

DET "LEVENDE" SALT

af Eckart Håkansson

Gennem en del år har stensaltforekomster overalt i verden været anset for en af de bedste muligheder for varig oplagring af høj-radioaktivt affald fra atomkraftværker og produktion af kernevåben. Efterhånden som den danske debat om indførelse af atomkraft er blevet mere intens, er deponeringsproblemerne - og hermed de danske stensaltforekomster - blevet stedse mere påtrængende. Med regeringens klart formulerede krav om, at højaktivt affald i givet fald skal kunne deponeres sikkert og varigt inden for landets grænser, er de danske stensaltforekomster nu centralt placeret i det politiske liv.

Men lad os først vende os mod geologien.

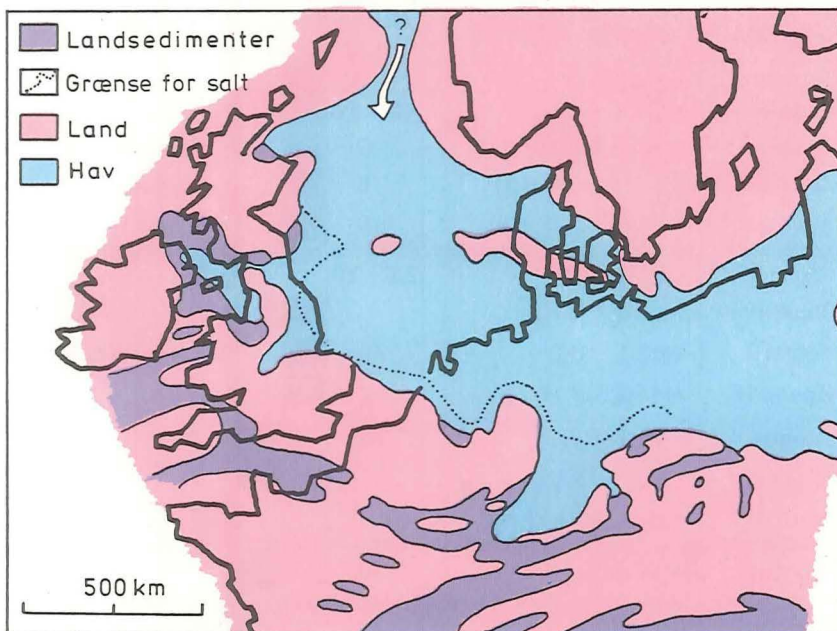
Saltbjergarternes mineraler

Karakteristisk for saltbjergarterne (såkaldte evaporitter) er, at de overvejende består af mere eller mindre letopløselige mineraler, som er udkrystalliseret ved en inddampningsproces. Vigtigst er selvfølgelig stensalt (NaCl), men alt i alt er der fundet godt 40 forskellige mineraler i de danske saltforekomster. Nedenstående tabel giver en oversigt over nogle af de vigtigere:

MINERAL.	KEMISK FORMEL	VÆGT-FYLDE	OPLØSELIG LET→TUNG	ANDRE EGENSKABER
STENSALT	NaCl	2,1 - 2,2		Plastisk
Sylvin	KCl	1,9 - 2,0		Plastisk
Bishofit	MgCl ₂ · 6 H ₂ O	1,6		Henflydende
CARNALLIT	KCl · MgCl ₂ · 6 H ₂ O	1,6		Henflydende
Tachydrit	CaMg ₂ Cl ₆ · 12 H ₂ O	1,6		Henflydende
ANHYDRIT	CaSO ₄	2,8 - 3,0		Henflydende
Glaubersalt	Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O			
Kieserit	MgSO ₄ · H ₂ O	2,5		
Epsomit	MgSO ₄ · 7 H ₂ O	1,7		
Langbeinit	K ₂ Mg(SO ₄) ₂	2,8		
Polyhalit	K ₂ Ca ₂ Mg(SO ₄) ₄ · 2 H ₂ O	2,7		
Kainit	KCl · MgSO ₄ · 3 H ₂ O	2,1		
Boracit	Mg ₃ ClB ₇ O ₁₃	3,0		
CALCIT	CaCO ₃	2,7		
DOLOMIT	CaMg(CO ₃) ₂	2,8-2,9		

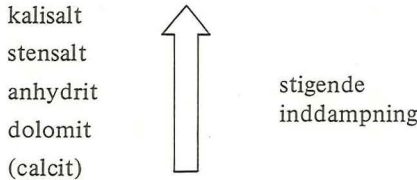
Dannelse af salt

Saltet i den danske undergrund er dannet både i Perm- og Triasperioden, men umiddelbart er det ikke særlig nemt at se forskel. For nemheds skyld vil vi her koncentrere os om saltet fra Øvre Perm, hvor de mægtigste lag blev afsat. De klimatiske og geologiske forhold omkring Danmark i sen Perm-tid, da de mægtige forekomster af stensalt blev afsat, var meget anderledes end de forhold vi kender i dag. Vi må forestille os, at aflejringen er foregået i et stort, mere eller mindre afsondret og lavvandet havbassin (fig. 1). Klimaet i området har været varmt og tørt, og rimeligvis ørkenagtigt hele vejen rundt om bassinet - herom vidner f.eks. udbredte flyvesandsaflejringer i England vest for bassinet. I Sverige, øst for bassinet, findes ikke jævnaldrende aflejringer, og nedbrudt materiale herfra må være skyllet ud i det danske bassin. Da klimaet bevirkede en kraftig fordampning fra havoverfladen, steg saltholdigheden efterhånden i det nogenlunde lukkede bassin, og det medførte snart en faunaændring, idet færre og færre dyrearter kunne tåle det efterhånden meget salte vand. Ganske som i tilsvarende situationer idag var det især bryozoaer (mosdyr), der holdt længst ud - men med stadigt stigende koncentration af opløste salte blev alle former for liv til sidst fordrevet. Som sidste led i udviklingen nåede havvandet ved inddampning mætningspunktet, og udviklingen og den kemiske udfældning (udkrystallisation) af saltminerale begyndte.



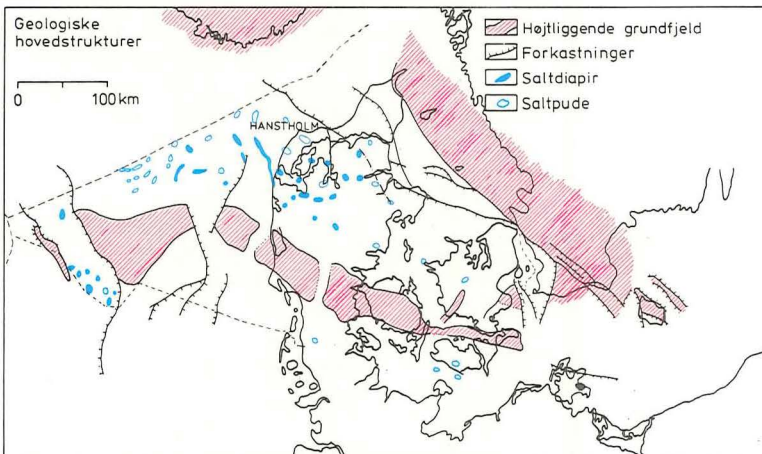
Figur 1. Nordsøbassinet mod slutningen af Perm perioden.

Almindeligt havvand indeholder en stor mængde opløste stoffer, og ved indampningsprocessen udkrystalliseres stofferne i en rækkefølge, der nøje afspejler de opløste stoffers koncentration og opløselighed. Det gjaldt også i Perm-tiden, hvor man i hver af de ialt 5 indampningsfaser finder en lagfølge af mineraler med de tungest opløselige salte nederst og de lettest opløselige øverst:



Helt så skematisk foregik det dog ikke altid i Permhavet. Dels finder man ofte en mere uregelmæssig vekslen i mineraludfældningen, og dels er der ofte markante afbrydelser og gentagelser af dele af den typiske lagfølge. Årsagen er ændringer i koncentrationen af saltopløsningerne i Permhavet - enten på grund af kortvarig tilførsel af ferskvand (regn, floder) eller på grund af fortynding ved tilførsel af frisk havvand.

Saltseriens tykkelse - op mod 1000 m Permsalt i Danmark - fortæller umiddelbart, at havvandet i bassinet må være blevet fornyet mange gange i løbet af denne periode. Der må derfor jævnligt have været åbnet en forbindelse ud til verdenshavene, men man ved ikke meget om, hvordan den har fungeret. Bedømt ud fra den fortidige geografi kan åbningen have ligget i den nordlige del af Nordsøen (fig. 1).



Figur 2. Hovedtrækkene i opbygningen af den danske undergrund (J. Baartman, DGU).

Som resultat af aflejringsforholdene gennem den yngre del af Perm-perioden findes nu op til 1000 m mægtige saltlag i den danske undergrund. Siden deres dannelse er aflejringerne gradvis sunket længere ned, og blev samtidig dækket af voksende yngre aflejringer. Derfor forekommer saltlagene nu i dybder helt ned til 8 km centralt i aflejringsbassinet nord for Ringkøbing-Fyn Ryggen.

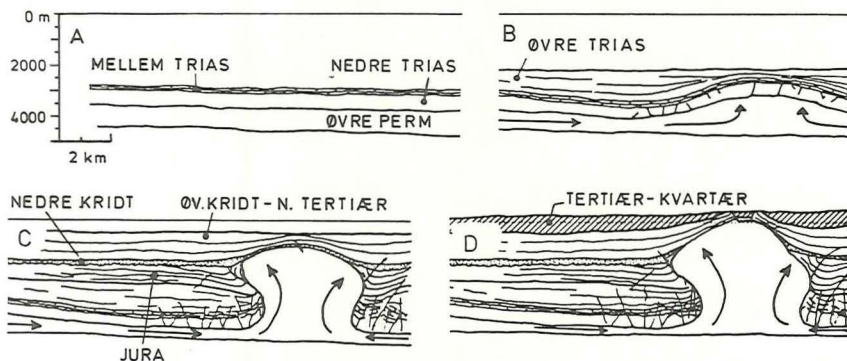
Dog er det nok kun en mindre del af Saltserien, der idag ligger uforstyrret i dybet i nogenlunde vandrette lag. Derfor er de bedst kendte saltforekomster også de såkaldte salt-diapirer ("saltskorstene"), hvor saltet er skudt op og er kommet tæt op til jordoverfladen (fig. 3). Med et tværsnitsareal op til 50 km og en total højde på måske 5-6 km er det enorme strukturer, der præger undergrunden på markant vis.

Men hvordan opstår sådanne salt-diapirer - og hvornår? Blot to helt simple egenskaber ved nogle af de mest almindelige saltmineraller er nok til at forklare saltstrukturens opståen.

Næsten alle dominerende mineraler i saltaflejringerne har en vægtfylde, der ligger betydeligt under den "normale" for mineraler som kvarts og feldspat. Da samtidig nogle af saltminerallerne - især stensalt - deformeres plastisk under selv ret ringe tryk, bliver saltlagenes stabilitet stærkt påvirket af belastningen fra de overliggende bjergarter.

Trykket fra dæklagene er naturligvis øget ganske gradvis, i takt med stigende tykkelse af dækket, men selv efter at trykket var blevet stort nok til at deformere saltet, måtte der en eller anden påvirkning til for at bryde den tyngdemæssige uligevægt med tungere aflejringer over det lette salt.

Det er påfaldende, at flere salt-diapirer ligger oven over forkastninger (fig. 2) Pludselige forskydninger langs forkastningerne har derfor utvivlsomt spillet en væsentlig rolle som "aftrækker" for diapir-dannelsen. Hastigt vekslende tryk-påvirkninger inden for geologisk set korte tidsrum - f.eks. i forbindelse med isbelastning i Kvartærtiden, har formodentlig ligeledes spillet en rolle.



Figur 3. Den formodede udvikling af Vejrum strukturen (efter I. Madirazza).

Hvor den ustabile ligevægt blev forstyrret, skød saltet - på grund af lav vægtfylde og udtalt plasticitet - op og kunne efterhånden flere steder danne en diapir, samtidig med at salt ved basis af strukturen "strømmede" til fra siden. På vej op puffede saltet selvfølgelig dæklagene op (fig. 4 B) og efterhånden som påvirkningen blev mere koncentreret, blev dæklagene også gennemtrængt, (fig. 4 C-D). På grund af saltets plastiske egenskaber er deformationen inde i selve diapiren umådeligt mere kompleks end den brud-deformation, den forårsager i de omliggende lag.

Imidlertid er saltbjergarterne fundstændig "døde" og "ugennemtsigtige" for visse geofysiske undersøgelser, og det har vist sig noget nær umuligt at få et indtryk af diapirenes indre opbygning ad traditionel geofysisk vej. Tilbage er kun at tage dyre borekerner op for at få noget som helst at vide om de indre strukturer. Derfor er det hidtil også kun en enkelt dansk salt-diapir, der er undersøgt blot nogenlunde detaljeret.

Efterhånden som salt-diapirerne under opskydningen når op i niveauer, hvor der er bevægelse i grundvandet, vil de letopløselige mineraler ret hurtigt blive opløst og transporteret væk. Følgelig har de fleste høje salt-diapirer udviklet en såkaldt kalot ("caprock"). Kalotten, som især består af anhydrit og gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, omdannet fra anhydrit ved vandoptagelse) danner en stedvis højporøs bjergart, hvis tykkelse bl.a. afhænger af den opadgående saltbevægelses hastighed og grundvandsstrømningen. Enkelte gange i løbet af tilsvarende nordvesttyske saltstrukturers udviklingshistorie har opstigningshastigheden sejret over opløsningsprocessen, med det resultat, at saltet er nået helt op til jordoverfladen. Om en lignende udvikling også har fundet sted nord for Ringkøbing-Fyn Ryggen, vides endnu ikke.

I forbindelse med beregningen af salt-diapirernes opskydningshastighed er det vigtigt at kende deres dannelses-tidspunkt og -historie. Således har salt-diapirer over hele verden tilsyneladende gennemløbet det samme karakteristiske mønster - blot til forskellig tid (fig. 3).

Først opstår en meget bred og flad bule (pude) i saltlagene, som ganske enkelt løfter de overliggende lag. Derpå sker den egentlige gennemtrængning, idet saltet så at sige skubber de overliggende lag til side. Forløbet synes at være påvirket af større, regionale geologiske hændelser. Således synes flere danske salt-strukturer at have gennemløbet "bule"-stadiet i Jura- og den ældre del af Kridttiden, medens den egentlige gennemtrængningsfase først synes at være begyndt i yngre Kridt og ældre Tertiær. Det kan rimeligvis sættes i forbindelse med den Alpine foldning, som har præget den geologiske udvikling over store dele af jordkloden i netop dette tidsrum. Den strukturelle uro virker ikke alene som "aftrækker" til saltbevægelserne, men har også påvirket aflejringsforløbet, idet lag fra yngre Kridt og ældre Tertiær er mangelfuldt udviklet ovenpå salt-diapirerne.

Hertil kommer den kolossale og relativt pludselige ydre påvirkning, som Kvar-tær-tidens gletschere utvivlsomt må have påført specielt de danske salt-diapirer. Der findes således særligt mange større partier af undergrunden løsrevet som flager, umiddelbart nord og øst for salt-diapirerne på grund af gletscherisens tryk, hvilket kunne tyde på, at salt-diapirenes dæklag har raget op som bakker i istiden.

SALTSTRUKTURER og RADIOAKTIVT AFFALD

Som antydnet i indledningen er saltet - og da især salt-diapirerne - stærkt i søgelyset som mulige slutdeponeringssteder for højradoaktivt A-affald. Med hvad er det egentlig der skal deponeres ? - og hvad skal deponeringen sikre imod ?

Det højaktive affald, man vil søge at skaffe sig af med på denne måde, er kort fortalt en blanding af talrige radioaktive og umådeligt giftige stoffer. Nedbrydningstiden for mange af stofferne er så lang, at de stadig må betegnes som farlige efter en periode på 100.000 år. Netop de lange tidsrum nødvendiggør et bredere kendskab til de geologiske processer, og derfor er deponeringsproblemerne medvirkende til at understrege den geologiske videnskabs centrale betydning for samfundet.

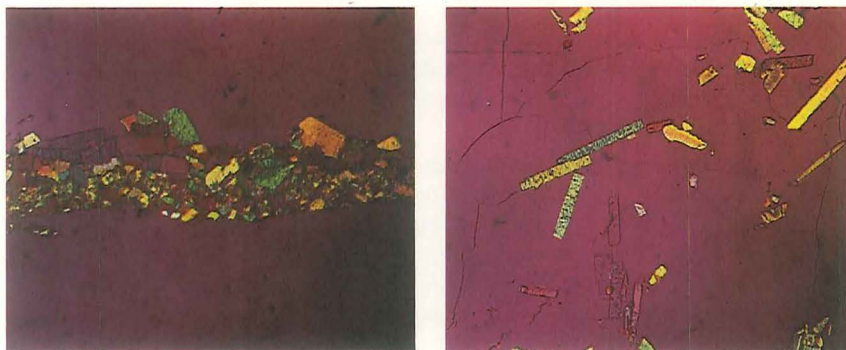


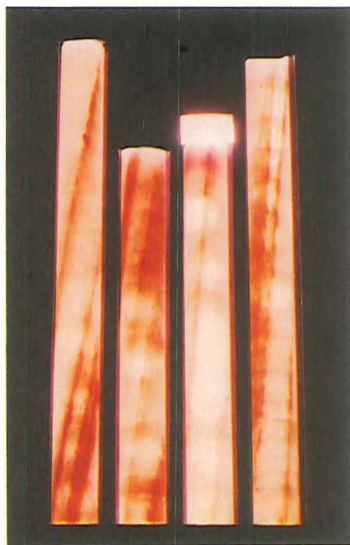
Fig. 4. Tyndslib af saltbjergarter fra Suldrup strukturen. I polariseret lys er stensalt violet, mens de forskelligt farvede korn er anhydrit. Til venstre er anhydritkornene koncentreret i et enkelt lag som oprindeligt udfældet fra havvandet. Til højre ses anhydritkornene spredt på grund af senere deformation af stensaltet (F. Lyngsie Jacobsen, DGU).

På grund af affaldets meget specielle karakter må et helt elementært samfundskrav være, at det højaktive affald ikke under nogen omstændigheder må kunne komme i kontakt med biosfæren - det vil sige levende organismer af enhver art samt de medier, de færdes i eller udnytter på anden vis, heri også inkluderet grundvand og andre underjordiske ressourcer. Nogle deponeringsplaner forudsætter dog en mulighed for genoptagelse af det højaktive affald til eventuelt senere brug. De to muligheder er naturligvis ganske uforenelige, alene af den grund, at menneskeheden - og dermed også fremtidens politikere og måske mindre demokratiske regimer - udgør en naturlig del af biosfæren.

Af de muligheder, der har været overvejet i forbindelse med en eventuel deponering i danske salt-diapirer, opfylder ingen på forhånd kravet om udelukkelse fra biosfæren i mindst 100.000 år.

Den såkaldte "skaktløsning", med anlæg af minegange i toppen af en salt-diapir mere end 500 m under jordoverfladen, giver indlysende adgang til at få fat på affaldet igen, samtidig med at det også giver mulighed for løbende kontrol af deponeringsstedet.

"Dybhulsløsningen", der for tiden synes at være den løsning el-selskaberne foretrækker, går simpelthen ud på at deponere affaldsbeholderne på bunden af et mindst 2000-3000 m dybt borehul i en salt-diapir og så derefter forsegle hullet. Denne deponeringsform må betragtes som endelig i den forstand, at den vil udelukke en genoptagelse af affaldet - men den forhindrer desværre også enhver forebyggelse og reparation af uforudsete beskadigelser af depotet i dybet.



Figur 5. Borekerner af salt fra Suldrup strukturen fotograferet i gennemfaldende lys. De rødlige lag (hæmatittrige) fremhæver den stejle hældning (F. Lyngsø Jacobsen, DGU).

Men tilbage til stensalt og årsagerne til disse forekomsters popularitet i denne sammenhæng. Ud over at saltet tilsyneladende forekommer i store, sammenhængende masser, er det især to egenskaber ved mineralet stensalt, der er værdsatte. For det første har stensalt en relativt høj varmeledningsevne, og det er en klar fordel, idet det højaktive affalds stråling producerer en vis mængde varme. For det andet er stensalt plastisk, således at eventuelle sprækker i saltet automatisk vil lukke til ved flydning. Med blandt andre de egenskaber in mente har man derfor opstillet følgende idelle krav til et slutdepot for højaktivt affald i en salt-diapir:

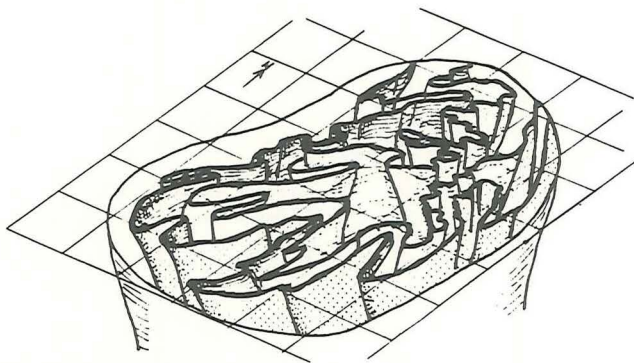
1. Forekomst af rent stensalt i mindst 200 m i alle retninger fra deponeringsstedet.
2. Salt-diapiren skal kunne bedømmes til at ville være stabil inden for en periode på mindst 100.000 år.
3. Deponeringsstedet skal være omgivet af flere hydrologiske barrierer, der ligeledes skal være stabile i mindst 100.000 år.

Det første krav sigter naturligvis på at sikre et tilstrækkeligt stort bjergartsvolumen med gunstige egenskaber. Ikke alle "urenheder" er imidlertid lige ødelæggende for de egenskaber, og det er især tre ting man må være sig for - nemlig forekomst af væske, gas og ustabile mineraler. Gas og væske (i form af stærkt korroderende, mættede saltopløsninger) er specielt generende, idet de er mobile, og derfor kan sprede radioaktivt affald fra en eventuel læk i depotet. Næsten alle saltforekomster indeholder noget væske og gas, der for det meste findes som små "libeller" inden i mineralkornene. Hvordan og hvor hurtigt de små væske- og gasindeslutninger kan vandre i selve saltmassen er hidtil kun skønnet ud fra laboratorieforsøg. Imidlertid synes væskeindeslutningernes vandringshastighed ikke at være bestemt af deres størrelse, men udelukkende af temperaturforskelle, således at selv mikroskopiske indeslutninger vil bevæge sig med en hastighed på op til 10 cm/år i retning mod en varmekilde - her mod det radioaktive affald. Det betyder, at affaldsbeholderne i løbet af nogle år vil være omgivet af en mættet saltopløsning, såfremt saltet i en vis afstand fra beholderne ikke er blottet for selv mikroskopiske væskeindeslutninger. Netop sådanne mikroskopiske væskeindeslutninger er meget almindelige overalt i Danmarks salt-diapirer. Hertil kommer, at større koncentrerede forekomster under højt tryk også er velkendte og flere gange har forårsaget "blow outs" i forbindelse med boringer i de danske salt-strukturer.

Forekomsten af ustabile saltmineraler har desuden direkte indflydelse på væskeindholdet, idet mineralerne vil afgive krystalvand ved temperaturer, der allerede vil opnås ved varmestrålingen fra det højaktive affald. F.eks. fraspalter carnallit alt sit bundne vand ved temperaturer omkring 110°C, og det betyder, at selv tilsyneladende tørre saltforekomster kan blive væskeførende direkte som følge af en deponering.

Nu vil det salte vand - hvad enten det har en oprindelse som krystalvand eller som væskeindeslutning - i sig selv ikke give anledning til korrosion af beholderne, med mindre der også findes fri ilt. At det faktisk er tilfældet, vises af forekomsten af iltede metaller (f.eks. hæmatit, se fig. 5).

Den konkrete påvisning af en tilstrækkelig stor forekomst af tilpas rent stensalt er således en meget problematisk sag. Hertil kommer, at der er al mulig grund til at antage, at samtlige danske salt-diapirer er mindst lige så kompliceret opbygget som Suldrup strukturen (fig. 6), og selv med anvendelse af de mest avancerede geofysiske metoder er det endnu ikke muligt at lokalisere de potentielt generende forekomster af væske, gas og ustabile mineraler imellem de enkelte borehuller. End ikke udbredelsen af de medfoldede ler- og anhydritlag er det muligt at fastslå uden direkte anboring.

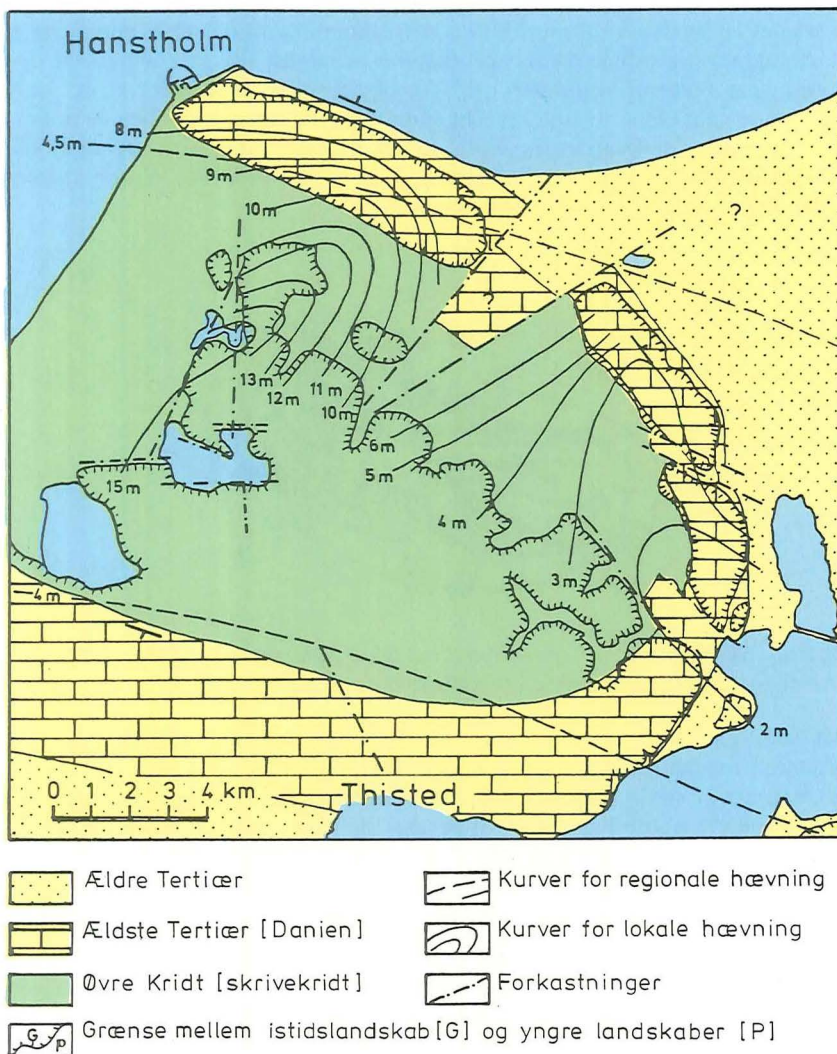


Figur 6. Skematiseret, tredimensional model af Suldrup strukturens opbygning baseret på 12 kerneboringer (efter Richter-Bernburg).

Det andet elementære krav om deponeringsstedets stabilitet igennem hele den periode, hvor det højaktive affald er potentielt farligt, er umiddelbart indlysende. Men det er straks mindre indlysende, hvordan man egentlig kan sandsynliggøre, at en given salt-diapir ikke vil bevæge sig på skadelig vis inden for en sikkerhedsperiode på 100.000 år. Et godt udgangspunkt vil dog være at fastslå, hvor meget bevægelse der har fundet sted igennem de sidste 100.000 år, samt om der har været ændringer i bevægelseshastigheden inden for den periode.

Som antydte tidligere følger opskydningen af saltet meget komplicerede mønstre, der på mange måder kan sammenlignes med de hvirveldannelser, der foregår i en skorsten med varm røg. Bevægelseshastighederne og -retningerne er derfor meget varierende i de forskellige dele af en aktiv salt-diapir. Set "udefra" resulterer summen af strømninger i en vis opadgående netto-bevægelse, som påvirker de ovenfor liggende lag med en intensitet, der også er stærkt afhængig af grundvandets opløsende effekt. Den opskydningshastighed man eventuelt

kan registrere ved jordoverfladen, er derfor under alle omstændigheder et udtryk for en absolut minimumshastighed. De faktiske bevægelsehastigheder inde i saltet er sandsynligvis mindst 10 gange så store.



Figur 7. Geologisk kort over Hanstholm området. Thisted saltdomens bevægelser har indvirket både på de Prækvarter og de Postglaciale aflejringer.

I Danmark har den seneste istids ismasser forstyrret de overfladenære lag så gennemgribende, at kun de sidste 10-12.000 års salt-bevægelser har sat sig egentlige spor i landskabet. For at sporene skal være til nogen nytte i denne sammenhæng, er det imidlertid nødvendigt dels at kunne måle størrelsen af en sådan deformation, dels at kunne fastslå hvor længe deformationen har fundet sted. I virkeligheden er det derfor kun i forbindelse med salt-strukturer, der har påvirket marine, sen- og postglaciale aflejringer, at man vil kunne få blot nogenlunde rimelige fingerpeg om bevægelsens størrelse ud fra almene geologiske metoder, og salt-strukturer, der dækkes af sådanne lag, har vi desværre ikke mange af.

Den dybtliggende Thisted struktur, der befinder sig på overgangsstadiet mellem en pude og en egentlig diapir (se fig. 3), er en af de få strukturer, hvor overfladeundersøgelser har kunnet give en fornuftig indikation. Strukturen overlejres af marine aflejringer fra en havstigning, der skønnes at være ca. 4000 år gammel, og ved at måle deformationen af de tilhørende strandlinier (fig. 7) kan man se, at Thisted-strukturens opadgående nettobevægelse beløber sig til godt 10 m siden da - eller med andre ord ca. 2.5 mm pr. år. Bevægelseshastighederne inde i Thisted-strukturens salt når derfor sandsynligvis op på 25 mm eller mere pr. år.

Bevægelser af denne størrelsesorden må formodes meget hurtigt at opbygge spændinger i det inhomogene salt, og de resulterende forskydninger må kunne få enhver type indkapsling om det højaktive affald til at revne. Hermed vil de stærkt korroderende væsker få direkte adgang til affaldet.

Det sidste krav omhandler et antal hydrologiske barrierer, der - kort fortalt - skal sikre mod udstrømning af radioaktivt forurennet vand til biosfæren. Der kan tænkes flere typer af barrierer. Egentligt vandstandsede lag vil selvfølgelig være det ideelle, men gives der tid nok, er stort set alle danske bjergarter gennemtrængelige for vand, og det er derfor mere kombinationen af de forskellige bjergarters evne til at binde de radioaktive stoffer og deres evne til at opbremse grundvandsstrømmene der har interesse.

Da alt dybtliggende grundvand i Danmark er salt, er der næppe nogen tvivl om, at salt-diapirerne har hydrologisk forbindelse med dette grundvand. Det er derfor især de relativt højtliggende Tertiærtids lerbjergarter, der må tænkes på som hydrologiske barrierer i Danmark, og formodentlig vil de fleste af dem have ganske gode egenskaber til at forsinke det radioaktive materiales vandring mod biosfæren. Men for at fungere tilfredsstillende må de nødvendigvis være fuldstændigt frie for sprækker - også langt ud i fremtiden, hvor påvirkninger fra salt-diapirerne, nye istider eller andre ukendte faktorer kan gribe forstyrrende ind i det nuværende geologiske strukturmønster.

Som en konklusion må vi konstatere, at den øjeblikkelige geologiske viden ikke kan garantere, at de tre kravs ideale fordringer umiddelbart er opfyldt. Et endeligt svar kræver et både omfattende og tidskrævende undersøgelsesprogram.