

2011

# geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 2

## SLUTDEPOT FOR RISØS RADIOAKTIVE AFFALD

INDLEDNING/FORHISTORIE

AFFALDET

DEPOTDESIGN OG RISIKOVURDINGER

TRANSPORTSTUDIER

KORTLÆGNING OG LOKALISERING, GEOLOGI

ANDRE STEDER I VERDEN



## INDLEDNING/FORHISTORIE

**F**olketinget har besluttet, at det radioaktive affald fra Risø skal placeres i et slutdepot i Danmark. Affaldet omfatter materiale fra Risøs forsøgsperiode og de nedrevne reaktorer, fra forskning, industri og hospitaler. De væsentlige faktorer for et sådant slutdepot, bl.a. hvor det kan placeres, er blevet undersøgt i tre forstudier i de sidste par år.

Det første studie beskriver tre depotkoncepter set i forhold til fire forskellige typiske, men teoretiske geologiske situationer. Koncepterne omfatter et depot på terræn eller lige under terræn eller 30–100 m under terræn. Muligheden for at have et åbent, reversibelt depot er også blevet vurderet. Risikofaktorerne i forbindelse med et udslip fra et depot, både under normale forhold og ved en ulykke, er blevet analyseret.

Forstudiet om transport af det radioaktive affald analyserer den risiko, der er forbundet med transporten af affaldet fra Risø til et slutdepot i Danmark. Studiet

viser, at risikoen ikke begrænser valget af et slutdepots placering i Danmark.

Det tredje studie var en regional kortlægning af de geologiske forhold i Danmark, baseret på eksisterende informationer i arkiver, databaser og litteratur. Målet var at finde ca. 20 områder, som kunne være depotlokaliteter. Kortlægningen udpegede 22 egnede områder ud fra geologiske og hydrogeologiske kriterier.

Af de 22 områder er der peget på 6 områder til det fortsatte arbejde. De 6 områder vurderes til at være lidt bedre egnede som slutdepot end de øvrige 16 områder, ud fra geologiske kriterier. Der skal foretages yderligere undersøgelser, som skal bringe de 6 områder ned til 1–3 områder, hvorpå der skal foretages feltstudier før den endelige lokalitet kan udpeges.

Forsøgsanlæg Risø blev oprettet sidst i 50'erne på Niels Bohrs initiativ og efter hans egen udvælgelse af lokaliteten ved Roskilde Fjord. Forsøgsanlægget har siden udgjort det danske

center for forskning i nuklear teknologi og først i 60'erne blev anlægget bl.a. udbygget med 3 forsøgsreaktorer og et hot-cell anlæg til undersøgelse af stærkt radioaktive emner, som fx brugt nukleart brændsel efter drift i en reaktor.

Forsøgsanlægget omfattede også faciliteter til håndtering af det radioaktive affald, som driften af forsøgsreaktorerne gav anledning til, fx inddampning af flydende radioaktivt affald og opbevaring af affaldet under sikre forhold. Efter aftale med Sundhedsstyrelsen (Statens Institut for Strålebeskyttelse, SIS), der gennem alle årene har fungeret som landets strålebeskyttelsesmyndighed, forpligtigede Risø sig endvidere til også at modtage og håndtere radioaktivt affald fra brugen af radioaktive stoffer på danske sygehuse, industrivirksomheder og forskningsinstitutioner. Alt danskgeneret radioaktivt affald er således gennem årene blevet samlet på Risø under sikkerhedsmæssigt forsvarlige forhold.

Efter Folketingets beslutning i 1985 om, at atomkraft ikke skulle indgå i den danske energiforsyning, blev Risøs forskningsprofil tilpas-



Køer på strandengen ved RISØ.

## DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND (GEUS)

**PETER GRAVESEN**

.....  
Chefkonsulent, pg@geus.dk

**MERETE BINDERUP**

.....  
Seniorforsker, mb@geus.dk

**BERTEL NILSSON**

.....  
Seniorforsker, bn@geus.dk

**STIG A. SCHACK PEDERSEN**

.....  
Seniorforsker, sasp@geus.dk

## DANSK DEKOMMISSIONERING (DD)

**HEIDI SJØLIN THOMSEN**

.....  
Projektleder, hst@dekom.dk

**ANNE SØRENSEN**

.....  
Sektionschef, anne.soerensen@dekom.dk

**OLE KASTBERG NIELSEN**

.....  
Direktør, okn@dekom.dk

## SUNDHEDSSTYRELSEN, STATENS INSTITUT FOR STRÅLEBESKYTTELSE (SIS)

**HARALDUR HANNESSON**

.....  
Civilingeniør, hah@sis.dk

**KRESTEN BREDDAM**

.....  
Chefkonsulent, krb@sis.dk

**KAARE ULBAK**

.....  
Chefkonsulent, ku@sis.dk

set, men den indebar stadig brug af specielt forsøgsreaktor DR 3 til avancerede materialeundersøgelser og -forskning og til bestråling af silicium for den hastigt stigende globale halvlederproduktion.

I 2000 måtte DR 3 lukkes ned på grund af problemer med en utæthed i reaktortanken, og Risøs bestyrelse besluttede efterfølgende, at den ikke skulle repareres og genstartes for den forventede relativt korte driftsperiode før den planlagte endelige nedlukning. Efter flere undersøgelser og overvejelser om den fremtidige status og brug af de nukleare anlæg på Risø kunne Videnskabsministeriet i 2003 forelægge Folketinget beslutningsforslag B 48, der blev vedtaget med tilslutning af alle de politiske partier.

Beslutningsforslaget havde følgende ordlyd: *Folketinget meddeler sit samtykke til, at regeringen fremmer afviklingen (dekommissioneringen) af de nukleare anlæg på Forskningscenter Risø hurtigst muligt i regi af den selvstændige virksomhed Dansk Dekommissionering, sådan at arealerne af de nukleare tilsynsmyndigheder kan frigives til ubegrænset brug inden for en tidshorison på op til 20 år.*

*Folketinget meddeler sit samtykke til, at regeringen samtidig med afviklingen (dekommissioneringen) påbegynder udarbejdelsen af et beslutningsgrundlag for et dansk slutdepot for lav- og mellemaktivt affald.*


Da første fase i udarbejdelsen af et beslutningsgrundlag bestod i at fastlægge de overordnede rammer og strålebeskyttelsesprincipper for et dansk slutdepot, blev der nedsat en tværministeriel arbejdsgruppe med formandskabet i Indenrigs- og Sundhedsministeriet og med deltagelse fra Videnskabsministeriet, Dansk Dekommissionering (DD), De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), SIS, Beredskabsstyrelsen, Miljø-

ministeriet og Miljøstyrelsen. Arbejdsgruppen udarbejdede et beslutningsgrundlag, der dannede baggrund for en redegørelse, der blev fremlagt af Indenrigs- og sundhedsministeren i Folketinget i 2009.

Redegørelsen fastlagde de overordnede rammer og principper for et dansk slutdepot og pegede på gennemførelse af tre forstudier i den næste fase med henblik på at udpege en række områder i Danmark, der muligvis ville kunne benyttes til at etablere et dansk slutdepot. Disse områder skulle dernæst undersøges og udredes nærmere.

### DE TRE FORSTUDIER OMFATTEDE:

- *Et for depotkoncepter, hvor forholdene omkring depotkoncepterne studeres nærmere. Formålet er at fremskaffe det nødvendige beslutningsgrundlag til valg af hvilke koncepter, der skal arbejdes videre med i processen omkring etablering af et slutdepot.*
- *Et om transport af det radioaktive affald.*
- *Et om regional kortlægning, hvor regionale forhold, der har betydning for placeringen af et slutdepot studeres. Formålet er at tilvejebringe materiale om regionale forhold, der kan anvendes til at karakterisere områder som egnede eller uegnede til lokalisering af et slutdepot. Det er således første skridt i en lokaliseringsproces, der skal sikre, at efterfølgende arbejde fokuseres i relevante områder.*

De tre forstudier blev gennemført af henholdsvis DD, SIS og GEUS med afslutning i foråret 2011. Resultaterne af forstudierne blev præsenteret for Folketingets politiske partier i Indenrigs- og Sundhedsministeriet den 4. maj 2011 og offentliggjort umiddelbart herefter. Dette nummer af Geoviden beskriver gennemførelsen og resultaterne af de tre forstudier. Ønsker man at orientere sig i det samlede materiale, kan det findes på Indenrigs- og Sundhedsministeriets hjemmeside. 

## AFFALDET

Det danske slutdepot kommer til at rumme 5–10.000 m<sup>3</sup> affald. Affaldet er lav- og mellemaktivt. Det meste af affaldet er kortlivet, det vil sige at de radioaktive isotoper i affaldet har en halveringstid (T<sub>1/2</sub>) på max. 30 år, mens en mindre del er langlivet (T<sub>1/2</sub> > 30 år). Halveringstiden er den tid det tager, at mængden af et radioaktivt stof formindskes til halvdelen af det oprindelige. Halveringstiden er forskellig for forskellige radioaktive stoffer og kan være fra brøkdelene af et sekund til hundredtusinder af år.

Dansk Dekommissionering er endestation for alt dansk radioaktivt affald. Affaldet stammer derfor dels fra den nukleare forskning på Risø, dels fra andre danske brugere af radioaktive stoffer, fx hospitalsvæsenet, industrien og forskningsinstitutioner.

Affaldet kan typisk være driftsaffald så som brugte handsker, arbejdstøj, kanyler og røgmeldere (røgalarmere). Det kan også være radioaktive kilder, som man fx bruger til behandling i hospitalsvæsenet og som værktøj i industrien. Det kan være kasseret, radioaktivt forurenet udstyr, eller det kan være dekommissioneringsaffald, som typisk består af rørdelene, betonbrokker og andre dele af de nukleare anlæg på Risø-området, som nu er un-

der afvikling (se figurer s. 4, 6 og 7). Endelig kan det være såkaldt særligt affald, som hovedsageligt består af stykker af bestrålet brændsel, som har været brugt til forsøg på Risø's Hot Cell anlæg. Fælles for affaldet er, at det enten er blevet forurenet på overfladerne med radioaktive isotoper, eller at det er blevet aktiveret ved bestråling med neutroner.

Det særlige affald (233 kg) udgør en lille del af affaldet, men det indeholder en relativt stor andel af langlivede isotoper, hvis tilstedeværelse kan være bestemmende for, hvordan slutdepotet udformes. Derfor undersøges det, om det er muligt at finde en international løsning for deponering af dette affald.

I Dansk Dekommissionerings varetægt befinder sig desuden en del affald, som bliver betegnet som potentielt affald, fordi det ikke er afgjort om affaldet skal slutdeponeres. Det drejer sig om ca. 600 m<sup>3</sup> tailings (restprodukter) fra uranudvindingsforsøg, som i 1970'erne og -80'erne blev udført på Risø-området, og 3670 ton resterende lav-aktivt uranmalm, som aldrig blev anvendt. Under tailingsmaterialet befinder sig ca. 500 m<sup>3</sup> beton, som er forurenet af tailingsmaterialet, og som i givet fald også vil skulle slutdeponeres. Uranmalmen og

tailingsmaterialet stammer fra minen i Kvane-fjeld i Grønland.

Det brugte brændsel fra DR2 og DR3 reaktorerne er returneret til USA i 2002 efter en aftale, som kom i stand allerede da brændslet blev indkøbt.

Dansk Dekommissionering modtager både fast og flydende affald. Da der ikke må lagres flydende affald hverken på mellemlager eller i det kommende slutdepot, skal affaldet solidificeres, dvs. ændres til en fast masse, før lagring. Det gøres ved at inddampe væskerne før inddampningsresten indkapsles i bitumen og lagres i tromler. Det faste driftsaffald presses i tromler før det lagres.

Det radioaktive affald indeholder ud over de radioaktive stoffer også en mængde tungmetaller og andre stoffer, som under ét kan beskrives som kemisk affald. Dette omfatter 2 tons ubestrålet uran, 50–70 tons bly, omkring 200 kg cadmium og 80 kg beryllium samt 40–50 tons oliebaseeret bitumen. Dette affald behandles på lige fod med de radioaktive stoffer i de sikkerhedsanalyser, som skal beskrive depotets potentielle påvirkning af omgivelserne.



Ophugning af betongulv i DR2 reaktoren.

# DEPOTDESIGN OG RISIKOVURDNINGER

For at fremskaffe det nødvendige beslutningsgrundlag til valg af hvilke depotkoncepter, der skal arbejdes videre med i processen mod etablering af et slutdepot, har Dansk Dekommissionering udført forstudier, som omfattede sikkerhedsanalyser af forskellige kombinationer af depotdesign og geologi. Studierne indeholdt desuden et økonomisk overslag over, hvad den samlede proces, indtil depotet står færdigt, vil koste. Derudover blev mulighederne for at gøre depotet reversibelt undersøgt. Med et reversibelt depot menes, at det er muligt at hente alt eller dele af affaldet ud af depotet igen. Dette kunne man overveje, fx hvis ny teknologi en dag gør det muligt at genanvende dele af affaldet, eller hvis det på et tidspunkt viser sig, at depotet er placeret uhensigtsmæssigt.

Et slutdepot kan betragtes som en række barrierer, menneskeskabte og naturlige, som skal adskille det radioaktive affald fra mennesker og miljø. Depotets levetid bestemmes af, hvad der skal opbevares i det. I dette tilfælde skal affaldet indeholde lav- og mellemaktivt affald, hvoraf en mindre del indeholder langlivede isotoper. Det er derfor på forhånd bestemt at depotet skal have en levetid på mindst 300 år. Dette svarer til 10 halveringstider af de kortlivede isotoper. Efter 300 år er der således mindre end 0,1 % tilbage af den oprindelige, kortlivede aktivitet. Den resterende aktivitet vil derfor hovedsagelig være fra de langlivede isotoper.

Tre forskellige depotkoncepter blev studeret, se figuren ovenfor.

- Et overfladenært depot placeret mellem 0 og 30 m under terræn
- Et overfladenært depot som ovenfor, kombineret med et borehulsdepot til det særlige affald
- Et mellemdybt depot placeret mellem 30 og 100 m under terræn

Et overfladenært depot kan være placeret over grundvandsniveau i umættet zone eller under grundvandsniveau i mættet zone. Hvis et depot er designet til umættet zone, bør det forblive tørt efter lukning, mens et depot, der er designet til mættet zone, gerne må blive vådt.

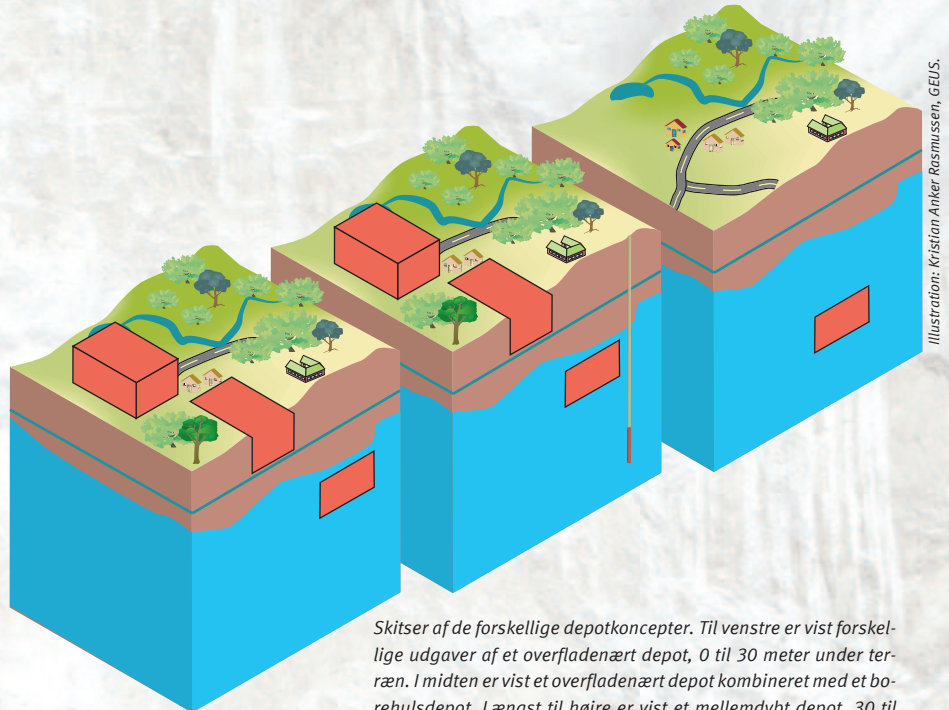


Illustration: Kristian Anker Rasmussen, GEUS.

Skitser af de forskellige depotkoncepter. Til venstre er vist forskellige udgaver af et overfladenært depot, 0 til 30 meter under terræn. I midten er vist et overfladenært depot kombineret med et borehulsdepot. Længst til højre er vist et mellemdybt depot, 30 til 100 meter under terræn. Blå linje illustrerer grundvandspejlet. Blå farve symboliserer tæt homogent ler.

I forstudierne blev tre depotkoncepter kombineret med fire forskellige type-geologier, som er udvalgt, fordi de er relativt lav-permeable og fordi de er repræsentative for Danmarks geologi. De fire udvalgte type-geologier, som er brugt i de foreløbige sikkerhedsanalyser, repræsenterer således ikke virkelige geologiske scenarier, men er konstruerede således at sikkerhedsanalyserne, sammen med andre forhold kan være baggrund for valg af lokalitet til depotet.

De valgte type-geologier er:

- Moræneler, smeltevandsler og marine, kvartære lag
- Fedt, plastisk tertiært ler
- Kalk
- Klippe (grundfjeld)

## DEPOTKONCEPTER

Under forstudierne er en række mulige depotkoncepter blevet undersøgt. Konstruktionen af depotet vil bl.a. afhænge af den dybde, depotet placeres i. For alle depottyper gælder det, at de vil være overdækkede, mens de er under

fyldning, og i en periode efter fyldning med affaldet fra Risø, hvis de skal være åbne for modtagelse af yderligere affald. Under alle omstændigheder vil der indgå overvejelser om lokale forhold, sikkerhed, økonomi og mulighed for reversibilitet ved valg af depotdesign.

## OVERFLADENÆRT DEPOT

Et depot placeret på overfladen vil være placeret over grundvandspejlet og skal derfor konstrueres som et tørt depot. Det kan fx. være udformet som en bund af armeret beton, placeret på en HDPE-membran (højkvalitets "plastik"-membran), som ligger over en ler-membran. Affaldet placeres oven på betonbunden. Efter placering af affaldet dækkes depotet med endnu en HDPE-membran, som herefter dækkes med et 1 meter tykt jordlag, fx et lerholdigt materiale. Herefter kan depotet sås til med græs og vil derefter fremstå som en græshøj i landskabet.

Et overfladenært depot kan også placeres under overfladen, men over grundvandspejlet. Ned til en dybde på omkring 10 meter kan en kasseformet betonkonstruktion kombineret



Pakning af driftsaffald i handskeboks.

med en tæt membran være en hensigtsmæssig løsning. Depotet kan fx placeres i en naturlig eller kunstig bakke for at opnå bedre mulighed for dræning. Depotet kan efter fyldning dækkes med en selvbærende betonkonstruktion med top-membran, der samles med den ydre membran. Herefter fyldes op til terrænniveau med fx grus. Endelig kan depotet placeres under grundvandsspejlet.

## MELLEMDYBT DEPOT

Den optimale udformning af depoter på større dybder end 10 meter er baseret på en cylindrisk ydre væg. Depotet kan etableres som en cylinderformet skakt med ruminddelinger, eller som en skakt ned til et niveau med horisontale rum - en kaverne. Ingen af depoterne behøver at være synlige på overfladen efter lukning.

Et cylinderformet depot kan konstrueres med forskellig højde og bredde tilpasset de lokale geologiske forhold. Depotet kan konstrueres med bærende horisontale skillerum, som sikrer at affaldet i depotet ikke presses sammen af sin egen vægt, hvilket betyder, at man har muligheden for at kunne tage dele af affaldet ud igen (reversibelt depot). Depotet kan også konstrueres uden hensyn til, hvorvidt affaldet presses sammen under vægten fra det ovenliggende affald. Et sådant depot vil være irreversibelt, dvs. at man ikke umiddelbart vil kunne hente specifikke dele af affaldet ud igen. Et cylinderformet depot vil kunne konstrueres, så det kan betjenes / fyldes oppefra

ved hjælp af en kran eller så det skal betjenes indefra fx ved hjælp af en elevator og truck-udstyr.

Et depot udformet som en kaverne vil være reversibelt, men vil kræve tungt transport-udstyr. Forskelligt affald vil kunne placeres i forskellige rum.

## SIKKERHEDSANALYSER OG RISIKOVURDERINGER

Der udføres sikkerhedsanalyser af de forskellige kombinationer af depotkoncept og geologi for at vurdere om den enkelte kombination kan resultere i et sikkerhedsmæssigt acceptabelt depot. Man vurderer dels et normalscenario, som beskriver den forventelige udvikling af depotet med tiden, dels andre hændelser (uheld), som ikke nødvendigvis vil opstå, men hvis forekomst er behæftet med en vis sandsynlighed.

Det er uundgåeligt at vand med tiden vil trænge ind i depotet. Som normalscenario modelleres derfor vandindtrængning i depotet, nedbrydning af beholderne, opløsning af de radioaktive isotoper i vandet, og vandets transport gennem de menneskeskabte barrierer (beholderne, depotkonstruktionen og fyldmateriale i beholdere og depot) og de naturlige barrierer (den omgivende geologi). Herefter modelleres optaget af de radioaktive stoffer i mennesker. Dette gøres ved at definere en referenceperson, typisk en nabo til depotet, som drikker vand fra lokale drikkevandsboringer, spiser en vis del af de lokale afgrøder, kød og

mejeriprodukter og som opholder sig udendørs i området ca. 20 % af tiden og indendørs i sin bolig resten af tiden.

Uheldshændelser vurderes ud fra sandsynligheden for at de vil opstå og muligheden for at forhindre dem. Eksempler på uheldshændelser er: Håndteringsuheld (fx 'en beholder tabes under fyldning af depotet'), meteoritnedslag, flystyrt eller mennesker, der trænger ind i depotet i forbindelse med fx boringer eller udgravninger.

På basis af resultaterne af modelleringerne af normalsceneriet beregnes den radioaktive dosis, som ovenstående referenceperson vil modtage fra depotet i hele depotets levetid. I forbindelse med uheldsscenerierne beregnes en sandsynlighed for at referencepersonen modtager en dosis over dosisgrænsen, se boks nedenfor.

### DOSISGRÆNSERNE ER:

Mens depotet er under fyldning: 0,1 mSv/år  
Efter lukning af depotet: 0,01 mSv/år  
Som følge af uheld: 1 mSv/år.

Til sammenligning kan nævnes, at gennemsnitsdanskere modtager 3 mSv/år fra naturlige kilder (undergrund og kosmisk stråling) og 1 mSv/år fra medicinsk behandling.  
mSv: se boks side 9.



Projektleder Heidi Sjølin Thomsen fortæller om nogle af de typer af radioaktivt affald, der forefindes på Risø. I tromlerne er der røgmeldere (røgalarmer) og i den røde container bagved er der radioaktivt forurenet metalskrot.

## RESULTATER

Resultaterne af forstudierne til slutdepotet viser, at det er muligt at bygge et depot, som vil overholde de fastsatte dosisgrænser, hvis de givne anbefalinger overholdes. Anbefalingerne omfatter placering af depotet, pakning af affaldet, depotkonstruktion og forhold, der knytter sig til depotets åbne periode indtil den endelige lukning.

Eksempler på anbefalinger er:

- Affaldsbeholderne bør efterfyldes med fyldmateriale, så hulrum i videst muligt omfang undgås
- Depotet bør ligeledes efterfyldes med fyldmateriale efter placering af beholderne
- Selv om depotet under alle omstændigheder bliver vådt med tiden, bør det konstrueres så vandtæt som muligt for at forsinke mulig udsivning af radioaktive og giftige materialer
- Hvis man vælger et depot placeret på overfladen, bør dele af det langlivede materiale placeres andetsteds, fx i et borehul
- Hvis man vælger et depot på overfladen, bør det placeres i moræneler, da udsivning kan føre til utilsigtet overfladeafstrømning, hvis depotet placeres på mere tætte bjergarter
- Et mellemdybt depot bør placeres i ler, kalk eller klippe. Lokale sprækker i kalk eller klippe kan dog gøre disse bjergarter mindre egnede til depotet
- Depotet bør ikke placeres i et OSD-område (Område med Særlige Drikkevandsinteresser); det skal beskyttes mod pludselige oversvømmelser og særligt skiftende oversvømmelser/tømninger, ligesom det i videst muligt omfang bør være forberedt for klimaforandringer
- Et reversibelt depot kan give modstridende interesser med hensyn til placering af affaldet i depotet og sikkerhed.



## TRANSPORTSTUDIER

### TRANSPORTFORM OG REGLER

Transport af det danske radioaktive affald skal ske i overensstemmelse med danske bestemmelser og internationale retningslinjer, der alle er baseret på retningslinjer fra det Internationale Atomenergiagentur (IAEA).

En modellering forudsætter således, at det radioaktive indhold transporteres i beholdere, der opfylder IAEA's retningslinjer vedr. mængden af radioaktive materialer i beholderne og på køretøjerne samt beholderens ydeevne og deres vedligeholdelse.

I princippet kan det radioaktive affald transporteres med bil, tog, skib eller fly eller i en kombination. Baseret på en indledende vurdering af sikkerheden, praktiske forhold og økonomi for hver transportform er jernbane- og lufttransport blevet forkastet. Studiet koncentrerer sig således om modellering af vej- og søtransport.

### MODELLERING

Der er opstillet konceptuelle modeller for vej- og søtransport, og disse er indarbejdet i det amerikanske modelværktøj RADTRAN.

Modellerne anvendes til at vurdere stråledoserne i forbindelse med transport, både hvor der ikke sker et uheld og i ulykkesituationer. For at kunne gøre dette anvender modellen et omfattende sæt af inputparametre for affaldet, beholdere, køretøj, rute m.m. Desuden ses på ulykkescenarier med forskellige beholder typer.

For den overordnede sandsynlighed for en transportulykke er der benyttet analyser af trafikken i Danmark, mens analyser af de særlige forhold, der gør sig gældende for ulykker med radioaktivt materiale stammer fra lande, der har udviklet detaljerede modeller for sådanne ulykker. Endelig antages det, at det frigjorte radioaktive materiale i en ulykkesituation spredes med vinden, og at dette forårsager en forurening af et område langs vindretningen.

Beregningerne er i vid udstrækning gennemført med modellerens mindst gunstige randbetingelser. Resultaterne angiver således de højeste, potentielle stråledoser et scenarie med rimelighed kan frembringe. Eksempelvis er transportafstanden modelleret som den størst mulige fra det nuværende opbevaringssted. Derudover forudsættes det, at den mest kritiske affaldstype læses i størst mulig mængde på ét køretøj. For at opnå realistiske scenarier har man dog valgt at bruge inputparametre for gennemsnitlig hastighed, trafik-tæthed og befolkningstæthed, baseret på de seneste danske observationer. Alt taget i betragtning er modellerne en forsimplet, men forsigtig beskrivelse af virkeligheden, der giver et godt grundlag for en vurdering af en mulig transportform.

*Lastbiler forberedt til transport af radioaktivt affald.*





## ANVENDETE BEGREBER

### Individuel dosis:

Stråledosis en person modtager, udtrykt i mSv.

### mSv (millisievert):

Enhed for stråledosis (effektiv dosis) (1 mSv = 100 millirem).

### Kollektiv dosis:

Summen af de individuelle doser som alle personer i en defineret gruppe modtager, udtrykt i person-mSv.

### Person-mSv:

Enhed for kollektiv dosis

### Sandsynlighed på 1:20.000.000:

Én ud af 20 millioner (fx én alvorlig ulykke ud af 20 millioner gennemførte transporter).

## RESULTATER

Det vurderes, at den totale mængde affald skal transporteres i 6300 beholdere i lastbil med anhænger med i alt 250 individuelle transporter. Til sammenligning anslås det, at der årligt transporteres ca. 55.000 beholdere indeholdende radioaktive materialer på de danske veje. Den samlede kollektive stråledosis fra de 250 transporter, såfremt der ikke sker et uheld, er i størrelsesordenen 40 person-mSv. Chaufførerne modtager ca. halvdelen, mens personer på og langs ruten modtager den anden halvdel. Den samlede kollektive dosis fra de i alt 10 søtransporter af alt det radioaktive affald, herunder håndtering og efterfølgende transport ad vej fra havnen til slutdepotet, er i størrelsesordenen 20 person-mSv. Besætningen modtager ca. tre fjerdedele heraf, mens personer på og langs ruten modtager den sidste fjerdedel.

I begge tilfælde udgør de berørte personer på og langs ruten en større gruppe. Det betyder, at for hver enkelt transport, er den stråledosis, den enkelte person modtager lille, nemlig i størrelsesordenen 0,0001 mSv. Selvom modelleringen er udført konservativt, viser de beregnede stråledoser, at begge transportformer kan gennemføres langt inden for de danske dosisgrænser, der er på 20 mSv pr. år for arbejdstagere og 1 mSv pr. år for enkeltpersoner i befolkningen.

Den ulykkesituation, som modelleres til at medføre den højeste kollektive stråledosis, har en sandsynlighed på 1:20.000.000 for at forekomme for vejtransport og 1:33.000.000 for søtransport. Den beregnede kollektive stråledosis over 50 år fra sådanne ulykker er 9.500 person-mSv for vejtransport og 24.000 person-mSv for søtransport. I disse scenarier er antallet af berørte personer konservativt beregnet af standard spredningsmodellen til at

udgøre 1,4 millioner, da der er anvendt en forstads-befolknings-tæthed i hele det berørte område. Den kollektive stråledosis er mindre end 1 promille af den kollektive dosis (ca. 1 millioner person-mSv), den samme gruppe af personer får fra baggrundsstrålingen i den samme tidsperiode (de interne stråledoser fra naturligt forekommende radon ikke medregnet).

De højeste individuelle doser, der er beregnet for en ulykkesituation, er i størrelsesordenen 1 mSv for vejtransport og 10 mSv for søtransport, forudsat at de pågældende personer opholder sig i 24 timer inden for de nærmeste 30 meter fra ulykkestedet. Disse stråledoser er 1 til 10 gange den gennemsnitlige dosis, en person får årligt fra baggrunds-

strålingen i Danmark (radon ikke medregnet).

Risiciene forbundet med de modellerede ulykkes-scenarier er derfor vurderet til at være små, og dermed acceptable.

## KONKLUSIONER

De stråledoser, der er beregnet for transport af det danske radioaktive affald fra Risø til et fremtidigt slutdepot i Danmark, viser at risikoen forbundet med vej- og søtransport ikke begrænser den kommende udvælgelse af en placering af depotet i Danmark. Fra et sikkerhedsmæssigt perspektiv synes både bil og skib at være mulige transportformer.



Tromler med radioaktivt affald på det foreløbige depot på Risø.

# KORTLÆGNING OG LOKALISERING, GEOLOGI

## KORTLÆGNINGSOPGAVEN

Lav- og mellemaktivt affald fra Risø, dvs. reaktorbygningen og forskellige typer affald fra forskningsperioderne samt radioaktivt affald fra hospitaler, industri, forskningsinstitutioner og universiteter skal opbevares i et endeligt depot, et slutdepot, i mindst 300 år.

En arbejdsgruppe under Indenrigs- og Sundhedsministeriet udarbejdede i 2007 et Beslutningsgrundlag, som beskriver rammerne for opgaven med at lokalisere og finde aflejringer eller bjergarter med lav permeabilitet (vandledningsevne), som kan isolere det radioaktive affald fra omgivende aflejringer, grundvandsressourcer, recipienter (fx åer og vandløb) og fra menneskelig aktivitet.

Aflejringer eller bjergarter skal også fungere som beskyttelse, hvis radioaktivt affald siver ud fra depotet til omgivelserne. Dette kan opnås, hvis der er lav grundvandstrømning og høj evne til at tilbageholde radioaktivt materiale i aflejringerne eller bjergarterne.

Forstudiernes regionale kortlægning skulle ende op med en udpegning af ca. 20 potentielle områder, der skal danne udgangspunkt for at finde 1–3 mulige lokaliteter.



Krystallin Paradisbakke Migmatit/Gnejs fra Prækambrium. Præstebo Bruddet, Bornholm.



Balka Sandsten med bølgeribber fra Kambrium. Strøby Sandstensbrud, Bornholm.

## BAGGRUND

I Danmark findes der mange forskellige typer finkornede aflejringer og krystalline bjergarter fra jordoverfladen og ned til 100 meters dybde. Der findes derfor en lang række geologiske situationer, der inkluderer disse aflejringer eller bjergarter af forskellig sammensætning og alder, og de er tillige fordelt geografisk ud over landet:

1. Krystalline granitter og gnejser
2. Sandsten og skifre
3. Skrivekridt og kalksten
4. Tertiære finkornede og ofte plastiske lerarter
5. Kvartære leraflejringer af glacial, interglacial og sen-glacial oprindelse.

Sand- og grusaflejringer indgår ikke i denne undersøgelse på grund af deres høje permea-



Parti med kalkaflejringer i Stevns Klint. Nederst ses hvid og hvidgrå skrivekridt med flintlag fra Øvre Kridt. Ved overhænget findes Kridt-Tertiær-grænsen markeret ved det tynde sorte Fiskeler. Herover følger forskellige hvidlige og gullige Danien kalktyper, især bryozokalk der danner store banker markeret af flintlag.

bilitet og dermed ringe beskyttelsesevne, og fordi de hyppigt anvendes som grundvandsmagasiner. Sandaflejringer er ofte indlejret eller omgiver de lav-permeable aflejringer, og de vil derfor blive inddraget i analyser i den endelige områdebeskrivelse, hvis det er relevant.

Beslutningsgrundlaget fra 2007 anbefaler hvilke typer af eksisterende data og informationer, som skal inddrages, for at der kan foretages en foreløbig udvælgelse af depotområder. Anbefalingerne bygger på retningslinjer fra Det Internationale Atomenergiagentur.

Forstudierne er foretaget på grundlag af data, der allerede findes i databaser, kort, rapporter, publikationer og geologiske modeller. Dette betyder, at de potentielle områder er beskrevet på et uens data- og vidensgrundlag. De øverste geologiske aflejringer i Danmark

(ned til ca. 300 meters dybde) har en meget heterogen karakter hvad angår sammensætning og strukturer bl.a. fordi istidernes gletsjere, når de bevægede sig hen over landet, har skubbet og omformet ældre lag.

## DE CA. 20 OMRÅDER KRITERIER

De geologiske og hydrogeologiske kriterier har sammen med terræforhold været centrale for udvælgelsen af områderne. Da der ved forstudiernes start ikke var taget stilling til depottype og reversibilitet (se side 5) har det været nødvendigt at finde områder, som kunne anvendes uanset hvilken depottype der vælges.

Følgende udvælgelseskriterier blev valgt som centrale:

- Aflejringerne fra jordoverfladen og ned til så

stor dybde som mulig skulle være homogene og lav-permeable. Dette betyder, at høj-permeable aflejringer som sand- og gruslag helst skal undgås.

- Aflejringerne skulle kunne omslutte depotet, hvilket bedst sker ved tilstedeværelse af tykke, udbredte lav-permeable lag, hvorfor stor tykkelse og stor horisontal udbredelse inden for områderne er tilstræbt.

Ud fra disse to kriterier er der på de undersøgte arealer søgt efter lav-permeable aflejringer fra jordoverflade og nedad, hvilket har medført, at moræneler er øverste aflejring i stort set alle områder. Det er accepteret, at der kan forekomme meget begrænsede indslag af smeltevandssand og -grus. I hvert område er det blevet vurderet om de kvartære aflejringer er glacialtektonisk forstyrrede, fordi forholde-



*Brungrå moræneler fra Risø. Leret er aflejret fra en gletsjer under Weichsel-istiden og består af en usorteret blanding af ler, silt, sand, grus og sten.*



*Gråt smeltevandsler fra Elster-istiden. Leret er lagdelt og består af vekslende lag af fedt ler og lag af siltet ler. Leret er aflejret i en stor smeltevandssø under smeltningen af gletsjeren ved slutningen af Elster-istid. Karby Klint, Mors.*



*Meget fedt plastisk ler tilhørende Lillebælt Ler Formationen fra Eocæn. Leret er aflejret i havet under rolige strøm- og bølgeforhold. Albæk Hoved Klinten, Juelsminde.*

ne i områderne forringes, hvis der forekommer større sprækker m.v. Det er ligeledes vurderet, om de underliggende aflejringer/bjergarter også er glacialtektonisk forstyrrede og omlejrede.

De underliggende palæogene leraflejringer, kvartære leraflejringer, grundfjeldsbjergarter og kalklag er vurderet ud fra så stor vertikal tykkelse og sammenhængende horisontal udbredelse som mulig. Denne vurdering er baseret på viden om litostratigrafi (beskrivelse og inddeling af bjergarterne ud fra deres indbyrdes indhold af fx sand, ler eller kalk) og aflejringsmiljø og er især foretaget på grundlag af data fra borer. Strukturforhold er vurderet ud fra viden om undergrundens strukturer.

Ved gennemgangen af de geologiske forhold i Danmark blev en række områder udeladt af undersøgelsen pga. andre centrale forhold/ kriterier:

- Områder med Særlige Drikkevandsinteresser (OSD) er der set helt bort fra. Områder



*Mørkebrunt fedt glimmerler fra Vejle Fjord Formationen, Oligocæn–Miocæn. Sønder Thise Klint, Thise.*

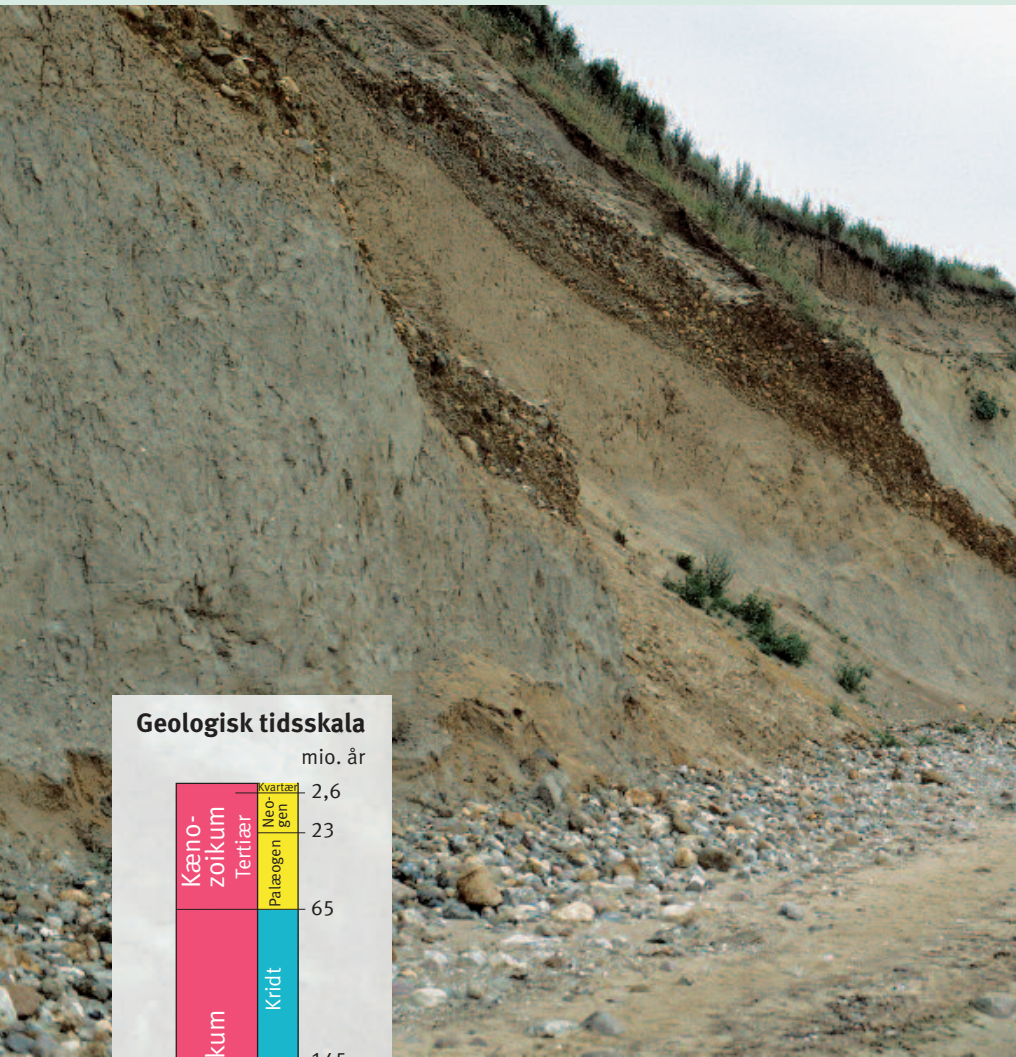
med Drikkevandsinteresser (OD), som dækker et meget stort areal i Danmark, har det ikke været muligt helt at undgå. Ideelt set burde de udvalgte områder ligge inden for den tredje drikkevandskategori (IDI), der kun rummer begrænsede eller Ingen Drikkevandsinteresser, men det er ikke muligt. De

tre typer drikkevandsområder er udpeget af de tidligere amter og nuværende miljøcentre.

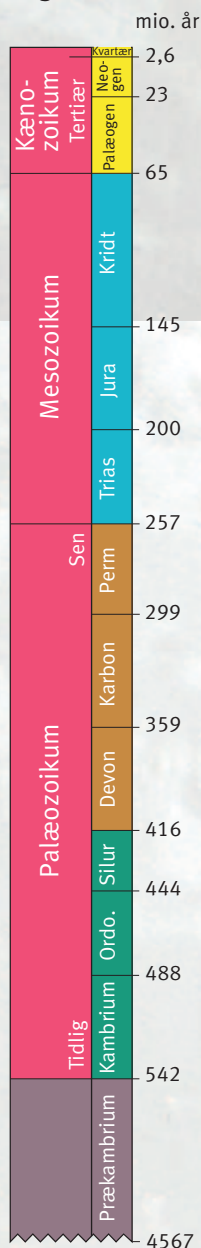
- Områder med grundvandsforekomster (GWB) af god status er udeladt, bortset fra hvis de har en helt lokal udbredelse. Grundvandsforekomster af overfladenær, regional

Skråstillede op til 20 m tykke flager af brungråt moræneler og rustrødt smeltevandssand, grus og stenlag, som er presset op af en gletsjer fra nordøst under Weichsel-istiden. Klinten ved Halk Hoved.

Foto: Peter Roll Jakobsen, GEUS.



## Geologisk tidsskala



og dyb udbredelse er udpeget af Miljøministeriet. De enkelte grundvandsforekomsters status er vurderet gode eller dårlige med hensyn til kvalitet og kvantitet samt i en samlet vurdering.

- NATURA2000-naturbeskyttelsesområder er fravalgt, ligesom der er taget hensyn til fredninger af fortidsminder. NATURA2000-områder er udpeget af Miljøministeriet og indmeldt til EU. Specifikationer på NATURA 2000-områderne er fastsat af EU. Der må hverken etableres et depot inden for eller uden for et NATURA2000-område, hvis depotet påvirker NATURA2000-området via grundvand, overfladevand eller luft.
- Byområder i form af de fire største danske byer og deres nærliggende oplande er ikke inddraget. Byer og bymæssig bebyggelse er områder med stor befolkningskoncentration, som kan påvirkes af udslip fra et depot. I følge både internationale og danske retningslinjer for et slutdepot for radioaktivt affald bør disse områder undgås, da risici fra depotet må være acceptabel for den nuværende og fremtidige befolkning.

Opskudt flage af smeltevandsler, som viser en markant opsprækning parallelt med forkastningsplanerne. Lønstrup Klint.

Fremtidige klimaændringer kan have betydning ved udvælgelse af den endelige lokalitet. De nuværende prognoser fra det Internationale Klima Panel (IPCC) vedrørende mulige ændringer rækker ca. 100 år frem. Affaldsdepotet skal fungere mindst 300 år frem i tiden, men ud over de 100 år findes kun meget usikre fremskrivninger af mulige klimaændringer. Forudsigelserne af fremtidige havniveauændringer peger på stigninger på mellem 0,5 og 1,0 meter ved danske kyster de næste 100 år, men mulige større havstigninger er blevet forudsagt, hvis klimaændringerne som følge af menneskelig aktivitet ikke bremses.

## METODER

Fremgangsmåden for kortlægningen har været følgende:

- De geologiske forhold i Danmark er gennemgået ved hjælp af de eksisterende datasamlinger og informationer. På denne måde blev det bestemt, hvilke aflejringer og bjergarter, der skulle indgå i det videre arbejde,

nemlig kvartært ler, tertiært ler, grundfjeld og kalk.

- Det næste skridt var at identificere og udelade arealer (OSD-, NATURA2000-områder og de 4 største byer). Udelukkelsen af OSD-områderne betød, at store dele af fx Sjælland og Fyn blev fravalgt. Der er ikke foretaget en gennemgang af de geologiske forhold inden for disse arealer, og arealerne er ikke behandlet videre. Ved de fire store byer: København, Århus, Odense og Ålborg er der ikke set på de geologiske forhold i 'byområderne'.
- De geologiske forhold blev derefter gennemgået og analyseret, baseret på eksisterende information inden for de resterende arealer. Det vigtigste var at identificere lav-permeable aflejringer/lag fra jordoverfladen til så stor dybde, som mulig og med stor horisontal udbredelse. En række arealer er således fravalgt. Det gælder fx det meste af Syd- og Midtjylland, hvor aflejningsforholdene ikke opfylder de opstillede kriterier med lav-permeable aflejringer.
- Gennemgangen resulterede i ca. 50 arealer, som blev undersøgt nærmere, og efterfølgende reduceret til en udpegning af 22 mindre områder, som vurderes at være egnede til at gå videre med i den fortsatte udpegningsproces.

## RESULTATER:

### UDPEGNING AF DE 22 OMRÅDER

Da de geologiske forhold i Danmark som udgangspunkt er heterogene, er det ikke muligt at opfylde alle de opstillede kriterier inden for ét område. Der er derfor foretaget en vægtning af kriteriernes betydning i de enkelte områder. De 22 områder vurderes på det nuværende grundlag i udstrakt grad at opfylde kriterierne. Hvert område er udvalgt i en størrelse, som er væsentlig større end det areal, som skal bruges til den endelige lokalitet. De 22 udpegede områder er mellem 5 og 15 km<sup>2</sup> store.

Dette betyder, at der kan tages hensyn til andre former for begrænsninger, når den endelige lokalitet skal fastlægges. Dette vil bl.a. ske i de kommende 'omegnssudier', der skal belyse infrastruktur, arealplanlægning for fremtiden med videre.

Det fremgår af kortet, at der nogle steder optræder en 'koncentration' af mulige områder, mens der i store dele af landet ingen eller kun få lokaliteter er udpeget, som fx i Vest- og Sønderjylland, Vendsyssel og Sjælland. Det skyldes især de geologiske og hydrogeologiske kriterier, hvor højtliggende, tykke lerlag uden sandlag har haft første prioritet og områder med særlige grundvands-/drikkevandsinteresser er fravalgt.

Inden for de 22 områder er der tale om følgende bjergarter og/eller aflejringer af forskel-

lig geologisk alder, som alle er dækket af forskellige tykkelser af moræneler:

- 17 områder med finkornede, fede og meget fede plastiske lerarter fra Palæocæn, Eocæn og Oligocæn (alle tilhørende den geologiske periode Palæogen, der strakte sig fra 65 til 23 mio. år før nu).
- 2 områder med fedt ler og silt fra Elster, Saale, Eem og Weichsel (Kvartær).
- 2 områder med krystalline granitter og gnejser fra Prækambrium.
- 1 område med kalksten/kridt fra Danien/Kridt.

Det forventes, at områderne opfylder kriterierne om stor tykkelse og horisontal sammenhæng i hele de udpegede områders udstrækning. På grund af de ofte begrænsede datamængder er den geologiske tolkning grundlag for vurderingen. I de 17 områder med moræneler over tertiært ler er udgangspunktet, at de tertiære leraflejringer er dannet i havet på stor havdybde, hvorfor der kan forventes et tykt lerlegeme med horisontal udbredelse. Morænelerets udbredelse er vurderet ud fra geologiske overfladekort og borer.

I de to områder med kvartære leraflejringer, består det øverste lag af moræneler, men også andre steder i lagsøjlen er der indslag af moræneler. De tykke kvartære lerarter er dels dannet i en stor smeltevandssø syd for Limfjorden og dels i havet i Vendsyssel gennem de to sidste istider og den sidste mellemistid. Begge typer ler kan forventes at have stor horisontal udbredelse. På de to områder med grundfjeld på Bornholm er moræneleret tyndt, og de underliggende krystalline bjergarter forventes at være tykke og have stor horisontal udbredelse. Kalkaflejringerne er dannet i havet og har samlet stor tykkelse, ligesom de forventes at have stor horisontal udbredelse.

## ANBEFALINGER OM VIDERE ARBEJDE PÅ SEKS OMRÅDER

Alle 22 områder er kvalificeret ud fra en vurdering baseret på eksisterende data og viden, men mængden af data og viden er forskellig for de enkelte områder. Ud af de 22 områder er der udpeget seks områder, som det er anbefalet at gå videre med i næste fase. De seks områder er vurderet lidt bedre end de øvrige 16 (se figurer næste side), der alle har status som reserveområder, der inddrages, hvis de seks første ikke kan anvendes af andre årsager, der kan 'overskygge' de geologiske forhold. Dette kan primært skyldes resultater fra de kom-



Kort som viser beliggenheden af de 22 potentielle områder. Med blå er vist de 6 områder, som der arbejdes videre med.

Illustration: Eva Mølskens, GEUS.



Tre diagrammer som er anvendt til at udpege de 6 områder ud af de 22 områder. Diagrammet længst til venstre viser morænelerstykkelsen i forhold til glacialtektonik. Diagrammet i midten viser tykkelse af palæogent ler i forhold til strukturer i de palæogene aflejringer, mens diagrammet længst til højre viser drikkevandsområder (klassifikation) i forhold til grundvandsforekomster af god status.

mende omegnsstudier. Endelig kan resultater af detaljerede felt- og laboratoriestudier nødvendiggøre, at et område, som var vurderet egnet ud fra den eksisterende viden, må opgives på grund af uforudsete faglige årsager.

### KRITERIER

De geologiske egenskaber, der er lagt vægt på ved udpegningen af de seks mest potentielle områder, er følgende:

- Områderne har lav-permeable lerarter/krySTALLINE bjergarter fra terræn til stor dybde.
- I overfladen dominerer moræneler, men det dækkende morænelerslag er forholdsvis tyndt (mindre end 30 m) i det meste af området, hvorfor der hurtigt kan nås ned i de særligt lav-permeable lag. Dette matcher den ideelle situation for et mellemdybt depot (30–100 m), hvor det er hensigtsmæssigt at de mest lav-permeable lag omslutter depotet.
- Glacialtektonik skal have beskeden betydning (ned til 30 meters dybde), men det kan ofte være vanskeligt at vurdere disse forhold gennem et helt område. (Glacialtektonik: forstyrrelse af jordlagene pga. gletsjeroverskridelse, som fører til fx folder og forkastninger).
- Inden for de udpegede områder er der ingen eller begrænsede drikkevandsinteresser (IDI) eller nogen drikkevandsinteresser (OD). I to områder er der oprindelig vurderet OD-område (af de tidligere amter), men denne klassifikation bør revurderes, da der ikke findes vandindvinding eller væsentlige grundvandsmagasiner inden for områderne.
- Inden for områderne er der ingen væsentlige grundvandsforekomster med god status. Et

enkelt område er vurderet til at være god status af de statslige myndigheder, men der er grund til at revurdere denne klassifikation.

- Terrænet inden for områderne er for det meste plant og horisontalt, hvorfor landskabet betragtes som stabilt og uden risiko for eksempelvis skred.

### METODER

I figurerne ovenfor er de forskellige egenskaber fra de 22 områder holdt op mod hinanden. De grønne felter angiver de optimale egenskaber. Moræneler under 30 meters tykkelse kombineret med store tykkelser af underliggende palæogent ler, kvartært ler eller grundfjeld er en fordel ved begge typer depotkoncepter, da den hydrauliske ledningsevne i disse lag oftest er lavere end i moræneler.

En så beskeden glacialtektonisk deformation som mulig er også hensigtsmæssig, idet der ved forstyrrede lag er større risiko for, at fx sand og grus optræder i sprækker i den finkornede lagpakke, se foto af Halk Hoved side 13.

Den palæogene lertykkelse er opdelt i under eller over 50 meters tykkelse ud fra den betragtning, at den samlede tykkelse af lav-permeable lag helst skal være mindst 80–100 meter. Det vil sige, at det palæogene ler kan rumme depotet, hvis det er mindst 50 meter tykt, især når der skal lægges en morænelerstykkelse til. Det er imidlertid en klar fordel, hvis de palæogene lerlag er tykkere. Strukturer som fx forkastninger i de palæogene lerlag skal helst slet ikke være til stede. På dette område er der dog helt klart en mangel på data fra det danske område generelt.

IDI-områder er områder med begrænsede el-

ler ingen drikkevandsinteresser. Det er bedst, at områderne ligger inden for denne kategori, men den har ikke stor udbredelse på landsplan. Flere områder går derfor helt eller delvis ind i OD-områder. To områder, der er klassificeret som OD-områder, Kertinge Mark og Thise, indeholder ingen drikkevandsinteresser eller påviselige grundvandsmagasiner og bør derfor revurderes. Regionale og dybe grundvandsforekomster af god status er vigtige at opretholde for eftertiden. Et område, Thyholm, er klassificeret med dybe grundvandsforekomster, men denne klassifikation bør på det foreliggende datagrundlag genovervejes.

Seks lokaliteter er domineret af kvartært ler, grundfjeld eller kalk uden forekomst af palæogent ler.

### RESULTATER

Analysen placerer nedenstående områder i den bedste kategori (grønne felter i diagrammerne ovenfor), og det er foreslået, at arbejdet i den næste fase bliver koncentreret om disse seks mest potentielle områder, som er valgt ud af de 22 områder. For de fleste områder er der udarbejdet en skematisk geologisk model og et geologisk profil, som er repræsentative for området. Et eksempel herpå er vist ved lokaliteten Skive Vest, side 17.

### DE SEKS OMRÅDER ER FØLGENDE:

#### OMRÅDE 1: ØSTERMARIE – PARADISBAKKERNE, BORNHOLM REGIONSKOMMUNE

Området består af tynde istidslag af især sandet moræneler, som overlejrer krystalline granitter og gnejser fra Prækambrium. Områdets geologi er interessant, fordi der i andre lande som fx

Sverige og Finland bygges depoter i lignende grundfjeldsbjergarter.

Geologien i Område 1 kendes især fra nærliggende gnejs-/migmatitbrud i nordkanten af Paradisbakkerne og fra kystprofiler på nordkysten af Bornholm. Området er et højtliggende, forholdsvis fladt terræn i kote (niveau) + 65 til + 80 m, men det er gennemskåret af nogle få dale.

Det er bjergarter, der umiddelbart er kendetegnede ved at være tætte og lav-permeable. Men den synlige, overfladenære del af grundfjeldet er gennemsat af horisontale og vertikale sprækker, hvilket betyder at dele af grundfjeldet kan have en højere permeabilitet. Antallet af sprækker antages at aftage i dybden, men det skal undersøges nærmere.

Der er kun lokale drikkevands-/grundvandsinteresser i området. Der er kun i beskedent omfang fredninger af fortidsminder, og ingen NATURA2000-områder. Fremtidige klimaændringer vurderes ikke at ville påvirke et depot i væsentlig grad. De krystalline gnejsstyper kan sammenlignes med de bjergarter, som er depotbjergarter i Sverige og Finland, hvor sprækkeproblematikken også kendes, og hvor omfattende risiko-undersøgelser har fundet sted i en lang årrække.



*Paradisbakke Migmatit i Præstebo Bruddet i nordkanten af Paradisbakkerne, Bornholm. Den grå og sorte krystalline bjergart er gennemsat af horisontale sprækker og røde grovkornede pegmatitgange.*



*Nærbillede af en grovkornet pegmatitgang i den grå og sortstribede migmatit.*

#### **OMRÅDE 4: RØDBYHAVN, LOLLAND KOMMUNE**

Området er beliggende lige øst for byen, hvor der tidligere er kortlagt plastisk ler som led i råstofeftersøgning. Det finkornede og meget fede plastiske ler fra Palæocæn ligger under 14–36 meter hård, kompakteret moræneler. Moræneleret er tyndest mod vest, ved byen, mens der bliver dybere ned til det plastiske ler mod øst, hvor der dog er en begrænset data-dækning. Det palæocæne ler er op til 80 meter tykt, underlejret af skrivekridt fra Kridt.

De lav-permeable leraflejringer vurderes at kunne rumme og indeslutte et depot. Der er ingen NATURA2000 eller fredninger på området. Der er begrænsede eller ingen drikkevandsinteresser i området. Området ligger i op til kote + 4 meter over nuværende havniveau og selv om det i dag er beskyttet af et 4 meter højt dige, skal der tages højde for stigende havniveau og stormfloder. Forekomst af salt havvand og evt. hævet salt/ferskvandsgrænse skal vurderes i forhold til et depots konstruktioner.

En del af område 4 er båndlagt til Femern Bælt-forbindelsen. Det er muligt, at de to konstruktioner kan eksistere sammen, men ellers bør der søges en placering for depotet så nordligt og østligt i området som muligt.



*Foto: Peter Roll/Jakobsen, GEUS.*

*Udgravning i det meget fede grønne ler fra Holmehus Formationen fra Palæocæn, som er dannet i havet. Oven på det grønne ler findes en hård, kompakt moræneler, som lokalt kaldes for "knaldler". Øst for Rødbyhavn, Lolland.*

#### **OMRÅDE 10: KERTINGE MARK, KERTEMINDE KOMMUNE**

Kertinge Mark nær Kerteminde er en halvø med et fladt terræn omkring kote + 20 meter, hældende ud mod kysten. Geologien kendes fra få boringer mod sydøst. Moræneler (op til 30 meter tykt) overlejrer sandsynligvis mere end 40–50 meter tykke lag af fedt ler fra Palæocæn, men den totale tykkelse kendes ikke. Der er således tale om lav-permeable leraflejringer, men forholdene er begrænset belyst på grund af spinkelt datagrundlag. Relationer til OSD drikkevandsområdet mod øst er ikke belyst.

Informationer uden for området understøtter, at det med fordel kan undersøges, om området vil være velegnet til at kunne rumme et slutdepot. Området er klassificeret som OD-område. Effekter af klimaændringer vil sandsynligvis ikke påvirke et depot, hvis det placeres på højereliggende arealer væk fra kysten. Der er ingen NATURA2000-begrænsninger på halvøen.

#### **OMRÅDE 17: HVIDBJERG, THYHOLM, STRUER KOMMUNE**

Ved Hvidbjerg på nordsiden af Thyholm ligger terrænet i kote + 10–20 meter, hældende mod Limfjorden. Området træffes på nordsiden af





Profil i det fede glimmerler fra Vejle Fjord Formationen, Oligocæn-Miocæn. Sønder Thise Klint ved Thise.

Herunder ses et udsnit af det Geologiske Basiskort 1115 Struer fra området vest for Skive, der viser tolkede boreprofiler som cirkeldiagrammer. På kortet ses, at der under tynde kvartære lag med moræneler og sand (brun og rød) findes tykke lag af sort glimmerler fra Vejle Fjord Formationen (lyseblå). Dette demonstreres også af profilet nedenfor mellem Lund og Hvidbjerg, som er konstrueret på basis af boringsdata.

Uglev Salthorsten med op til 80 meter tykke lag af siltet ler og fedt ler fra Oligocæn, som bliver gradvis tykkere mod nord. Lagene er overlejret af 4–20 meter tykke kvartære lag.

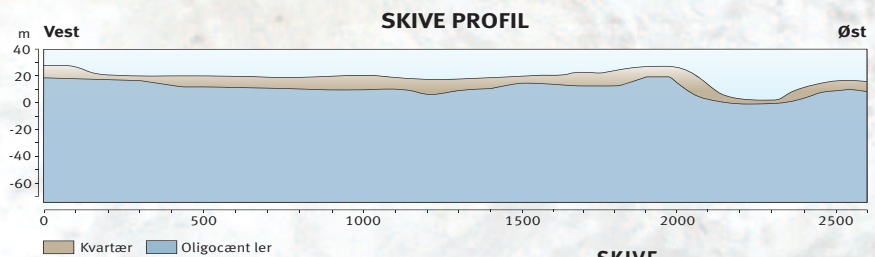
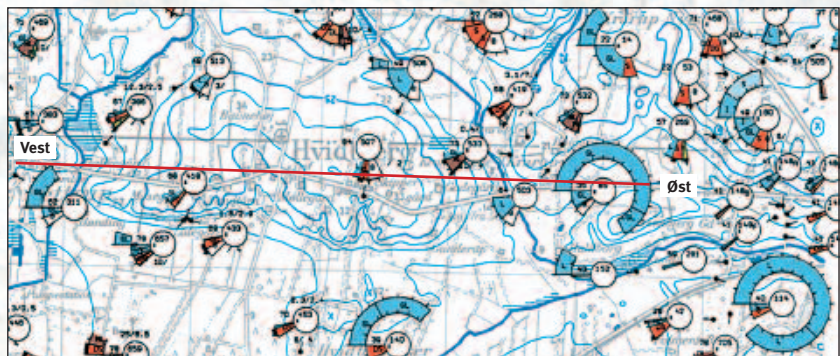
Området kan i nogen grad være præget af glacialtektonik, men de relativt tykke lerlag vurderes at være velegnede til et slutdepot. Området er klassificeret som et område med begrænsede eller ingen drikkevandsinteresser. Området grænser op til NATURA2000-områder på havet. Fremtidige klimaændringer forventes ikke at påvirke området.

### OMRÅDE 20: THISE, SALLING, SKIVE KOMMUNE

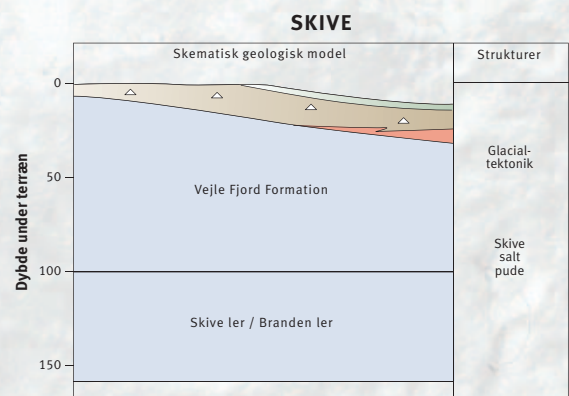
Midt på Østsalling, omkring Thise, ligger terrænet som en flad bakke op til ca. kote + 40 meter, hvorfra terrænet hælder nedad til alle sider. Området indeholder siltet ler og fedt ler fra Oligocæn på op til 150 meters tykkelse under istidslag af moræneler på op til 15 meters tykkelse og stedvis også af smeltevandsler. Det vurderes, at den horisontalt udbredte lagfølge vil kunne rumme et slutdepot. Der er begrænsede eller ingen drikkevandsinteresser langs kysten, men et OD-område findes inde i land. Der er ingen NATURA2000-områder. Fremtidige klimaændringer vil formodentlig ikke påvirke et depot placeret her.

### OMRÅDE 21: SKIVE VEST, SKIVE KOMMUNE

Området vest for Skive ligger i et terræn, hvor den nordlige del når op til ca. kote + 40 meter. Terrænet hælder stejlt ned til den sydlige del, der udgøres af en øst–vest-orienteret dal i kote + 5–6 meter. Geologisk består området af op til 150 meter siltet ler og fedt ler fra Oligocæn overlejret af istidslag, som kan være op til 40 meter tykke.



En skematisk geologisk model for Skive Vest-området viser tynde kvartære aflejringer ovenpå tykke palæogene leraflejringer.



Illustrationer: Eva Mølskens, GEUS.

De sammenhængende oligocæne leraflejringer med forholdsvis tynde istidslag over i området vest for Skive vurderes at kunne rumme et slutdepot. Det meste af området er klassificeret som havende begrænsede eller ingen drikkevandsinteresser. Der er ingen NATURA2000-områder. Fremtidige klimaændringer vil formodentlig kun i begrænset omfang påvirke et depot på de lavtliggende arealer, hvilket der må tages højde for.

### FREMIDTIGE OPGAVER

Forstudiernes regionale geologiske kortlægning baseret på eksisterende data er afsluttet med udpegningen af 22 forskellige områder i Danmark, der efterfølgende er skåret ned til seks områder. Der forestår herefter yderligere undersøgelser for at bringe de seks områder ned til de 1–3 områder, hvor der skal udføres feltstudier, før den endelige lokalitet kan udpeges.

# ANDRE STEDER I VERDEN

## UDENLANDSKE ERFARINGER

For at lokalisere velegnede steder til slutdepot for lav- og mellemaktivt affald har man i flere europæiske lande i en lang årrække undersøgt geologiske aflejringer af ler (Belgien, Tyskland, Frankrig og Schweiz) og krystalline bjergarter (Sverige, Finland og Schweiz). Status i 2010 var, at der er idriftsat overfladenære slutdepoter (fra terræn til max. 100 meters dybde) for lavaktivt affald i Finland, Frankrig, Japan, Spanien, Sverige, England og i USA. Yderligere er der depoter i drift for mellemaktivt affald i Sverige og Finland, mens der endnu ikke er etableret slutdepoter for højradioaktivt affald nogen som helst steder i verden trods omfattende forstudier i adskillige lande. Det højradioaktive affald med de længste depottider ligger således på mellemlagre i de forskellige lande.

Det belgiske atomforskningscenter SCK-CEN i Mol har siden 1974 forestået omfattende undersøgelser af dybereliggende leraflejringer (Boom Clay) til deponering af radioaktivt fast affald. Boom Clay er geologisk set samtidig med den danske Viborg Formation, som også

ligner det belgiske Boom Clay. Viden fra de belgiske undersøgelser forventes for en stor del at kunne overføres til et dansk slutdepot anlagt i leraflejringer. Foreløbige resultater fra dybe borer og råstofgrave på tværs af Belgien viser, at leren forekommer i udstrakte og tykke lag, og meget sandsynligt med de tætte egenskaber, som vi er på jagt efter til slutdeponering af Risø-affaldet i Danmark. En omfattende råstofudvinding af Boom Clay til murstensproduktion kan ses på fotos side 19.

I mere end 30 år har vores nabolande Sverige og Finland ligeledes været i gang med at udforske undergrunden med henblik på deponering af radioaktivt affald. Fokus i disse to lande har været at etablere slutdepoter for hhv. højradioaktivt affald i 400–500 meters dybde og for det lav- og mellemaktive affald i knap så stor dybde (ca. 50 meter). Depoterne indkapsles i krystalline bjergarter, der for en stor del ligner grundfjeldet på Bornholm, så den omfattende viden fra Sverige og Finland kan direkte overføres til et eventuelt dansk slutdepot i grundfjeld. Det er kendt, at krystal-

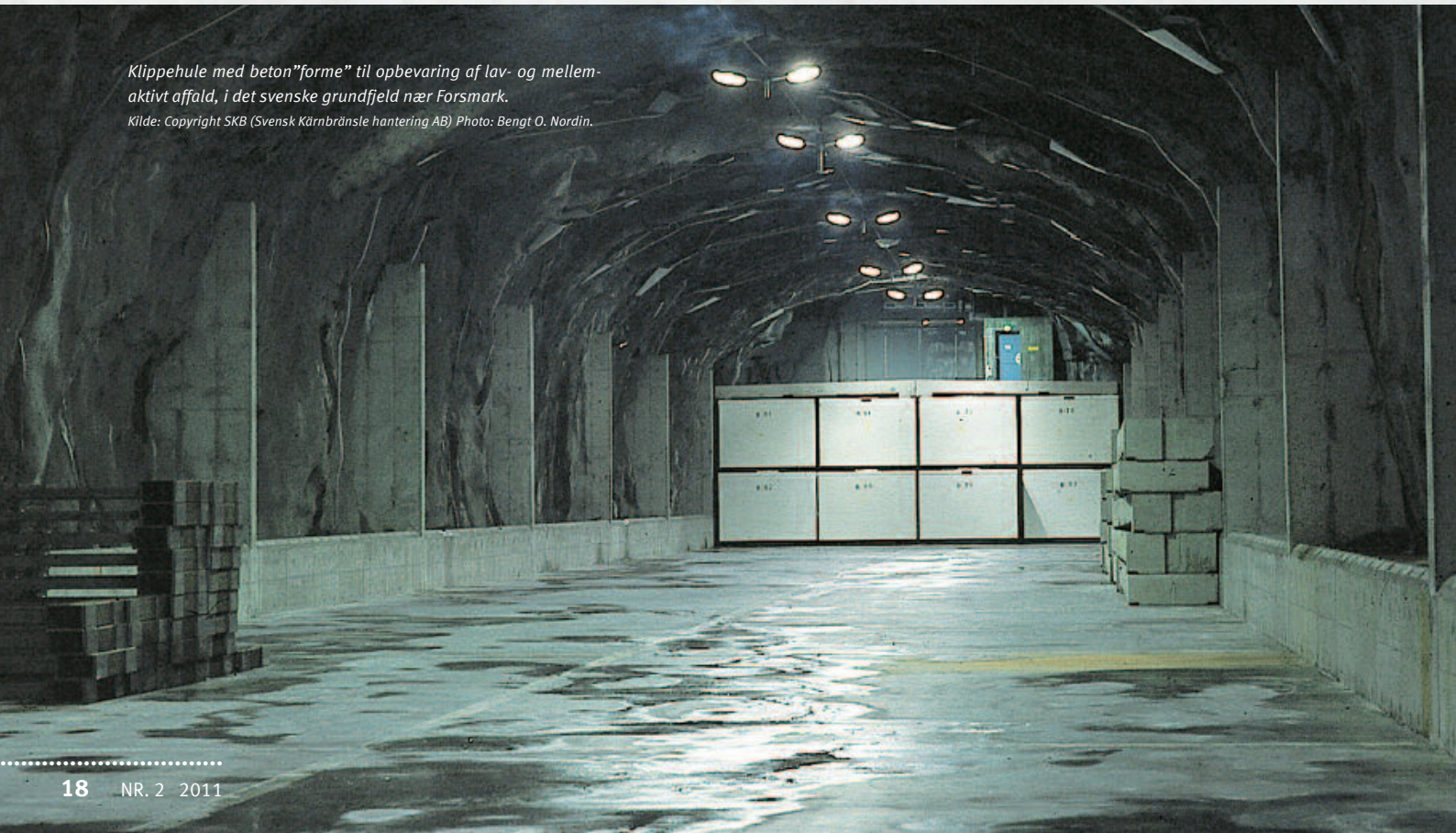
*Santa Barbara er skytshelgen for bl.a. stenhuggere, gravere, artillerister og geologer. Det er derfor ikke så mærkeligt, at denne figur af Santa Barbara findes ved nedgangen til de underjordiske laboratorier ved det belgiske atomforskningscenter SCK-CEN i Mol.*

line bjergarter kan indeholde sprækker/knudsninger, der formodes at have uheldige følger i et spredningsperspektiv fra et slutdepot. De svenske og finske erfaringer må derfor formodes at få væsentlig betydning for de videre overvejelser af en eventuel slutdeponering i det danske grundfjeld. Figuren nedenfor viser tunneller boret ud skråt under havbunden 50 m under den Botniske Bugt i grundfjeld til deponering af lav- og mellemaktivt affald.



*Klippehule med beton"forme" til opbevaring af lav- og mellemaktivt affald, i det svenske grundfjeld nær Forsmark.*

*Kilde: Copyright SKB (Svensk Kärnbränsle hantering AB) Photo: Bengt O. Nordin.*





*Lokalitet ved Rumst, sydøst for Antwerpen (Belgien), hvor man udvinder det oligocæne Boom Clay til fremstilling af mursten. I Belgien undersøges bl.a. Boom Clay'et for, om det kan benyttes som depot for radioaktivt affald.*

## GEOLOGISKE AFLEJRINGER

Geologiske aflejringer er tidligere blevet undersøgt som mulige deponeringsmedier for radioaktivt affald fra et eventuelt atomkraftværk i Danmark. Dengang var der fokus på dybtliggende saltaflejringer og grundfjeldsbergarter samt tertiære leraflejringer på Fyn og i Jylland.

Saltdiapirer, saltpuder og saltaflejringer og dybtliggende (> 800 meter) grundfjeldsbergarter er ikke inkluderet i denne undersøgelse. Dels ligger disse aflejringer generelt for dybt, dels har saltaflejringer vist sig at være for ustabile til deponering, jf. de tyske saltminer.

*Det belgiske atomforskningscenter SCK-CEN i Mol, set udefra.*



Flint i skrivetridt fra Stevns Klint. Flintkonkretionen ligger i en horisontal sprækkezone.

# 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](http://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: Risø DTU.

Foto: Dansk Dekommissionering.

Reprografisk arbejde: Benny Scharck, 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](mailto: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](mailto:geo@geo.ku.dk)

## GEOLOGISK MUSEUM

Øster Voldgade 5-7  
1350 København K

Tlf: 35 32 23 45

E-mail: [rcp@snm.ku.dk](mailto:rcp@snm.ku.dk)



## GEOLOGISK INSTITUT

Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670  
8000 Århus C

Tlf: 89 42 94 00

E-mail: [geologi@au.dk](mailto:geologi@au.dk)



PortoService, Postboks 9490, 9490 Pandrup

DANMARK  
**PP**

Magasinpost UMM  
ID-nr. 46439