

Vurdering af elværkernes salthorstundersøgelser

Rapport udarbejdet af
en gruppe nedsat af
miljøstyrelsen

Marts 1984

miljøstyrelsen · Strandgade 29 · 1401 København K · Tlf. (01) 57 83 10

6/11/2017 198

201 10.2

Vurdering af elværkernes salthorstundersøgelser

**Rapport udarbejdet af
en gruppe nedsat af
miljøstyrelsen**

Marts 1984

MILJØSTYRELSEN
BIBLIOTEKET
STRANDGADE 29
1401 KØBENHAVN K

miljøstyrelsen · Strandgade 29 · 1401 København K · Tlf. (01) 57 83 10



trykt på genbrugspapir

ISBN 87-503-5010-2
Stougaard Jensen/København
Fu 00-241

FORORD.

Hermed offentliggøres rapport om miljøstyrelsens vurdering af det undersøgelsesarbejde, som ELKRAFT og ELSAM har udført for at belyse mulighederne for betryggende deponering af højaktivt affald i en dansk salthorst.

I 1976 traf regeringen beslutning om at udskyde afgørelsen om anvendelse af kernekraft i den fremtidige energiforsyning i Danmark. Baggrunden for denne beslutning var, at en række forhold i forbindelse med sikker opbevaring af radioaktivt affald fra kernekraftproduktion og bestemte sikkerhedsmæssige spørgsmål ved kernekraftanlæg nødvendiggjorde lange og grundige overvejelser.

Elværkerne besluttede derfor efter samråd med handelsministeriet at undersøge mulighederne for deponering af højaktivt affald i Danmark.

Første fase af dette arbejde omfattede indledende vurderinger på generelt grundlag til belysning af mulighederne for deponering. Denne fase blev afsluttet i 1978.

Af statsministerens redegørelse i folketinget den 6. november 1979 fremgik, at det fortsat var regeringens opfattelse, at kernekraft skulle indgå i den flerstrengede energiforsyning. Det blev imidlertid fastslået, at betingelsen for en positiv stillingtagen til kernekraft er, at sikkerheden ved driften af kernekraftværker er tilstrækkelig stor, og at der findes en tilfredsstillende løsning på spørgsmålet om slutdeponering af radioaktivt affald.

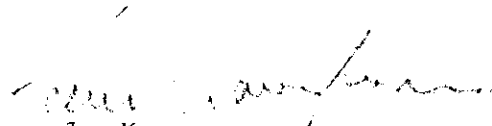
Elværkerne besluttede derfor at videreføre arbejdet i en fase 2. Den skulle omfatte målinger og prøveboringer med henblik på at finde egnede deponeringsmuligheder i danske salthorste.

Resultatet af fase 2 undersøgelserne blev fremsendt til myndighederne i juni 1981.

Til at forestå myndighedernes vurdering af fase 2 tog miljøstyrelsen initiativ til etablering af en gruppe med repræsentanter for miljøstyrelsen, sundhedsstyrelsen, Tilsynet med Nukleare Anlæg og Danmarks Geologiske Undersøgelse. Energiministeriet har deltaget som observatør i gruppen.

Nærværende rapport omhandler gruppens vurdering af elværkernes undersøgelser.

Spørgsmålet om sikkerheden ved kernekraftværker er samtidig behandlet i en anden rapport fra miljøstyrelsen.



Jens Kampmann

INDHOLD

	<u>Side</u>
1. Baggrundsoplysninger.	1
1.1. Indledning.	1
1.2. Elværkernes undersøgelser.	2
1.3. Myndighedernes sagsbehandling.	7
1.3.1. Fase 1.	7
1.3.2. Fase 2.	7
2. Generelt om højaktivt affald.	11
2.1. Indledning.	11
2.2. Radioaktivitet.	11
2.3. Affaldsmængder og -former.	12
2.4. Deponering.	13
2.5. Miljøstyrelsens forslag til overordnede krav til deponering.	14
3. Gruppens vurdering af elværkernes undersøgelser.	16
3.1. Indledning.	16
3.2. Anlægstekniske forhold.	16
3.3. Affaldet.	26
3.3.1. Indledning.	26
3.3.2. Mængde og sammensætning af affald.	27
3.3.3. Affaldets energiproduktion og ioniserende stråling.	29
3.3.4. Konklusion vedrørende affaldet.	30
3.4. Sikkerheden under normale forhold.	31
3.4.1. Indledning.	31
3.4.2. Salthorstens bevægelse (diapirisme).	33
3.4.3. Opløsning af horsten.	35
3.4.4. Temperaturfeltet omkring deponeret højaktivt affald.	38
3.4.5. Radiolyse af brine.	44
3.4.6. Strålingsenergiakkumulering i salt.	47

3.4.7.	Bevægelse af affaldsbeholdere.	49
3.4.8.	Væsketilstrømning til affaldsbeholdere.	55
3.4.9.	Korrosion og udludning.	62
3.4.10.	Spredning af radioaktive stoffer med vand.	64
3.5.	Sikkerheden over for ydre påvirkninger.	71
3.5.1.	Indledning.	71
3.5.2.	Voldsomme naturbegivenheder.	71
3.5.3.	Menneskers indgreb i salthorsten.	76
3.6.	Sammenfatning.	88
3.6.1.	Baggrund.	88
3.6.2.	Elværkernes undersøgelser.	89
3.6.3.	Gruppens vurderinger.	91
3.6.4.	Hovedresultat.	99
	Referenceliste.	101

I. BAGGRUNDSOPLYSNINGER.

I.1. INDLEDNING.

Miljøministeriet og energiministeriet modtog i juni 1981 ELKRAFT's og ELSAM's rapport: "Deponering af højaktivt affald fra danske kernekraftværker."

Rapporten omhandler det undersøgelsesarbejde, der er udført af de to elselskaber i fællesskab i 1979-80 til belysning af mulighederne for betryggende deponering af højaktivt affald i en nordjysk salthorst.

I april 1981 tog miljøstyrelsen initiativ til etablering af en gruppe med repræsentanter for miljøstyrelsen, sundhedsstyrelsen og Tilsynet med Nukleare Anlæg til at forestå miljøstyrelsens vurderingsarbejde. Energiministeriet har deltaget som observatør i gruppen. Danmarks Geologiske Undersøgelse (DGU) blev knyttet til gruppen som geologisk konsulent.

Gruppen holdt sit første møde den 12. august 1981.

I februar 1982 ændredes DGUs tilknytning til gruppen således, at DGU fik direkte repræsentation. Siden februar 1982 har to sagkyndige på henholdsvis kemi og korrosion været tilknyttet gruppen.

Gruppen har herefter haft følgende sammensætning.

Fra miljøstyrelsen:

Civilingeniør Leif Mortensen (formand)
Civilingeniør Bjørn Thorlaksen
Cand.scient. Kurt Overgaard
Cand.jur. Kirsten Leth, udtrådt december 1982.

Fra sundhedsstyrelsen:

Civilingeniør Leif Hannibal, afløst juni 1982 af
Cand.scient. Thomas Laursen, afløst august 1983 af
Cand.scient. Søren Damgaard, afløst i januar 1984 af
Cand.scient. Kaare Ulbak

Fra Tilsynet med Nukleare Anlæg:

Civilingeniør Aage Jensen, afløst september 1981 af
Civilingeniør Henning Jensen.

Fra Danmarks Geologiske Undersøgelse:

Statsgeolog Lars Jørgen Andersen
Statsgeolog Ole Winther Christensen.

Som faste konsulenter for gruppen har virket:

Afdelingsleder Hans Arup, Korrosionscentralen ATV
Afdelingsleder Bror Skytte Jensen, Forsøgsanlæg Risø.

Energiministeriets observatør har været kontorchef T. Terkel-Nielsen, afløst af fuldmægtig Mogens Houe i oktober 1982.

I nærværende rapport redegøres for gruppens vurderinger af elværkernes rapport om deponering af højaktivt affald fra danske kernekraftværker. Redigeringsarbejdet på rapporten afsluttedes marts 1984.

1.2. ELVÆRKERNES UNDERSØGELSER.

I maj 1976 vedtog folketinget en ny lov om proceduren for godkendelse af atomanlæg ud fra sikkerheds- og miljømæssige hensyn. Lovens ikrafttræden blev dog udskudt ud fra et politisk ønske om, at en række spørgsmål i forbindelse med anvendelse af kernekraft blev yderligere belyst, blandt andet spørgsmålet om forsvarlig deponering af højaktivt affald fra kernekraftværker.

På denne baggrund besluttede bestyrelserne for ELKRAFT og ELSAM efter samråd med handelsministeriet at undersøge mulighederne for deponering af højaktivt affald i Danmark.

Elværkernes undersøgelsesprogram for etablering af et deponeringsanlæg for affald kan inddeles i tre faser. Fase 1 omfatter indledende vurderinger på generelt grundlag til belysning af behovet og mulighederne for at etablere et deponeringsanlæg. I fase 2 foretages forarbejder, målinger og prøveboringer m.v. på et antal lokaliteter som grundlag for dokumentation for, at deponering af affaldet vil kunne gennemføres på betryggende måde. I fase 3, der forudsætter konkret behov for deponering af affald, udføres yderligere undersøgelsesboringer og detaljerede tekniske undersøgelser til udpegning af deponeringssted og endelig projektering af deponeringsanlæg. I sidstnævnte fase indgår den lovgivne myndighedsbehandling for opnåelse af plads-, bygge- og driftstilladelse.

Fase 1.

Fase 1 påbegyndtes i 1977 og afsluttedes i 1978 med en redegørelse for undersøgelsen og konklusionerne heraf.

Elværkerne valgte at undersøge mulighederne for deponering i stensalt. Dette valg begrundedes med, at formationer af stensalt i tykke lagserier eller horste har en række egenskaber, der gør dem egnede for deponering af radioaktivt materiale.

Der redegøres for situationen i udlandet med hensyn til deponering af højaktivt affald. Elværkerne bedømmer, at et dansk deponeringsprojekt i salt vil kunne basere sig på teknologi, som er, eller i nær fremtid vil være, gennemprøvet i udlandet, blandt andet Vesttyskland og USA. Dette har været medvirkende ved elværkernes valg af salt som værtsbjergart for et deponeringsanlæg.

Der redegøres for fremkomsten og behandlingen af højaktivt affald fra kernekraftværker, forholdene omkring oparbejdningsanlæg i udlandet samt behovet for affaldsdeponering med udgangspunkt i et kerneenergiprogram omfattende 6 kraftværksenheder. Idet elværkerne bedømmer, at det brugte brændsel vil kunne sendes til oparbejdning i udlandet, betragtes kun deponering af højaktivt affald indstøbt i glas. Direkte deponering af brugte brændselelementer er således ikke overvejet.

Den daværende viden om danske saltforekomster og specielt danske salthorste résummeres. Horstes geologi og saltbjergarters egenskaber beskrives generelt. Endvidere beskrives mulige udformninger af deponeringsanlæg i en salthorst med hovedvægt lagt på skakt-mineanlæg. Deponering i dybe huller boret fra jordoverfladen fremholdes som alternativ løsning. Ved anvendelse af foreliggende geologiske oplysninger for Vejrumssalthorsten foretages dimensioneringsberegninger for mineanlægget samt undersøgelse over affaldets varmepåvirkning på salthorsten.

Med udgangspunkt i den antagne anlægsudformning og ved anvendelse af generelle geologiske data behandles mekanismer og situationer, der kunne tænkes at resultere i frigørelse af radioaktive stoffer fra anlægget. Således betragtes mulige vekselvirkninger mellem affald og salt samt postulerede situationer, der kan ændre de forventede deponeringsforhold (jordskælv, lokale forkastningsskred, vandindtrængning).

Elværkernes vurdering på grundlag af fase 1 arbejdet er, at selvom man forventer at få det brugte reaktorbrændsel oparbejdet i udlandet, kan det ikke afvises, at det glassificerede højaktive affald på et tidspunkt måske skal kunne returneres til Danmark. Af den grund finder elværkerne det nødvendigt at gennemføre undersøgelser vedrørende bygning af et dansk placeret geologisk deponeringsanlæg.

Elværkernes konklusion er, at et deponeringsanlæg kan etableres i en egnet salthorst, og at egnede salthorste med stor sandsynlighed kan findes blandt de danske horste.

Fase 2.

Affaldsundersøgelsernes anden fase indledtes kort tid efter afslutningen af fase 1 med geologiske undersøgelser af danske salthorste.

Elværkernes oprindelige målsætning for fase 2 var "i en 2-årig periode at finde frem til mindst to danske salthorste på basis af feltundersøgelser og forarbejder, som tilsammen bekræfter, at disse horste er egnede til deponering af højaktivt affald".

Målsætningen blev i løbet af fase 2 ændret, jf. afsnit 1.3.2.

I forudsætningerne for undersøgelserne betoner elværkerne, at feltundersøgelserne har til formål at skaffe materiale til projektering og sikkerhedsbedømmelse af deponeringsanlæg til højaktivt affald, men at materialet ikke vil omfatte detaljerede specifikationer og data for et bestemt anlæg i en udpeget horst, ligesom feltundersøgelserne ikke omfatter bygning af skaktanlæg og brydning af underjordiske minegange.

Elværkerne udvalgte indledningsvis 6 nordjyske salthorste for geofysiske målinger fra jordoverfladen. Efter analyse af resultaterne herfra besluttedes det at udføre to dybe prøveboringer i hver af horstene ved Linde og Mors. Ved dette valg blev taget i betragtning, at salthorsten ved Vejrum blev undersøgt af ELSAM i 1973 ved tre dybe prøveboringer.

Den første dybe prøveboring blev udført på Lindehorsten. Først i dybden ca. 1900 m blev salt anboret, betydeligt dybere end forventet. Bedømmelsen af resultaterne herfra førte til, at borearbejdet på Linde blev standset, og at feltundersøgelserne herefter blev koncentreret om Morshorsten. Her blev udført 2 dybe boringer med ca. 1 km's afstand (Erslev I og Erslev II) til ca. 3,5 km's dybde. Salt blev anboret i henholdsvis 600 og 750 m's dybde. Geologiske data er indhentet fra boringerne ved udtagning af kerneprøver og ved sondemålinger af forskellig art. Dæklagene over horsten er undersøgt ved 4 boringer til 550 m's dybde. Målinger i disse boringer tager særligt sigte på beskrivelse af dæklagenes hydrogeologi.

Undersøgelserprojekttet blev ledet af el-værkerne, og arbejdet er udført af danske og udenlandske entreprenører, konsulenter og laboratorier. En betydelig konsulentbistand er ydet af DGU.

Resultaterne fra de foretagne feltundersøgelser og tilhørende laboratoriemålinger på prøver er benyttet ved anlægstekniske og sikkerhedsmæssige bedømmelser.

Anlægsteknisk er undersøgt muligheder for etablering af såvel et dybhulsanlæg som et skakt-mineanlæg. Elværkerne har valgt dybhulsanlægget som det foretrukne eksempel på udformning af et deponeringsanlæg, og dette er lagt til grund for de sikkerhedsmæssige vurderinger.

Sikkerhedsvurderingen består af en gennemgang og undersøgelse af mekanismer og hændelser, der kunne tænkes at føre til frigørelse af radioaktive stoffer fra det forseglede deponeringsanlæg til menneskets miljø.

Under forløbet af projektet har elværkerne fremsendt 109 delrapporter til myndighederne for at informere om foreløbige undersøgelses- og vurderingsresultater. En række af disse delrapporter er tillige udarbejdet som uddybende dokumentation for elværkernes afsluttende hovedrapport, der forelå i sommeren 1981. Denne rapport omfatter følgende 5 bind:

- I Sammenfatning
- II Geologi, tekst og figurer
- III Materialeprøvning
- IV Deponeringsanlæg
- V Sikkerhedsredegørelse

Ved fremsendelsen af rapporten til miljøministeriet udtaler elværkerne, at denne og delrapporterne tilsammen indeholder dokumentation for, at højaktivt affald fra eventuelle kommende danske kernekraftværker kan deponeres på en efter elværkernes opfattelse betryggende måde i en salthorst i Danmark.

Som hovedresultat af fase 2 undersøgelserne anfører elværkerne:

"Et stort saltområde bestående af rent natriumklorid med spredte spor af anhydrit (kalciumsulfat) og lavt vandindhold varierende mellem 0 og 0,1% er lokaliseret ved to dybe saltboringer i horsten på Mors. Med dette område som eksempel er det anlægsteknisk dokumenteret, at der her med brug af kendt teknologi vil kunne placeres et deponeringsanlæg i form af otte dybe boringer med stor diameter til 2500 m dybde. Det er endvidere teknisk muligt at indkapsle affaldet i stålbeholdere, sådan at affaldet bliver beskyttet mod saltformationens mekaniske påvirkninger samt mod udludning.

For det forseglede anlæg med den omgivende geologi er der udført en sikkerhedsredegørelse omfattende glasset, hvori det højaktive affald er indlejret, stålbeholderen, saltet, horsten og kalklagene over horsten. Den viser, at kun begivenheder, som indbefatter vandindtrængning til anlægget, f.eks. via fremtidige menneskeskabte forstyrrelser, har potentiel betydning for sikkerheden. Undersøgelsesresultaterne viser, at selv ekstreme situationer medfører så små lækager af radioaktivitet fra systemet, at der efter opblanding i ferskvandsområder er tale om koncentrationer, som er ubetydelige i forhold til de værdier, der hidrører fra det naturlige indhold af radioaktivitet.

Kerneprøverne fra de to saltboringer er tillige indgået i en fornyet gennemgang af eksisterende kerneprøver fra tidligere saltboringer i andre større horste i området. Det fremgår heraf, at horste som Batum, Mors, Uglev, Vejrum og Mønsted rummer saltområder, som er særlig velegnet til placering af et deponeringsanlæg. Disse horste kan derfor indgå i valget, når der til sin tid skal udpeges en foretrukken placering af et eventuelt dansk anlæg."

1.3. MYNDIGHEDERNES SAGSBEHANDLING.

1.3.1. Fase 1.

Resultatet af elværkernes undersøgelsesfase 1 blev vurderet af en arbejdsgruppe fra miljøministeriet og handelsministeriet.

Gruppen udtalte i et notat af 20. august 1978, at fase 1 rapporten giver grundlag for en ubetinget positiv vurdering af mulighederne for ved de foreslåede undersøgelser at finde en til betryggende deponering egnethed salthorst. Arbejdsgruppen tilføjer, at den under hensyn til begrænset tid ikke har kunnet tage endelig stilling til forslagene i rapporten, men kun har givet en foreløbig vurdering i lyset af viden om udenlandske planer for løsning af affaldsspørgsmålet.

1.3.2. Fase 2.

Tværministerielt udvalg.

Til varetagelse af de statslige interesser i forbindelse med elværkernes fase 2 undersøgelser besluttede miljøministeriet og energiministeriet at nedsætte et tværministerielt udvalg med repræsentanter fra miljøstyrelsen, Tilsynet med Nukleare Anlæg, sundhedsstyrelsen, energiministeriet, energistyrelsen og Forsøgsanlæg Risø. Udvalget skulle være forum for gensidig orientering og koordinering i forbindelse med undersøgelsesarbejdet.

Nedsættelsen af udvalget ændrer ikke ved den gældende opgavefordeling inden for kerneenergiområdet, hvorefter energiministeriet varetager de energipolitiske interesser, medens miljøministeriet har ansvar for og varetager den miljø- og sikkerhedsmæssige myndighedsbehandling af kernekraftanlæg, herunder eventuelle anlæg til deponering af højaktivt affald i Danmark.

Efter årsskiftet 1978/1979 forelå for det tværministerielle udvalg elværkernes målsætning og principprogram for fase 2 undersøgelserne.

Under undersøgelsesarbejdet blev det tværministerielle udvalg orienteret om justeringer i planlægning, mål og ressourceforbrug i forhold til planlægningsgrundlaget.

Det tværministerielle udvalg tilkendegav, at selv om hovedsigtet med elværkernes arbejde var at undersøge mulighederne for deponering af glassificeret højaktivt affald, så udvalget gerne, at elværkerne ud fra de pågående undersøgelser overvejede mulighederne for deponering af ikke oparbejdet, brugt brændsel. Elværkerne oplyste, at de ikke så sig i stand til at følge denne opfordring, da planlægningsgrundlaget i så fald måtte ændres.

I fase 1 var undersøgelserne primært centreret om et skakt-mineanlæg. Under fase 2 undersøgelserne er et dybhulsanlæg gjort til undersøgelseens hovedalternativ under hensyntagen til den forholdsvis lille mængde højaktive affald fra et dansk kernekraftprogram. Det tværministerielle udvalg har i denne forbindelse bemærket, at elværkernes undersøgelser alene har til formål at dokumentere mulighederne for deponering af højaktivt affald, men samtidig konstateret, at dokumentationen for muligheden for deponering af højaktivt affald i et skakt-mineanlæg i højere grad end dokumentationen for dybhulsløsningen giver grundlag for at belyse forholdene ved deponering af mellemaktivt affald.

Stigende ressourcebehov medførte, at elværkerne over for det tværministerielle udvalg tilkendegav, at det inden for de fastlagte rammer ikke var muligt - på samme niveau - at dokumentere "mindst to danske salthorste" egnede til deponering af højaktivt affald, hvilket udvalget i overensstemmelse med sit kommissorium meddelte regeringens energiudvalg.

Miljøstyrelsens opfølgning.

I egenskab af nuklear sikkerhedsmyndighed og koordinerende led for de miljøministerielle interesser nedsatte miljøstyrelsen en styringsgruppe i forbindelse med elværkernes planlægning for fase 2.

Gruppen, hvis medlemmer var repræsentanter fra Tilsynet med Nukleare Anlæg, miljøstyrelsen og sundhedsstyrelsen, begyndte arbejdet i januar 1979. Gennem en

række møder har gruppen diskuteret planlægning af undersøgelsesarbejdet med elværkerne og rådgivet dem med hensyn til indhentning af ekspertbistand fra relevante institutioner.

Arbejdet i styringsgruppen fortsatte under projektets gennemførelse, idet gruppen senere fik til opgave at følge undersøgelsen, at rådgive elværkerne og at vurdere delrapporter om undersøgelsesresultater og disses betydning for det fortsatte undersøgelsesarbejde.

Gruppen har løbende orienteret miljøstyrelsen om sit arbejde og periodisk udarbejdet notater med henblik på drøftelserne i det tværministerielle udvalg.

Miljøstyrelsens vurderingsgruppe.

Vurderingsgruppens oprettelse og sammensætning er omtalt i nærværende rapports indledning. Som omtalt fik gruppen til opgave at forestå miljøstyrelsens vurdering af elværkernes afsluttende rapport om fase 2. Rammerne for gruppens opgave fremgår af miljøstyrelsens notat af 11. juni 1981.

"Gruppen vil have til opgave at forestå vurderingsarbejdet og som basis herfor at bearbejde overordnede krav med henblik på deres praktiske anvendelse i dette arbejde samt at koordinere eventuel indhentning af bistand til slutvurderinger fra uafhængige faglige institutioner her i landet og i udlandet."

Vedrørende overordnede krav henvises i notatet til forslag til overordnede sikkerhedskrav til deponering af højaktivt affald udarbejdet af en arbejdsgruppe under miljøstyrelsen, jf. afsnit 2.5.

I spørgsmålet om overordnede sikkerhedskrav har vurderingsgruppen taget udgangspunkt i ovennævnte forslag med den videre bearbejdning, som fremgår af miljøstyrelsens notat af 2. juli 1981 om overordnede krav til geologisk deponering af højaktivt affald.

Elværkerne har under projektets forløb fremsendt 109 delrapporter til myndighederne. Disse rapporter omhandler arbejdsplaner og resultater m.m. fra de enkelte delundersøgelser samt forberedende arbejde med beregningsmodeller og bearbejdning af berørte, konkrete emner. I overensstemmelse med det tværministerielle udvalgs ønske om at få fremmet myndighedernes vurderingsarbejde blev Tilsynet

med Nukleare Anlæg af miljøstyrelsen anmodet om at gennemgå udvalgte delrapporter under inddragelse af uafhængige konsulenter på særlige fagområder. Tilsynet har fra dette arbejde afgivet 17 rapporter, der dækker delrapportemner, som måtte forventes at indgå centralt i elværkernes endelige dokumentation om sikkerhedsmæssige og miljømæssige forhold. Til Tilsynets udtalelser knytter sig 20 konsulentrapporter.

Materiale, der ligger til grund for vurderingsgruppens bedømmelser, er følgende:

- Elværkernes hovedrapport og delrapporter.
- Tilsynets udtalelser om delrapporter med tilhørende konsulentvurderinger.
- DGU's vurderingsrapport, december 1982.

Sidstnævnte rapports kapitel 5 og 9 om henholdsvis Morshorstens og de øvrige salthorstes geologi, indeholder DGU's besvarelse af konsulentopgaver for miljøstyrelsen og Tilsynet i forbindelse med delrapportgennemgangen.

Vurderingsgruppen har under behandlingen af ovennævnte materiale foranlediget, at der ved de deltagende institutioner og af gruppens konsulenter er udarbejdet vurderingsnotater m.v. om delemner. Gruppen har i forbindelse med arbejdet indhentet udtalelse fra Geodætisk Institut om seismiske forhold. Endvidere har miljøstyrelsen ladet udarbejde en rapport hos Institut for Teknisk Geologi, Danmarks Tekniske Højskole, om Morsstrukturens naturlige bevægelse.

2. GENERELT OM HØJAKTIVT AFFALD.

2.1. INDLEDNING.

Energiudviklingen i et kernekraftværk sker ved spaltning (fission) af uran i reaktorens brændselelementer. Ved spaltningen dannes fissionsprodukter og samtidig dannes transuraner ved neutronindfangningen i uran. Såvel fissionsprodukterne som transuranerne er radioaktive.

2.2. RADIOAKTIVITET.

Radioaktive stoffer består af ustabile atomer, som under udsendelse af stråling omdannes til andre stoffer, der kan være radioaktive eller stabile. Antallet af ændringer, henfald, pr. tidsenhed i et radioaktivt stof kaldes aktivitet, der måles i enheden curie.

I forbindelse med radioaktive stoffer bruges udtrykket halveringstid, der angiver hvor lang tid det tager, før antallet af radioaktive atomer er halveret. Halveringstiden er karakteristisk for hver enkelt radioaktiv isotop. Der findes kortlivede radioaktive isotoper med halveringstider på brøkdeler af sekunder, og langlivede radioaktive isotoper med halveringstider på millioner af år.

Strålingen fra radioaktive stoffer kan bestå af alfapartikler, betapartikler, elektromagnetisk (gamma) stråling og neutroner. Ved bestråling af materialer afgives strålingsenergi, og der dannes varme. Energiafsættelsen pr. masseenhed materiale måles i enheden rad.

Bestråling af materiale kan medføre forandringer i dettes atomer og molekyler. Levende væv kan skades herved. Virkningen afhænger, foruden af energiafsættelsen, af strålingstypen og de enkelte strålingspartiklers energi. For levende væv angives den biologiske virkning af en bestråling i enheden rem fælles for alle strålingsarter.

2.3. AFFALDSMÆNGDER OG -FORMER.

Et kernekraftværk på 1000 megawatt elektrisk effekt indeholder omkring 100 tons uranbrændsel, hvoraf ca. 1/4 udskiftes hvert år. I de 25 tons brugt uranbrændsel, der udskiftes om året, findes typisk et restindhold af uran-235 på 250 kg samt 1000 kg fissionsprodukter og 300 kg transuraner, heraf ca. 250 kg plutonium.

Fissionsprodukter og transuraner, bortset fra plutonium, udnyttes ikke. De er derfor at betragte som affald, som må bortskaffes, deponeres.

Man kan vælge mellem at betragte de brugte brændselelementer i sig selv som højaktivt affald eller at udvinde plutoniet og uranet (oparbejde) og betragte restproduktet som højaktivt affald. I dette valg vil indgå overvejelser om værdien af at bevare energiresourcer, ulemperne ved anvendelse af plutonium i brændselskredsløbet, økonomien og sikkerheden ved oparbejdningsprocessen samt forskelle i sikkerhedsproblematikken ved bortskaffelse af højaktivt affald med og uden indhold af plutonium.

Ved udtagningen fra reaktoranlægget er det brugte brændsel stærkt radioaktivt. Der kræves kraftig afskærmning mod strålingen og køling er nødvendig. For at udnytte, at radioaktiviteten aftager hurtigt i de første år, stilles de brugte brændselelementer på mellemlager i en årrække, inden de enten oparbejdes eller deponeres.

Affaldet fra oparbejdningen er flydende, men bringes på fast form inden deponering. Den mest gennemarbejdede og undersøgte metode består i at lade affaldet indgå som bestanddel i borsilikatglas. Affaldet kan udgøre mellem ca. 9-20 vægtprocent af glasset med tilfredsstillende egenskaber for glasset i henseende til stabilitet, varmeledningsevne, styrke og modstand mod opløsning (udludning) af glasset.

Keramisk materiale undersøges også som indstøbningsmateriale, men på nuværende tidspunkt er kun glas undersøgt og afprøvet i industriel skala.

Som afskærmning mod stråling og beskyttelse mod ydre påvirkninger forventes det indstøbte højaktive affald eller, i tilfælde af direkte deponering af brændslet, brændselelementerne indkapslet i tykvæggede beholdere af materiale med stor modstand mod korrosion.

Aktiviteten af det højaktive affald domineres i de første ca. 500 år af fissionsprodukterne. Herefter vil kun findes enkelte meget langlivede fissionsprodukter, der sammen med indholdet af uran og transuraner bestemmer aktiviteten fremover. Regnet fra 1 år efter udtagningen af det brugte brændsel fra reaktoren er aktiviteten 100 gange mindre efter 100 år, og 10.000 gange mindre efter 1000 år. Efter 100.000 år er aktiviteten 100.000 gange mindre. Tilsvarende fald gør sig gældende for varmeudviklingen i affaldet.

2.4. DEPONERING.

Højaktivt affald må anbringes således, at det ikke kommer i berøring med mennesker. Under hensyn til det lange tidsperspektiv må bortskaffelsen ske, således at overvågning ikke bliver nødvendig. Denne form for bortskaffelse kaldes deponering.

Der har gennem tiderne været fremsat mange forslag til deponering af højaktivt affald blandt andet udskydning i rummet, anbringelse og nedsmeltning i indlandsisen, nedboring i dyb havbund. Nu pågående arbejde er hovedsageligt centreret om undersøgelse af mulighederne for deponering i geologiske formationer.

Hensigten med denne form for isolering af affaldet er, at indkapslingen af affaldet, de geologiske formationer og afstanden mellem affaldet og menneskets miljø skal hindre, at de radioaktive stoffer kommer tilbage til jordens overflade i betydelige mængder.

Indkapslingen af affaldet må tilpasses de omgivende geologiske forhold.

Til deponeringen søges tætte geologiske formationer f.eks. lerlag, krystallinske bjergarter, eller stensalt. Der findes ikke entydige grunde til at foretrække eller forkaste en enkelt af disse formationer frem for de øvrige. De enkelte landes foretrukne valg synes snarere begrundet i forekomst og placering af de pågældende geologiske formationer.

Uanset den geologiske formations art må det forud for deponeringens iværksættelse ud fra undersøgelser, forsøg og beregninger eftervises, at det højaktive affald ikke vil blive bragt tilbage til menneskers omgivelser i betydelige mængder.

Det må ud fra viden om det højaktive affalds egenskaber og de geologiske forhold i deponeringsområdet vurderes, om deponeringsanlæggets etablering og/eller vekselvirkning mellem affaldet og de omgivende geologiske formationer kan forårsage uheldige omstændigheder for deponeringen. Som et enkelt eksempel skal nævnes affaldets varmeafgivelse. Ved vurderingen må man være særlig opmærksom på processer, der kan medføre, at affaldet kommer i kontakt med vand.

Sammenfattende for geologisk deponering af højaktivt affald kræves således, at det højaktive affalds indkapsling sammen med de omgivende geologiske formationer skal udgøre hindringer mod affaldets tilbagevenden til det menneskelige miljø.

2.5. MILJØSTYRELSENS FORSLAG TIL OVERORDNEDE KRAV TIL DEPONERING.

Miljøstyrelsen har udarbejdet forslag til overordnede sikkerhedskrav til deponering af højaktivt affald. Iflg. disse krav skal deponering foretages således:

- at indholdet af radioaktive stoffer forhindres i at nå frem til biosfæren ved naturlige transportmekanismer i mængder og koncentrationer, der ikke ville kunne akcepteres efter gældende regler og principper for nutidig menneskeskabt forurening af naturen med radioaktive stoffer,
- at den sundhedsmæssige risiko for befolkningen i forbindelse med tænkelige frigørelser af affaldet til biosfæren ved voldsomme naturfænomener er forsvindende sammenholdt med andre menneskeskabte og naturbetingede risikomomenter,
- at sandsynligheden for fremtidige indgreb fra menneskers side i deponeringsstedet er lille, og at den sundhedsmæssige risiko for befolkningen herfra ligeledes er forsvindende sammenholdt med andre menneskeskabte risici.

I baggrundsmaterialet til forslag til overordnede sikkerhedskrav anføres, at affaldet ved deponeringens begyndelse indeholder væsentlige mængder af fissionsprodukter, hvis radioaktivitet forsvinder relativt hurtigt - over en periode på ca. 1000 år - på grund af henfald. Der er derfor grund til i deponeringens første periode at skabe yderligere sikkerhed gennem teknologiske (menneskeskabte) foranstaltninger såsom indkapsling og forarbejdning af affaldet mod strålingsrisiko

ved spredning af de radioaktive stoffer. Det nævnes endvidere, at som et arbejdsgrundlag for bedømmelsen af deponeringsløsninger forekommer det berettiget i alt væsentligt at begrænse tidsperspektivet til de nærmeste ca. 10.000 år.

I tyske sikkerhedsovervejelser, ref. A4, nævnes, at det ud fra sammenligning med referenceniveauer kan slutes, at giftigheden af affaldet efter ca. 10.000 år er aftaget så meget, at man for tidsrum større end 10.000 år kan stille sig tilfreds med grovere data og mere generelle betragtninger. For et tidsrum indtil ca. 10.000 år, i hvilket varmepåvirkningen spiller en væsentlig rolle for salthorsten, må man stille større krav til en sikkerhedsanalyse, hvad angår detaljeringsgrad og data.

Da det ikke ud fra rent tekniske overvejelser kan fastsættes, hvor lang en periode sikkerhedsvurderingen af en affaldsdeponering skal omfatte, har gruppen på baggrund af ovenstående som arbejdsgrundlag valgt en tidshorisont af størrelsesordenen 10.000 år.

3. GRUPPENS VURDERING AF ELVÆRKERNES UNDERSØGELSER.

3.1. INDLEDNING.

Elværkerne har i deres vurdering af sikkerheden ved deponering af højaktivt affald taget udgangspunkt i, at deponering er foretaget i et dybhulsanlæg i Morshorsten. Elværkerne har anført, at den gennemførte sikkerhedsvurdering principielt også gælder for et skakt-mineanlæg.

Gruppen har foretaget en vurdering af den af elværkerne gennemførte sikkerhedsvurdering. Gruppens vurdering er derfor koncentreret om dybhulsanlægget, mens der ikke er foretaget en egentlig vurdering af de sikkerhedsmæssige spørgsmål ved et skakt-mineanlæg. Endvidere er der foretaget en vurdering af, om det rent anlægsteknisk er muligt at etablere både et dybhulsanlæg og et skakt-mineanlæg i Morshorsten.

Vurderingen af om det rent teknisk er muligt at etablere de af elværkerne foreslåede deponeringsanlæg i Morshorsten er beskrevet i afsnit 3.2. Vurderingen af elværkernes sikkerhedsanalyse er beskrevet i afsnittene 3.3, 3.4 og 3.5.

Gruppen har i overensstemmelse med sit kommissorium ikke vurderet elværkernes bedømmelser af omkostninger ved at etablere de foreslåede anlæg.

3.2. ANLÆGSTEKNISKE FORHOLD.

Problemstilling.

Behandlingen af de anlægstekniske forhold har to formål.

For det første at afklare, hvorvidt det praktiske anlægs- og deponeringsarbejde kan forventes at være gennemførligt. I denne opgave vil indgå overvejelser om

- bjergværkstekniske metoder for etablering af depotrummene m.v.,
- saltforekomsternes mægtighed og rumlige udstrækning og de geologiske egenskaber af disse og dæklagene set i relation til bjergværkstekniske krav,
- forsegling af depotet betragtet som et anlægsteknisk arbejde,
- affaldets emballering og håndteringsproceduren under hensyntagen til blandt andet strålingsbeskyttelsen af personalet og mekanisk beskyttelse af affaldet under deponeringsarbejdet.

For det andet at få forudsætninger for en realistisk vurdering af deponeringssikkerheden efter depotets forsegling. Sådanne forudsætninger vedrører blandt andet depotets geometri og placering i salthorsten samt langtidsegenskaberne af affaldet, affaldsbeholderne og depotkonstruktioner, herunder forseglingen, under de påvirkninger, som kan forventes fra omgivelserne.

Elværkernes eksempler på anlæg.

Elværkernes behandling af de anlægstekniske forhold er beskrevet i hovedrapporten. Der er betragtet to eksempler på anlægsudformning, et mineanlæg og et dybhulsanlæg.

Detaljeret projektering og bygning af et deponeringsanlæg er forudsat først at skulle finde sted, når der foreligger et konkret behov for deponering af højaktivt affald. Anlægsudformningen i fase 2 undersøgelserne er derfor eksempler, der må anses for at være repræsentative for eventuelt kommende deponeringsanlæg.

Elværkerne har taget udgangspunkt i, at det brugte brændsel oparbejdes. Som reference for affaldsenhederne er valgt affald indstøbt i glas, som det kan leveres fra det statslige franske oparbejdningsselskab COGEMA. Beholderne er af fransk standardkonstruktion. Glasset er borsilikatglas.

Det forudsatte kernekraftprogram på 6000 megawatt installeret elektrisk effekt i 25 år svarer til et samlet forbrug af ca. 4500 ton uranbrændsel. Oparbejdning af

det brugte uranbrændsel resulterer i ca. 170 tons højaktivt affald, der indstøbt i glasmasse vil fylde ca. 700 m³. Der er her forudsat, at glasmassen indeholder 9 vægtprocent affald.

Det glassificerede affald er forudsat indstøbt på oparbejdningsanlægget i tyndvæggede kapselbeholdere med en diameter på 35 cm og en højde på 1,8 m. Dimensionen svarer til praksis i Frankrig. Affaldet pr. år fra et 1000 megawatt reaktoranlæg vil fylde 30 beholdere.

Før deponeringen anbringes kapselbeholderne i tykvæggede beholdere, affaldsbeholdere, der giver strålingsafskærmning, mekanisk styrke og beskyttelse af affaldskapslerne mod vand. Affaldsbeholderne tænkes udført af blødt stål. Vægtykkelsen er sat til 15 cm.

I mineudformningen omgives hver kapselbeholder af en affaldsbeholder. Ved dybhulsløsningen rummer hver affaldsbeholder tre stablede kapsler.

Elværkerne har anvendt de tyske bjergværkstekniske firmaer Kavernen Bau und Betriebs GmbH og Thyssen Schachtbau GmbH som konsulenter på de neden for skitserede anlægs løsninger. Desuden har elværkerne indhentet prækvalifikations-tilbud på udførelse af dybhulsanlægget fra det rådgivende ingeniørfirma Fenix and Scissons INC i samarbejde med entreprenørfirmaet Loffland Brothers Company i USA.

Skitseprojekterne som helhed er baseret på de geologiske undersøgelsesresultater for Morshorsten. Til grund for overvejelserne om bygning af skakter og boring af dybe huller er lagt resultaterne af undersøgelserne omkring den ene dybe boring, Erslev II, i Morshorsten.

Det skitserede mineanlæg er udformet som et minegalleri i 1000 m's dybde. Minegalleriet bestående af hovedgang, ventilationsgang og 24 sidegange er forbundet til jordoverfladen med 2 skakter. Affaldsbeholderne deponeres vandret i forlængelse af hinanden i sidegangene. Gangsystemet dækker et kvadratisk areal med sidelængden 1100 m.

Mineanlæggets skakter tænkes foret med stålplader til en dybde af 750 m, d.v.s. ca. 15 m ned i saltet. På den resterende strækning ned til 1000 m's dybde forstærkes skaktvæggene med stålnet forankret i saltet. Minegangene bygges fritstående.

Elværkernes konsulent Thyssen Schachtbau anfører, at det med foreliggende udstyr og byggeteknik er muligt at etablere skakter til 1350 m's dybde, idet denne dybde dog må betragtes som ganske stor set på baggrund af praksis for anlæg af saltminer.

For mineanlægget gælder, at minegang med hovedskakt, ventilationsskakt og ventilationsgang skal etableres som en samlet arbejdsopgave og opretholdes under den forudsatte driftsperiode på 25 år. De enkelte sidegange derimod udgraves og fyldes i takt med behovet for deponeringsplads. Når anlægget som helhed skal lukkes, fyldes minegangene op med salt og skakterne forsegles med en lagdelt pakning, der har betonitbeton og asfalt som hovedbestanddele.

Dybhulsanlægget er skitseret som 8 huller placeret på en cirkel med en diameter på 500 m, boret til en dybde af 2500 m fra jordoverfladen. Hvert hul har en diameter på 75 cm. Afstanden mellem to nabohuller er ca. 200 m.

De dybe huller fores med stålrør til 950 m's dybde d.v.s. ca. 200 m ned i saltformationen. Mellemrummet mellem foring og saltvæg udstøbes med cement. Den resterende strækning til 2500 m's dybde fores ikke.

Ved dybhulsanlægget foregår alle operationer fra jordoverfladen. Anlægstypen indebærer, at affaldet skal opsamles på lager svarende til depotkapaciteten af et enkelt dybhul, hvilket modsvarer affaldsmængden fra et 1000 megawatt reaktor-anlæg i en driftsperiode på 18 år.

Det er forudsat, at boremudder udskiftes med mættet saltopløsning (brine) efter etableringen af et dybhul. Affaldsbeholderne nedsænkes i brinen samtidig med, at den resterende brine fortrænges af cementudstøbning. Fyldning af et dybhul forventes at tage ca. 3 måneder.

Boring af dybhullet, nedføring af affaldsbeholderne og forsegling kan foretages i sammenhængende arbejdsoperationer. Beholderne stables til 1200 m under terræn. Forseglingen videre op sker med knust salt til toppen af salthorsten og i resten af foringsrøret med asfalt.

Elværkerne har undersøgt, i hvilket omfang saltflydning omkring den nedre del af borehullerne vil medføre, at disse indsnævres. Hulindsnævringen er undersøgt dels ved en teoretisk beregning, dels ved direkte målinger i prøveboringen Erslev II. På baggrund af de gennemførte undersøgelser konkluderer elværkerne, at saltflydning

omkring deponeringshuller vil være helt uvæsentlig under driften af disse. Det anføres, at der under driften af et deponeringshul vil blive udført regelmæssige målinger af hullets diameter for hele tiden at overvåge saltflydningens forløb.

Elværkernes beholderudformninger er fastsat dels ud fra belastningsforhold i deponeringsanlæggene, dels under hensyntagen til nødvendig strålingsafskærmning og korrosionsforhold.

Beholderne foreslås fremstillet af et rør af finkornet blødt stål med elektropå-svejst bund og låg af samme materiale. Svejsningerne kan gennemføres med dagens teknologi. Det anføres, at både stålrør og -plader til bund og låg kan leveres i de nødvendige dimensioner.

Den dybest deponerede beholder vil ligge i 2500 m's dybde i dybhulsanlægget. Denne vil være belastet dels fra omgivende formationer, dels fra de ovenliggende beholdere og forseglingen. Beholderne beregnet for mineanlægget vejer ca. 5 ton iberegnet én kapselbeholder med glassificeret affald, mens dybhulsbeholderne vejer ca. 13 ton iberegnet 3 kapselbeholdere med glassificeret affald.

Elværkernes beregninger af beholdernes mekaniske styrke viser, at spændingsgrænser for eventuelt deformation af beholderne ligger en til to størrelsesordener over de forventede spændinger.

I tilknytning til de nævnte beregninger er der også undersøgt beholdernes spændingstilstand som følge af strømning af saltet. For en antagen strømningshastighed på 50 cm pr. 1000 år findes disse spændinger helt ubetydelige.

Elværkerne har undersøgt spændinger forårsaget af såvel den geotermiske varme-påvirkning som varmeudviklingen i det højaktive affald i deponeringshullet. Disse spændingsbidrag er angivet at være ubetydelige.

Ved såvel dybhuls- som mineløsningen foreslår elværkerne som forseglingsmateriale fra jordoverfladen og ned under saltoverfladen anvendt asfalt tilsat kalksten. Materiale med denne sammensætning har en vægtfylde på ca. 1,3 g/cm³. Trykket af den plastiske asfaltsøjle vil således overstige trykket af en tilsvarende vandsøjle, hvorved der sikres tæthed mod nedsivning af grundvand. Under asfaltforseglingen benyttes en kombination af materialer. Ved mineløsningen opfyldes minegangene med knust salt og hver sidegang lukkes med en betonavæg.

Konsulentvurdering.

Ved gennemgangen af elværkernes materiale om de anlægstekniske forhold, har myndighederne fået bjergværksteknisk konsulentbistand af professor, dip.ing. Helmut Eichmeyer og professor, dr.ing. Helmut Wolff fra Institutet for Bjergværksvidenskab ved Berlins Tekniske Universitet, ref. K8. DGU har vurderet seismiske undersøgelser til fastlæggelse af Morshorstens ydre form, ref. K16.

Myndighedernes bjergværkstekniske konsulenter anser de geologiske udgangsbetingelser for Morshorsten for lovende for etablering af et deponeringsanlæg, men det bemærkes, at yderligere information er nødvendig for endelig stillingtagen. I forbindelse med en skakt-mineløsning vil horisontale undersøgelser i deponeringsniveau være påkrævet. Behovet herfor er underbygget af, at det ene borehul, Erslev I, i Morshorsten indeholder kalisalte. Det anføres, at selv om afstanden mellem borehullerne Erslev I og Erslev II er 1000 m kan det ikke udelukkes, at de favorable betingelser i Erslev II ikke vil være fremherskende selv i kort afstand fra hullet.

For et dybhulsanlæg undersøges selve deponeringsområdet direkte ved boreoperationen. Akcepteres en procedure hvor de borehuller, som har vist sig uegnede, ikke anvendes til deponering, kan udlægningen af dybhulsanlægget foregå mere fleksibelt end skakt-mineanlægget.

Konsulenterne finder det indlysende, at lade Erslev II boringen være placeringsstedet for den ene skakt i skakt-mineløsningen, og det anføres, at der formentlig foreligger tilstrækkelige oplysninger til udførelse af en detaljeret skaktkonstruktion. Såfremt dette ikke bedømmes at være tilfældet, foreslås det, at skakt nr. to undersøges og udgraves først. Såfremt afstanden mellem skakterne, som foreslået, kun er 80 m, forventes yderligere undersøgelser ved Erslev II at være unødvendige.

Videre finder konsulenterne, at skaktudgravning og skaktforing kan udføres med dagens teknologi, og at muligheden for eventuel nedfrysning af dæklagene omkring skaktudgravningen sikrer mod uforudsete ugunstige hydrogeologiske forhold over horsten.

Konsulenterne tilslutter sig de foreslåede fremgangsmåder for etablering af skakter og minegange. På enkelte punkter foreslås ændringer til overvejelse ved eventuel endelig projektering.

Konsulenterne anfører endvidere, at de foreslåede tværsnit af minegangene ikke vil give stabilitetsproblemer med de bjergmekaniske egenskaber af saltet, som er bestemt ved Erslev II boringen. Det anføres, at de udførte stabilitetsberegninger og modelforsøg er i overensstemmelse med normal praksis og vil opfylde sikkerhedskravene på det nuværende projekteringsstade.

Myndighedernes bjergværkstekniske konsulenter har gennemgået erfaringerne fra boring af store, dybe huller og finder, at de af elværkerne foreslåede huller kan etableres med eksisterende udstyr. Det bekræftes, at retningsafvigelser mindre end 1,5° ofte kræves i forbindelse med anlæggelse af kaverne i salt. Lille retningsafvigelse nødvendiggør lav borehastighed og hyppig retningskontrol.

Konsulenterne fremholder, at detailprojekteringen må indeholde præcise dimensioneringsberegninger for foringsrørene i den øvre del af borehullerne gennem dæklagene.

Saltflydning omkring den nedre del af borehullerne vil medføre, at disse gradvis indsnævres. Denne konvergens betegnes af konsulenterne som det måske mest væsentlige problem i forbindelse med dybhulsløsningen. De fremhæver, at det er vigtigt forud for etableringen af et dybhulsanlæg at udføre præcise undersøgelser og beregninger af konvergens.

Konsulenterne finder, at anbringelse af affaldsbeholdere i "tørre" huller uden brine næppe vil være mulig, og at driftstiden for brinefyldte huller på grund af konvergens bør være kort for at undgå klemning af affaldsbeholdere ved nedsænkningen. Klemning kan eventuelt forårsages ved opsvulmning af konstaterede anhydritlag.

Konsulenterne peger på, at der kan være en fordel ved at undlade at cementere affaldsbeholdere. Fordelen er, at saltet kryber sammen omkring beholdere og dermed på naturlig måde dækker de deponerede affaldsbeholdere.

I en samlet vurdering af dybhulsløsningen siger konsulenterne, at deponeringen af affaldsbeholdere i dybe huller i salt er en proces, der forsvarligt kombinerer kendt og prøvet teknik med gennemførelse af et nyt koncept. Der er svage punkter jf. ovenfor, hvor det anbefales at udføre yderligere undersøgelser eller beregninger, men ingen af de rejste kritikpunkter anses for så alvorlige, at de vil forhindre gennemførelsen af dybhulsløsningen.

Myndighedernes bjergværkstekniske konsulenter har haft forskellige bemærkninger til de foreslåede forseglinger med henblik på at opnå optimale løsninger. Der er dog ikke rejst principielle indvendinger mod forseglingsmetoderne.

DGU har udtalt, at de seismiske undersøgelser er behæftet med en vis usikkerhed, men bekræftet, at rent geometrisk er det for de foreslåede anlæg nødvendige volumen tilstede.

Gruppens vurdering.

Ved gruppens behandling af anlægstekniske forhold er der taget hensyn til, at fase 2 har karakter som forprojekt og ikke indebærer en egentlig projektering.

Tilsynet med Nukleare Anlæg har foretaget supplerende undersøgelser for gruppen.

Morshorstens tværsnitareal er ifølge de udførte seismiske målinger godt 40 km² i 1000 m's dybde og ca. 60 km² i 1200 m's dybde. Tilsynet finder, at disse arealstørrelser samt horstens form giver rent geometrisk god marginal for placering af det skitserede mineanlæg, når der regnes med en mindsteafstand på 300 m mellem minegangene og horstens periferi.

Efter nærmere gennemgang af undersøgelsesresultaterne vedrørende saltflydningen i dybe huller finder Tilsynet, ref. VGI, at saltkrybningsrater af størrelsesorden 15% i løbet af 3-6 måneder ikke kan udelukkes. Ved placering af affaldsbeholderne i et deponeringshul under sådanne forhold kan det blive nødvendigt at oprømme hullet i driftsperioden. Ligeledes kan hulindsnævring som følge af en længere driftsafbrydelse nødvendiggøre oprømning, såfremt der ikke tages andre foranstaltninger i brug, som f.eks. midlertidig tryksætning af hullet. Tilsynet finder dog, at krybningsrater af ovennævnte størrelsesorden ikke vil forhindre affaldsbeholdernes placering i deponeringshullerne.

Elværkernes styrkeberegninger er gennemgået af Tilsynet, ref. TD4.

Beregningerne forudsætter, at beholderne er intakte, og der er ved beregningerne kun taget hensyn til påvirkninger under normale forhold.

Den mekaniske belastning af affaldsbeholderne vil stige i takt med deponeringsdybden. Tilsynet finder, at styrke- og stabilitetsberegninger udført for den dybest liggende beholder i dybhulsanlægget vil være dækkende for alle andre beholdere i begge eksempler på depotudformningen.

Efter gennemgang af elværkernes beregninger er det Tilsynets opfattelse, at undersøgelsens omfang vedrørende affaldsbeholdernes spændingsforhold i forbindelse med etablering af de foreslåede deponeringsanlæg er tilstrækkeligt i nærværende fase 2. Selvom beregningerne er forenklede, giver resultaterne et rimeligt godt indtryk af spændingsforholdene i den dybestliggende affaldsbeholder. De fundne spændinger viser, at affaldsbeholderne har den fornødne styrke og stabilitet for den praktiske gennemførelse af deponeringen. Ved den detaljerede konstruktionsudførelse i en eventuel næste fase vil der dog kræves nærmere redegørelse for forhold som følge af uhensigtsmæssig deponering, som f.eks. skæv placering og dermed skæv belastning af beholdere i depotet, eller de påvirkninger, en beholder kan udsættes for ved eventuelt tab af beholder ned i deponeringsanlægget, idet der ikke er fremlagt dokumentation herfor.

I tilknytning til de nævnte styrkeberegninger er der også undersøgt beholdernes spændingstilstand som følge af strømning af saltet. For en strømningshastighed på 50 cm pr. 1000 år findes disse spændinger helt ubetydelige, dog forudsat, at der ikke er sket væsentlige tæring i beholderne.

Spændinger som følge af såvel den geotermiske varmepåvirkning som varmeudviklingen i det højaktive affald i deponeringshullet er ubetydelige.

Hvad angår indstøbning af affald i glas henvises til, at glassificering af højaktivt affald har været gennemført i industriel skala i Frankrig siden 1978 på oparbejdningsanlægget ved Marcule. Glassificering af højaktivt affald kan således betegnes som kendt teknologi, og det er i industriel skala demonstreret, at processen kan styres således, at ensartede produkt egenskaber opnås. Gruppen finder, at produkt egenskaberne foreligger belyst gennem forskningsresultater i fornødent omfang til bestemmelse af det glassificerede affalds langtidsegenskaber ved geologisk deponering.

På baggrund af konsulentudtalelser finder gruppen, at de foreslåede metoder til forsegling giver grundlag for at antage tæthed af adgangsvejen mellem overfladen og deponeringsstedet for både dybhuls- og mineløsningen. Det må konservativt

antages, at alle affaldsbeholdere i et enkelt dybhul umiddelbart efter forseglingen ved eventuel vandindtrængning kan stå i forbindelse med hinanden; tilsvarende gælder for beholdere i en sidegang i et skakt-mineanlæg. På længere sigt, nogle hundrede år, forventes det, at krybningen vil kompaktere knust salt som fyldningsmateriale til en sammenhængende tæt masse.

Gruppens konklusion.

Nærværende konklusioner sammenfatter gruppens stillingtagen til, om elværker-nes skitserede udformninger af affaldsenheden og deponeringsanlæg er baseret på kendt teknologi, og om de kan antages at være gennemførlige efter den nødvendige detaljerede projektering med tilhørende videregående undersøgelser. Der er ikke taget stilling til spørgsmål om deponeringssikkerheden efter anlæggenes forsegling under hensyntagen til affaldets indhold af radioaktive stoffer. Dette behandles i efterfølgende afsnit.

Indsmeltning af højaktivt affald i glas gennemføres industrielt og processen kan styres således, at ensartede produkttegenskaber opnås. Produkttegenskaberne foreligger belyst gennem forskningsresultater i fornødent omfang til bestemmelse af det glassificerede affalds langtidsegenskaber ved geologisk deponering. Elværkernes antagelser om affaldsenhedernes udformning kan derfor godtages.

Fremstillingen af affaldsbeholderne er kendt teknologi, og der findes rimelige marginaler i beholderstyrke for de belastninger, som påføres under deponeringsforholdene. Ved detailprojektering bør styrken også verificeres for tænkelige uheldspåvirkninger, som f.eks. tab af en beholder under nedføring i et dybhul eller indbyrdes skæv placering af beholderne.

På basis af myndighedernes bjergværkstekniske konsulenter skønner gruppen, at det er teknisk gennemførligt med nutidig teknologi at etablere både et dybhulsanlæg og et skakt-mineanlæg i en egnet salthorst.

De geologiske undersøgelser af Morshorsten viser, at dens størrelse, form og dybdeforhold muliggør etablering af begge anlægsformer. De geologiske resultater fra den dybe undersøgelsesboring ved Erslev II findes af bjergværksteknisk sagkyndige tilfredsstillende for iværksættelse af videregående undersøgelser og anlægsarbejder til endelig afgørelse, om et mineanlæg eller et dybhulsanlæg

bestående af 8 huller kan etableres i området. Konsulenterne bemærker dog, at et mineanlæg forudsætter bygningen af en første skakt og undersøgelsesboringer herudfra. Dette krav underbygges af det faktum, at en af de to dybe boringer i Morshorsten, Erslev I, gik igennem skiftende lag af stensalt og kalisalte.

Hvad angår dybhulsanlægget kan situationen være anderledes. I dette tilfælde undersøges det direkte deponeringsområde ved selve boreoperationen. Akcepteres den procedure ikke at anvende de borehuller, som anlægstekniske undersøgelser viser er mindre fordelagtige, kan deponeringsanlægget udlægges mere fleksibelt end skakt-mineanlægget.

Konsulenterne anfører, at det væsentligste problem i forbindelse med dybhulsløsningen er, at flydning af salt medfører, at borehullerne gradvist indsnævres. Dette forhold kræver nærmere undersøgelser og bearbejdning under projekteringen for at undgå, at beholderne sætter sig fast under nedsækning.

Gruppen skal bemærke, at de bjergværkstekniske konsulenter har rejst en række kritikpunkter, som de dog ikke finder så alvorlige, at de vil forhindre gennemførelse af dybhulsløsningen.

På baggrund af bjergværkstekniske konsulentudtalelser findes, at der for både mine- og dybhulsanlægget kan udføres en tæt forsegling fra depotområde til jordoverfladen.

Håndtering af affaldsbeholdere vil kræve særligt udstyr af hensyn til strålingsbeskyttelsen af personalet. Erfaringer med sådant udstyr findes.

3.3. AFFALDET.

3.3.1. Indledning.

I elværkernes forslag til deponering af højaktivt affald er det forudsat, at brugt brændsel oparbejdes efter udtagning af reaktoren, og at det ved oparbejdningen fraseparerede højaktive affald glassificeres. Glas med affald omgives af en stålbeholder, og denne affaldsbeholder anbringes i en salthorst.

Affaldet påvirker deponeringsanlæggets omgivelser gennem sin varmeproduktion og udsendelse af ioniserende stråling. Et udgangspunkt for sikkerhedsvurderingen er således mængden og sammensætningen af affaldet, der er bestemmende for varmeproduktionen og strålingsudsendelsen.

3.3.2. Mængde og sammensætning af affald.

Problemstilling.

Radioaktive stoffer dannes i en reaktor i drift dels ved spaltning af uran til fissionsprodukter, dels ved omdannelse af uran til de såkaldte transuraner.

Brugt reaktorbrændsel indeholder mange forskellige radioaktive stoffer, som har halveringstider fra brøkdele af sekunder til mange tusinde år.

Mængde og sammensætning af det brugte reaktorbrændsel afhænger dels af den mængde energi, der er produceret med brændslet, dels af ved hvilken effekt reaktoren har produceret energi i den sidste tid før nedlukning.

Efter udtagning af reaktoren oparbejdes det brugte reaktorbrændsel. Ved denne proces udvindes hovedparten af plutoniet og uranet i brændslet. Restproduktet fra oparbejdningen udgør affaldet. Sammensætningen af affaldet ændrer sig med tiden, fordi affaldet består af radioaktive stoffer med forskellige halveringstider.

Elværkernes behandling.

Elværkerne har taget udgangspunkt i et kernekraftprogram omfattende 6 reaktorer på hver 1000 megawatt elektrisk effekt og med en driftstid på 25 år. Mængde og sammensætning af affald fra dette kernekraftprogram er angivet i hovedrapporten. Beregninger af den producerede mængde affald og sammensætning heraf er beskrevet i ref. 96 og ref. S1.

I beregningerne af indholdet af radioaktive stoffer i brugt reaktorbrændsel er forudsat, at affaldet stammer fra trykvandsreaktorbrændsel, der er udnyttet i reaktoren til 33.000 megawatt-dage pr. ton uran (1 megawatt-dag = 24.000 kilowatttimer) ved en konstant termisk effekttæthed på 24.4 megawatt pr. ton uran. Mængden af isotopen uran-235 i det oprindelige brændsel er sat til 3,1% af den totale mængde uran i reaktoren (berigning på 3,1%).

Det forudsættes, at oparbejdning og glassificering gennemføres 10 år efter udtagning af reaktoren, og at alle fissionsprodukter og alle transuraner overføres til glas, idet det dog antages, at 0,5% af det plutonium, der er i brugt reaktorbrændsel overføres til glas.

Hvad angår overførsel af uran til glas er det i ref. 96 ved beregninger af affaldets effektproduktion antaget, at 0,1% af uranet overføres til glas, hvorimod det i hovedrapporten ved beregning af affaldsmængde er forudsat, at 0,5% af uranet overføres til glas.

Hovedparten af plutoniet (99,5%) og uranet (99,9%) er således ikke affald, men forudsættes genanvendt til reaktorbrændsel. Det er endvidere forudsat, at glasmassen indeholder 9% affald (vægt).

Konsulentvurdering.

Afdelingen for Elektrofysik, Danmarks Tekniske Højskole, har ydet fagkyndig bistand i forbindelse med vurdering af beregningerne af mængde og sammensætning af affald, ref. K1 og ref. SK1.

Det er afdelingens vurdering, at de valgte forudsætninger for beregning af indholdet af radioaktive stoffer i brugt reaktorbrændsel er rimelige.

Med hensyn til overførsel af radioaktive stoffer fra det brugte reaktorbrændsel til glassificeret affald ved oparbejdning bemærker afdelingen, at (ædle) luftarter ikke overføres til affald ved oparbejdning.

Afdelingen har gennemført kontrolberegninger af affaldets indhold af fissionsprodukter, uran og transuraner. Afdelingen har konstateret visse afvigelser fra elværkernes resultater, men afvigelserne er efter korrektion af elværkernes beregninger så beskedne, at det ikke spiller nogen rolle for overvejelser i forbindelse med affaldsdeponering.

Gruppens vurdering.

Det er gruppens vurdering, at elværkerne i deres beregninger af indholdet af radioisotoper har medtaget de isotoper, som har betydning for vurdering af

sikkerheden. Endvidere finder gruppen en tilfredsstillende nøjagtighed på de beregnede mængder.

De anvendte tal for overførsel af uran og plutonium til affald ved oparbejdning anses for rimelige.

Elværkerne forudsætter, at den radioaktive isotop jod-129 findes i det oparbejdede affald. Gruppen bemærker, at denne isotop ikke overføres til affaldet ved oparbejdning.

Sammenfattende finder gruppen, at det af elværkerne beregnede indhold af radioaktive stoffer i affald kan lægges til grund ved bedømmelse af deponerings-sikkerheden.

3.3.3. Affaldets energiproduktion og ioniserende stråling.

Problemstilling.

Det radioaktive affald udsender ved henfald ioniserende stråling. De radioaktive stoffer, som affaldet er sammensat af, udsender alfa-, beta-, gamma- og neutronstråling. Strålingen indfanges af det materiale, som omgiver affaldet.

Størstedelen af strålingen indfanges af glas og stålbeholder, og energien i den indfangede stråling omdannes til varme. En mindre del trænger igennem stålbeholderen.

Elværkernes behandling.

I hovedrapporten er angivet resultaterne af beregninger af affaldets energiproduktion og ioniserende stråling. Beregningerne er beskrevet i ref. 102 og ref. 51.

Ved beregning af affaldets energiproduktion er brændslets bestrålingsforhold og oparbejdningsforhold som forudsat i 3.3.2. Deponering forudsættes foretaget 30 år efter oparbejdning, der finder sted 10 år efter udtagning af reaktoren. Deponering finder således sted 40 år efter udtagning af reaktoren.

Energiproduktionen er beregnet for alfa-, beta-, og gammastråling. Neutronernes energibidrag er ikke beregnet, men det anføres, at det er ubetydeligt.

Efter at have foretaget korrektioner, jf. ref. S1, angiver elværkerne et tilnærmet udtryk for den udviklede energi pr. tidsenhed gældende for tidsrummet 0-ca. 1000 år efter deponering. Dette udtryk anvendes til beregning af temperaturstigning i saltet. Dosishastigheden for gammastråling på overfladen af stålbeholderen er beregnet som funktion af tiden efter deponering. På deponeringstidspunktet er dosishastigheden angivet til 10 rad pr. time. Det anføres, at alfa- og betastrålingen opfanges af glas og stålbeholder.

Konsulentvurdering.

Afdelingen for elektrofysik, Danmarks Tekniske Højskole, har ydet fagkyndig bistand ved vurdering af elværkernes behandling af affaldets energiproduktion og ioniserende stråling, ref. K1 og ref. SK1.

Afdelingen er enig med elværkerne i, at alfa- og betastrålingen vil blive opfanget af glas og stålbeholder. Endvidere har afdelingen tilsluttet sig elværkernes beregninger, for så vidt angår energiproduktionen fra alfa-, beta- og gammastråling. Afdelingen har beregnet energien af den fission, der spontant finder sted i visse affaldsstoffer, den beregnede energi betegnes som negligibel.

Afdelingen finder elværkernes beregning af dosishastigheden på overfladen af stålbeholderen rimelig.

Gruppens vurdering.

Vurderingsgruppen finder, at den af elværkerne beregnede energiproduktion og dosishastighed på overfladen af stålbeholderen er rimelig.

Gruppen finder endvidere, at det angivne tilnærmede udtryk for varmekilden er en god tilnærmelse til den beregnede energi pr. tidsenhed for tiden 0-1000 år efter deponering. For tidsrummet 1000-10.000 år efter deponering overvurderer det tilnærmede udtryk den beregnede energi pr. tidsenhed.

3.3.4. Konklusion vedrørende affaldet.

Gruppen kan tilslutte sig elværkernes bedømmelser vedrørende affaldsmængde og sammensætning samt affaldets strålingsfysiske forhold herunder den tidsafhængige varmeproduktion og strålingsintensitet. De fremlagte resultater med de

justeringer, som er foretaget i forbindelse med myndighedernes gennemgang af delrapporter, findes således at kunne bruges som grundlag for bedømmelse af deponeringssikkerheden.

3.4. SIKKERHEDEN UNDER NORMALE FORHOLD.

3.4.1. Indledning.

Beskyttelsesbarriererne glas, stålbeholder og de geologiske formationer, specielt salthorsten, som affaldsbeholderen er anbragt i, skal forhindre, at det radioaktive affald når biosfæren.

Ved vurdering af sikkerheden er processer og hændelser, der har med tilstedeværelse af vand ved et deponeringsanlæg at gøre, af særlig interesse. Vand kan dels ødelægge stålbeholderne ved korrosion og vaske de radioaktive stoffer ud af glasset, dels transportere de radioaktive stoffer.

Når en salthorst betragtes som muligt deponeringssted for radioaktivt affald, skyldes det, at stensalt i horste normalt er tørt og lidt gennemtrængeligt for vand. Stensaltet kan dog indeholde urenheder bestående af andre saltbjergarter, som kan indeholde mere vand og kan være mere gennemtrængelig end stensalt.

Ved en analyse af deponeringssikkerheden må det vurderes, om salthorsten kan undergå forandringer, således at dens evne til at beskytte affaldet forringes. Dette kunne f.eks. ske som følge af saltets bevægelse eller, ved at horsten opløses af omgivende grundvand.

Beskyttelsesbarriererne påvirkes af den ioniserende stråling, som det radioaktive affald udsender. Strålingen opfanges i glasset og i den omgivende stålfaskærmning og en mindre del i saltet nær ved stålbeholderen. Det må vurderes, om affaldets påvirkning af området, hvori det er deponeret, kan medføre, at der trænger vand ind til affaldet.

Stråling kan påvirke affaldsbeholderen og salthorsten på to måder. Energien i den stråling, der opfanges, omdannes til varme, og selve opfangningen kan påvirke materialernes egenskaber.

Varmen breder sig ud i salthorsten omkring deponeringsanlægget, og temperaturen i saltet stiger, indtil der er ligevægt mellem varmeproduktion og varmetransport bort fra varmekilden. Temperaturstigningen vil være størst nærmest affaldsbeholderen. Varmeproduktionen vil som følge af radioaktivt henfald af affaldet, blive mindre med tiden, og temperaturen vil med tiden nærme sig temperaturen i salthorsten før deponering.

En del af energien i den ioniserende stråling når ud i saltet og vil kunne bindes til dette. Den bundne energi vil kunne frigøres senere og derved forårsage temperaturstigninger i saltet.

Temperaturstigningen omkring et deponeringsanlæg afhænger af varmeproduktionens variation med tiden, af salthorstens varmetekniske egenskaber, samt af den mængde energi, der bindes i saltet tæt ved affaldsbeholderne.

Temperaturstigningen overlejrer den oprindelige geotermiske temperatur, der stiger med dybden. Temperaturen omkring et deponeringsanlæg varierer således både med afstanden fra anlægget og med dybden.

Temperaturstigningen kan have indflydelse på, hvor meget vand der kan komme i kontakt med deponeringsanlægget.

Vand forekommer i en salthorst som brine, der er vand mættet med salte samt som vand bundet til visse mineraler, såkaldt krystalvand. Krystalvand kan frigøres, såfremt temperaturen overstiger en vis størrelse. Brine kan bevæge sig under påvirkning af tryk-, temperatur og koncentrationsforskelle.

Brine, der udsættes for gammastråling, kan ved radiolyse spaltes i fri brint og ilt. Dette kan medføre en forøgelse af trykket i deponeringsanlæggets omgivelser.

En temperaturstigning i saltet ændrer dets flydeegenskaber samt massefylde og medfører spændingsændringer som følge af udvidelse, hvorved saltets naturlige bevægelse påvirkes. Herved kan affaldsbeholderens placering i salthorsten ændres.

Affaldets påvirkning af salthorsten har således indflydelse på, hvor meget vand, der kan komme i berøring med affaldsbeholderen og har derved betydning for, i hvilket omfang stålbeholderen udsættes for korrosion og i hvilket omfang de radioaktive stoffer eventuelt udvaskes af glasset. Den ved radiolyse dannede ilt kan endvidere medvirke til korrosion af affaldsbeholderne.

Vurdering af sikkerheden er foretaget ud fra den af elværkerne anvendte forudsætning om, at deponering er foretaget i salt svarende til den dybe boring Erslev II.

3.4.2. Salthorstens bevægelse (diapirisme).

Problemstilling.

De nordjyske dybe saltaflejringer dannedes for 250 millioner år siden. I løbet af de følgende millioner af år, mens nye aflejringer afsattes oven på saltet, skabtes kimene til de nuværende salthorste som lokale forhøjninger på saltoverfladen. Dette skete ved flydning af saltet, bl.a. på grund af ujævn vægtfordeling af de overliggende lag og saltets lavere vægtfylde. Saltflydningen fortsatte gennem de efterfølgende geologiske tidsaldre, således at forhøjningerne efterhånden udvikledes til egentlige opskydninger af salt og tog form som horste.

Så længe en salthorst har forbindelse til det oprindelige saltlag, vil der kunne foregå en fortsat langsom flydning af salt fra dette til horsten. Denne flydning sammen med trykket fra dæk- og sidelagene, og opløsning af saltet i horstens top m.v. bestemmer horstens bevægelse.

Ved anbringelse af højaktivt affald i salthorsten tilføres midlertidigt en varmekilde, hvorved horstens naturlige bevægelse påvirkes.

Salthorstens fremtidige bevægelse kan have betydning for deponeringssikkerheden på grund af ændringer i horstens fremtidige form og størrelse samt placering i forhold til vandførende dæklag, påvirkninger af dæklagene som medfører ændringer i grundvandsstrømninger over horsten, og saltflydning inde i horsten som kan medføre ændringer i affaldsbeholdernes placering i horsten.

De to første forhold behandles nedenfor. Det tredje forhold behandles i afsnit 3.4.7, bevægelse af affaldsbeholderne.

Elværkernes behandling.

Den samlede ydre bevægelse af horsten er af elværkerne beskrevet i hovedrapporten ved anvendelse af geologiske data fra ref. 15., samt på grundlag af modelberegninger, ref. 107.

Det skønnes, at horstens top har bevæget sig opad med en hastighed på 0.02 mm pr. år beregnet som gennemsnit over perioden fra 100 mio. år før nu og til 60 mio. år før nu. Over de sidste 60 mio. år er opstigningshastigheden skønnet til 0.005 mm pr. år.

Ud fra mere detaljerede informationer redegør elværkernes konsulenter Richter-Bernburg og DGU for kortere perioder, hvor opstigningshastighederne har været større: fra 0.01 til 0.3 mm pr. år. Disse hævningshastigheder fremgår af nedenstående tabel hentet fra elværkernes hovedrapport.

	Opadgående hastighed	
	Richter-Bernburg	DGU
Maalm (160-140 mill. år)	0,1-0,3 mm/år	-
Øvre kridt (100-65)	0,025 mm/år	(0,05) mm/år
Eocæn-nutid (53-0)	0,01 mm/år	-
Oligocæn (37-22)	-	(0,1) mm/år
Istid (2-0,01)		0,2 mm/år

Elværkerne konkluderer generelt, at opstigningshastigheden er aftagende med tiden, og at horsten i dag har nået et udviklingstrin, hvor opstigningen af salt målt over længere tidsrum er så lille, at en transport af affaldet til toppen af horsten synes utænkelig, også selv om affaldet fulgte saltets bevægelser.

Elværkerne har beregnet, at varmen fra affaldet vil medføre, at jordoverfladen vil hæve sig op til 8 cm.

Konsulentvurdering.

DGU har bistået myndighederne ved gennemgang af Morsstrukturens udvikling, ref. K 14. Konsulentvurderinger af modelberegningerne er omtalt i afsnit 3.4.7., bevægelse af affaldsbeholderne.

DGU har anført, at for at en vurdering af Morsstrukturens udvikling kan foretages, forudsætter det, at der foreligger rimeligt detaljerede oplysninger om salthorsten og dens omgivers form og struktur, idet salthorstens udviklingshistorie alene kan udledes af disse oplysninger, og idet salthorstens faktiske bevægelsehastighed til forskellige tidspunkter alene kan udledes af dens udviklingshistorie.

Navnlig bemærkes, at salthorstens udvikling i kvartærtiden (de sidste ca. 2 millioner år) ikke kan belyses rimeligt detaljeret på basis af det foreliggende observationsmateriale. Da kvartærtidens saltbevægelser, specielt bevægelserne efter sidste istid, kan forventes at give de mest realistiske indtryk af fremtidige saltbevægelseres intensitet, finder DGU, at disse bevægelser burde have været belyst.

Gruppens konklusion.

DGU har vurderet opstigningshastigheden for Morshorsten til at kunne være af størrelsesordenen 0,01-0,2 mm pr. år. En opstigningshastighed på 0,2 mm pr. år svarer til en samlet opstigning på 20 m over 100.000 år.

Vurderingsgruppen finder på grundlag heraf, at horsten ikke kan gennembryde de ovenliggende lag og bringe affaldet op til overfladen i intakt tilstand.

En samlet bevægelse af salthorsten vil imidlertid kunne afstedkomme brud i dæklagene over horstens caprock. Dette vil kunne medføre ændrede betingelser for grundvandets strømning i disse lag.

Gruppen anser ikke hævnningen af jordoverfladen for et sikkerhedsmæssigt problem.

3.4.3. Opløsning af horsten.

Problemstilling.

Salthorste udsættes for opløsning, hvis de kommer i kontakt med grundvand, som ikke er mættet med salt. Visse tungtopløselige og uopløselige bestanddele af salthorsten opløses ikke, men efterlades som en kappe på salthorsten. Denne kappe af tungtopløselige mineraler kaldes caprock.

Opløsning af salthorsten vil reducere tykkelsen af saltmassen mellem grundvandet og affaldet.

Herved vil deponeringssikkerheden kunne reduceres, idet saltmassen virker som naturlig beskyttelsesbarriere ved deponeringen.

Elværkernes behandling.

Elværkernes behandling i hovedrapporten af saltopløsningens betydning for deponeringssikkerheden er bl.a. baseret på ref. 97, ref. 101 og ref. 105.

Elværkerne anfører, at de dybe boringer Erslev I og II har vist tykkelser af caprock på henholdsvis 26 m og 20 m. Det vidner om, at der i hvert fald tidligere er foregået en opløsning af salthorsten. Ud fra Mors-strukturens udviklingshistorie, må den største opløsning have foregået i jura og nedre kridt.

Den nuværende opløsningshastighed bedømmes ud fra målinger af saltkoncentrationen i grundvandet over og uden for Morshorsten.

Det anføres, at den betydeligt højere koncentration af salt i grundvandet over horsten vidner om, at der i perioden efter nedre kridt og måske også i dag foregår en opløsning af horsten.

Elværkerne har på grundlag af ref. 97 og ref. 101 foretaget beregninger for at bedømme den aktuelle opløsningshastighed. Ved beregningerne er det antaget, at caprockens permeabilitet er meget lille, hvorfor vandet i caprocken anses for at være stillestående. Transporten af salt fra horsten til grundvandet over caprocken antages at foregå ved diffusion.

Det anføres, at det ikke er muligt at afgøre om den videre transport og spredning af salt ud i de overliggende kalklag skyldes diffusion alene eller en grundvandsstrømning. I konsekvens heraf diskuteres begge disse transportmekanismer.

Sammenfattende konkluderes, at uanset fortolkningen af de målte saltkoncentrationsprofiler, kan disse højst skyldes opløsningshastigheder på omkring 0,004 mm pr. år. Det svarer til, at det vil tage mere end 2,5 mio. år at opløse 10 m salt. Variationer i grundvandshastighed og caprock-porøsitet vil ikke i nævneværdig grad ændre dette forhold. Som forholdene er i dag, vil grundvandets opløsning af salthorsten ikke kunne nedbryde saltbarrieren mellem affaldet og grundvandet.

Endvidere har elværkerne på grundlag af ref. 105 vurderet, hvilken betydning forkastninger i dæklagene har på opløsning af salthorsten. På basis af beregninger finder de, at dette ikke ændrer ovenstående konklusion.

Konsulent vurdering.

DGU har vurderet ref. 97, ref. 101 og ref. 105 i ref. K 17 og ref. K 19. Forsøgsanlæg Risø har vurderet ref. 105, jf. K 18.

Ved DGU's vurdering af ref. 97 og ref. 101 har det ikke været muligt at kontrollere beregningsgrundlaget og beregningsresultaterne på grund af en mangelfuld beskrivelse af forudsætningerne og beregningsprocedurer.

DGU har af denne grund udført beregninger for situationer, der svarer til de i rapporterne angivne. Under konservative antagelser om de parametre, der indgår i bestemmelsen af opløsningshastigheden, har DGU fundet, at en opløsningshastighed på 1 mm pr. år må anses for en maksimal værdi under de forudsætninger, der ligger til grund for den opstillede opløsningsmodel.

DGU anfører dog, at større opløsningshastigheder kan opnås i situationer, som ikke er analyseret i de foreliggende rapporter. Således er forholdene omkring opløsning af de letopløselige K-Mg-salte ikke belyst. Hvor sådanne lag når ud til horstens rand, vil der foregå betydelig hurtigere opløsningsprocesser end i tilsvarende områder med rent stensalt. Endelig beskriver DGU, hvordan der i forbindelse med opløsningsprocessen kan opstå en zone med vandfyldte hulheder under caprocken, på grund af uensartet opløsningshastighed hen over salthorstens overflade. På et vist tidspunkt vil der derfor eksistere et uregelmæssigt forgrenet "vandlag" mellem caprock og saltet, samtidig med at caprock og de overliggende dæklag "bæres" af de resterende, ikke opløste saltpartier. Når disse bliver for svage til at modstå de overliggende lags tryk, bryder de sammen, og trykket stiger voldsomt i brinen, hvilket kan accelerere strømninger over store afstande. DGU finder, at disse forhold kan være medvirkende til en markant forøgelse af opløsningshastigheden.

Gruppens vurdering.

DGU anfører, at elværkernes konklusion om, at de målte saltkoncentrationsprofiler kun kan være resultat af opløsningshastigheder på højst 0,004 mm pr.år, kun kan drages under den forudsætning, at opløsningsprocessen er begrænset af en diffusionsproces i caprock. DGU anser denne forudsætning for hypotetisk og ikke videre sandsynlig og fremfører, at de udførte målinger i dybdeboringen Erslev II ikke berettiger til den vidtgående konklusion, at caprock er tæt, og at transport af

salte fra horsten og til grundvandet over caprock må foregå ved diffusion gennem caprock.

DGU anfører endvidere, at elværkerne drager alt for vidtgående konklusioner om caprock's beskaffenhed ud fra de seismiske målinger. Disse målinger viser efter DGU's opfattelse ikke, at der kun foregår meget lille eller ingen opløsning af saltoverfladen, sådan som det anføres af elværkerne.

Det er DGU's opfattelse, at de indsamlede data ikke er tilstrækkelige til at fastlægge opløsningsprocessernes natur, endsige opløsningshastigheden.

DGU kan således ikke tilslutte sig elværkernes konklusion.

DGU har oplyst, at med det nuværende kendskab til salthorstens sammensætning må det skønnes, at 1 meter caprock svarer til ca. 100 m opløst salt. Da caprock's tykkelse i Erslev I er ca. 26 m, og i Erslev II 20 m, svarer dette til, at der i gennemsnit snarere er opløst ca. 2000 m salt, i perioden fra nedre kridt til nutiden, d.v.s. på 100 mio. år. Dette svarer til en gennemsnitlig opløsningshastighed på 0,02 mm pr. år, hvilket er 5 gange større end den værdi, elværkerne har fundet. Efter DGU's opfattelse giver det kendskab, der i dag er til opløsningsprocessen, ikke grundlag for at betragte dette som en øvre værdi.

DGU skønner dog, at der ikke er risiko for, at en saltbarriere på ca. 500 m mellem affaldet og dæklagene vil kunne fjernes ved opløsning inden for sikkerhedsvurderingens tidshorisont.

Gruppens konklusion.

På grundlag af DGU's vurdering finder gruppen, at der ikke er risiko for, at saltbarrieren mellem affaldet og dæklagene vil kunne fjernes ved opløsning af saltet i salthorsten, og denne mekanisme kan derfor ikke betragtes som et sikkerhedsmæssigt problem.

3.4.4. Temperaturfeltet omkring deponeret radioaktivt affald.

Problemstilling.

Størstedelen af den ioniserende stråling det radioaktive affald udsender opfanges af glas og stålbeholder og omdannes til varme.

Den varme, der dannes breder sig ud i salthorsten omkring deponeringsanlægget, og temperaturen i saltet vil som følge heraf stige, indtil der er opnået ligevægt mellem varmeproduktionen og varmetransporten bort fra varmekilden. Temperaturstigningen vil være størst ved affaldsbeholderen. Varmeproduktionen vil, som følge af radioaktivt henfald af affaldet, blive mindre med tiden, og temperaturen vil efterhånden nærme sig temperaturen i salthorsten før deponering.

Temperaturstigningen, som skyldes deponering af højaktivt affald, overlejrer den oprindelige geotermiske temperatur, der øges med dybden. Temperaturen omkring et deponeringsanlæg varierer således både med afstanden fra anlægget og med dybden.

Temperaturfordelingen har indflydelse på, hvor meget vand, der kan komme i berøring med affaldsbeholderen og har derved betydning for, i hvilket omfang stålbeholderen udsættes for korrosion, og i hvilket omfang de radioaktive stoffer udvaskes af glasset.

Elværkernes behandling.

Temperaturfeltet omkring deponeret radioaktivt affald er beskrevet i hovedrapporten.

Beregningerne af temperaturfeltet omkring deponeret radioaktivt affald er beskrevet i ref. 82. Ved beregningerne er benyttet data for varmetekniske egenskaber målt på kerneprøver taget fra de to dybe boringer Erslev I og Erslev II. Resultaterne heraf er præsenteret i hovedrapporten samt i ref. 69, 70 og 71.

Den geotermiske temperatur i salthorsten som funktion af dybden er målt i de to dybe boringer, og resultaterne er angivet i hovedrapporten.

Elværkerne har foretaget beregninger af temperaturstigningen omkring affald placeret i et dybt hul fra 1200-2500 meters dybde.

Elværkerne har ved beregning af temperaturfeltet forudsat, at energiproduktionen i affaldet er, som beskrevet i afsnit 3.3, at varmekilden er uendelig lang og uden radial udstrækning, at varmekilden er placeret i et uendeligt, homogent medium, og at spredningen af varmen alene finder sted ved varmeledning, hvorfor temperaturfeltet kan beregnes ved hjælp af varmeledningsligningen.

Elværkerne har for salthorsten benyttet en varmeledningsevne på 4.7 watt pr. m pr. grad celsius svarende til salt ved en temperatur på knap 100 grader celsius. For saltets varmenefylde har elværkerne anvendt en værdi på 1.9 megajoule pr. m³ pr. grad celsius.

Det fremgår af elværkernes beregninger, at den maksimale temperaturstigning i salthorsten vil være ca. 29 grader celsius. Temperaturstigningen antager maksimalværdien på grænsen af affaldsbeholderen nogle få år efter deponering. Temperaturstigningen vil efter nogle få hundrede år ikke overstige 10 grader celsius, og vil aldrig overstige 10 grader celsius i afstande større end 10 m fra affaldet.

Elværkerne har i hovedrapporten angivet den målte geotermiske temperatur i salt som funktion af dybden i intervallet fra 1200 m til 3375 m. I intervallet fra 1200 m til ca. 2500 m varierer den geotermiske temperatur næsten liniært fra ca. 40 grader celsius til ca. 60 grader celsius.

Sammenfattende finder elværkerne, at den maksimale temperatur, som saltet omkring affaldsdepotet når op på, vil variere liniært fra ca. 70 grader celsius i 1200 m's dybde til ca. 90 grader celsius i 2500 m's dybde. I afstande større end 10 m fra deponeringsanlægget vil temperaturen i 1200 og 2500 m's dybde ikke overstige henholdsvis ca. 50 grader celsius og ca. 70 grader celsius.

Konsulentvurderinger.

Ved gennemgang af beregninger af temperaturfeltet er der ydet fagkyndig bistand fra Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, ref. K4, DGU, ref. K3, og Laboratoriet for Geofysik ved Århus Universitet, ref. K5.

DGU har udtalt, at elværkerne højst undervurderer den geotermiske temperatur i intervallet 1200-2500 m med 3 grader celsius. Dette geotermiske temperaturfelt kan dog ikke på det foreliggende grundlag generaliseres til hele salthorstområdet.

Hvad angår beregningsforudsætningerne om varmekildens geometri har Laboratoriet for Varmeisolering udtalt, at det ikke introducerer fejl af betydning, at der ikke er taget hensyn til affaldsbeholdernes fysiske udstrækning i radial retning. Forudsætningen om en uendelig lang varmekilde betyder, at de beregnede temperaturer er større end temperaturer beregnet for en kilde af endelig længde.

DGU har anført, at elværkernes beregningsmodel gengiver temperaturfeltet omkring en affaldsstreng korrekt under forudsætning af, at deponeringsområdet kan anses for homogent/isotropt med hensyn til varmetekniske egenskaber i et tilstrækkeligt stort område.

Hvad angår de anvendte værdier for varmetekniske egenskaber har Laboratoriet for Geofysik udtalt, at de målte middelvarmeledningsevner, som funktion af temperaturen udviser samme tendens og størrelsesorden som resultaterne fra litteraturen. Litteraturværdierne udviser store variationer, der tilskrives saltets sammensætning. De i ref. 69, 70 og 71 rapporterede variationer i varmeledningsevnen, bestemt på kerner fra forskellige dybder og borer, er signifikante, hvilket indikerer variationer op til 20%. I betragtning af det lille antal kerner der er målt på, anses det for sandsynligt, at variationen i varmeledningsevnen for saltstrukturen som helhed kan udvise endnu større variationer.

Laboratoriet skønner, at andre forholds indvirkning på varmeledningsevnen kan negligeres set i relation til betydningen af variationen i saltets sammensætning. De opnåede resultater for specifik varmefylde vurderes som rimelige.

Laboratoriet for Varmeisolering har udtalt, at det for beregninger i tørt salt kan sikres, at den af elværkerne anvendte metode ikke undervurdere temperaturen, hvis der anvendes termiske data svarende til den højeste temperatur i det beregnede temperaturfelt. Vedrørende beregningen af temperaturen i vandholdigt salt vil beregninger foretaget med data for tørt salt overvurdere temperaturen i vådt salt, hvad enten vandet er bundet som krystalvand eller forefindes frit således, at varmetransporten sker ved en kombination af ledning og konvektion, hvorimod temperaturen vil blive undervurderet, såfremt der alene er tale om varmeledning.

Gruppens vurdering.

Ved vurdering af temperaturstigningen i saltet omkring affaldsdepotet er den største usikkerhed forbundet med mangelfuldt kendskab til sammensætningen af de saltbjergarter, der omgiver depotet og dermed til saltets varmeledningsevne.

Elværkerne har ved temperaturberegningen antaget, at deponeringen finder sted i et homogent medium med varmeledningsevne 4.7 watt pr. m pr. grad celsius. Måling af varmeledningsevnen på kerneprøver fra de dybe borer viser en

mindste varmeledningsevne ved 100 grader celsius på 3.84 og 4.24 watt pr. meter pr. grad celsius for henholdsvis Erslev I og Erslev II.

Vurderingsgruppen finder elværkernes valg af varmeledningsevne rimeligt for det rene salt. Ud fra litteraturstudier anser gruppen en varmeledningsevne på 3 watt pr. m pr. grad celsius som en konservativ lav varmeledningsevne for større saltområder. Lag på op til 5 m's tykkelse med varmeledningsevne ned til 1.7 watt pr. m pr. grad celsius kan forekomme. DGU har peget på, at lokalt kan varmeledningsevnen muligvis være ned til ca. 1 watt pr. m pr. grad celsius.

For at vurdere betydningen af antagelsen om, at varmekilden er placeret i et uendeligt homogent medium, har miljøstyrelsen gennemført temperaturberegninger, ref. VG 4, under antagelse af elværkernes forudsætninger om varmekildens geometri samt elværkernes forudsætninger om værdier for varmeledningsevne og varmekapacitet, men med et dårligt ledende materiale fuldstændigt omgivende en cylindrisk saltblok med varmekilden som akse. Beregningerne er gennemført for forskellige diametre for den cylindriske saltblok. Varmeledningsevnen for det dårligt ledende materiale er sat til 1/10 af den anvendte varmeledningsevne for stensalt.

Beregningerne viser, at hvis det dårligt ledende materiale findes i større afstand end 30 m fra affaldsstrengen, vil det ikke have nogen indflydelse på maksimaltemperaturen i saltet. Befinder materialet sig nærmere varmekilden, vokser maksimaltemperaturen.

DGU og elværkernes konsulent har anført, at borehulsgravimetri, elektromagnetiske målinger samt forekomsten af kieseritholdigt stensalt i kernematerialet indicerer, at ikke-halitiske lag findes i umiddelbar nærhed af Erslev II. Det er imidlertid ikke muligt entydigt at bestemme, hvilke ikke-halitiske lag, der er tale om.

Da rene kalisalte som oplyst af DGU har samme varmeledningsevne som stensalt finder gruppen, at resultaterne af temperaturberegninger for deponering i stensalt, også gælder selv om der i nærheden af deponeringsområdet alene findes rene kalisalte indlejret i stensalt. Kalisalte kan dog forekomme sammen med bjergarter med lavere varmeledningsevne end stensalt.

Miljøstyrelsen har derfor foretaget beregninger for at vurdere indflydelsen på temperaturstigningen af variationer i varmeledningsevnen for forskellige antagel-

ser om urenheder i saltet i området omkring et dybt hul med affald. Beregningerne er foretaget for varmeledningsevner fra 1 watt pr. m pr. grad celsius til 4.7 watt pr. m pr. grad celsius.

På grund af de radioaktive stoffers henfald bliver affaldets varmeproduktion mindre jo længere tid, der går efter udtagning af reaktoren. Venter man længere tid end 40 år efter udtagning af reaktoren, bliver temperaturstigningen under i øvrigt uforandrede forudsætninger derfor mindre end beregnet af elværkerne. For at belyse dette forholds betydning for temperaturstigningen har miljøstyrelsen foretaget beregninger af temperaturstigningen ved deponering fra 40 år op til 140 år efter udtagning af reaktoren.

Varmelednings- evne watt pr. m pr. grad celsius	Maksimal temperaturstigning i grader celsius under forudsætning af		
	deponering 40 år efter udtagning af reaktor.	deponering 90 år efter udtagning af reaktor.	deponering 140 år efter udtagning af reaktor.
1.0	109	50	34
2.0	59	27	19
3.0	41	19	13
4.7	29	13	9

Ved deponering i et område med varmeledningsevne på 3 watt pr.m pr.grad celsius kan den af elværkerne beregnede maksimale temperaturstigning overholdes, såfremt deponering finder sted 55 år efter udtagning af reaktoren.

Gruppens konklusion.

Det er gruppens opfattelse, at de beregninger, som elværkerne har foretaget af temperaturfordelingen i Morshorsten i et stort område bestående af stensalt svarende til kerneprøverne fra Erslev II er korrekte efter, at de med baggrund i myndighedernes gennemgang af delrapporter har korrigeret varmeproduktionen fra affaldsbeholderne.

Gruppen skønner, på grundlag af beregninger foretaget af miljøstyrelsen, at den indre struktur i afstande større end 30 meter fra et dybt deponeringshul er uden

betydning for den maksimale temperaturstigning i saltet. Salthorstens indre struktur i afstande større end 30 meter har imidlertid betydning for temperaturstigningens fordeling.

Såfremt bjergarter med lavere varmeledningsevne end stensalt findes mindre end 30 meter fra borehullet, kan det ikke udelukkes, at der ved deponering som foreslået af elværkerne lokalt kan forekomme temperaturer større end beregnet af elværkerne.

Ved eventuel deponering bør der derfor enten tilvejebringes et sådant kendskab til salthorstens indre struktur i nærheden af borehullet, at temperaturfordelingen under de faktiske deponeringsforhold kan beregnes, eller det må dokumenteres, at temperaturstigningen, uanset de saltgeologiske forhold omkring dybhullet, kan holdes inden for en størrelse, der ikke på noget sted giver anledning til sikkerhedsmæssige problemer.

Det er gruppens opfattelse, at temperaturen ved deponering i et område svarende til Erslev II kan holdes under de af elværkerne beregnede 90 grader celsius, såfremt der træffes passende foranstaltninger, eventuelt gennem forlængelse af tidsrummet mellem udtagning af reaktoren og deponering. Gruppen finder det derfor acceptabelt, at elværkerne har lagt en maksimal temperatur på 90 grader celsius til grund for sikkerhedsvurderingen. Der er ikke herved taget stilling til, hvilken maksimaltemperatur der kan accepteres ved deponering.

Det er naturligvis herved forudsat, at man ikke deponerer direkte i kaliførende lag med urenheder med lav varmeledningsevne.

3.4.5. Radiolyse af brine.

Problemstilling

En mindre del af strålingen fra det radioaktive affald vil trænge ud igennem affaldsbeholderen. Såfremt brine findes i umiddelbar nærhed af det deponerede affald, vil den blive udsat for denne stråling, der ved radiolyse kan spalte vandet i fri brint og ilt.

Radiolyse kan medføre en forøgelse af trykket i deponeringsanlæggets omgivelser. Ilten kan endvidere medvirke til korrosion af affaldsbeholderne.

Elværkernes behandling.

Elværkernes behandling af radiolyse i hovedrapporten er baseret på ref. 98.

På grundlag af litteraturstudier er der i ref. 98 opstillet en reaktionsmekanisme for radiolyse af koncentrerede, neutrale, vandige natriumkloridopløsninger. For hastighedskonstanterne for reaktionerne er benyttet værdier, der gælder ved stuetemperatur, men det angives, at værdierne kan benyttes op til 100 grader celsius.

Der angives en teoretisk ligevægtskoncentration af brint svarende til et brintpartialtryk på 300 atmosfære ved stuetemperatur. Beregningen er foretaget under forudsætning af, at den fri ilt og den fri brint ikke omdannes til vand eller fjernes fra dannelsesstedet.

Med de givne forudsætninger ændrer variationer i gammadosishastigheden ikke ligevægtskoncentrationen væsentligt, men hastigheden for opbygning af brintkoncentrationen er afhængig af dosishastigheden. Som eksempel på tidshorisonten nævnes, at med en konstant dosishastighed på 1 rad pr. time vil det i et lukket system tage mindst 500 år at nå en brintkoncentration svarende til et tryk på 10 atmosfære og 20.000 år at opnå ligevægtskoncentrationen.

For tidsrum på mange år anses det ikke for relevant at betragte systemet som værende lukket, idet brint vil diffundere bort, og den anførte ligevægtskoncentration vil således aldrig blive opnået.

Elværkerne finder på grundlag af ref. 98, at for at undgå dannelsen af væsentlige brinttryk under radiolyseprocessen skal overfladedosishastigheden være passende lav, hvilket vil sige af størrelsesorden rad pr. time.

Elværkerne konkluderer, at den valgte beholdertykkelse yder tilstrækkelig strålingsafskærmning til at sikre mod, at der ved radiolyse opstår væsentlige brinttryk omkring beholderne i depotet.

Konsulentvurdering.

Behandlingen af radiolyse i ref. 98 er vurderet for myndighederne af Studsvik Energiteknik AB i Sverige, ref. K 13.

Konsulenten finder, at behandlingen af radiolyse i ref. 98 hviler på et sundt grundlag.

Konsulenten har dog på baggrund af litteraturstudier fremført muligheden for, at vandring af brine kan forårsage øget radiolyse. Den vandrende brine kan opløse salt, der har været udsat for bestråling. Ved bestråling af salt dannes defekter i saltet. Salt med defekter kan ved opløsning spalte vand i fri ilt og brint, den såkaldte radiomimetiske effekt. Effektens betydning afhænger af, hvor store mængder salt med defekter der opløses af vandrende brine. I litteraturen angives den radiomimetiske effekt at kunne udgøre 4-5 gange den direkte radiolytiske effekt.

Gruppens vurdering.

Elværkernes konklusioner om radiolyse er baseret på en dosishastighed på overfladen af beholderne på 0.5 rad pr. time ved deponering. På baggrund af myndighedsbehandlingen af delrapporterne er dette tal rettet til 10 rad pr. time ved deponeringstidspunktet. Elværkernes konklusion om radiolyse kunne som følge heraf samt fordi betydningen af den radiomimetiske effekt ikke er vurderet, ikke umiddelbart godtages.

Miljøstyrelsen har på grundlag af oplysninger i litteraturen foretaget en vurdering af betydningen af den radiomimetiske effekt, ref. VG 5.

Miljøstyrelsen har beregnet, at den radiomimetiske effekt vil være uden betydning for brine, der bevæger sig ind mod affaldet, i forhold til radiolyse af den brine, der konstant er i nærheden af affaldet. Dette skyldes den stærke dæmpning af gammastråling ind i saltet. Ifølge ref. A1 kan vandring af brine ved opløsning af salt ikke forårsages af den geotermiske temperaturgradient. Brinebevægelse langs med affaldet har derfor ingen betydning for den radiomimetiske effekt.

DGU har bemærket, at brinen i Morshorsten er bitternbrine med et vist indhold af kalium-magnesiumklorid, ofte mættet og antagelig med et højt bromindhold. Elværkernes behandling af radiolyse af brine er baseret på natriumkloridopløsninger.

Den radiolytiske effekt er ikke afhængig af brinens sammensætning, når bortses fra stærkt sure opløsninger. Ved opvarmning af stærkt koncentreret magnesium-

holdig brine til 290-300 grader celsius kan der ved hydrolyse af magnesium-ionerne ske en forøgelse af radiolysen af vand.

De nødvendige forhold for disse processer skønnes ikke at være tilstede i salthorsten.

Miljøstyrelsen har beregnet brintpartialtrykket omkring et dybhulsanlæg. Beregningen er foretaget ud fra den antagelse, at den ved radiolysen dannede fri ilt og brint hverken gendannes til vand eller bevæger sig bort fra dannelsesstedet. Ved beregningen af trykstigningen er benyttet dosishastigheden på overfladen af affaldsbeholderne. Beregningen viser, at i løbet af de første 100 år af deponeringen vil brintpartialtrykket kunne vokse til ca. 17 atmosfære og være næsten konstant i de følgende 10.000 år.

Antagelsen om, at den fri ilt og brint hverken gendannes til vand eller bevæger sig bort fra dannelsesstedet, kan ikke anses at være gældende for lange tidsrum. F.eks. kan brint opløses i stålbeholderne og ved få atmosfæres partialtryk kan der opløses 10 mg brint pr. ton. Dette betyder, at den ved radiolyse dannede brint kan opløses i stålbeholderne. Det anses derfor for mere realistisk alene at regne med iltpartialtrykket, der efter 10.000 år højst kan andrage ca. 9 atmosfære.

Gruppens konklusion.

Vurderingsgruppen finder på grundlag af miljøstyrelsens beregninger, at trykstigning som følge af radiolyse ikke vil udgøre nogen sikkerhedsmæssig risiko for det af elværkerne skitserede dybhulsanlæg.

3.4.6. Strålingsenergiakkumulering i salt.

Problemtilling.

Ved deponering i salt er der mulighed for, at energien i den ioniserende stråling, der ikke opfanges af glas eller stålindkapsling, vil kunne bindes i salt tæt ved affaldsbeholderne. Den mængde energi, der bindes i saltet, øges med tiden efter deponering, men stigningstakten aftager med tiden, da dosishastigheden aftager med tiden. Den bundne energi vil ved eventuel frigørelse kunne forårsage temperaturstigninger i saltet.

Elværkernes behandling.

Elværkernes behandling af strålingsenergiakkumulering i hovedrapporten er baseret på ref. 99, ref. 102, ref. S1 og ref. S2.

Elværkerne henviser til, at beregninger foretaget af deres konsulent viser, at den maksimale temperaturstigning i saltet, som følge af at akkumuleret energi inden for en periode af 10 mio. år pludseligt frigøres, vil være begrænset til nogle få hundrededele af en grad.

Ved beregningen er der set bort fra korrosion af stålbeholderen. Det anføres, at korrosion ikke umiddelbart vil ændre energiakkumuleringen i saltet, idet hovedparten af korrosionsprodukterne forventes fortsat at ville kunne afskærme affaldet.

Der er også foretaget beregninger, hvor det er forudsat, at stålbeholderen ikke er tilstede.

Beregningerne er foretaget for salt, der har en temperatur mellem 90-150 grader celsius. Elværkernes konsulent bemærker i øvrigt, at energiakkumulering i salt sandsynligvis kun vil foregå, hvis saltet har en temperatur i intervallet ca. 90-150 grader celsius og bedømmer derfor, at med det valgte depotdesign, hvor temperaturen er under 90° celsius, vil energiakkumulering næppe finde sted.

Konsulentvurdering.

Som konsulent for myndighederne har Afdelingen for Elektrofysik, Danmarks tekniske Højskole, ydet fagkyndig bistand ved gennemgang af beregningerne af strålingsenergiakkumulering, ref. K2 og ref. SK2.

Afdelingen for Elektrofysik anser ikke beregninger, som forudsætter, at jernlaget forsvinder, som værende relevante, idet det anses for givet, at hvis jernlaget forsvinder, vil det omgivende saltlag også forsvinde.

Afdelingen tilslutter sig, at akkumulering af energi i saltet på grund af bestrålingen ikke på nogen måde kan anses at give anledning til problemer.

Gruppens vurdering.

Vurderingsgruppen skal bemærke, at elværkernes beregning af den akkumulerede mængde energi forudsætter, at det bestrålede salt er stensalt med et begrænset indhold af anhydrit (op til 15%). Resultatet af elværkernes undersøgelser af kerneprøver fra de to dybe borer i Morshorsten viser, at anhydritindholdet i stensalt er mindre end 15%, og forudsætningen er derfor opfyldt.

Miljøstyrelsen har foretaget beregninger af de temperaturstigninger, der kan forekomme i salt som følge af strålingsenergiakkumulering, VG 6.

Disse beregninger viser, at de mulige temperaturstigninger er uden betydning for sikkerheden.

Gruppens konklusion.

Vurderingsgruppen kan tilslutte sig elværkernes konklusion om, at strålingsenergiakkumulering ikke kan anses for at være af sikkerhedsmæssig betydning for et dybhul placeret i stensalt med op til 15% anhydrit.

3.4.7. Bevægelse af affaldsbeholdere.

Problemstilling.

De deponerede affaldsbeholdere har en større vægtfylde end det omgivende salt. Affaldsbeholderne vil derfor kunne bevæge sig nedad i forhold til saltet.

Under uforstyrrede forhold foregår en saltflydning inde i horsten. Opvarmningen af saltet omkring beholderne vil give anledning til en forøgelse af denne saltflydning.

Affaldsbeholdernes nedadrettede bevægelse og saltflydning kan ændre beholdernes placering i salthorsten. Den ændrede placering kan betyde, at beholderne efterhånden befinder sig i et andet geologisk miljø end det oprindelige deponeringsmiljø.

Elværkernes behandling.

Elværkerne har i hovedrapporten behandlet bevægelsen af en enkelt affaldsbeholder placeret i salt svarende til boreprøverne i Erslev II og den nedadrettede bevægelse af en affaldsstreng. Saltbevægelserne er ligeledes beskrevet i hovedrapporten.

En model til beregning af en enkelt affaldsbeholders bevægelse er beskrevet i ref. 85 og 86. Ref. 107 er benyttet ved behandling af saltbevægelserne.

I ref. 85 er beskrevet en analytisk model til beregning af bevægelsen af en varmeproducerende kugle, som er anbragt i en lineær viskos væske med stor viskositet. I ref. 86 er denne model anvendt til at beregne bevægelsen af en enkelt affaldsbeholder, som er anbragt i et uendeligt, homogent viskøst medium af stensalt.

I hovedrapportens bind IV er angivet resultater af beregning af temperaturopdriften for en enkelt affaldsbeholder. Den maksimale opadrettede bevægelse er bestemt til 0,15 mm pr. år for dybhulsbeholderen. Den nedadrettede bevægelse er bestemt til 0,37 mm pr. år. Ved beregningerne er anvendt en dynamisk viskositet for salt på $5 \cdot 10^{14}$ Pa x s.

Endvidere er der i bind IV angivet en nedsynkningshastighed for en affaldsstreng på 0,75 mm pr. år.

I hovedrapportens bind V er angivet, at beholderne på grund af opvarmningen i en kort årrække efter deponeringen bevæger sig opad i forhold til saltet med en hastighed, der vokser til et maksimum på 0,05 mm pr. år efter 50 år og derefter aftager til nul. Denne bevægelse vil være overlejet en konstant nedadrettet bevægelse på grund af affaldscyklindrenes store vægtfylde i forhold til saltets. Afhængigt af om affaldsbeholderne bevæger sig som en lang streng eller som adskilte enheder, beregnes den nedadrettede bevægelse til henholdsvis 0,7 mm pr. år og 0,25 mm pr. år, når viskositeten af saltet sættes til $5 \cdot 10^{14}$ Pa x s. Elværkerne anfører, at i forhold til oplysninger i litteraturen må denne viskositet anses for lav. Normalt angives viskositeten for salt at ligge mellem $5 \cdot 10^{14}$ og $5 \cdot 10^{16}$ Pa x s og at afhænge kraftigt af spændingstilstanden i saltet og i nogen grad af temperaturen. De angivne hastigheder anses derfor for øvre grænser, der formentlig er en faktor 10 eller mere for høje.

De naturlige indre saltstrømninger i horsten er bedømt i hovedrapporten ved at anvende de i ref. 15 udtegnede profiler af horstens udvikling til at beregne gennemsnitshastigheder for stigningen i horstens saltspejl.

På basis heraf konkluderer elværkerne, at de største opadrettede bevægelser fremkommer i horstens midte med hastigheder på op mod 0,001 mm pr. år.

Der er i ref. 107 foretaget beregninger af saltflydning omkring det deponerede affald. De beregnede hastigheder for saltflydning kort efter deponering når et maksimum tæt ved affaldet på ca. 1 mm pr. år. Hastighederne ændrer sig hurtigt med temperaturfeltets udbredelse og bliver modsat rettet efter nogen tids forløb, når salttemperaturerne vender tilbage til udgangspunktet, og saltet atter trækker sig sammen elastisk.

Elværkerne mener, at forholdene illustreres bedre ved at beregne den samlede integrerede forskydning af saltet. Det fremgår af elværkernes beregning, at forskydningen af saltet tæt ved affaldet stiger til et maksimum på ca. 5 cm efter 300-400 års forløb og derefter falder igen uden dog at nå helt tilbage til udgangspunktet. På jordoverfladen vil maksimum forskydningen (hævningen) indtræffe langt senere og ikke overskride 6-8 cm.

På grundlag af de udførte beregninger har elværkerne i hovedrapporten draget følgende konklusioner:

- at de beregnede hastigheder for affaldsbeholdernes bevægelse som følge af temperaturpåvirkning anses for at være øvre grænser, der formentlig er en faktor 10 eller mere for høje. Disse bevægelser skal ses i relation til den naturlige opadrettede saltbevægelse i horsten, og
- at affaldets virkning på de naturlige saltbevægelser i horsten vil være negligibel med den aktuelle temperaturopbygning.

Konsulentvurdering.

Ref. 85 og 86 er gennemgået af Laboratoriet for Anvendt Matematik, Danmarks tekniske Højskole, ref. K 6, og DGU, ref. K 7. Ref 107 er gennemgået af Geoteknisk Institut samt af DGU.

Laboratoriet for Anvendt Matematik finder, at den model, der er opstillet til beregning af bevægelsen af en varmeproducerende kugle, er korrekt, såfremt temperaturfaldet er tidsuafhængigt. Hensyntagen til temperaturfeltets tidsafhængighed vil ifølge laboratoriets skøn, føre til en anden beholderhastighed, men vil dog ikke resultere i en beholderbevægelse af en anden størrelsesorden end beregnet.

DGU anfører, at det ikke på indeværende tidspunkt er klarlagt, om krybningen af stensalt ved små differentialspændinger kan beskrives ved at antage, at saltet opfører sig som en lineær viskos væske, således som det er gjort i rapporten, ligesom størrelsen af viskositeten, samt dennes spændings- og temperaturafhængighed er meget usikkert fastlagt.

Laboratoriet for Anvendt Matematik bemærker om forudsætningen om, at saltet kan opfattes som en lineær viskos væske i en vis forstand er den simpleste beskrivelsesform, og derved den mest nærliggende tilnærmelse at vælge, når materialets egenskaber ikke er bedre kendt, end det må formodes at være tilfældet her. Laboratoriet kan ikke forestille sig, at hensyntagen til ikke-lineære korrektioner vil ændre bevægelsens størrelsesorden, så længe viskositetens størrelsesorden ikke ændres. Laboratoriet kan således ikke se, at der er rimelig grund til at foretage en udbygning af modellen.

DGU anfører endvidere, at kuglemodellen ikke kan anvendes til beregning af bevægelsen af strenge af affaldsbeholdere, samt at de naturlige og de temperatur-inducerede saltbevægelser, f.eks. i et deponeringsanlæg bestående af 8 deponeringshuller med sammenhængende deponeringsinterval over 1300 meter, vil være styret, dels af den valgte geometri af deponeringsanlægget dels af beskaffenheden og strukturen af saltbjergarterne i deponeringsområdet. Specielt vil forekomsten af inhomogeniteter i horsten, d.v.s. lag og forskydningszoner, som er mere letflydende end rent, tørt stensalt, og som skærer og/eller kommer tilstrækkeligt tæt på deponeringshullerne, give anledning til øgede bevægelser i saltet.

Sammenfattende finder DGU ikke, at kuglemodellen dokumenterer bevægelserne af en enkelt varmeproducerende affaldsbeholder i en salthorst, således som de vil forekomme under realistiske geologiske og tekniske omstændigheder.

I modsætning hertil finder DGU, at modellen er velegnet til at studere parametervariationers betydning for beholderbevægelsen, ligesom den er velegnet som reference for numeriske beregningsprogrammer.

Efter gennemgang af ref. 107 nævner Geoteknisk Institut tre tvivlsspørgsmål, som burde opklares, hvis deponeringen skulle blive overvejet seriøst.

De tre tvivlsspørgsmål er: Effekten af en reduktion af saltets elasticitetsmodel med en faktor 0,01 og 0,1, angivelse af konfidensgrænser for krybelovens parametre, eller en sandsynlighedstæthed for den relevante effektive viskositet i saltet samt virkningen af afvigende udgangsskøn (hviletrykskoefficienter) for den nuværende tilstand, kombineret med vandrette tektoniske bevægelser, hvis dette er geologisk tænkeligt.

Instituttet finder det rimeligt, at disse spørgsmål allerede er overvejet og afvist af Battelle Instituttet, som har forfattet ref. 107, således at rapportens konklusion, at ingen mekanisme, der er farlig for deponeringen, har kunnet spores, er rigtig. De geologiske forbehold er herved ikke taget i betragtning. De geologiske forbehold vedrører f.eks. profilet's homogenitet. Instituttet henviser til inhomogeniteter i horstens dæklag samt inhomogeniteter i salthorsten med væsentlig afvigende krybeegenskaber.

Hvad angår beregningerne af opdriften på lageret som helhed, finder DGU, at de bevægelser, som er et resultat af deponering af radioaktivt affald, er undervurderede som følge af en kraftig overvurdering af viskositeten.

DGU finder, at størrelsen af viskositeten for stensalt er af central betydning.

Vurderingen af viskositetens afhængighed af deviatorspændingernes lave niveau er efter instituttets opfattelse helt afgørende. Såfremt der er for lave deviatorspændinger, er der tale om diffusionskrybning (hvilket man teoretisk må forvente) og $5 \times 10^{14} - 5 \times 10^{16} \text{ Pa} \times \text{s}$ er en korrekt viskositetsværdi for stensalt fra Morshorsten under de aktuelle tryk- og temperaturforhold, vil ekstrapolationen ved hjælp af loven for lavtemperaturkrybning således, som det er gjort i ref. 107 over 3-4 dekader i deformationshastighederne og 1 dekade i spændingerne, føre til en kraftig overvurdering af viskositetens størrelse.

DGU finder, at anvendelsen af saltspejlets stigning som mål for den indre flydning i horsten kan føre til en kraftig undervurdering af de indre strømningshastighed. Grundene hertil er, at der i perioden fra nedre kridt til nutiden er opløst salt, som har modsvaret ca. 2 km samlet opstigning af Morshorsten ud over de i hovedrapporten medregnede 1,8 km. Hertil skal føjes de indre strømningsbi-

drag, som dannelsen af overhæng m.v. har medført. De indre strømningshastigheder kan derfor, specielt periodevis, være flere størrelseordner over elværkernes værdier.

Ved brug af den af ref. 107 anvendte analytiske model for opdriften på det samlede lager, har DGU foretaget et skøn over betydningen af, at der ved beregningerne ses bort fra inhomogeniteterne i horsten. DGU har ved brug af modellen beregnet hastigheder op til 5,5 m pr.år. På basis af disse beregninger skønner DGU, at tilstedeværelsen af letflydende inhomogeniteter i deponeringshullernes nærhed kan føre til en kraftig forøgelse af saltstrømningerne i depotområdet.

Gruppens vurdering.

Miljøstyrelsen har for at belyse bevægelse af en streng af affaldsbeholdere opstillet en enkel, endimensional model til beregning af affaldsstrengens og det omliggende salts bevægelse som følge af temperaturstigningen i salt.

Miljøstyrelsen har ved beregningerne anvendt værdier for stensalts viskositet fra ref. A 1.

Beregninger foretaget med en viskositet på 10^{17} Pa x s viser, at strengen af affaldsbeholdere efter 1000 år vil være steget ca. 15 cm og nå en maksimal opstigning på ca. 30 cm efter ca. 5000 år. Herefter vil affaldsbeholderne igen synke nedad.

Miljøstyrelsen har endvidere foretaget beregninger, hvor et lag med lav viskositet på 10^{14} Pa x s er placeret rundt om en affaldsstreng.

Beregningerne viser, at hvis det lavviskose lag befinder sig inden for 30 meter fra affaldet, vil den maksimale opstigning af beholderen være 15 cm. DGU har anført, at forøget vandindhold mellem saltkrystallerne bl.a. som følge af brine-migration antagelig kan resultere i viskositeter i området fra $5 \cdot 10^{14}$ Pa x s til $5 \cdot 10^{16}$ Pa x s. Anvendes en viskositet på 5×10^{14} Pa x s fås en maksimal opstigning på 60 m.

Gruppens konklusion.

Gruppen finder, at den af elværkernes anvendte kuglemodel ikke kan benyttes til beregning af bevægelsen af en affaldsstreng i forhold til omgivende salt.

Gruppen bemærker, at DGU har anført, at de af elværkerne beregnede hastigheder for uforstyrrede indre strømninger kan være flere størrelsesordener for små.

Der er stor usikkerhed på beregningen af saltets bevægelseshastigheder i horsten. Herudover er betydningen af inhomogeniteter i salthorsten for saltbevægelserne ikke belyst i elværkernes undersøgelser. Overslagsberegninger viser, at ovennævnte forhold må antages at have betydning for størrelsen af saltets strømningshastighed og dermed for affaldsbeholderne bevægelse i salthorsten.

Sammenfattende finder gruppen, at saltflydning formentlig ikke har sikkerhedsmæssig betydning, med mindre den medfører, at affaldsbeholderne kommer i kontakt med områder med våd carnallit eller vådt stensalt.

3.4.8. Væsketilstrømning til affaldsbeholderne.

Problemstilling.

Stensalt fra salthorste er en meget tør bjergart. Som urenheder i salthorste findes dog også andre saltbjergarter, som kan indeholde vand i varierende mængde. Væske kan findes i porøse områder som væskeindeslutninger og som krystalvand bundet til saltminerale i bjergarterne.

Krystalvand kan frigøres fra saltminerale, hvis temperaturen overstiger en given temperatur. Det i den henseende mest følsomme mineral er carnallit. Frigørelse af krystalvand fra tør carnallit kan afhængig af trykket finde sted ved temperaturer fra 70-170 grader celsius. Derudover kan carnallit, som indeholder vand, våd carnallit, gradvis opløses ved stigende temperatur, hvorved krystalvand også kan frigives.

Væskeindeslutninger og frigjort krystalvand kan bevæge sig under påvirkning af tryk-, temperatur- og koncentrationsgradienter. Den mængde væske, som kommer i kontakt med beholderne er bestemmende for, i hvilket omfang beholderne udsættes for korrosion.

Elværernes behandling.

Elværkerne har ved deres undersøgelse målt indholdet af vand i kerneprøver fra Erslev I og Erslev II boringerne. Resultaterne heraf er angivet i hovedrapporten. En model til beregning af væsketilstrømningen til affaldsbeholderne er beskrevet i ref. 103. Resultaterne af beregning af væsketilstrømning til beholderne er angivet i hovedrapporten.

Elværkerne angiver for Erslev II, at væskeindholdet i saltet i de dybder, hvor deponeringsanlægget er foreslået anbragt, er mindre end 0,05% i dybder fra 1104-1449 m og mindre end 0,1% i dybder fra 1523-2855 m. 0,1% svarer til ca. 2,2 liter brine pr. m³.

Hvad angår frigørelse af krystalvand anfører elværkerne, at det eneste af de konstaterede mineraler, der udsættes for ændringer i det temperaturområde, der er tale om ved deponering, er carnallit, og ændringen vil indskrænke sig til en begyndende udskillelse af krystalvand. Overslagsmæssigt udskilles måske 10% af krystalvandet i carnallit ved temperaturer mellem 80 og 100 grader celsius. En udjævnet maksimal koncentration af carnallit, der er set i lagene ved Erslev I, er ca. 30%. Disse 30% indeholder 38% krystalvand, hvorefter højst 10% ventes at udskilles under de aktuelle temperaturforhold. Brinekoncentrationen kunne da højst tænkes at blive ca. 1% i dette område eller ca. 22 liter brine pr m³ salt. Temperaturer over 80 grader celsius kan forekomme i afstande mindre end 2 m fra affaldet, og ved beholderne kan optræde temperaturer på op til ca. 90 grader celsius.

Elværkerne omtaler forekomst af sammenhængende anhydritlag. Sådanne lag angives at kunne være vandførende, hvis de strækker sig ud til horstkanten i områder med rigeligt vand. Specielt er vandindbrud gennem anhydritlag forekommet ved minedrift tæt ved randen af salthorste, hvor det høje grundvandstryk uden for horsten kan bryde igennem til atmosfæretrykket i minen. I dybdeboringen Erslev II er der mødt anhydrit som egentlige lag i overgangszonen mellem to lagserier, der blev antruffet i intervallet 3155-3188 m's dybde. Der er imidlertid ikke konstateret væsentlige vandmængder i disse lag, og de geofysiske målinger tyder på, at disse lag ikke er sammenhængende, men er brudt op i klumper, der "svømmer" isoleret i saltet. I forbindelse med hypotetiske hændelser behandler elværkerne en situation, hvor en efterforskningsboring i horsten starter en vandbevægelse gennem et deponeringshul. Denne situation vil være analog med

vandtilførsel gennem et anhydritlag, og vandtilførsel ved utæt forseglings, men under betydeligt ugunstigere betingelser.

Ref. 103 omhandler en matematisk model til beregning af bevægelseshastigheden af væskeindeslutninger i saltkrystaller i et temperaturfelt. Væskeindeslutninger og indeslutninger, som indeholder væske og mindre end ca. 10% gas, vil bevæge sig mod højere temperaturer d.v.s. ind mod de varmeproducerende affaldsbeholdere. Indeholder indeslutningerne mere end 10% gas vil de bevæge sig væk fra beholderne, mod lavere temperaturer.

Ref. 103 er baseret på en migrationsmodel, som er omtalt i litteraturen Anthony/Clines model. Modellen giver et generelt udtryk for den hastighed, hvormed brine og brine/gas, som er indesluttet i enkeltkrystaller, vil bevæge sig.

I ref. 103 er den matematiske model anvendt på et i litteraturen rapporteret eksperiment, som blev foretaget i en saltmine i USA (Projekt Salt Vault, 1971). Forskellen mellem beregnede og målte brinemængder ligger inden for en faktor 2. Ref. 103 henleder opmærksomheden på en betydelig usikkerhed ved de præcise forhold omkring eksperimentet og finder derfor, at den foretagne sammenligning bør behandles med en vis forsigtighed.

Med de konstanter og de temperaturgradienter, der er aktuelle for det foreslåede affald, finder elværkerne, at hastigheden af væskeindeslutninger vil variere fra 0,6 til 0,006 mm pr. år gennem de første 5000 år, og kun den brinemængde, der oprindeligt var inden for en afstand af 15 cm fra hulkanten, vil kunne nå frem til affaldsbeholderne. Bevægelsen væk fra affaldet af to-fase indeslutninger vil foregå betydeligt hurtigere, ca. 1500-2000 gange hurtigere. Efterhånden som de bevæger sig væk fra affaldet, falder temperaturgradienter imidlertid kraftigt, og bevægelsen vil gå i stå.

Elværkerne mener, at selv om deponering foregår direkte i et carnallitlag, som det der er set i boringen Erslev I, er virkningen på affaldet ikke særligt alarmerende. En sådan fejltagelse ville i værste fald give anledning til et brineindhold på 22 liter pr. m³ og den brinemængde, der akkumulerer omkring affaldet vil være ca. 10 liter pr. m. For at brinen overhovedet kan komme i forbindelse med affaldsbeholdere, forudsættes, at betonudstøbningen omkring cylindrene er opsprækket, og at brinen kan trænge gennem disse revner ind til jernbeholderne, der indeholder affaldet.

Hvis hele den tiltrukne brinemængde trænger ind til jernbeholderen gennem 1 rundtgående revne pr. m, vil korrosionsdybden fra 10 liter brine højst kunne blive ca. 25 mm eller 1/6 af beholdertykkelsen. Spredes angrebet over større dele af beholderen, vil korrosionsdybden blive tilsvarende mindre.

Elværkerne konkluderer således, at jernbeholderne omkring affaldscylinerne forbliver intakte. For at få en korrosionsdybde på 15 cm i en rundtgående revne pr. m kræves en disponibel brinemængde på 360 liter pr. m eller et brineindhold i saltet på ca. 800 liter brine pr. m³ salt, hvilket forekommer elværkerne absurd.

Konsulentvurderinger.

Institut for Kemiteknik, Danmarks Tekniske Højskole samt DGU har bistået med fagkyndig vurdering af ref. 103.

Instituttet for Kemiteknik har på basis af vurderingen af ref. 103 konkluderet, at modellen skønnes at være egnet til beskrivelse af brine- og brine/gasindeslutningers vandringshastighed igennem salt, såfremt modellens forudsætninger er opfyldt. Instituttet anfører, at yderligere undersøgelser synes påkrævet til at belyse, om dette er tilfældet omkring et geologisk affaldsdepot. På grundlag af resultater fra undersøgelser, som bl.a. er foretaget i forbindelse med deponeringsundersøgelser i saltaflejringer i USA, anfører instituttet endvidere, at man kan forestille sig, at den af elværkerne anvendte model for vandtransport gennem de enkelte korn skal kombineres med en model for vandoverførsel ad andre transportveje, f.eks. langs korngrænser og gennem revnedannelser, hvis sidstnævnte er en realistisk mulighed ved forholdene omkring et geologisk affaldsdepot. I så fald måtte der også tages hensyn til den hastighed, hvormed sådanne revner lukkes ved plastisk flow.

DGU har på basis af en vurdering af ref. 103 konkluderet, at der i forbindelse med deponering i det aktuelle stensalt fra Morshorsen er en række parametre, der med betydelig vægt påvirker væskeindeslutningernes migration, som ikke er medtaget i modellen. Nogle af parametrene er kendte og kan tages i regning, medens andre ikke er kendte i detaljer, og atter andre er næsten helt ukendte. Nogle af disse parametre vil hæmme væskeindeslutningernes migration, mens andre vil forøge den.

Endvidere anfører DGU, at det på grund af den nuværende mangelfulde viden om de parametre, der styrer væskeindeslutningernes migration, er vanskeligt at opstille en brugelig, matematisk model til beregning af tilstrømningen til affaldsbeholderne.

Gruppens vurdering.

Gruppen har ved sin vurdering af væsketilstrømning benyttet ref. A1 og A2.

Det anføres i ref. A2, at Anthony/Clines model er den mest komplette, teoretiske model, der findes, til at beskrive bevægelse af indeslutninger i saltkrystaller, men at der ikke er tilstrækkelige data til at verificere den. Valg af talværdier for parametre i formen må i nogen grad baseres på antagelser og ekstrapolationer. Forfatterne foreslår talværdier for nogle parametre, til brug ved en konservativ beregning. Der er i rapporten givet oplysninger, der gør det muligt at bestemme en temperaturafhængig vandringshastighed for brine af forskellig sammensætning. Om mængden af vand i salthorste anføres, at den totale mængde vand, der er tilstede i horste, er væsentligt lavere end mængden af vand i lagdelt salt.

For en meget konservativ beregning anføres, at et vandindhold på 0,1 vægt% kan benyttes. Dette er i overensstemmelse med elværkernes undersøgelser af boreprøver fra Morshorsten.

I ref. A1 anføres om vandindhold, at salthorste formentlig ikke indeholder så meget vand som lagdelt salt og derfor kan være mere egnede til deponering af radioaktivt affald.

Miljøstyrelsen har på grundlag af ref. A1 og ref. A2 foretaget beregninger af tilstrømning af væske til affaldsbeholdere, ref. VG 7. Styrelsen har benyttet Anthony/Clines model.

Med et indhold af vand på 0,1% svarende til 2,2 liter vand pr. m³ er vandtilstrømningen beregnet som funktion af tiden. DGU har oplyst, at brine i Morshorsten er bitter brine. Den tilstrømmede mængde af bitter brine til bunden af depotet vil efter 10.000 år være 9 liter pr. m affaldsstreng. I toppen findes tilsvarende 4 liter pr. m.

Den tilstrømmede vandmængde er proportional med vandkoncentrationen i saltet. Elværkerne angiver for carnallitholdige bjergarter et disponibelt vandindhold på 22 liter pr. m³. Ved deponering i carnallit skal resultaterne således øges med en faktor 10.

Efter 10.000 år er temperaturgradienten ved affaldet ca. 0,02 grad celsius pr. m. I ref. A1 anføres, at under påvirkning af en geotermisk temperaturgradient på ca. 0,03 grad celsius pr. m har brineindeslutninger ikke migreret siden, de blev dannet for ca. 225 mio. år siden. En temperaturgradient af denne størrelse må således anses for en effektiv tærskelværdi for brinemigration. De anførte tilstrømningsmængder ved 10.000 år repræsenterer således den totale vandmængde, der kan strømme til affaldet under de givne forudsætninger.

I beregningerne er ikke taget hensyn til eventuel vandring af brine langs korngrænser.

Med hensyn til væske og væske/gasmigration langs korngrænser og lagflader/grænser anfører DGU, at langs korngrænserne i saltbjergarterne findes vand, som i tørt stensalt ofte kun er få vandmolekyler tykt. Dette vand er fordelt som et sammenhængende "netværk". Migrationstiden gennem saltkrystallerne ud til korngrænserne og dermed til netværket, anslås til at ligge i størrelsesordenen 0-100 år. Væskeindeslutninger og væske/gasindeslutninger, som er tappet på korngrænserne, vil primært fortsætte migrationen langs korngrænsernes "netværk".

Forståelsen af migrationen langs korngrænserne er endnu ufuldstændig. I tilfælde af rent stensalt med lavt vandindhold er det således uafklaret, om permeabiliteten af sådant salt in situ er nul, eller om saltet blandt andet med ophav i ovennævnte "korngrænse-netværk" har en absolut meget lav permeabilitet.

DGU henviser til nyere modeller til simulering af væsketilstrømningen som blandt andet er udviklet i Vesttyskland (Institut für Tieflagerung, Braunschweig, 1981). I disse modeller antages væske og gas at blive afgivet til korn-grænse-netværket, for derefter at strømme videre dels gennem dette netværk, dels gennem mikrofakturer. I disse modeller anvendes væsketryk/damptryk/temperatur- og koncentrationsgradier som de drivende transportmekanismer. I modellerne er bl.a. de påførte randbetingelser for strømningerne afgørende (f.eks. antagelser vedrørende trykforholdene i deponeringshullet, eksempelvis hydrostatisk- eller geostatisk tryk).

DGU har anført, at der i salthorste forekommer områder med vådt stensalt (brinelommer), samt at de geofysiske målinger indikerer, at sådanne lommer kan findes i salt omkring Erslev II. Det er med den anvendte teknik ikke muligt at afgøre, om vådt salt findes i nærheden af borehullet. Hvis vådt stensalt findes i nærheden af affaldet, kan væsketrykket presse brinen ind til affaldet og videre op langs affaldsstrengen. Dette forudsætter, at der kan foregå vandtransport mellem det våde saltområde og affaldet og, at der kan foregå vandtransport i cementen op langs affaldsbeholderne.

DGU finder, at det ikke kan udelukkes, at store mængder brine på denne måde kan transporteres op langs affaldsstrengen.

DGU har anført, at carnallit i danske salthorste indeholder vand.

Gruppen finder, at ved de relevante temperatur og trykforhold kan der ikke forventes krystalvandsfrigørelser fra tør carnallit.

I det relevante temperaturområde medfører en temperaturstigning en forøgelse af den oprindelige vandmængde i våd carnallit på 4% pr. 10 graders temperaturstigning, ref. VG 8.

Gruppens konklusion.

Gruppen har ingen bemærkninger til elværkernes målinger af det totale indhold af vand svarende til højst 2.2 liter pr. m³ i kerneprøverne fra Erslev II fra det foreslåede deponeringsområde i intervallet 1.200-2.500 m.

Elværkerne har ved beregning af tilstrømning af væske til affaldsbeholderne benyttet en model, som beskriver vandring af brine og brine/gas indeslutninger i krystaller som følge af temperaturgradienter.

Elværkerne har ikke foretaget beregninger af vandtransporten langs korngrenser, gennem revner eller sammenhængende poresystemer. Endvidere har de set bort fra vekselvirkninger mellem de enkelte indeslutninger.

Med hensyn til behovet for at kombinere elværkernes vandtransportmodel med en model for vandtransport langs korngrenser og gennem revnedannelser må gruppen konstatere, at de foreliggende konsulentrapporter ikke tillader en éntydig konklusion.

sion, men da det internationalt er en akcepteret opfattelse, at der kan foregå væskebevægelser langs korngrænser, finder gruppen, at der skal tages hensyn til sådanne.

Gruppen finder i overensstemmelse med konsulentudtalelserne, at mangelfulde data for flere parametre gør, at elværkernes beregninger af væsketilstrømningen må anses for at være behæftet med usikkerhed, og at beregningerne derfor ikke kan anses for at være konservative.

Miljøstyrelsen har derfor med anvendelse af elværkernes model, men med mere konservative parameterværdier udført beregninger af, hvor meget vand der kan bevæge sig ind til affaldet. Miljøstyrelsens beregninger giver vandmængder, der er større end beregnet af elværkerne. Hertil kommer den vandmængde, som bevæger sig langs korngrænser, og som vil kunne øge vandtilstrømningen yderligere.

DGU har anført, at der i salthorste forekommer områder med vådt stensalt (brine og våd carnallit lommer), samt at der er mulighed for, at sådanne lommer kan findes i salt omkring Erslev II. Eventuelle utætheder i cementen omkring affaldsbeholderne vil kunne udgøre en transportvej for brine. Hvis vådt stensalt (brinelommer) findes i nærheden af affaldet, kan porevæsketrykket presse brinen ind til affaldet og videre op langs affaldsstrengen. Dette forudsætter, at der kan foregå vandtransport mellem det våde saltområde og affaldet, og at der kan foregå vandtransport i cementen op langs affaldsbeholderne.

DGU finder, at det ikke kan udelukkes, at store mængder vand på denne måde kan transporteres op langs affaldsstrengen.

Betydningen af væsketilstrømning er omtalt i afsnit 3.4.9 om korrosion.

3.4.9. Korrosion og udludning.

Problemstilling.

Tilstedeværelsen af vand er en nødvendig, men ikke tilstrækkelig betingelse for såvel korrosion som udvaskning af radioaktive stoffer fra glas, udludning. Udludningen kan ikke begynde, såfremt stålbeholderen er tæt, og korrosion af denne er derfor det første trin i enhver frigørelsesmekanisme, der ikke indebærer mekanisk overlast.

Elværernes behandling.

Elværkerne har behandlet korrosion i hovedrapporten på basis af ref. 80.

I ref. 80 gennemgås forskellige metaller korrosionsforhold i saltopløsninger og i geotermisk vand. Det påpeges, at man i saltet kan have så tørre forhold, at mængden af vand (brine) bliver bestemmende for korrosion, og at en stålbeholder derfor vil have lang levetid. Ved tilstedeværelse af større mængder vand korroderer jern hurtigere og ofte mere ujævnt, og det nævnes, at det kan være fordelagtigt at anvende en sammensat beholder med en indervæg af et mere ædelt metal, f.eks. kobber, der kan beskyttes katodisk af det korroderende jern og derfor sikre tæthed, i det mindste indtil alt jern er korroderet bort.

Elværkerne har valgt en beholder af kulstofstål, fordi korrosionshastigheden anses begrænset af den meget ringe tilstrømmende vandmængde på ca. 1 liter pr. m. Denne vandmængde antages at blive fuldstændig forbrugt ved en brintudviklende korrosionsproces, og dette er da et udtryk for den maksimalt mulige, jævnt fordelte, korrosion af størrelsesorden 0.1 mm, og selv ved pittingkorrosion anses det, at beholderen forbliver intakt.

Elværkerne har i hovedrapporten ikke behandlet udludning af radioaktive stoffer fra glas, fordi stålbeholderne anses for at forblive intakte.

Gruppens vurdering

I forbindelse med vurderingsarbejdet har gruppens faste konsulent vedrørende korrosionsspørgsmål oplyst følgende:

"Korrosionscentralen kan tilslutte sig, at det i tørt salt vil være vandtilstrømningen, der bestemmer den maksimalt mulige korrosion, og at selv en betydelig usikkerhed i skønnet af vandmængder ikke vil ændre konklusioner i ref 80 herom. Pittingkorrosion findes ikke sandsynlig i denne situation, ligesom der - i overensstemmelse med ref. 80 - ikke ses mulighed for spændingskorrosion.

Korrosionscentralen tilføjer, at selv om de af miljøstyrelsen beregnede vandmængder på 10 liter pr. meter tidobles, idet der f.eks. tages hensyn til resterende brine fra boringen og til visse af elværkerne upåagtede transportmekanismer, vil stålbeholderen ikke blive tæret igennem.

Korrosionscentralen finder iøvrigt, at en yderligere sikkerhed kunne være opnået ved at fastholde forslaget om en indre beholder af mere ædelt metal med en tykvægget beholder af mere uædelt metal.

Denne sikkerhed bygger på den omstændighed, at den indre beholder beskyttes galvanisk, så længe den er i kontakt med resten af stålbeholderen. Det kan herudover påregnes, at den indre beholder kan vælges af et sådant materiale, at den selv efter bortkorrosion af den ydre beholder vil korrodere meget langsomt og derved lægge et betydeligt åremål til den samlede levetid. Korrosionscentralen bemærker i denne forbindelse, at kobber måske ikke er det optimale materiale, men at andre legeringer kan forventes at give større sikkerhed."

Gruppens konklusion.

Det er med baggrund i Korrosionscentralens udtalelser gruppens opfattelse, at der ved deponering i rent, tørt stensalt, er så stor sikkerhed, at gennemtæring næppe vil finde sted over endog lange tidsrum som f.eks. 10.000 år, selv om det antages, at der foregår væsketilstrømning langs korngrænserne.

Det er gruppens opfattelse, at hvis affaldet får kontakt med vådt salt, eller våde carnallitbjergarter, vil det kunne give anledning til så stor væsketilstrømning, at gennemtæring af affaldsbeholderne vil kunne finde sted. Det bør derfor enten dokumenteres, at der ikke findes vådt salt i nærheden af deponeringshullet, eller også må det ved sikkerhedsanalysen godtgøres, at tilstedeværelse af områder med vådt salt ikke giver anledning til sikkerhedsmæssige problemer.

Den gasudvikling, som er et resultat af korrosionen, kan føre til trykopbygning under forseglingen. Denne trykopbygnings indflydelse på forseglingen er ikke behandlet af elværkerne.

Udludning er behandlet i afsnit 3.5.5 om menneskers indgreb.

3.4.10. Spredning af radioaktive stoffer med vand.

Problemstilling.

Spredning af forurenende stoffer med vand karakteriseres ved processerne konvektion, dispersion og retention.

Konvektion er den passive, fysiske transport uden fortynding.

Dispersion er opblanding og fortynding af opløste, forurenende stoffer på grund af diffusion og andre fysiske processer, der forårsages af vandets strømning. Dispersionsprocessen karakteriseres ved en dispersionskoefficient, der er tilgængelig for eksperimentel bestemmelse i et givet system. Ved dispersion sker en fortynding og udjævning af koncentrationsforskelle i grundvandet.

Ved retention forstås tilbageholdelse af stoffer i vandet hovedsagelig ved afsætning på andre materialer, adsorption. Den forekommer i praksis aldrig alene, idet alle stoffer i alle tilfælde er underkastet den fysiske betingede dispersion.

Hvis vandsbevægelserne kan antages at være neglige, vil diffusion være den eneste transportmåde for de forurenende stoffer.

Normalt må man forvente, at vandet vil bevæge sig, omend i dybere liggende lag uhyre langsomt. Det kan dog ikke udelukkes, at geologiske ændringer kan forøge vandbevægelser i et deponeringsområde.

Elværkernes behandling.

Elværkerne har behandlet de hydrogeologiske forhold i dæklagene over Morshorsten på baggrund af undersøgelser i 4 borer til 550 m's dybde. Der er opstillet en model til beskrivelse af grundvandsbevægelserne over horsten med henblik på beregning af transporttider og koncentrationer af eventuelt frigjorte radioaktive stoffer.

Opløsning af radioaktive stoffer i vand og adsorption er behandlet i ref. 100.

I ref. 100 diskuteres opløselighed af uran, neptunium, plutonium, americium samt fissionsproduktet technetium i forventede grundvandssammensætninger.

Det anføres, at disse radionuklider under de mest sandsynlige betingelser omkring depotet, vil bevæge sig langsommere end grundvandet.

De undersøgte elementer har bortset fra americium en meget begrænset opløselighed.

Bortset fra technetium eksisterer de øvrige elementer i kemiske forbindelser, der adsorberes stærkt på ionbytende mineraler som f.eks. ler. Technetium kan imidlertid også under visse omstændigheder adsorberes effektivt.

Ved normalt forekommende grundvandshastigheder vil bevægelsen være så langsom, at radioaktivt henfald sammen med blandingsprocesser sikrer, at radionuklidene aldrig vil findes i biosfæren i koncentrationer, der nærmer sig de maksimalt tilladelige.

Konsulentvurdering.

Instituttet for Kemiteknik, Danmarks Tekniske Højskole, har ydet fagkyndig bistand ved gennemgang af ref. 100, jf. ref. K 10. DGU har ydet fagkyndig bistand ved vurdering af den hydrogeologiske model, ref. K 19.

Institut for Kemiteknik har foretaget sammenligning af diagrammerne i ref. 100 og de dertil benyttede data med andre publicerede arbejder. Instituttet har følgende kommentarer og vurderinger på grundlag heraf.

I litteraturen angives flere mulige hydrolysereaktioner for uran, neptunium, plutonium og americium end medtaget i delrapporten. Instituttet vurderer, at dette forhold kan influere på forudsigelsen af radionuklidernes opløselighed og mobilitet.

For uran opløst i rent vand er der i store træk overensstemmelse med hensyn til de fremherskende oxidationstrin i opløsningen. Ligevægtskurven mellem hexa- og tetravalent uran er dog forskudt en smule i de forskellige beregninger. Instituttet fremholder beregninger, der viser, at opløseligheden af amorfe, vandholdige oxider er betydeligt større end af krystallinsk UO_2 . Tetravalent uran vil ved moderate temperaturer og de aktuelle pH-værdier sandsynligvis udfældes som amorfe, vandholdige oxider, der i uforstyrret tilstand formodentlig efterhånden omdannes til krystallinsk form. Instituttet finder på denne baggrund, at det bør undersøges nærmere, om amorfe, vandholdige oxider, eventuelt i samspil med andre faktorer, kan tænkes at bidrage til uranets mobilitet.

De fremholdte beregninger afviger endvidere væsentligt fra delrapportens resultater i ref. 100, hvad angår opløseligheden af krystallinsk UO_2 i rent vand. Dette skyldes, at der lægges forskellige kemiske reaktioner til grund for beregningerne.

Med hensyn til mobiliteten mener Institutttet, at tilsvarende betragtninger som for opløseligheden kan anføres vedrørende forudsigelsernes usikkerhed og afhængighed af tilstedeværelsen af kompleksdannende stoffer.

Sammenfattende anfører Institutttet følgende usikkerhedsmomenter for såvel opløselighed som mobilitet:

- a) ufuldstændigt kendskab til det enkelte radioaktive stofs kemiske reaktioner i vandige opløsninger,
- b) indflydelsen af den samtidige tilstedeværelse af andre stoffer i opløsningen,
- c) temperaturen afviger under de fleste geologiske betingelser fra 25°C.
- d) udfældning af tungere opløselige faste faser end oxider/hydroxider vil måske kunne mindske opløselighed og mobilitet
- e) betydningen af kolloider og polymere for radionuklidetransport bør undersøges nærmere,
- f) det bør undersøges, om amorfe oxider kan få betydning for opløselighed og mobilitet.

Institutttet påpeger, at før der drages så vidtgående konklusioner som i delrapporten, er det ønskeligt med en mere detaljeret dokumentation. Denne kunne eksempelvis omfatte en tabel over alle betydningsfulde radioaktive stoffers opløselighed bestemt under hensyntagen til de af Institutttet nævnte forhold.

I de tilfælde hvor det skønnes nødvendigt at basere sig på lerarter som geologisk barriere, er det Institutttets opfattelse, at adsorptionen på de aktuelle mineraler bør bestemmes eksperimentelt.

Det findes ønskeligt med en mere tilbunds gående redegørelse for de radioaktive stoffers bevægelighed, når lerarternes effektivitet medtages i beregningerne.

Gruppens vurdering.

I forbindelse med vurderingsarbejdet har gruppens faste konsulent vedrørende kemiske spørgsmål oplyst følgende:

"Under transport af de evt. opløste radionuklider fra depotområdet til biosfæren vil deres koncentration i grundvandet formindskes som følge af dispersionsprocesser og radioaktivt henfald. Adsorption på mineraloverflader forårsager en forsinkelse af radionuklide-transporten i forhold til vandtransporten, hvorved koncentrationen i de øvre grundvandsforekomster formindskes yderligere.

Omfattende undersøgelser igennem flere årtier har demonstreret, at kemiske vekselvirkninger mellem en geologisk formations mineralkomponenter og opløste radioaktive isotoper meget effektivt nedsætter spredningen af disse, selv i strømmende grundvand.

De kemiske mekanismer, der bevirker denne tilbageholdelse, er i store træk velundersøgte og forståede og har den væsentlige fordel, fremfor de geologiske vurderinger, at de vil fungere effektivt til et hvilket som helst tidspunkt nu og i fremtiden uden at være underkastet sandsynlighedsbetragtninger.

Tilbageholdelsesmekanismerne er ikke udelukkende af kemisk art, idet f.eks. den fysiske diffusion ind i porøse nabolag og lukkede porer vil kunne bevirke meget væsentlige forsinkelser af transport af de opløste stoffer. De mest effektive tilbageholdelsesmekanismer skyldes adsorption af de radioaktive stoffer på overflader af mineraler og suspenderede materialer.

Andre mekanismer såsom indbygning af de radioaktive stoffer i udfældede mineraler er sandsynlige, men mindre velundersøgte. Foreløbige undersøgelser på Forsøgsanlæg Risø tyder på, at den sidstnævnte proces er vidt udbredt og vil kunne bevirke en binding af de fleste radioaktive isotoper og bremse deres transport næsten fuldstændigt.

Adsorptionsevnen påvirkes på systematisk måde af grundvandets indhold af andre komponenter, der kan konkurrere med det radioaktive stof om adsorption på overflader. Stærke saltkoncentrationer vil generelt formindskes adsorptionsevnen omend i forskellig grad.

Det kan på grundlag af målinger forventes, at der finder tilbageholdelse sted af europium og enkelte aktinider i saltmættet brine i stensalt. Disse forhold er dog endnu ikke undersøgt i tilstrækkelig detaljer til, at man kan beregne en saltformations effektivitet som kemisk barriere. De udførte forsøg viser imidlertid med sikkerhed, at den besidder denne egenskab.

Tilbageholdelsesegenskaberne af kridtformationen over Morshorsten er dokumenteret ved undersøgelser på Forsøgsanlæg Risø og er vist at kunne tilskrives indholdet af calcite, calciumcarbonat.

Forsøg på Risø har vist, at cesium og strontium ionerne vil migrere ca. 10 gange langsommere i kridtformationen end brine. For ioner af cobolt og europium er fundet, at de vil vandre ca. 100 respektive 10000 gange langsommere end brine.

Tilbageholdelsesfaktorerne udviser kun ringe variation, når brinekoncentrationen varierer fra 1-5 M. Ved mere fortyndede saltopløsninger nedsættes transporthastighederne yderligere. Dette gælder især for cesium. Eventuelt frigjort cesium aktivitet vil derfor bindes stærkere til kridt, efterhånden som saltkoncentrationen i formationsvandet falder nærmere jordoverfladen.

Europiumionen afspejler den forventede opførsel af aktiniderne, der under de reducerende betingelser i undergrunden findes enten på den tetravalente- eller den trivalente form. I den tetravalente form er alle aktinider ekstremt tungtopløselige, og de vil derfor i opløsning næsten udelukkende findes som trivalente ioner. Europiumionen ligner i sin kemiske opførsel meget de trivalente aktinider, og hvorfor disse må forventes at blive stærkt hæmmet i deres migration gennem kridtformationen og at vandre ca. 10000 gange langsommere end grundvandet.

Den svagt radioaktive technetium isotop, vil i undergrunden kunne reduceres til meget tungtopløseligt $TcO(OH)_2$ af f.eks. pyrit (svovlkis), der er vidt udbredt enten som større konkretioner eller som findisperget materiale.

De underste lag af de kvartære formationer vil udvise lignende eller endog mere udprægede adsorptionsforhold på grund af deres indhold af lerminerale og andre forvittringsprodukter.

Først når de radioaktive isotoper når de øverste jordlag med det forøgede indhold af organiske komponenter, frit carbonat og oxyderende forhold, vil retentionen

kunne blive modvirket, selvom de tilstedeværende humusstoffer i høj grad vil binde væsentlige mængder af det radioaktive materiale til sig i en immobil form.

Under disse betingelser vil tecnetium kunne blive oxideret til pertechnat, der ikke adsorberes. Visse af aktiniderne som uran, neptunium og plutonium vil kunne oxideres til pentavalente eller hexavalente ioner, der enten kun udviser svag adsorption eller danner negativt ladede komplekser, der slet ikke adsorberes.

Ovenstående forhold er bekræftet ved mange laboratorieforsøg og er den kemiske årsag til spredning fra overfladenære affaldsdepoter.

Under langt det meste af transportvejen fra et underjordisk depot hersker der imidlertid geokemiske betingelser, der vil kunne nedbremse transporten af eventuelt frigjort radioaktivt affald i en sådan grad, at det kun vil kunne nå biosfæren i ubetydelige mængder, inden det er forsvundet på grund af det radioaktive henfald."

Gruppens konklusion.

Så længe saltbarrieren er intakt, vil der ikke ske spredning af radioaktive stoffer. Hvis saltbarrieren er brudt, vil radioaktive stoffer kunne spredes ud af horsten og op i dæklagene over horsten.

Med hensyn til spredning i stensalt kan det på grundlag af målinger forventes, at der finder tilbageholdelse sted af europium og enkelte aktinider i saltmættet brine.

Tilbageholdelsen i dæklagene over salthorsten er betydelig, men stærkt afhængig af hvorledes brinen med de radioaktive stoffer passerer gennem disse lag. Ved en langsom porevandsstrømning (interstitiel strømning) under små gradienter, er tilbageholdelsen stor, mens den er betydeligt mindre ved en hurtig sprækkestrømning under store trykgradienter. En nøjagtig beskrivelse af strømningsforholdene er ikke mulig ud fra de gennemførte undersøgelser.

3.5. SIKKERHEDEN OVER FOR YDRE PÅVIRKNINGER.

3.5.1. Indledning.

Voldsomme naturbegivenheder eller menneskers indgreb i deponeringsområdet kan føre til ændringer i de forudsætninger, der er lagt til grund for vurdering af sikkerheden under normale forhold.

Der kan f.eks. være tale om, at salthorsten ikke yder den beskyttelse mod vandindtrængen til depotet som forudsat eller en ændring af den beskyttelse, som dæklagene yder mod transport af radioaktive stoffer til biosfæren.

Ved vurdering af sikkerheden under sådanne forhold skal både sandsynligheden og konsekvenserne heraf vurderes.

3.5.2. Voldsomme naturbegivenheder.

Problemstilling.

Voldsomme naturbegivenheder omfatter f.eks. jordskælv og forkastning, vulkanisme, meteoredfald og istid.

Virkningen af sådanne begivenheder kan være: fjernelse af dæklag eller dele heraf, ændring af de hydrogeologiske forhold i dæklagene og ændring af trykforholdene i undergrunden som følge af isens belastning.

Disse forhold er af betydning for såvel salthorsten som for de formationer, som befinder sig over og omkring horsten.

Elværkernes behandling.

Elværkerne anfører i hovedrapporten de frigørelsesmekanismer, som de har anset for relevante at medtage i sikkerhedsanalysen. Disse mekanismer er grupperet i to kategorier, der afspejler den sandsynlighed, hvormed elværkerne forventer, at de vil forekomme. I den første kategori, normale eller forventede forhold, er samlet de processer og mekanismer, som elværkerne med sikkerhed eller med stor sandsynlighed forventer vil forekomme. I den anden kategori, hypotetiske

begivenheder, er samlet forhold, som elværkerne ikke forventer vil indtræffe, men som de alligevel ikke på det foreliggende grundlag helt kan udelukke.

Således medtages virkningen af jordskælv og istid under kategori 1, medens tektoniske bevægelser under samt forkastninger over horsten er medtaget i kategori 2.

Elværkerne omtaler et vulkanudbrud under horsten som værende en teoretisk mulig frigørelsesmekanisme, men udelukker den som værende for usandsynlig. Elværkerne omtaler ikke meteornedfald.

For at vurdere virkningen af situationer i kategori 2 på horsten og depotet har elværkerne valgt to scenarier, som de mener giver et overdrevent billede af de forhold, som kan tænkes at forekomme.

I det ene scenarium beregnes ændringerne i grundvandsbevægelserne over horsten for en situation, hvor der findes to lodrette forkastningsområder fra jordoverfladen ned til toppen af horsten. I det andet scenarium beregnes virkningen på saltbevægelserne i horsten af en tektonisk forstyrrelse, der går midt gennem bundlaget under horsten.

I det første scenarium har elværkerne undersøgt, om ændringerne i grundvandsbevægelserne og den dermed forbundne opløsning af salthorsten vil udgøre nogen risiko for nedbrydning af saltbarrieren mellem affaldet og grundvandet.

På basis af beregninger konkluderer elværkerne, at selv om der skulle findes forkastningsområder over horsten med høj permeabilitet, så vil opløsningshastigheden stadig være uvæsentlig.

I det andet scenarie har elværkerne beregnet virkningen af en kontinuert isostatisk forskydning af horstens bundlag på 50 m over 10.000 år. Forskydnings-spændingerne i saltet, som den langsomme forskydning af bundlaget giver anledning til, beregnes til ca. 10 bar. På basis heraf konkluderer elværkerne, at der ikke er risiko for revner i saltet og dermed i salthorsten.

Elværkerne finder, at en fremtidig istid formentlig ikke vil influere voldsomt på horsten eller depotet på grund af den dybe placering.

Isens eroderende virkning rækker efter elværkernes opfattelse højst til dybder af 100-200m. En direkte påvirkning af horsten eller depotet er således efter elværkernes opfattelse ikke tænkelig. Derimod vil deponeringshullernes forsegling blive påvirket.

Elværkerne anser denne situation for dækket af scenariet om "utilsigtet anbring". Vedrørende ændringerne af de hydrogeologiske forhold anfører elværkerne, at grundvandsbevægelserne vil blive ændret på en sådan måde, at grundvandet i dybgrunden vil bevæge sig langsommere og få længere vej til områder, hvor det kan komme op til overfladen. Dog finder elværkerne, at der i forbindelse med en nedslæbning kan være opstået forkastningsområder over horsten med forøget permeabilitet, og at betonudstøbningen omkring affaldet kan blive sprækket og knækket. Denne situation anses for dækket af "borehulsscenarioet" og "forkastningsscenarioet". Endvidere finder elværkerne, at saltet som følge af isens belastning vil kunne presses noget sammen, og at en vis omlejring af saltet vil kunne tænkes under isens passage. Elværkerne finder, at saltet i det mindste delvis vil vende tilbage til udgangspositionen, når belastningen igen bliver mere homogen på alle sider af horsten, enten fordi isen har passeret eller trukket sig tilbage.

Konsulentvurdering.

Geodætisk Institut har udarbejdet en udtalelse vedrørende seismiske forhold, ref. VG 4.

Instituttet konkluderer, at elværkernes udtalelse om, at Danmark er et fredeligt sted med hensyn til jordskælv, er blevet yderligere underbygget af de senere års særlige indsats for at observere jordskælv i det nordlige Jylland.

Hvad angår virkningerne af jordskælv på et lukket underjordisk affaldsdepot udtaler Instituttet, at nære jordskælv, som mindst må være i sedimenttykkelsens afstand, ikke kan forventes at blive af væsentlig styrke. Det nærmeste jordskælvsområde er i Skagerak, ca. 80-100 km fra kysten, men selv de største jordskælv her er ganske små. Skal vi finde større jordskælv, må vi mindst til vestkysten af Sverige, men jordskælvsbølger herfra vil være dæmpet kraftigt, inden de når frem til Mors.

Gruppens vurdering.

DGU har anført, at de i rapporterne omtalte jordskælv er udtryk for momentane energiudløsninger, d.v.s. momentane bevægelser i dybgrunden. Sådanne jordskælv vil med sikkerhed forekomme. Spørgsmålene er derfor, om depotet vil påvirkes af eventuelle jordskælvsbølger, eller om jordskælvet kan tænkes lokaliseret således og være af en sådan intensitet, at det vil føre til brud eller aktivere gamle brud i lagene umiddelbart under, omkring eller over horsten.

Disse spørgsmål er knyttet til dels de intensiteter, der kan forventes at forekomme, dels til lokaliseringen af jordskælvenes epicentre inden for en tidshorisont, som er relevant ved sikkerhedsvurderingen.

DGU anfører, at det nordjyske salthorstområde nu er relativt seismisk roligt, idet kraftigere jordskælv ikke er observeret i nyere tid. De synes koncentreret længere mod vest ude i Nordsøen. Der er dog lokaliseret et enkelt svagt jordskælv under Mors inden for de sidste 2 år, hvor observationsmulighederne er blevet stærkt forbedret.

Præcise forudsigelser om risikoen for fremtidig seismisk aktivitet kan ikke gives. Dette forudsætter et observationsmateriale, der strækker sig over en længere periode end det foreliggende. Herudover forudsættes dels et langt mere indgående kendskab til undergrundens dybere strukturer og dels et detaljeret kendskab til den nuværende spændingsfordeling i undergrunden. DGU kan tilslutte sig elværkernes konklusion om, "at jordskælv, der fører til brud i, eller til fornyede bevægelser i eksisterende brudzoner i lagene under/over eller omkring horsten ikke kan udelukkes".

Angående intensiteter anfører instituttet, at kvartære, herunder også sen- og postglaciale forkastningsbevægelser kendes fra Danmark, navnligt fra den fennoskandiske randzone. Springhøjden af disse forkastninger i kvartær tid vides der meget lidt om. Det må antages, at opsummerede springhøjder på mere end 50 meter er usandsynlige inden for en kort periode på f.eks. 1.000 år. Over en periode på 10.000 år kan sådanne springhøjder på over 50 meter derimod ikke fuldstændig udelukkes for det danske område. Selv om Morshorsten er placeret marginalt i forhold til den fennoskandiske randzone, må det derfor betragtes som værende rimeligt at beregne virkningen af forkastninger i bundlaget under Mors-horsten med en samlet springhøjde på 50 meter, idet forkastningsbevægelser på

væsentligt mere end 50 meter inden for de næste 10.000 år næppe kan komme på tale.

Ved elværkernes scenarie, hvor virkningerne af en tektonisk forstyrrelse, der går midt gennem bundlaget under horsten, er beregnet, behandles en forskydning på 50 meter.

DGU finder imidlertid ikke, at der er tale om, at der ved dette scenarie beregnes virkningen af et jordskælv (d.v.s. springvise bevægelser i områdets dybgrund). En mere realistisk opgaveformulering havde derfor været, at man ville beregne virkningen af en samlet forkastningsbevægelse på 50 m, idet denne bevægelse opdeles i en serie af momentane bevægelser, hvis hyppighed aftager eksponentielt med tiden og klinger ud med en tidskonstant på 10.000 år. Beregningen kunne derefter gennemføres, idet man antager, at de enkelte delbevægelser andrager f.eks. 10 m, 1 m, 10 cm, 1 cm, 1 mm etc. i hvert sit regneeksempel. Herved ville man opnå et mål for, under hvilke seismiske forhold der vil kunne opstå en forkastning, som evt. gennemsætter hele salthorsten, som gennemsætter dele af salthorsten, eller som helt opfanges af salthorsten. En sådan beregningsmetodes resultater vil derpå kunne sættes i relation til den for området forventede seismicitet.

DGU anfører, at brud i dæklagene og sidestenen i altovervejende grad er et resultat af diapirismen (saltopstigningen). Sådanne bruddannelser forekommer praktisk taget altid over og omkring salthorste. Dette er også tilfældet for Morshorstens vedkommende. Forkastninger i dæklagene tilhører derfor den kategori af hændelser, som af elværkerne betegnes som "normale og forventlige forhold" og er ikke som anført i rapporterne en "hypotetisk hændelse". Brud i horstens underlag (basement) er derimod af mere "hypotetisk hændelse" natur, d.v.s. at sandsynligheden for, at sådanne brud dannes, er relativt mindre.

Vedrørende isens erosion anfører DGU, at der i løbet af korte geologiske tidsrum skønnes at kunne fjernes op til maksimalt ca. 300 m af lagene over horsten. Fra Danmark kendes kun i enkelte tilfælde istransporterede flager på 300 m's tykkelse. Vedrørende de hydrogeologiske forhold anfører instituttet, at virkningen af ændringer i dæklagenes tykkelse, permeabilitets- og potentialforhold kan belyses gennem studie af disse ændringers betydning for grundvandsstrømningerne.

Endelig anfører instituttet, at isbelastningen vil have betydning for salthorstens bevægelseshastighed. Til belysning af dette anbefaler instituttet bevægelseshastigheds-

stigheden belyst gennem beregninger, hvor salthorstområdet er belastet af en iskappe, f.eks. hvor en isrand befinder sig i undersøgelsesområdet. Den under fase 2 undersøgelserne udviklede simuleringsmodel er anvendelig til dette formål.

Gruppens konklusion.

Gruppen finder, at de eneste voldsomme naturfænomener, som vil kunne tænkes at influere på depotet således er springvise deformationer i underlaget under horsten. Beregninger af effekten af sådanne foreligger imidlertid ikke, men sandsynligheden for deformationer, der har sikkerhedsmæssig betydning, må anses for ringe.

3.5.3. Menneskers indgreb i salthorsten

Problemstilling.

Placering af affaldet i stor dybde og forsegling af depotet ved fuldstændig opfyldning af åbningerne til jordoverfladen skal sikre, at deponeringsforholdene ikke påvirkes af anvendelse af de overliggende arealer og øvre dæklag. Overfladearealerne skal kunne reetableres efter forseglingen uden særlige restriktioner på deres fremtidige anvendelse.

Ifølge gældende regler skal alle projekter i undergrunden godkendes. Gennemførte projekter skal ligeledes registreres med alle relevante oplysninger. Denne registrering giver grundlag for at forudsætte, at der, så længe myndighedskontrolten fungerer, ikke iværksættes projekter i undergrunden, hvor deponering har fundet sted.

Det må imidlertid forudses, at registreringer af affaldsdeponering kan gå tabt eller ikke udnyttes. Det kan således ikke udelukkes, at fremtidige samfund med høj teknologisk stadiet griber ind i deponeringsforholdene uden på forhånd at kende til affaldet og måske uden at blive opmærksom derpå.

Betydningen for deponeringssikkerheden af utilsigtede, fremtidige indgreb kan bedømmes ved betragtning af postulerede situationer, der repræsenterer forskelligartede ændringer af de geologiske barrierer og deponeringsforholdene i øvrigt. I forbindelse med deponering i en salthorst kan man med udgangspunkt i nutidig teknologi forestille sig forskellige muligheder for menneskelige indgreb. Det kan være boringer i dæklagene over og omkring salthorsten samt boringer og anlægsar-

bejder direkte i salthorsten. Sidstnævnte projekter kan dreje sig om udvinding af salt og andre mineraler og om etablering af lagerrum, kaverne, for olie, gas m.v.

Elværkernes behandling.

Elværkerne har behandlet problemstillingen om menneskers indgreb i affaldsdepotet i hovedrapporten.

Der er betragtet to typer indgreb i et dybhulsanlæg placeret i Morshorsten: En kaverneudskylning, der berører affaldet, og en dyb boring, der får vandforbindelse med et deponeringshul. Begge indgreb forudsættes at finde sted 500 år efter deponeringen, idet elværkerne betragter det som udelukket, at indgreb foretages så længe kendskabet til deponeringen eksisterer, og den nuværende kontrol med anvendelse af undergrunden opretholdes.

Elværkerne har anført, at konsekvenser af utæt forsegling er dækket af behandlingen af menneskers indgreb.

I. Kaverneudskylning.

Elværkerne anfører, at sandsynligheden for, at der udskylles en kaverne, der rammer et ukendt affaldsdepot, vil være meget lille. Dette begrundes bl.a. med, at kaverne skal ramme med sin akse mindre end 10-20 m fra et deponeringshul, og at affaldet burde kunne afsløres af målinger i efterforskningsboringen inden kaverneudskylningen. Videre anføres, at fremtidig anvendelse af salthorste til kaverne vil koncentrere sig om de mindst 10 salthorste, som findes i det nordjyske område, hvor saltoverfladen ligger betydeligt højere end Morshorstens.

Elværkerne betragter to muligheder for placering af en kaverne i salthorsten - en højtliggende kaverne, der kun kommer i kontakt med deponeringshullets forsegling og en dybtliggende kaverne, der berører selve affaldsdepotet.

Den førstnævnte situation betragtes på samme måde som an boring af forseglingen. I begge tilfælde antages, at indgrebet fører til, at vand siver ned i deponeringshullet omkring affaldet. Korrosionen af affaldsbeholderne i det stillestående saltvand findes at blive helt ubetydelig, således at beholderne forbliver intakte.

Ved behandlingen af den situation, hvor kavernen kommer i direkte kontakt med affaldet, forudsætter elværkerne, at udskylningen berører et enkelt deponeringshul, og at samtlige affaldsbeholdere fra dette hul falder ind i kavernen. Yderligere forudsættes, at affaldet opdages, når det falder ind i kavernen, og at denne nedlukkes straks herefter. Inden udgangsboringen forsegles, tænkes kavernen fyldt med fast, vandfortrængende materiale, hvorved vandindholdet af kavernen reduceres til ca. 40% af kavernens volumen.

En del af det tilbageblevne vand i kavernen tænkes efter forseglingen presset ud i formationerne over horsten som følge af saltets sammenkrybning. Elværkerne behandler tre tilfælde - udpresning til de nedre lavpermeable kridtlag, udpresning til overfladelagene eller andre højpermeable lag samt udpresning gennem en kaverneforsegling, der er utæt helt op til jordoverfladen.

Vandudpresning beregnes at forløbe over 150-200 år ved udpresning til de nedre kridtlag. I de andre tilfælde findes udpresningstiden til ca. 20 år.

Elværkerne postulerer, at alle affaldsbeholdere er gennemtæret på det tidspunkt kavernen lukkes og vandudpresningen begynder. Mængden af radioaktive stoffer, der udpresses fra kavernen, bestemmes derved af udludningen af stofferne fra affaldsglasset. Den videre transport af de radioaktive stoffer mod og i det øvre grundvand er herefter bedømt.

Ved udpresning til de nedre kridtlag finder elværkerne, at kun zirconium-93 og cesium-135 når frem til overfladen. Aktiviteten pr. liter af disse to isotoper i grundvandet i de øverste jordlag vil være mange størrelsesordener mindre end aktiviteten pr. liter af naturligt forekommende radioaktive stoffer i vand.

Ved udpresning til overfladelagene forudsættes, at de radioaktive stoffer fra affaldet mere eller mindre direkte tilføres Lyngbro Bæk, og at denne anvendes som drikkevandsforsyning. Den samlede dosis fra drikkevand fra Lyngbro Bæk beregnes til ca. 0,5 rem pr. år og tilskud til doserne fra andre anvendelser af grundvandet f.eks. mark- og kreaturvanding, findes betydningsløse. Etablering af en boring til drikkevandsforsyning kan medføre doser af størrelsesordenen 5-10 rem pr. år, hvis boringen placeres i meget lille afstand fra udpresningsstedet.

I det tredje tilfælde, hvor udpresningen finder sted direkte til jordoverfladen, vil det udpressede vand kunne fremtræde som en artesisk saltvandskilde. Elværkerne forudsætter, at kilden vil blive søgt standset, og at situationen derefter vil blive den samme som ved udpresning til overfladelagene.

II. Boreindgreb.

Elværkerne vurderer den situation, at en boring ned i salthorsten utilsigtet rammer forseglingen i et deponeringshul. Idet det forudsættes, at forseglingen er utæt, således, at vand fra boringen kan sive ned omkring affaldsbeholderne, betragtes den deraf følgende korrosion af affaldsbeholderne. Elværkerne finder, at under disse forudsætninger, hvor betonudstøbningen kan indeholde 11 liter vand pr. m affaldsstreng, bliver korrosionen ca. 0,35 g jern pr. m. Dette finder elværkerne er betydningsløst, selv hvis korrosion bliver ujævnt fordelt.

For at opnå en situation, der indebærer vandstrømning forbi affaldsbeholderne, postulerer elværkerne, at dybdeboringen berører den nedre del af et deponeringshul, og at forseglingen er utæt helt op til det øvre grundvand. Vandstrømning forudsætter dog tillige en trykforskel, som indføres ved at antage forskellige grundvandstryk ved deponeringshul og boring. Denne trykforskel vil senere udbalanceres af vægtfyldeforskel mellem frisk vand og saltvand og strømmingen vil ophøre.

På baggrund af strømningsberegningerne konkluderer elværkerne, at der højst sandsynligt ikke vil ske gennemtæring af affaldsbeholderne, og at der derfor ikke vil ske udludning fra depotet. Dette begrundes med, at levetiden af beholderne findes at være 25.000-100.000 år eller mere for den beregnede vandstrømningshastighed, når der forudsættes, at strømmingen ikke ophører. Endvidere frenholdes, at strømmingen må antages at standse meget tidligere; blandt andet som følge af, at borehullet kryber sammen. Elværkerne bedømmer, at dette vil ske efter ca. 500 år.

Elværkerne anfører dog, at der er mange skøn involveret i ovenstående konklusion. Derfor postuleres i supplerende konsekvensberegninger, at samtlige affaldsbeholdere er gennemtæret 500 år efter boreindgrebet, d.v.s. udludning af radioaktive stoffer fra affaldsglasset starter 1000 år efter deponeringen.

Med udgangspunkt heri er foretaget en vurdering af transporten af radioaktive stoffer mod de øvre grundvandslag. Elværkerne konkluderer, at kun isotoperne cesium-135 og zirconium-93 har mulighed for at nå frem til jordoverfladen, og at dette ifølge beregningerne først vil ske efter 1-2 millioner år, at aktiviteten pr. liter grundvand, er mange størrelsesordener mindre end aktiviteten pr. liter af det naturlige indhold af radioaktive stoffer.

Sammenfattende finder elværkerne, at et utilstigtet boreindgreb i dybhulsdepotet sandsynligvis ikke vil frigøre radioaktive stoffer fra depotet. Sker der alligevel en udsivning, vil de overliggende kridtlag effektivt forhindre forurening af de udnyttelige grundvandslag i overfladen.

Gruppens vurdering.

Et samfund, som har bevaret kendskabet til affaldsdeponering, og som er i besiddelse af teknologi til gennemførelse af projekter, der kunne berøre deponeringsforholdene, må forventes at administrere således, at deponeringsikkerheden ikke unødigt forringes. Det synes derfor rimeligt i sikkerhedsvurderingen af en påtænkt deponering at se bort fra, at mennesker bevidst griber ind i horsten.

For at menneskers indgreb i et affaldsdepot i en salthorst skal få indflydelse på den fortsatte deponeringssikkerhed, må de medføre, at der føres vand til eller fra deponeringsområdet, samtidig med at der skabes forudsætninger for vandtransport op til biosfæren af radioaktive stoffer, som måtte blive frigjort fra depotet.

Boringer ned i dæklagene over og omkring salthorsten vil kunne ændre de hydrologiske forhold, således at opløsningen af salthorsten fremmes. Selve depotet vil dog først blive berørt, når det overliggende saltvolumen er fjernet.

De af elværkerne betragtede direkte indgreb i affaldsdepotet - kaverneudskylning og boreindgreb - repræsenterer to vidt forskellige påvirkninger af depotet: tilførsel af betydelige mængder vand med en vis forbindelse til de øvre grundvandslag; respektive gennemstrømning af vand med forbindelse til grundvandet.

De to typer indgreb, som elværkerne har behandlet, anser gruppen som et tilstrækkeligt grundlag for vurdering af menneskers indgreb i Morshorsten.

I. Kaverneudskylning.

Som baggrund for bedømmelsen af elværkernes behandling af kaverneudskylning gives indledningsvis en sammenstilling af oplysninger om den nuværende teknologi for bygning af kaverne i saltforekomster.

Formålet med kaverneudskylning er at anlægge et lagerrum for f.eks. olie eller gas. Desuden frembringes kaverne som resultat af saltudvinding ved udskylning.

Kaverners form og størrelse er meget varierende, afhængig bl.a. af kaverneområdets geologi og struktur. I salthorste foretrækkes en cylindrisk form, der følger naturligt af udskylningen. Typisk forhold mellem kaverners højde og diameter er 4-5. Kavernestørrelsen ligger i praksis mellem 100 og 500 tusind m^3 , men op til 1 million m^3 er tænkelig. En kaverne af sidstnævnte størrelse vil typisk have en diameter på 60-75 m og en højde på 250-350 m.

Lager-kaverner for olie placeres af stabilitetsgrunde normalt 200-300 m under saltspejlet. Gaskaverner lægges i dybder ned til 1800 m under jordoverfladen.

Udskylning af en kaverne sættes i gang ud fra en udgangsboring, som føres ned i salthorsten til en dybde svarende til placering af den planlagte kavernes bund. Udskylningshastigheden ligger typisk omkring 30 m^3 salt pr. time.

Det forventes at vare 2-4 år at udskylle en kaverne til olie eller gas af den nævnte størrelsesorden, medens udskylningstiden for kaverner til saltindvinding er 30-50 år.

Kaverners levetid er begrænset på grund af saltets krybning. Ved projektering af lager-kaverner tilstræbes en driftstid på 30 år. Driftstiden kan eventuelt forlænges ved en efterskylning.

Mange spørgsmål i forbindelse med kaverner og deres levetid har ikke på nuværende tidspunkt éntydige svar. Når en kaverne opgives, vil der formentlig blive stillet krav om fyldning med vand og lukning af forbindelsen til jordoverfladen.

Gruppen skal til elværkernes sandsynlighedsbetragtninger bemærke, at den kritiske afstand mellem deponeringshul og kavernens akse må anses for større end fastsat af elværkerne, at der ikke foreligger dokumentation for, at affaldsdepotet vil kunne registreres ved efterforskningsundersøgelserne, samt at højdebetragtningerne vedrørende saltoverfladen ikke er relevante ved anlæg af gaskaverner i Morshorsten. Disse forbehold sammen med, at danske salthorste fremover kan være attraktive for saltudvinding og kaverneprojekter, ændrer dog ikke ved elværkernes bedømmelse, at sandsynligheden for ubevidst at ramme ned i affaldsdepotet kan betragtes som lille.

Elværkerne forudsætter en kaverne af størrelse 1 million m^3 med 20-30 m i diameter. En sådan kaverne vil være mellem 3200 m og 1500 m høj og vil kunne berøre samtlige affaldsbeholdere i et deponeringshul.

Denne forudsætning fører til en stærk overvurdering af antallet af berørte affaldsbeholdere. Med henvisning til normal praksis ved kaverneprojektering vil en kaverne af den antagne størrelse have en højde på mellem 250 m og 350 m.

Antages en kaverne, der er 550 m høj (højde/diameter forhold på 10), anlagt som gaskaverne, kan ca. 100 affaldsbeholdere blive berørt og ikke 215, som forudsat af elværkerne.

Anlægges kavernen som en olie-kaverne vil det sandsynlige antal berørte beholdere være væsentlig mindre.

Elværkerne har forudsat, at affaldet bliver opdaget, når det falder ind i kavernen under udskylningsarbejdet, og at kavernen derefter opgives. Hertil skal bemærkes, at den teknologi som findes i dag ikke giver sikkerhed for opdagelse af affaldet. En mere realistisk situation er, at kaverneprojektet fortsættes uden kendskab til affaldet i kavernen.

Elværkerne postulerer, at affaldsbeholderne er tøret bort ved standsningen af kaverneprojektet og lukningen af kavernen. Gruppens bedømmelser giver grundlag for at antage, at beholderne normalt vil være intakte og kun lidt angrebet af korrosion på det tidspunkt, de berøres af kaverneudskylningen, uanset at dette sker langt ude i fremtiden. Under visse omstændigheder med tilstedeværelse af vådt salt vil det dog kunne tænkes, at de kan være gennemtærede.

På baggrund af disse bemærkninger til elværkernes forudsætninger har Tilsynet med Nukleare Anlæg gennemgået et mere realistisk og repræsentativt hændelsesforløb:

- kaverneudskylningen berører op til 100 affaldsbeholdere, der er intakte,
- udskylningen sker i løbet af 4 år, og kaverne-projektet gennemføres som oprindelig planlagt med en driftstid på 30 år. Affaldsbeholderne ligger i bunden af kavernen omgivet af saltvand,
- efter driften af kavernen forlades den saltvandsfyldt og forseglet.

Korrosion af affaldsbeholderne må under de givne forhold forventes at optræde som meget ujævnt fordelt punktkorrosion i kombination med ensartet korrosion. Tilsynet har beregnet, hvornår 10% af den enkelte beholders vægt vil være

korroderet bort. På baggrund af erfaringer skønnes det, at der på dette tidspunkt er mulighed for lækage som følge af en lokal gennemtæring.

Til grund for Tilsynets beregninger ligger erfaringstal for korrosionshastighed i iltmættet saltopløsning på 0,5 mm pr. år og 0,1 mm pr. år i et iltfrit brinemiljø.

Ved kaverneudskylningen tilføres til stadighed frisk vand med stort iltindhold. Korrosionshastigheden sættes derfor til 0,5 mm pr. år. Antages udskylningen at strække sig over 4 år, vil korrosionen i denne periode udgøre ca. 1% af affaldsbeholdervægten. Der forventes derfor ikke at optræde gennemtæring.

For kavernens driftsperiode, 30 år, forudsættes i overensstemmelse med normal praksis, at 10% af kavernens volumen er fyldt med brine. Det giver 100.000 m³ brine i en kaverne af den størrelse, som er forudsat. Brinen antages iltmættet ved begyndelsen af driftsperioden, hvorefter iltindholdet går ned som følge af iltforbruget til korrosion af beholderne. Når og såfremt al ilt er opbrugt, vil korrosionshastigheden ændres fra 0,5 mm pr. år til 0,1 mm pr. år.

Korrosionen af de enkelte affaldsbeholdere vil afhænge af antallet af beholdere, som findes i kavernen. Findes kun een beholder, korroderes 7% af beholdervægten i løbet af 30 år. For 100 beholdere findes tilsvarende 2%.

Det betragtes derfor som usandsynligt, at der under driftsperioden sker gennemtæring af affaldsbeholderne i kavernen.

Efter afsluttet driftsperiode forudsættes, at kavernen bliver fyldt med iltmættet vand og forbindelsen til jordoverfladen lukket.

En samlet korrosion på 10% for 1 eller 100 beholdere nås efter ca. 40-45 år, resp. 120-160, regnet fra kaverneudskylningsens start.

Fastsættelsen af 10% korrosion af den enkelte affaldsbeholder, som kriterium for gennemtæring, er bestemt af materiale og udformning af de beholdere, som elværkerne har fremlagt i hovedrapporten. Korrosionscentralen har peget på, at yderligere sikkerhed kunne være opnået ved at anvende en beholder med galvanisk beskyttelse. Denne løsning indebærer, at praktisk taget al jernet skal korroderes bort, før der sker gennemtæring.

Galvanisk beskyttelse af affaldsbeholdere vil i en situation, som beskrevet ovenfor, indebære, at beholderne vil beskytte affaldet mod indtrængning af vand i ca. 400 år med kun 1 beholder i kavernen og i ca. 2000 år med 100 beholdere i kavernen. Det er i disse beregninger ikke taget i betragtning, at kavernen kryber sammen. Antages utæt forsegling af udgangsboringen, jf. elværkernes forudsætning om udpresning til det øvre grundvand, må kavernen ifølge de grundlæggende krybelove forventes at være indsnævret helt efter 500 år. Med galvanisk beskyttede affaldsbeholdere vil udpresningen af kavernevandet finde sted inden beholderne gennemtæres, når bortset fra den situation, at der kun findes enkelte affaldsbeholdere i kavernen.

Antages utæt forsegling i horsten og udpresning til lavpermeable nedre dæklag, bedømmer Tilsynet, at sammenkrybningen af kavernen bliver væsentlig langsommere end for tilfældet med udpresning til det øvre grundvand. Det må derfor uanset beholdernes udformning forventes, at alle beholdere i kavernen gennemtæres, inden udpresningen af vand er afsluttet.

Med galvanisk beskyttelse af affaldsbeholderne vil der ved udpresning til de øvre grundvandslag kun kunne gennemtæres enkelte affaldsbeholdere og dette kun i det tilfælde, at få beholdere er berørt af kaverneprojektet. Tidspunktet for gennemtæring er for en enkelt beholder beregnet til 400 år efter udskylningsens start. Dette giver 100 år for kontakt mellem affaldsglasset og saltvand i kavernen, idet hel indsnævring af kavernen forventes at tage 500 år, da der ikke forudsættes fyldstoffer, som antaget af elværkerne.

Udludning over 100 år af radioaktive stoffer fra det glassificerede affald i en beholder bliver væsentlig mindre end den udludning, der er beregnet af elværkerne ved postulering af, at affaldet i 125 beholdere udsættes for saltvand i 20 år. Anvendes samme udludningshastighed, som benyttet af elværkerne, bliver forholdet ca. 1/50.

Tilsynet har bedømt, at udludningshastigheden i det betragtede tilfælde kan være op til 50 gange større end den af elværkerne valgte værdi. Herved finder Tilsynet en samlet udludning, der er af samme størrelse, som den der fremgår af elværkernes beregning. Tilsynet finder videre, at udpresningen af radioaktive stoffer pr. år, i den sidste del af udpresningsperioden, hvor koncentrationen er størst, er ca. 6 gange mindre end beregnet af elværkerne.

På grund af den langsommere sammenkrybning af kavernen ved udpresning til de nedre lag, kan det selv med galvanisk beskyttelse af beholderen ikke udelukkes, at alle berørte beholdere gennemtæres. Den galvaniske beskyttelse udskyder tidspunktet for gennemtæring, men dette bliver mindre afgørende for udludningen af radioaktive stoffer med lang halveringstid.

Opløseligheden af de enkelte radioaktive stoffer vil, afhængig af mængden af vand i kavernen, kunne begrænse mængden af aktivitet, som opløses i vandet og dermed bliver til rådighed for udpresning. Cs-135 og Zr-93 har så stor opløselighed, at det må forventes, at de opløses helt. Disse stoffer vil desuden efter frigørelse til de nedre dæklag kunne føres ved vandtransport op til det øvre grundvand. De øvrige langlivede stoffer har derimod så lav opløselighed, at den nævnte opløsningsbegrænsning må forventes at gøre sig gældende. Når det samtidig tages i betragtning, at disse stoffer efter frigørelse fra kavernen, vil forblive i de første meter af de nedre dæklag på grund af vedhæftning til jordarterne, kan de på forhånd lades ude af betragtning i den videre sikkerhedsmæssige bedømmelse.

Det antages i Tilsynets situationsbeskrivelse for udpresning til de nedre dæklag, at kavernen kryber sammen i løbet af 2500 år. Det er åbent for diskussion, hvorvidt dette krybeforløb er realistisk, men der opnås den mest ugunstige situation for frigørelse af de radioaktive stoffer. Dette skyldes, at glasset og dermed Cs-135 og Zr-93 forudsættes opløst helt i løbet af de sidste 500 år, der samtidig giver den største årlige frigørelse af disse isotoper.

For denne antagelse findes, at Cs-135 og Zr-94 udpresses i den mængde, hvori de findes i affaldet, og at dette er 400 gange mere end i elværkernes situation. Anvendes elværkernes forudsætninger for spredning mod det øvre grundvand, må denne forøgelse af frigørelsen anses for betydningsløs i sikkerhedsmæssig henseende.

Anvendes andre forudsætninger vedrørende udpresningsvejen, beholdernes tæring samt dæklagenes tilbageholdelsesevne, vil dette kunne føre til større koncentrationer end beregnet ovenfor.

Elværkernes dosisberegninger i hovedrapporten er gennemgået af sundhedsstyrelsen, som finder, at der ikke på alle områder er redegjort fuldt tilstrækkeligt for valg af forudsætninger og beregningsparametre. En beskrivelse af de radioøkologiske forhold på Mors ville således kunne give mulighed for beregning af mindre usikre individdoser samt kollektivdoser. Sammenfattende finder sundhedsstyrelsen

dog, at de udførte beregninger giver et rimeligt grundlag for at vurdere størrelsesordenen af de maksimale indviddoser, som vil være konsekvens af det opstillede scenarie.

II. Borendgreb.

Elværkernes postulerede borendgreb illustrerer indvirkningen af en stadig strøm af vand forbi affaldsbeholderne.

Som under kaverneudskylningen forudsættes det, at beholderne kun er lidt angrebet af korrosion på det tidspunkt borendgrebet medfører vandstrømning.

Antages en korrosionshastighed på 0,5 mm pr. år i iltmættet saltvand og 0,1 mm pr. år i iltfrit saltvand, samt at beholderne ikke har galvanisk beskyttelse, må forventes, at gennemtæring af beholderne tidligst indtræder 200 år efter borendgrebet.

Forudsættes derimod galvanisk beskyttelse af beholderne, som omtalt under kaverneudskylning, forventes beholderens levetid i en fortsat vandstrøm at være ca. 2000 år. Vandstrømningen vil imidlertid stoppe, før denne tid er gået, på grund af sammenkrybning af borehullet.

Anvendes galvanisk beskyttelse kan det konkluderes, at borendgreb selv under ugunstige forhold, der medfører vandstrømning forbi affaldsbeholderne, ikke vil føre til frigørelse af radioaktive stoffer fra depotet.

Gruppens konklusion.

Kaverneudskylning og borendgreb findes at give udgangspunkt for en dækkende behandling af risikoen ved menneskers indgreb. Gruppen har dog bemærkninger til elværkernes behandling af enkeltheder i de to situationer.

Vurderingsgruppen er af den opfattelse, at det ikke kan udelukkes, at kendskabet til en eventuel deponering i Morshorsten kan være gået tabt, og at indgreb i horsten således kan finde sted.

Sandsynligheden for menneskers indgreb i et affaldsdepot kan ikke fastlægges nærmere. Selv om danske salthorste fremover kan være attraktive for saltudvinding og kaverneprojekter, findes dog, at sandsynligheden for ubevidst at gribe ind i et affaldsdepot i Morshorsten er lille.

Vedrørende boreindgreb findes elværkernes antagelser om, at depotets forsegling er utæt til de øvre grundvandslag, og at trykforskelle her kan opretholde en vandstrømning langs en affaldsstreng gennem meget lang tid for urealistiske, fordi borehullet må forventes at krybe sammen.

Selv ved antagelse om hurtigere lukning af borehullet kan det for visse korrosionsforløb ikke udelukkes, at enkelte beholdere gennemtæres. Gruppen vurderer dog, at gennemtæring under disse omstændigheder kan forhindres ved en forbedret korrosionsbeskyttelse, hvormed frigørelse af radioaktive stoffer ved et boreindgreb kan udelukkes.

Ved betragtning af kaverneudskylning findes det tvivlsomt, at affaldsbeholdere i kaverne vil blive opdaget som forudsat af elværkerne. Gruppen har derfor gennemgået et andet forløb, som indebærer, at kaverneprojektet gennemføres og afvikles med uopdagede affaldsbeholdere i kavernerummet. Dette forløb viser mulighed for større frigørelse af radioaktive stoffer til kavernevandet end bestemt af elværkerne. Den videre spredning af stofferne til dæklagen vil være stærkt afhængig af de nærmere omstændigheder, bl.a. utætheden af kaverneforseglingen.

De to typer indgreb, som elværkerne har behandlet, boring og udskylning af hulrum, anser gruppen som et tilstrækkeligt grundlag for vurdering af konsekvenserne af menneskers indgreb i Morshorsten. Gruppen mener dog ikke, at elværkernes forudsætninger for beregning af konsekvenser af menneskers indgreb er realistiske. Der er derfor foretaget beregninger under forudsætning af, at affaldsbeholderne ikke opdages, når de falder ind i hulrummet. Forudsætningen om at beholderne er intakte under udskylningen af hulrummet og forudsætningerne om dæklagenes evne til at tilbageholde affaldsstoffer i vand er bibeholdt fra elværkerne. Disse beregninger giver ikke i sig selv grundlag for at ændre elværkernes bedømmelse af risikoen ved menneskers indgreb.

Der er ved beregningerne imidlertid ikke taget hensyn til eventuel forudgående tæring af affaldsbeholderne, og de gennemførte hydrogeologiske undersøgelser har ikke tilvejebragt tilstrækkelig dokumentation for at radioaktive stoffer spredes

gennem dæklagene, som antaget af elværkerne. Ændres disse forudsætninger vil det kunne føre til større koncentrationer i grundvandet end beregnet. Gruppen finder derfor en yderligere behandling af konsekvenser af menneskers indgreb er nødvendig.

3.6. SAMMENFATNING.

3.6.1. Baggrund.

Miljøministeriet og energiministeriet modtog i juni 1981 ELKRAFT og ELSAM's rapport: "Deponering af højaktivt affald fra danske kernekraftværker".

Til at forestå myndighedernes vurdering af elværkernes affaldsprojekt etablerede miljøstyrelsen en vurderingsgruppe med repræsentanter fra miljøstyrelsen, sundhedsstyrelsen, Danmarks Geologiske Undersøgelse og Tilsynet med Nukleare Anlæg og med tilknyttede sagkyndige fra Forsøgsanlæg Risø og Korrosionscentra-len ATV. Energiministeriet har deltaget som observatør i gruppen.

Gruppen har ved gennemgangen af den sikkerhedsanalyse, som er indeholdt i elværkernes rapport, taget udgangspunkt i miljøstyrelsens forslag til overordnede sikkerhedskrav til deponering af højaktivt affald. Ifølge disse forslag skal deponering foretages således:

- at indholdet af radioaktive stoffer forhindres i at nå frem til biosfæren ved naturlige transportmekanismer i mængder og koncentrationer, der ikke ville kunne akcepteres efter gældende regler og principper for nutidig menneskeskabt forurening af naturen med radioaktive stoffer,
- at den sundhedsmæssige risiko for befolkningen i forbindelse med tænkelige frigørelser af affaldet til biosfæren ved voldsomme naturfænomener er forsvindende sammenholdt med andre menneskeskabte og naturbetingede risikomomenter,
- at sandsynligheden for fremtidige indgreb fra menneskers side i deponeringsstedet er lille, og at den sundhedsmæssige risiko for befolkningen herfra ligeledes er forsvindende sammenholdt med andre menneskeskabte risici.

Gruppen finder, at det ikke ud fra rent tekniske overvejelser kan fastsættes, hvor lang en periode sikkerhedsvurderingen af en affaldsdeponering skal omfatte. Som arbejdsgrundlag er valgt en tidshorisont af størrelsesordenen 10.000 år.

3.6.2. Elværkernes undersøgelser.

Elværkernes rapport omhandler det undersøgelsesarbejde, der er udført af EL-KRAFT og ELSAM i 1979-80 til belysning af mulighederne for betryggende deponering af højaktivt affald i en nordjysk salthorst.

Den oprindelige målsætning for undersøgelsesarbejdet var "i en 2-årig periode at finde frem til mindst to danske salthorste på basis af feltundersøgelser og forarbejder, som tilsammen bekræfter, at disse horste er egnede til deponering af højaktivt affald".

Elværkerne tilkendegav under undersøgelsesarbejdet, at det inden for de fastlagte rammer ikke var muligt, på samme niveau, at dokumentere mindst to danske salthorste.

I forudsætningerne for undersøgelserne betoner elværkerne, at feltundersøgelserne har til formål at skaffe materiale for projektering og sikkerhedsbedømmelse af deponeringsanlæg til højaktivt affald, men at materialet ikke vil omfatte detaljerede specifikationer og data for et bestemt anlæg i en udpeget horst, ligesom feltundersøgelserne ikke omfatter bygning af skaktanlæg og brydning af underjordiske minegange.

Blandt feltundersøgelserne er der i Morshorsten blevet udført to dybe saltboringer ned til ca. 3400 meter under terræn. Erslev II boringen i det centrale område af horsten ligger ca. 1 kilometer nordligere end den anden boring Erslev I. I borehullerne er gennemført geofysiske målinger for at kortlægge forholdene omkring borehullerne.

Anlægsteknisk er undersøgt mulighederne for etablering af såvel et dybhulsanlæg som et skakt-mineanlæg. Elværkerne har valgt dybhulsanlægget som den foretrukne udformning af et deponeringsanlæg, og dette er lagt til grund for de sikkerhedsmæssige vurderinger. Elværkerne har anført, at de sikkerhedsmæssige vurderinger i princippet også gælder for et skakt-mineanlæg.

Fælles for de to skitserede anlæg er, at de skal kunne rumme det højaktive affald fra et kernekraftprogram på 6000 megawatt elektrisk effekt under en driftstid på 25 år. Det brugte brændsel forudsættes oparbejdet og omdannet til glasmasse, svarende til ca. 700 kubikmeter glas for hele programmet. Før deponering i salthorsten anbringes glasmassen i tykvæggede stålbeholdere. Affaldet tænkes deponeret 40 år efter udtagning af reaktoren.

Elværkernes forslag til dybhulsanlæg udgøres af 8 huller placeret på en cirkel med en diameter på 500 meter boret til en dybde af 2500 meter fra jordoverfladen. Affaldsbeholderne stables oven på hinanden i hullerne og indstøbes i cement. Afstanden mellem to nabohuller er ca. 200 meter. Mineanlægget er udformet som et minegalleri i 1000 meters dybde. Minegalleriet bestående af hovedgang, ventilationsgang og 24 sidegange, er forbundet til jordoverfladen med 2 skakter. Affaldsbeholderne deponeres vandret i forlængelse af hinanden i sidegangene. Gangsystemet dækker et kvadratisk areal med sidelængden 1100 meter. Efter placering af affaldet forsegles anlæggene.

Sikkerhedsvurderingen for et deponeringsanlæg består i en gennemgang og undersøgelse af mekanismer og hændelser, der kunne tænkes at føre til frigørelse af radioaktive stoffer fra det forseglede deponeringsanlæg til menneskets miljø.

Elværkerne har valgt at gruppere de betragtede mekanismer i to kategorier, der afspejler den sandsynlighed, hvormed de forventes at forekomme. I den første kategori, normale eller forventede forhold, er samlet de processer og mekanismer, som med sikkerhed eller med stor sandsynlighed forekommer. Denne kategori indeholder først og fremmest de iboende, naturlige processer, men der er også medtaget den forventede virkning af naturfænomener som istider og en vis grad af svigt eller nedbrydning af de foranstaltninger, der er truffet, for at forsegle de borede huller i horsten.

I den anden kategori, hypotetiske begivenheder, er samlet de forhold, som egentlig ikke forventes at indtræffe, men som alligevel ikke på det foreliggende grundlag kan helt udelukkes. Denne kategori indeholder først og fremmest menneskers indgriben i horsten, såsom udførelse af fremtidige boringer eller udskylning af hulrum (kaverne); indgreb der i begge tilfælde tilfældigt rammer et deponeringshul. Sidstnævnte kategori medtager også større ændringer af de geologiske forhold, som udviklingen af højpermeable revner i lagene over horsten eller tektoniske bevægelser under horsten, f.eks. udløst af jordskælv.

Som hovedresultat af undersøgelserne anfører elværkerne:

"Et stort saltområde bestående af rent natriumklorid med spredte spor af anhydrit (kalciumsulfat) og lavt vandindhold varierende mellem 0 og 0,1% er lokaliseret ved to dybe saltboringer i horsten på Mors. Med dette område som eksempel er det anlægsteknisk dokumenteret, at der her med brug af kendt teknologi vil kunne placeres et deponeringsanlæg i form af otte dybe boringer med stor diameter til 2500 meters dybde. Det er endvidere teknisk muligt at indkapsle affaldet i stålbeholdere, sådan at affaldet bliver beskyttet mod saltformationens mekaniske påvirkninger samt mod udludning.

For det forseglede anlæg med den omgivende geologi er der udført en sikkerhedsredegørelse omfattende glasset, hvori det højaktive affald er indlejret, stålbeholderen, saltet, horsten og kalklagene over horsten. Den viser, at kun begivenheder, som indbefatter vandindtrængning til anlægget f.eks. via fremtidige, menneskeskabte forstyrrelser, har potentiel betydning for sikkerheden. Undersøgelsesresultaterne viser, at selv ekstreme situationer medfører så små lækager af radioaktivitet fra systemet, at der efter opblanding i ferskvandsområder er tale om koncentrationer, som er ubetydelige i forhold til de værdier, der hidrører fra det naturlige indhold af radioaktivitet.

Kerneprøver fra de to saltboringer er tillige indgået i en fornyet gennemgang af eksisterende kerneprøver fra tidligere saltboringer i andre større horste i området. Der fremgår heraf, at horste som Batum, Mors, Uglev, Vejrum og Mønsted rummer saltområder, som er særligt velegnet til placering af et deponeringsanlæg. Disse horste kan derfor indgå i valget, når der til sin tid skal udpeges en foretrukken placering af et eventuelt dansk anlæg."

Ved fremsendelsen af rapporten til miljøministeriet udtaler elværkerne, at denne og delrapporterne tilsammen indeholder dokumentation for, at højaktivt affald fra eventuelle kommende danske kernekraftværker kan deponeres på en efter elværkernes opfattelse betryggende måde i en salthorst i Danmark.

3.6.3. Gruppens vurderinger.

Vurderingsgruppen har dels vurderet, om det rent anlægsteknisk vil være muligt at etablere de af elværkerne foreslåede deponeringsanlæg i Morshorsten, og dels vurderet elværkernes sikkerhedsanalyse for et deponeringsanlæg efter forsegling.

Anlægstekniske forhold.

Gruppen finder, at fremstilling af affaldsbeholdere og behandling af affaldet er kendt og prøvet teknologi. Styrken af beholdere vurderes at være tilstrækkelig til, at beholdere kan holde til belastningerne ved normal deponering. Det bedømmes, at beholdere også vil kunne holde til belastningerne som følge af uheld under deponeringsarbejdet. Der er dog ikke fremlagt dokumentation herfor.

På basis af myndighedernes bjerværkstekniske konsulenter skønner gruppen, at det teknisk er gennemførligt med nutidig teknologi at etablere både et dybhulsanlæg og et skakt-mineanlæg i en egnet salthorst.

De geologiske undersøgelser af Morshorsten viser, at dens størrelse, form og dybdeforhold muliggør etablering af begge anlægstyper. De geologiske resultater fra den dybe undersøgelsesboring ved Erslev II findes af bjerværksteknisk sagkyndige tilfredsstillende for iværksættelse af videregående undersøgelser og anlægsarbejder til endelig afgørelse af, om et mineanlæg eller et dybhulsanlæg bestående af 8 huller kan etableres i området. Konsulenterne bemærker dog, at et mineanlæg forudsætter bygningen af en første skakt og undersøgelsesboringer herud fra.

Hvad angår dybhulsanlægget undersøges det direkte deponeringsområde ved selve boreoperationen. Akcepteres den procedure, ikke at anvende de borehuller, som undersøgelser viser, er mindre fordelagtige for deponering, kan dybhulsanlægget udlægges mere fleksibelt end skakt-mineanlægget.

Gruppen finder, at det væsentligste anlægstekniske problem i forbindelse med dybhulsløsningen er, at flydning af salt medfører, at borehullerne gradvist indsnævres. På grundlag af foreliggende oplysninger anses dette forhold ikke at forhindre gennemførelse af en dybhulsløsning, men det skal nærmere undersøges forud for en eventuel deponering.

Sikkerhedsanalyse.

Gruppen har foretaget en vurdering af den sikkerhedsanalyse, elværkerne har gennemført for deponering af højaktivt affald i dybe huller i Morshorsten. Vurderingsgruppen er af den opfattelse, at den udførte sikkerhedsanalyse ikke er dækkende for alle forhold for et skakt-mineanlæg.

Gruppen har i overensstemmelse med miljøstyrelsens forslag til overordnede sikkerhedskrav inddelt sit arbejde i en vurdering af sikkerheden under normale og forventede forhold, sikkerheden under påvirkning af voldsomme naturbegivenheder og sikkerheden i forbindelse med menneskers utilsigtede indgreb i deponeringsområdet.

Gruppen er enig med elværkerne i, at de mekanismer, der kan forringe deponeringssikkerheden, har at gøre med tilstedeværelse eller indtrængning af vand til depotet.

Ved vurderingen af sikkerheden ved normale eller forventede forhold er undersøgt, dels muligheden for at salthorsten kan nedbrydes, således at grundvand kan trænge ind til affaldet, dels muligheden for at vekselvirkningen mellem affaldet og salthorsten kan resultere i, at affaldet kommer i kontakt med vand indeholdt i saltet.

En begrundelse for at anvende salthorste til deponering af radioaktivt affald er blandt andre, at de fortrinsvis består af meget tørre bjergarter, men der kan lokalt forekomme områder med et større vandindhold. Vand i salthorste forekommer som brine, som er vand mættet med salte samt som vand bundet til visse mineraler, såkaldt krystalvand. Krystalvand kan frigøres, såfremt temperaturen overstiger en vis størrelse.

Det radioaktive affald påvirker de omgivende bjergarter, fordi det udsender ioniserende stråling. Næsten al strålingen opfanges i glasmassen og i affaldsbeholderen, hvorved der dannes varme. Varmen vil brede sig til saltet.

En lille del af den ioniserende stråling fra affaldet passerer affaldsbeholderen og den omkringliggende cement og opfanges i saltet eller i brine i umiddelbar nærhed af depotet.

Den stråling, der opfanges i saltet, vil fortrinsvis blive omdannet til varme umiddelbart, men der er også mulighed for, at en lille del af strålingen indfanges i saltet, hvorved der kan akkumuleres energi, som senere kan frigøres som varme. Bestråling af brine kan resultere i spaltning af vandet i ilt og brint ved radiolyse, hvorved der er mulighed for opbygning af et gastryk omkring affaldet.

Den ioniserende stråling fra affaldet aftager med tiden. Efterhånden vil ovennævnte processer derfor miste deres betydning.

Temperaturstigningen kan have indflydelse på, hvor meget vand der vil være tilstede ved deponeringsanlægget, dels gennem krystalvandsfrigørelse og dels gennem tilstrømningen af brine, idet brine kan bevæge sig under påvirkning af temperatur- og trykforskelle.

Tryk- og temperaturfordelingen har således indflydelse på, hvor meget vand der kan komme i berøring med affaldsbeholderen og har derved betydning for, i hvilket omfang stålbeholderen udsættes for korrosion, og i hvilket omfang de radioaktive stoffer eventuelt udvaskes af affaldsglasset.

En temperaturstigning medfører endvidere en udvidelse af saltet. Dette medfører dels en stigning af trykket i området omkring deponeringsanlægget, dels en bevægelse af saltet. Herved kan affaldsbeholdernes placering i salthorsten ændres.

Gruppen kan tilslutte sig elværkernes bedømmelser vedrørende affaldsmængder og affaldets strålingsfysiske forhold.

Gruppen finder, at hverken salthorstens naturlige opadgående bevægelse, eller grundvandets opløsning af salthorsten kan resultere i vandindtrængen til depotet. Ingen af disse mekanismer er derfor fundet at være af betydning for sikkerheden.

Elværkerne er i deres sikkerhedsanalyse gået ud fra, at deponeringsområdet består af salt af samme kvalitet, som fundet i boreprøverne fra Erslev II. Vurderingsgruppen er enig med elværkerne i, at det fundne salt er rent, men gruppen finder ikke, at de gennemførte feltundersøgelser giver grundlag for at fastslå, i hvor stort et område denne saltkvalitet er tilstede. Feltundersøgelserne tyder på, at der findes andre bjergarter end stensalt i området omkring Erslev II. Gruppen har derfor vurderet, hvilken indflydelse sådanne bjergarter kan have for deponerings-sikkerheden.

Elværkerne har beregnet den maksimale temperaturstigning i saltet som følge af affaldsdeponeringen til ca. 29 grader celsius. Disse beregninger er foretaget under forudsætning af tilstedeværelsen af et stort område med rent salt. Den naturlige salttemperatur stiger med dybden, således at en maksimal salttemperatur på ca. 90 grader celsius vil indtræffe i bunden af deponeringsområdet.

Såfremt saltet ikke indeholder bjergarter med en anden varmeledningsevne end stensalt, kan vurderingsgruppen tilslutte sig elværkernes beregning af temperatur-

påvirkningen af saltet. Elværkerne har ikke vurderet, hvilken betydning bjergarter med anden varmeledningsevne end stensalt har for temperaturstigningen.

På grundlag af beregninger foretaget af miljøstyrelsen vurderer gruppen, at sådanne bjergarter er uden betydning for den maksimale temperaturstigning i saltet, hvis de findes i større afstande end 30 meter fra deponeringshullet. Såfremt sådanne bjergarter findes mindre end 30 meter fra borehullet, kan det ikke udelukkes, at der ved deponering som foreslået af elværkerne lokalt kan forekomme temperaturer større end beregnet af elværkerne.

Ved eventuel deponering bør der derfor enten tilvejebringes et sådant kendskab til salthorstens indre struktur i nærheden af borehullet, at temperaturfordelingen under de faktiske deponeringsforhold kan beregnes, eller det må dokumenteres, at temperaturstigningen, uanset de saltgeologiske forhold omkring dybhullet, kan holdes så lav, at den ikke på noget sted giver anledning til sikkerhedsmæssige problemer.

Det er gruppens opfattelse, at temperaturen ved deponering i et område svarende til Erslev II, kan holdes under de af elværkerne beregnede 90 grader celsius, såfremt der træffes passende foranstaltninger, eventuelt ved at forlænge tidsrummet mellem udtagning af det brugte brændsel fra reaktoren og deponering af affaldet. Gruppen finder det derfor acceptabelt, at elværkerne har lagt en maksimal temperatur på 90 grader celsius til grund for sikkerhedsvurderingen. Der er ikke herved taget stilling til, hvilken maksimaltemperatur der kan accepteres ved deponering.

Ovennævnte beregninger af temperaturfordelingen er udført for et enkelt dybt hul. Såfremt deponeringshullerne som foreslået af elværkerne anbringes med en minimumsafstand på 200 meter, vil beregningerne gælde for anlægget som helhed.

Frigørelse af energi, der er akkumuleret i saltet, vil eventuelt kunne give anledning til en mindre temperaturstigning. Denne temperaturstigning vil komme på et tidspunkt, hvor deponeringsanlægget ellers ikke varmebelaster saltet. Vurderingsgruppen kan tilslutte sig elværkernes konklusion om, at akkumulering af strålingsenergi i saltet ikke kan anses at være af betydning for deponeringssikkerheden.

Elværkerne har under forudsætning af deponering i rent, tørt stensalt beregnet, at pr. meter af affaldsstrengen kan 1 liter vand bevæge sig ind til affaldsbeholderne.

Gruppen finder, at elværkernes beregninger af vandtilstrømningen er behæftet med mangler, og at det ikke kan udelukkes, at større vandmængder end beregnet af elværkerne kan komme i kontakt med affaldet. Det er dog gruppens opfattelse, at der ved deponering i stensalt svarende til kerneprøverne fra Erslev II er så stor sikkerhed, at gennemtæring af beholderne næppe vil finde sted over endog lange tidsrum som f.eks. 10.000 år.

Elværkerne omtaler betydningen for korrosion af frigivelse af krystalvand fra eventuelle lag af tør carnallit i umiddelbar nærhed af deponeringshullet. Det anføres, at sådanne lag direkte skal gennembøres for at få betydning, og da der for et faktisk deponeringshul udtages kerner over hele deponeringsintervallet, anser de sandsynligheden for at overse et gennemboret carnallitlag for at være minimal.

Gruppen finder, at krystalvandsfrigørelse fra lag af tør carnallit ved de temperaturer og tryk, der forekommer i deponeringsområdet ikke har væsentlig betydning for korrosion af affaldsbeholderne.

DGU har anført, at der i salthorste forekommer områder med vådt stensalt (brinelomner) og områder med våd carnallit, samt at de geofysiske målinger indicerer, at sådanne områder kan findes i salt omkring Erslev II. Det er med den anvendte teknik ikke muligt at afgøre, om vådt salt findes i nærheden af borehullet. Hvis vådt salt findes i nærheden af affaldet, og såfremt der kan foregå vandtransport mellem det våde saltområde og affaldet samt op langs affaldsbeholderne, kan væsketrykket presse brinen ind til affaldet og videre op langs affaldet.

DGU finder, at det ikke kan udelukkes, at store mængder brine på denne måde kan transporteres op langs affaldsstrengen.

Det er gruppens opfattelse, at hvis affaldet får kontakt med vådt salt, vil det kunne give anledning til så stor væsketilstrømning, at gennemtæring af affaldsbeholderne vil kunne finde sted. Det bør derfor enten dokumenteres, at der ikke findes vådt salt i nærheden af deponeringshullet, eller også må det ved sikkerhedsanalysen godtgøres, at tilstedeværelse af områder med vådt salt ikke giver anledning til sikkerhedsmæssige problemer.

Det skal bemærkes, at såfremt saltbarrieren er intakt, kan radioaktive stoffer ikke komme ud af salthorsten. Forholdene ved brudt saltbarriere er behandlet nedenfor.

Gruppen skal pege på, at korrosion af affaldsbeholderne og radiolyse af brine vil give anledning til opbygning af et gastryk omkring affaldsbeholderne. Denne trykopbygnings indflydelse på forseglingen er ikke belyst af elværkerne. Konsekvenserne af en eventuel utæt forsegling omtales i forbindelse med den sikkerhedsmæssige behandling af menneskers indgreb i deponeringsområdet.

Opvarmning af saltet kan give anledning til forøget saltflydning omkring depotet, hvorved affaldsbeholderne kan komme i en anden position. Ændringer i saltets mekaniske egenskaber, som blandt andet er forårsaget af tryk- og temperaturpåvirkningerne af carnallitholdige bjergarter kan være af betydning for bevægelsen. Gruppen finder, at saltflydning formentlig ikke har sikkerhedsmæssig betydning, medmindre den medfører, at affaldsbeholderne kommer i kontakt med områder med våd carnallit eller vådt stensalt.

Saltet fra boreprøverne i Erslev II kan således betegnes som værende egnet til deponering af højaktivt affald. De foretagne undersøgelser giver dog ikke grundlag for at fastslå, i hvor stort et område denne saltkvalitet er tilstede. Gruppen finder det ikke dokumenteret, at det er muligt at etablere 8 huller med tilfredsstillende deponeringssikkerhed.

Elværkerne har behandlet betydningen for sikkerheden af en række voldsomme naturbegivenheder.

De eneste voldsomme naturbegivenheder, som vil kunne tænkes at influere på depotet, er efter gruppens opfattelse springvise deformationer i underlaget under horsten. Beregninger af effekten af sådanne begivenheder foreligger imidlertid ikke. Sandsynligheden for deres indtræffen kendes ikke, men sandsynligheden for deformationer, der har sikkerhedsmæssig betydning, må anses for ringe.

Elværkerne har set på sandsynligheden for og konsekvenser af menneskers utilsigtede indgriben i Morshorsten. De giver udtryk for, at den kontrol, der føres med Danmarks undergrund, udelukker, at mennesker utilsigtet griber ind i horsten. Elværkerne behandler dog to mulige indgreb, undersøgelsesboringer og udskylning af hulrum til lager for olie, gas m.v..

Elværkerne finder, at udskylningen af hulrum er den eneste situation, der indeholder en mulighed for frigørelse af radioaktive stoffer til biosfæren. De fundne doser anses af elværkerne for små i betragtning af den ringe sandsynlighed, der er for, at en situation, som den beskrevne, skulle udvikle sig. Det er forudsat,

at udskylningen berører et enkelt deponeringshul, at samtlige beholdere fra hullet falder ind i hulrummet, samt at affaldet opdages, når dette sker, hvorefter hulrummet lukkes. Det er endvidere forudsat, at beholderne er gennemtæret ved lukningen, og at de frigjorte radioaktive stoffer, enten presses direkte op til de øvre vandførende lag eller til de nedre dæklag. I det sidste tilfælde forudsætter elværkerne på baggrund af deres hydrogeologiske undersøgelser, at de radioaktive stoffer spredes meget langsomt gennem dæklagene.

Vurderingsgruppen er af den opfattelse, at det ikke kan udelukkes, at kendskabet til en eventuel deponering i Morshorsten, kan være gået tabt, og at indgreb i horsten således kan finde sted.

De to typer indgreb, som elværkerne har behandlet, boring og udskylning af hulrum, anser gruppen som et tilstrækkeligt grundlag for vurdering af konsekvenserne af menneskers indgreb i Morshorsten. Gruppen mener dog ikke, at elværkernes forudsætninger for beregning af konsekvenser af menneskers indgreb er realistiske. Der er derfor foretaget beregninger under forudsætning af, at affaldsbeholdere ikke opdages, når de falder ind i hulrummet. Forudsætningen om at beholderne er intakte under udskylningen af hulrummet og forudsætningerne om dæklagenes evne til at tilbageholde affaldsstoffer i vand er bibeholdt fra elværkerne. Disse beregninger giver ikke i sig selv grundlag for at ændre elværkernes samlede bedømmelse af risikoen ved menneskers indgreb.

Der er ved beregningerne imidlertid ikke taget hensyn til eventuel forudgående tæring af affaldsbeholdere, og de gennemførte hydrogeologiske undersøgelser har ikke tilvejebragt tilstrækkelig dokumentation for at radioaktive stoffer spredes gennem dæklagene, som antaget af elværkerne. Ændres disse forudsætninger vil det kunne føre til større koncentrationer i grundvandet end beregnet. Gruppen finder derfor en yderligere behandling af konsekvenser af menneskers indgreb er nødvendig.

Elværkerne har udført seismiske undersøgelser over andre horste end Morshorsten. Elværkerne har endvidere i deres rapport gennemgået resultater af geologiske undersøgelser af horstene Batum, Uglev, Vejrum samt Mønsted, og de finder, at horstene indeholder saltområder, som er velegnede til placering af et deponeringsanlæg, hvorfor de kan indgå i valget af en foretrukken placering for et dansk deponeringsanlæg. Gruppen finder ikke, at det fremlagte materiale giver grundlag for en vurdering af disse horstes egnethed for affaldsdeponering.

3.6.4. Hovedresultat.

Miljøministeriet og energiministeriet modtog i juni 1981 ELKRAFT's og ELSAM's rapport: "Deponering af højaktivt affald fra danske kernekraftværker".

Rapporten omhandler det forprojekt, der er gennemført for at belyse mulighederne for på betryggende måde at deponere højaktivt affald i danske salthorste.

Det er ved undersøgelserne forudsat, at ved konkret behov for deponering af affald, skal der gennemføres yderligere undersøgelsesboringer og detaljerede tekniske undersøgelser til udpegning af deponeringssted og endelig projektering af deponeringsanlæg.

Ved fremsendelsen af rapporten udtalte elværkerne, at denne og baggrundsrapporter tilsammen indeholder dokumentation for, at højaktivt affald fra eventuelle kommende danske kernekraftværker kan deponeres på en efter elværkernes opfattelse betryggende måde i en salthorst i Danmark.

Elværkernes undersøgelse har været koncentreret om Morshorsten. To typer af anlæg for deponering, et skakt-mineanlæg og et dybhulsanlæg bestående af 8 dybe huller, er behandlet.

Elværkernes undersøgelser og sikkerhedsanalyse er blevet vurderet af en gruppe nedsat af miljøstyrelsen.

Gruppen finder, at resultaterne fra undersøgelserne viser, at der i Morshorsten findes salt, der er egnet til deponering, men de foretagne undersøgelser giver ikke grundlag for at fastslå, i hvor stort et område denne saltkvalitet er til stede.

Fastlæggelse af et tilstrækkeligt område af en sådan saltkvalitet kan ved et skakt-mineanlæg kun tilvejebringes ved udførelse af supplerende undersøgelser og ved etablering af minegange.

Ved et dybhulsanlæg skal der ligeledes udføres supplerende undersøgelser til udpegning af deponeringsområde, og de enkelte deponeringshuller skal udføres for endeligt at afgøre deponeringsmulighederne. Her er det imidlertid for nærværende uafklaret, om den fornødne viden om saltkvalitet vil kunne fremskaffes, idet dette ikke er demonstreret af elværkerne.

Gruppen kan derfor ikke tilslutte sig elværkernes konklusion om, at det ved undersøgelserne er dokumenteret, at højaktivt affald på betryggende måde kan deponeres i en dansk salthorst i de foreslåede anlæg.

Den gennemførte sikkerhedsanalyse peger på, at deponering vil kunne foretages på en sådan måde, at naturlige processer ikke vil bringe sundhedsfarlige mængder af affaldet i berøring med mennesker, ligesom naturkatastrofer ikke forventes at påvirke deponeringssikkerheden væsentligt.

Sandsynligheden for og konsekvenser af menneskers indgreb er vanskelige at vurdere. Sikkerhedsanalysen giver dog grundlag for at forvente, at der er ringe sandsynlighed for, at utilsigtede indgreb væsentligt påvirker sikkerheden ved et deponeringsanlæg, men elværkernes behandling af sådanne indgreb findes ikke dækkende.

De mangler og usikkerheder, der er fundet ved de foretagne undersøgelser er ikke af sådan karakter, at de udelukker, at det vil kunne dokumenteres, at deponering af højaktivt affald kan foretages på betryggende måde i danske salthorste. Der er derfor basis for at fortsætte undersøgelserne af mulighederne for deponering.

REFERENCER

Delrapporter udarbejdet i forbindelse med fase 2-projektet.

Geologi.

1. Proposal concerning selection of salt domes,
Geotechnical Report No. 1 with enclosures No. 1-34,
Danish Geotechnical Institute 1979-07-25.
2. On the disposal of radioactive waste in the saltstructures
in North Jutland, Denmark,
Ivan Madirazza, Århus, July 1979.
3. Seismic Reflection Survey, ELSAM 1979,
Prakla Seismos, 15. sept. 1979.
4. ELSAM 1979, Processing Vol. 1.
Prakla Seismos, 30. sept. 1979.
5. ELSAM 1979, Processing Vol. 2,
Prakla Seismos, 30. sept. 1979.
6. Interpretation, ELSAM 1979, Folder 1
Prakla Seismos, 31. oct. 1979.
7. Interpretation, ELSAM 1979, Folder 2,
Prakla Seismos, 31. oct. 1979.
8. Particular Description for Well No. 1. Linde No. 1.
ELSAM, 30-10-79.
9. Particular Description for Well No. 2. Erslev No. 1.
ELSAM, 11.01.80.
10. Particular Description for Well No. 3. Erslev No. 2.
ELSAM, 20.02.80.

11. Particular Description for Well No. 4. Vejrum 10.
ELSAM, 14.03.80.
12. Tredimensional gravimetrisk tolkning. Linde, 13.08.1980,
todimensional gravimetrisk tolkning, Linde 19.06.1980 og
beregning af gravimetrisk residualkort over Linde-strukturen,
16.05.1980, Århus Universitet, S.H. Petersen og J.O. Nielsen.
13. Analysis of the Linde Gravity anomaly, december 1980,
Edcon.
14. Appendix to Edcon's report "Analysis of the Linde gravity
anomaly", 10.04.1981.
15. Morsstrukturens udvikling, Geoteknisk Institut, sag K79018,
Gunnar Larsen, Århus Universitet og Jens Baumann, DGI,
oktober 1980.
16. Linde 1, Well completion Report, DGU 1.09.1980.
17. Linde 1, Well completion Report, KBB, February 1980.
18. Erslev 1, Well completion Report, DGU, December 1980.
19. Erslev 1, Well completion Report, KBB, October 1980.
20. Erslev 2, Well completion Report, DGU, December 1980.
21. Erslev 2, Well completion Report, KBB, October 1980.
22. Report on the geoelectrical Soundings at Elsf, Mors. DGU, March 1981.
23. Report on the Geological Soundings at Mors, DGU, April 1980.
24. Report on the geoelectrical soundings at Pårup, DGU, December 1980.
25. Report on the geoelectrical Soundings at Linde, DGU, February 1981.
26. Report on the geoelectrical soundings at Gørding, DGU, February 1981.

27. Rapport over gravimetrisk opmåling ved Gørding saltstruktur, Århus Universitet, Lab. for anvendt Geofysik, 28.9.1979.
28. Description of hydrogeological drilling programme, Mors, ELSAM, 5.5.1980.
29. Hydrological Tests Completion Report 1s, Edmund Gock, DGU, January 1981.
30. Hydrological Tests Completion Report 2s, Edmund Gosk, DGU Januar 1981.
31. Hydrological Tests Completion Report 3s, Edmund Gosk, DGU, January 1981.
32. Hydrological Tests Completion Report 4s, Edmund Gosk, DGU, January 1981.
33. Hydrogeological Investigations, Erslev 1s, Completion report technical part, Geotechnical report No. 7, 1981-03-20, Danish Geotechnical Institute.
34. Hydrogeological Investigations, Mors, Erslev 2s, Completion report technical part, Geotechnical report No. 8, 1981-03-20, Danish Geotechnical Institute.
35. Hydrogeological Investigations, Mors, Erslev 3s, Completion report technical part, Geotechnical report No. 9, 1981-03-20, Danish Geotechnical Institute.
36. Hydrogeological Investigations, Mors, Erslev 4s, Completion report technical part, Geotechnical report No. 10, 1983-03-20, Danish Geotechnical Institute.
37. Revised Seismic Interpretation of Mors Salt Dome, ELSAM og ELKRAFT, 27.03.1981.
38. Geogional Geology of Northern Jutland by Gunnar Larsen, Danish Geotechnical Institute, Date 1981.01.20.

39. Erslev No. 1s.
Geological Well completion report by Steen Midtgaard Nielsen,
DGU, March 1981.
40. Erslev No. 2s.
Geological well completion report by Luke Burne, DGU,
February 1981.
41. Erslev No. 3s.
Geological well completion report by Jørgen Knudsen,
DGU, March 1981.
42. Erslev 4s.
Geological well completion report by Luke Burne, DGU,
February 1981.
43. Erslev 1s.
DGU well logging completion report by Niels Bull,
DGU, February 1981.
44. Erslev 2s.
DGU well logging completion report by Niels Bull,
DGU, February 1981.
45. Erslev 3s.
DGU well logging completion report by Niels Bull,
DGU, February 1981.
46. Erslev 4 s.
DGU well logging completion report by Niels Bull,
DGU, February 1981.
47. Mineralogical investigations on samples from the well Linde 1.
Addendum to completion report, DGU, Holger Lindgreen, February 1981.
48. Thisted-strukturen. Geoteknisk Rapp. nr. 4.DGI, 1981.01.06.
49. Thisted-strukturen. Geoteknisk Rapp. nr. 5.DGI, 1981.04.29.

50. Kommentarer til Geoteknisk Institute rapport vedr. lodrette bevægelser af jordoverfladen på Thisted-strukturen. DGU, J.M. Hansen, 04.02.1981.
51. Geological Remarks about the North Jutland Salt Domes in respect on their Suitability for Radioactive Waste Disposal by Prof. Dr. G. Richter-Bernburg. 28.02.1981.
52. Geological Main Report on the basis of the wells Erslev 1, Erslev 2, Erslev 1s, Erslev 2s, Erslev 3s and Erslev 4s, DGU, April 1981.
53. Hydrogeological Main Report, DGU, April 1981, E. Gosk, N. Bull and L.J. Andersen.
54. Geology of the salt in the Mors Saltdome, March 1991, Kavernen Bau und Betriebs GmbH.
55. Surface and borehole gravity interpretation of the Mors saltdome, Edcon.
56. A simple three-dimensional interpretation of the Vejrum saltdome, Edcon.
57. High frequency electromagnetic reflection measurements in boreholes of the Vejrum and Mors saltdome.

Materialeprøvning.

58. Chemical Analysis of Erslev No. 1 Salt, DGU, March 1981, T. Laier.
59. Chemical Analysis of Erslev No. 2 Salt, DGU, March 1981, T. Laier.
60. Short Term Mechanical Testing of Rocksalt from Erslev 2, Report S44/79.2, 1981, The Technical University of Denmark, Departement of Structural Engineering.

62. Long Term Mechanical Testing of Rocksalt from Erslev 1, Report S44/79.3, 1981, The Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering.
63. Long Term Mechanical Testing of Rocksalt from Erslev 2, Report S44/79.3, 1981, The Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering.
64. Exploration Well, Erslev 1, Rockmechanical Tests, Universität Hannover, Lehrgebiet für Unterirdisches Bauen.
65. Exploration Well, Erslev 2, Rockmechanical Tests. Universität Hannover, Lehrgebiet für Unterirdisches Bauen.
66. Mechanical Testing of Rocksalt from Erslev 1 og 2, Summary Report, Report S44/79, 1981, The Technical Universitet of Denmark, Department of Structural Engineering.
67. Gutachten zur Berechnung der konvergenz eines Grossbohrloches in Rahmen des Projektes ELKRAFT, 25. januar 1981, W. Dreyer.
68. Stansicherheitsnachweis für Strecken zur Deponie von radioaktivem Müll. Projekt ELKRAFT, Shaft Gallery Studie, 27. februar 1981, W. Dreyer.
69. Determination of thermal properties of rock salt samples from the salt dome at Erslev, SHH-C-4, February 1981, Risø National Laboratory, Departement of Reactor Technology, Arne Jensen.
70. Thermal expansion coefficients for Erslev 1, salt samples determined by dilatometric measurements, S 8008, 5.12.1980, Risø National Laboratory, Metallurgy Department, O. Toft Sørensen.
71. Thermal expansion coefficients for Erslev 2 salt samples determined by dilatometric measurements, S 8008, 23.1.1981, Risø National Laboratory, Metallurgi Department, O. Toft Sørensen.
72. Hydrogeological programme Mors. Hydrochemistry based on the work performed in the DGU chemical laboratory, DGU, March 1981, T. Laier.

73. Hydrogeological Programme, Mors, Nitrate Tracer Test at E3s, Sept. 1980, DGU, T. Laier.
74. Hydrogeological Programme, Mors. Chemical Analysis of Pore Water from Seven Cores from E2s and E3s. An Investigation of Pore Water Extraction Methods, October 1980, DGU, S. Nielsen and T. Laier.
75. Hydrogeological Programme, Mors. Chemical Analysis of Water Samples from E1s and E3s, October 1980, DGU, T. Laier.
76. Chemical Analysis of Pore Water in Chalk Samples from Erslev, Mors, Denmark, April 1981. Risø National Laboratory, Chemistry Department, P. Solgaard and B. Skytte Jensen.
77. Permeability, Porosity, Dispersion and Sorption Characteristics of Chalk Samples from Erslev, Mors, Denmark. Risø National Laboratory, Chemistry Department, Walther Batsberg, Lars Carlsen and Bror Skytte Jensen.
78. Production and Properties of Solidified High Level Waste. Risø-R-431, August 1980, Knud Brodersen.
79. Borehole Sealing Cement Mortars for H.L.W. Repositories in Denmark. A Feasibility Study prepared for ELSAM/ELKRAFT, Nærum, december 1980, G.M. Idorn Consult ApS.
80. Corrosion Aspects of High Level Waste Disposal in Salt Domes, S-7913, K. Rørbo, Risø National Laboratory.
81. Kemisk analyse af stensalt for Linde nr. 1, DGU, T. Laier.

Anlæg.

82. Temperature Field around Radioactive Waste calculated by Use of Green Functions, RP-16-79. Hans Neltrup, Risø National Laboratory.

83. Temperaturberegninger vedrørende HLW-depot, august 1979, ELKRAFT, N. Laursen.
84. Conceptual Design of Overpacks for Transport and Final Storing of High-Level Waste Canisters. A. Hansen and O. Rasmussen, Risø National Laboratory.
85. Creeping Viscous Flow around a Heat-Generating Solid Sphere. Risø-1-39, April 1980, S. Krenk.
86. Thermally Induced Motion of a Nuclear Waste Canister in a Viscous Medium, Risø National Laboratory, August 1980, S. Krenk.
87. Conceptuel Study about Potential Methods for Underground Drilling Large Diameter Boreholes for High Level Nuclear Waste Disposal in Rock Salt. KBB, May 1980.
88. Deep Hole Depository Concept for High Level Radwaste - Construction of Facility. Kavernen Bau und Betriebs - GmbH, July 1980.
89. Deep Hole Depository Concept for High Level Radwaste - Operation and Sealing. Kavernen Bau und Betriebs - GmbH, March 1981.
90. Notat vedrørende endeligt kanisterdesign. ELKRAFT 29.1.1981.
91. Technical Specifications, Drill Large Diameter, Deep Hole Depository, Loffland Brothers Company, January 1981.
92. Technical Specifications, Drill Large Diameter, Deep Hole Depository, Fenix & Scissons INC., January 1981.
93. Underground Nuclear Waste Depository, Mors Salt Dome, Erslev 2 Location, Shaft Construction, Thyssen Schachtbau GmbH.
94. Shaft Gallery Depository Concept for High Level Radwaste, Construction - Operation - Sealing. Kavernen Bau und Betriebs - GmbH.

Sikkerhed.

95. IAEA-SM-243/154 Design and Safety Evaluation of a Danish High Level Waste Disposal Facility in Selected Salt Domes.
96. Calculation of Radioactivity of Nuclear Waste Material, RP-12-79, September 1979, C.F. Højerup, Risø National Laboratory.
97. Dissolution Rate of Salt Domes. E-K-notat nr. K79/193, 21. Nov. 1979, K.E. Lindstrøm-Jensen, ELSAM.
98. Radiolysis of Saltbrine, E. Bjergbakke, Risø National Laboratory.
99. Stored Energy in Salt in a Nuclear Waste Repository, RP-1-80, January 1980, Torben Petersen, Risø National Laboratory.
100. The Geochemistry of Radionuclides with Long Halflives. Their Expected Migration Behaviour, April 1980, B. Skytte Jensen, Risø National Laboratory.
101. Dissolution Rate of Salt Domes, Part 2, E-K-notat nr. K80/54, February 1980, K.E. Lindstrøm-Jensen, ELSAM.
102. Calculation of Power Generation and Radiation Levels in Nuclear Waste Material, RP-17-79, November 1979, C.F. Højerup, Risø National Laboratory.
103. Heat Gradient Induced Migration of Brine Inclusions in Rock Salt. Mathematical Treatment, RP-06-80, August 1980, H. Neltrup, Risø National Laboratory.
104. Selection of Release Scenarios for at Danish Waste Repository in a Salt Dome. ELSAM Report, September 1980, A. Pedersen, K.E. Lindstrøm-Jensen.
105. Numerical Modelling for the Linde Salt Dome. Hydrological and Radionuclide Transport, Intera, October 1980, INT 80-ID = 540-G01.

106. Transport of Radionuclides in Ground Water. ELSAM-Report K79/190A, 19. November 1979, K.E. Lindstrøm-Jensen.
107. Berechnung der mechanischen Beanspruchung des Salzdoms Mors, F. Rischbieter und K. Michelman, Battelle BF-V-64. 474-1. Oktober 1980.
108. Remarks on the Correlation between Size of Brine Inclusions and Migration Velocity, RP-1-81, Hans Neltrup, Risø National Laboratory.
109. Numerical Modelling for the Mors Salt Dome by INTERA Environmental Consultants Inc. Houston, USA, April - 1981.

Supplerende oplysninger fra elværkerne.

- S-1 Kommentarer til P.L. Ølgaards kritik af RP-12-79 og RP-17-79, C.F. Højerup, Forsøgsanlæg Risø, december 1981.
- S 2 Supplement til Torben Petersen: Stored Energy in Salt in a Nuclear Waste Depository, RP-1-80, Torben Petersen, Forsøgsanlæg Risø, februar 1982.
- S 3 Elværkernes affaldsprojekt. Rettelser til nuklidberegninger m.v., Arne Pedersen, Elsam, 26. januar 1982.
- S 4 Skrivelse om reviderede temperaturberegninger. Elkraft, 26. januar 1982.
- S 5 Bemærkninger til "Geologiske, termodynamiske og geokemiske bemærkninger til rapporten: "Heat Gradient Induced Migration of Brine Inclusions in Rock Salt, RP-06-80", DGU", Elsam, 3. juli 1981.
- S 6 Bemærkninger til "Migration af brine og brine/gasindeslutninger i stensalt, Institutet for Kemiteknik", Elsam, 18. februar 1982.

Tilsynet med Nukleare Anlægs udtalelser om delrapporter.

- TD 1. Udtalelse om delrapporten: "Stored Energy in Salt in a Nuclear Waste Repository".
- TD 2. Udtalelse om delrapporten: "Corrosion Aspects of High-Level Waste Disposal in Salt Domes". Metallurgi Dept. S-7913, K. Rørbo, December 1979.
- TD 3. Udtalelse om delrapporten: "Borehole Sealing Cement Mortars For H.L.W. Repositories in Denmark. A feasibility study prepared for Elsam/Elkraft; G.M. Idorn Consult Aps., Dec. 1980.
- TD 4. Kommentarer til delrapporten: "Conceptual Design of Overpacks for Transport and Final Storing and High-Level Waste Canisters" udarbejdet af Risø for Elsam/Elkraft i april 1980.
- TD 5. Udtalelse om delrapporten: "Production and properties of Solidified High-Level-Waste", december 1981.
- TD 6. Udtalelse om delrapporten: "Beregning af temperaturfelt omkring deponeret radioaktivt affald", marts 1983.
- TD 7. Udtalelse om delrapporter vedrørende deponeringsanlæg for højaktivt affald, april 1982.
- TD 8. Udtalelse om delrapport om radiolyse af salt-brine, marts 1982.
- TD 9. Udtalelse om delrapporter om seismiske målinger, marts 1982.
- TD 10. Udtalelse om delrapporter: "Dissolution rate of salt domes, E-K notat nr. K79/193, 21. nov. 1979 og E-K notat nr. K80/54, Elsam, 14. febr. 1980, K.E. Lindstrøm Jensen", marts 1982.
- TD 11. Udtalelse om delrapporter om Morshorstens opstigning, maj 1982.
- TD 12. Udtalelse om delrapporter om affaldets indhold af radioaktive stoffer, varmeeffekten og strålingen, april 1982.

- TD 13. Udtalelse om delrapport vedr. brine migration, april 1982.
- TD 14. Udtalelse om delrapporten over målinger af termiske data for salt i Morshorsten, maj 1982.
- TD 15. Udtalelse af delrapport vedr. radioaktive stoffers geokemi og migration.
- TD 16. Udtalelse om delrapport om hydrologiske spredningsberegninger.
- TD 17. Udtalelse om delrapporter om affaldsbeholderes bevægelse, juni 1982.

Rapporter fra konsulenter.

- K 1. Kritisk gennemgang og vurdering af "Calculation of Radioactivity of Nuclear Waste Material, RP-12-79" og "Calculation of Power Generation and Radiation Levels in Nuclear Waste Material, RP-17-79". Afdelingen for Elektrofysik, Danmarks Tekniske Højskole, juni 1981.
- K 2. Kritisk gennemgang og vurdering af "Stored Energy in Salt in a Nuclear Waste Repository, RP-1-80". Afdelingen for Elektrofysik, Danmarks Højskole, januar 1981.
- K 3. Kritisk gennemgang og vurdering af rapporten "Temperature Field around Radioactive Waste calculated by Use of Green Functions, RP-16-79" samt Temperaturberegninger vedr. HLW-Depot, ELKRAFT A.m.b.A., DGU, december 1981.
- K 4. Vurdering af termisk simuleringsmodel i elværksprojekt for deponering af højaktivt affald. Laboratoriet for varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, april 1981.
- K 5. Vurdering af Risø's termiske rapportmateriale i forbindelse med ELSAM/-ELKRAFT's affaldsundersøgelse fase 2. Laboratoriet for Geofysik, Århus Universitet, juni 1981.

- K 6. Vurdering af to rapporter vedrørende varmeproducerende beholderes bevægelser i salthorste. Laboratoriet for Anvendt Matematik, Danmarks Tekniske Højskole, juli 1981.
- K 7. Kritisk gennemgang og vurdering af rapporterne: "Greeping Viscous Flow around a Heat-Generation Solid Sphere" samt "Thermally Induced Motion of a Nuclear Waste Canister in a Viscous Medium". DGU, januar 1982.
- K 8. Report to the Deep Hole and Shaft Gallery Depository Concept for High Level Radwaste in Denmark. Technische Universität Berlin. Institut für Bergbauwissenschaften, november 1981.
- K 9. Korrosionsvurdering af affaldsprojekt. Korrosionscentralen ATV.
- K 10. Radioaktive Stoffers Geokemi og Migration. Institut for Kemiteknik, Danmarks Tekniske Højskole, august 1981.
- K 11. Migration af Brine og Brine/gas indeslutninger i Stensalt. Institut for Kemiteknik, Danmarks Tekniske Højskole, marts 1981.
- K 12. Geologiske, termodynamiske og geokemiske bemærkninger til rapporten "Heat Gradient Induced Migration of Brine Indusions in Rock Salt", DGU, marts 1981.
- K 13. Vurdering af rapportmateriale om radiolyse af brine. Energiteknik AB, Studsvik, april 1981.
- K 14. Vurdering af rapporten "Morsstrukturens Udvikling", DGU, februar 1982.
- K 15. Vurdering af rapporten "Berechnung der mechanischen Beanspruchung des Salzdoms Mors" DGU, januar 1982.
- K 16. Gennemgang af rapporterne:
"Seismic Reflections Survey 791 007/1a"
"Seismic Reflections Survey 791 007/1b"
"Seismic Reflections Survey 791 007/1c"
"Interpretation 791 007/4", folder 1
"Interpretation 791 007/4", folder 2
"Processing Vol. 1 791 007 50"
"Processing Vol. 2 791 007 50", DGU, maj 1981.

- K 17. Kritisk gennemgang og vurdering af rapporterne "Dissolution Rate of Salt Domes, E-K notat nr. 79/193" samt "Dissolution Rate of Salt Domes, E-K notat nr. K80/54", DGU, februar 1982.
- K 18. Delrapportvurdering i forbindelse med elværkernes affaldsprojekt af INTERA-rapporten vedr. simulering af radionuklide-transport fra Morst-salthorsten. Forsøgsanlæg Risø, november 1981.
- K 19. Geologisk og hydrologisk vurdering af rapporten "Numerical Modelling for the Mors Salt Dome, Report I. Hydrological and Radionuclide Transport Simulations. Intera Environmental Consultants INC., DGU, december 1981.
- K 20. Gennemgang af Battelle Instituts rapport, Berechnung der mechanischen Beanspruchung des Salzdoms Mors. Geoteknisk rapport nr. 1, Geoteknisk Institut, februar 1982.

Supplerende konsulentvurderinger.

- SK 1 Bemærkninger til "Kommentarer til P.L. Ølgaards kritik af RP-12-79 og RP-17-79" af C.F. Højerup, Afdelingen for Elektrofysik, Danmarks Tekniske Højskole, januar 1982.
- SK 2 Bemærkninger til "Supplement til Torben Petersen: Stored Energy in Salt in Nuclear Waste Repository RP-1-80". Afdelingen for Elektrofysik, Danmarks Tekniske Højskole, januar 1982.
- SK 3 Tillæg til "Delrapportvurdering i forbindelse med Elværkernes affaldsprojekt af INTERA-rapporten vedrørende simulering af radionuklide-transport fra Mors-salthorsten". Forsøgsanlæg Risø, 17. november 1981.

Materiale udarbejdet som led i vurderingsgruppens arbejde.

- VG 1 Baggrundsrapport om saltkrybning omkring dybe huller, Tilsynet med Nukleare Anlæg, 1. februar 1984.
- VG 2 DGUs vurderingsrapport, december 1982.

- VG 3 Overslagsberegninger vedrørende korrosion af affaldsbeholdere ved menneskelige indgreb i affaldsdepotet, Tilsynet med Nukleare Anlæg, januar 1984.
- VG 4 Beregning af temperaturfordelingen i saltet omkring en varmeproducerende affaldsstreng placeret i en saltformation. Miljøstyrelsen, februar 1984.
- VG 5 Notat om radiolyse af brine i forbindelse med vurderingen af elværkernes affaldsundersøgelse, fase 2. Miljøstyrelsen, oktober 1983.
- VG 6 Notat om strålingsenergiakkumulering i salt. Miljøstyrelsen, juli 1982.
- VG 7 Beregning af væsketilstrømning til affaldsbeholdere ved Anthony og Clines metode. Miljøstyrelsen, februar 1984.
- VG 8 Carnallits stabilitetsforhold. Forsøgsanlæg Risø, marts 1983.
- VG 9 Bevægelse af en streng af varmeproducerende affaldsbeholdere i et viskøst medium. Miljøstyrelsen, februar 1984.
- VG 10 SSIs notat om dosisberegninger til brug for vurdering af de sundhedsmæssige konsekvenser ved deponering af højaktivt affald i salthorsten på Mors, november 1983.
- VG 11 Baggrundsrapport vedrørende udludning af radioaktive stoffer fra affaldet ved kaverneudskylning, Tilsynet med Nukleare Anlæg, januar 1984.

Andet materiale.

- A 1 Review, Creep of Rocksalt, Neville L. Carter and Francis D. Hansen, Tectonophysics 92 (1983) 275-33.
- A 2 A critique of "Brine migration in salt and its implications in the geologic disposal of nuclear Waste". ORNL 5818, by G.H. Zenks and H.C. Claiborne Edwin Roedder and I-Ming Chou, 1982.

- A 3 Final Environmental Impact Statement, Management of Commercially Generated Radioactive Waste. US Department of Energy, October 1980.
- A 4 Projekt sikkerhedsstudien. Entsorgung, zusammenfassender zwischenbericht, juni 1981. Udgivet af sikkerhedsstudiets projektledelse.
- A 5 Morsdiapirens udviklingshistorie. Rapport for miljøstyrelsen af Kaj Sørensen, Institut for Teknisk Geologi, Danmarks Tekniske Højskole, februar 1984.

ISBN 87-503-5010-2
Stougaard Jensen/København
Fu 00-241
Pris kr. 50,- incl. moms