

Den norske deponiløsningen for lav- og middelsaktivt radioaktivt avfall

Av David Banks.

David Banks er forsker ved Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.

SAMMENDRAG

Norges lav- og middelaktive radioaktive avfall er beskjedent mht. mengde og farlighetsgrad. Som en «gravplass» for dette avfallet har myndighetene vurdert tre mulige lokaliteter; en nedlagt kisgruve i Killingdal, og nye selvdrenerende deponier i prekambrisk berggrunn ved enten Kukollen eller Himdalen, nær Fetsund.

En konsekvensutredning fant Killingdal uegnet for deponering, hovedsaklig på grunn av gruvens uoversiktlige struktur og korrosive miljø, og fordi den fylles raskt opp med surt gruvevann. Lokalitetene ved Kukollen og Himdalen ble funnet tilfredsstillende, og av disse to var Himdalen å foretrekke. Deponiet er planlagt som to selvdrenerende fjellhaller, med innadrettet grunnvannsgradient (for å umuliggjøre utslipp til grunnvann), hvor avfallet står tørt og innstøpt i en sarkofag av betong. Deponiets levetid er prosjektert til 3—400 år. Konsekvensutredningen konkluderer med at et slikt deponi vil tilfredsstillende det planlagte ambisjonsnivået på $<1 \mu\text{Sv}/\text{år}$ for den mest utsatte personen.

BAKGRUNN

Norge trenger et nytt deponi eller lager for lavt- og middelsaktivt radioaktivt (LMR) avfall. På det nåværende tidspunkt er ca. 40% av avfallet gravd ned i leiravsetninger på tomter til IFE på Kjeller; og de resterende 60% er lagret i en bygning over bakkenivå på samme sted. Dette lageret vil bli fullt i løpet av 1993/94.

En vurdering av mulige deponeringssteder har nå pågått i snart ti år, og forskjellige løsninger har blitt betraktet, fra nedlagte jernbanetunneler og gruver til et nytt spesielt tilpasset tunnelanlegg. Kveseth-kommisjonen vurderte hovedsaklig eksisterende tunnelanlegg (NOU, 1991) og kom med anbefaling at Killingdal gruve ville være den best egnede løsningen, men anbefalte at man også skulle vurdere et nytt deponeringsanlegg i nærheten av Kjeller.

Samtidig har konsulentene Bernald Strømme og Scandpower (1991 a) utført et studium av 52 mulige lokaliteter på Romerike for Statens Atomtilsyn, og har betraktet bl.a. logistiske faktorer, nåværende og planlagt arealbruk, hydrologi og geologi. Hovedbetingelsene

for et vellykket anlegg var at det skulle

- ligge i det såkalte «stabile» prekambriske grunnfjellsgneisområdet øst for Oslofjord,
- være selvdrenerende
- ligge i rimelig kjøreavstand fra Halden og Kjeller
- ikke ligge i nærheten av tett bebyggelse eller umiddelbar nærhet av faste bosteder

Berdal Strømme og Scandpower (1991a) anbefalte at man skulle foreta en nøye vurdering av to lokaliteter i nærheten av Kjeller, — Kukollen og Himdalen.

Den 16. juni 1992 bestemte det daværende Olje- og Energidepartementet at det skulle foretas en konsekvensutredning av tre omtalte lokaliteter:

- det eksisterende, nedlagte gruveanlegget på Killingdal (Holtålen kommune — nord for Røros)
- to lokaliteter for ny, selvdrenerende fjellhall i nærheten av Kjeller: Himdalen (Aurskog-Høland kommune) Kukollen (Sørums kommun)

Forfatteren, sammen med spesialister i strålingsvitenskap, landbruk og naturforvaltning ble innkalt som styringsgruppe for konsekvensutredningen (KU-gruppen), under ledelsen av Statsbygg. Utredningen skulle bli (og ble faktisk!) ferdig den 15. november 1992. Den ble utført med en budsjett på ca. 2 millioner NOK.

HVA ER RADIOAKTIVITET?

Radioaktivitet er et begrep som brukes om ustabile isotoper som avgir stråling når de brytes ned til stabile stof-

fer. Det er tre hovedtyper ioniserende stråling:

- alfa (α)-stråling — består av helium kjerner
- beta (β)-stråling — består av elektroner
- elektromagnetisk stråling, f.eks. Røntgen (X-ray) gamma (γ) — har høyere energi enn Røntgen

Et spørsmål som ofte stilles er hvilken strålingstype som er mest farlig; og til dette finnes det ingen enkle svar fordi stråledoser avhenger av situasjonen. γ -stråling er svært penetrerende, man trenger tykk betong eller bly-barrierer for å stoppe den. Men nettopp fordi den er så penetrerende, kan den gå gjennom kroppen uten å føre til så stor tetthet av skade på vevet som for eksempel α -stråling gjør. α -stråling består av forholdsvis «tunge» partikler; den er lite penetrerende og kan stoppes etter noen centimeter luft eller et ark papir. Derfor kan man gjerne (litt forenklet) si at γ -stråling er mest farlig mht. direkte eksponering fra en kilde utenfor kroppen, mens α er mest farlig ved inntak av partikler gjennom luftveier eller fordøyelsessystem.

Noen radioaktive stoffer brytes ned fortere enn andre. Noen, f.eks. jod-131, kobolt-60 eller tritium, brytes ned i løpet av noen dager, uker eller år, og kan dermed på mange måter betraktes som mindre problematiske enn visse spesialavfallstyper (f.eks. noen tungmetaller, eller klorerte løsningsmidler) som aldri, eller svært sakte brytes ned. Andre isotoper brytes meget sakte ned, f.eks. uran eller plutonium, som bruker mange tusener eller millioner år og er dermed potensielt langt mer problematiske. Nedbrytningshastigheten måles

ved begrepet «halveringstid» — den tiden det tar for enhalvdel av kjernene å brytes ned.

Selv om det finnes kun tre grunnleggende strålingstyper, kan stråling ha forskjellige energier, og som omtalt, kan isotoper ha forskjellige nedbrytningshastigheter. Derfor har ulike isotoper ulike **radiotoksiteter**. Radiotoksitet kvantifiseres med en **ALI-verdi** (annual limit of inntake) — dvs. den mengden av isotopen som man kan drikke/puste inn/spise før man får en uakseptabel dose (dosegrensen). Jo høyere ALI-verdien er, desto mindre farlig er isotopen (tabell 1).

Det finnes forvirrende mange begrep for å uttrykke radioaktivitet. Vi skal her bry oss om kun to:

- Becquerel (Bq) — som er et mål for mengde radioaktive nedbrytninger: dvs. radioaktivitet. En Becquerel = 1 nedbrytning per sekund.

- Sievert (Sv) — som er et mål for effektiv strålingsdose. Dette kan avhenge av isotopen, måten man blir eksponert på og de kropporganene som blir eksponert.

Ambisjonsnivået for det norske deponiet var at den mest utsatte personen som ble eksponert for radioaktivitet pga. deponiet ikke skulle få en tilleggsdose på mer enn 1 $\mu\text{Sv}/\text{år}$. Tabell 2 viser noen typiske aktiviteter som innebærer en strålingsdose, og tilsvarende strålingsdose i Sv.

Det bør være nødvendig å poengtere at radioaktivitet ikke er noe som er «ondt», «kunstig» eller «unaturlig». Vi er alle eksponert for stråling — fra bergartene omkring oss, fra kosmisk stråling og fra radon gass som frigjøres fra uran i bergarter og grunnvann. Radon står for ca. 75% av den årlige strålingsdosen for en gjennomsnittlig nordmann.

Tabell 1. Radioaktivt stoff (nuklider) og aktivitet i avfallet, år 2030.

Nuklide	Halveringstid (år)	Total Aktivitet (GBq)	Strålingsstype	ALI-verdi for inntak via drikkevann (GBq)
Co-60	5,3	3000	Beta, gamma	0,003
Kr-85	10,6	35	Beta, gamma	*
H-3	12,3	105000	Beta	1,0
Eu-152	13	0,1	Beta, gamma	0,01
Sr-90	28	40000	Beta	0,0006
Cs-137	30	55000	Beta, gamma	0,001
Am-241	458	1150	Alfa, gamma	0,00003
Ra-226	1622	51	Alfa, gamma	0,00009
C-14	5760	148	Beta	0,04
Pu-240	6760	465	Alfa	0,00004
Pu-239	24000	427	Alfa, gamma	0,00004
Ca-41	103000	50	Gamma	0,07
Cl-36	310000	0,4	Beta	0,02
U-238	$4,5 \cdot 10^9$	1,4	Alfa, gamma	0,0008

*) Kr-85 tas ikke opp i kroppen

Tabell 2. Sammenligning av doser ved forskjellige situasjoner og handlinger.

Effektiv dose (størrelsesorden)	Strålekilde	Situasjon/eksempel/kommentar.
1 mikrosievert	<ol style="list-style-type: none"> 1) Naturlig stråling 2) Naturlige radioaktive stoffer i kroppen 3) Forurensning med nedfall 4) Radioaktivt avfall 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 10 timers opphold utendørs. 2) Leve 1 døgn. 3) Spise 120 gram kjøtt med høyeste tillatte innhold av cesium-137. (Tiltaksgrense 600 Bq/kg.) 4) Anbefalt øvre grense for dose til person fra deponi i Norge.
10 mikrosievert	<ol style="list-style-type: none"> 1) Kosmisk stråling 2) Naturlig C-14 i kroppen 3) Radioaktivt nedfall 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Tilleggsdose ved flytur tur/retur Oslo-Tromsø (5 timer). 2) Årlig dose fra naturlig radioaktivt karbon (C-14) i kroppen. (helt nøyaktig 12 mikrosievert pr. år). 3) Spise 4-5 kg. reinsdyrkjøtt fra Finnmark.
100 mikrosievert	<ol style="list-style-type: none"> 1) Medisinsk bruk 2) Medisinsk bruk 3) Kosmisk stråling 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Besøk hos tannlegen som tar 2-3 røntgenbilder. 2) Røntgenbilde av lungene. 3) Reise 10 timer med supersonisk fly.
1000 mikrosievert (= 1 millisievert)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Naturlig stråling 2) Medisinsk bruk 3) Kosmisk stråling 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Årlig dose fra naturlige strålekilder (i jorda + kosmisk + interstrålingen i kroppen) 2) Typisk dosenivå for 1 røntgenundersøkelse av rygg, bekken eller nyrer (1-5 mSv). 3) Typisk årlig dosenivå for flypersonell (600 timer/år). <p>Kommentar 1: Årlig dosegrense for befolkning er 1 mSv. fra virksomheter som planlagt bruker stråling.</p> <p>Kommentar 2: Kjøre 10 000 km med bil (dødsrisiko).</p> <p>Kommentar 3: Røyke 1 sigarett årlig (forutsatt proporsjonalitet mellom sigarettkonsum og helseskade (?))</p>
10 millisievert	<ol style="list-style-type: none"> 1) Medisinsk bruk 2) Kosmisk stråling 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Doser ved noe mer komplekse røntgenundersøkelser (CT, angiografi, gjennomlysningsundersøkelser av mage-tarm system) er typisk i området 1 - 20 mSv. pr. undersøkelse. 2) Astronauter får doser på dette nivå ved romferder som varer ca. 1 måned. <p>Kommentar: Årlig dosegrense for strålingsarbeidere er 20 mSv.</p>
100 millisievert	Alle vanlige strålekilder	Leve 20 år som gjennomsnittsperson i Norge. Eksponering for alle naturlige og kunstige strålekilder inklusiv radoneksponering og dose fra medisinske undersøkelser, men eventuell dose fra strålebehandling av kreftsykdom ikke medregnet.
1000 millisievert (= 1 sievert)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Medisinsk bruk 2) Medisinsk, industri, kjernekraftverk 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Stråledoser ved kreftbehandling ligger i området 1-5 sievert. 2) Ulykkesituasjoner med akutte stråleskader til personale/pasienter.

Nyere undersøkelser utført av NGU har tydet på at folk som har borebrønn i noen fjellformasjoner i Østlandsområdet kan pumpe opp vann med opp til 0,2 mg/l uran; 9000 Bq/l radon og 2 ppb thorium!

Når man tenker på radioaktivitet, er det lett å la temaet bli dominert av ulyk-

ker som Windscale (Sellafield), Three Mile Island og Tsjernobyl. Men vi lever med radioaktivitet hver dag. Det er ikke nok å betegne radioaktivt avfall som «verdens farligste avfall» som vi ikke vil ha noe å gjøre med. Når vi vurderer deponering av radioaktivt avfall bør vi stille spørsmål som:

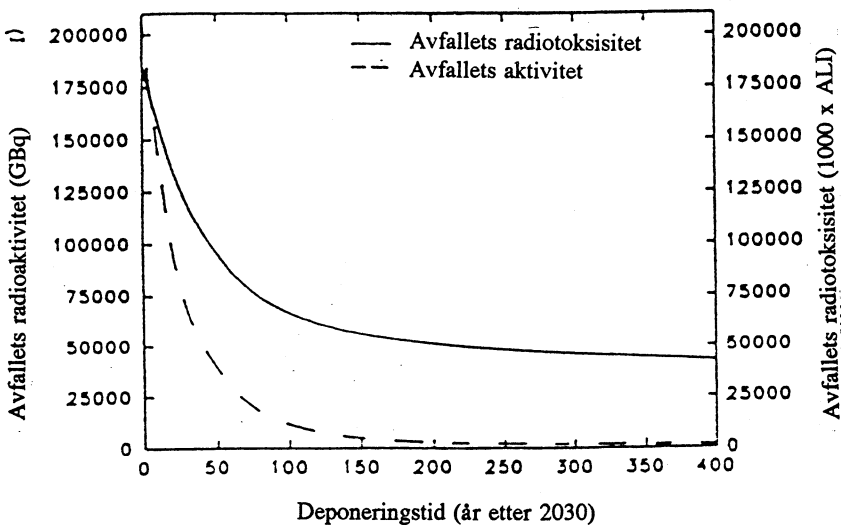
- hvor **mye** avfall er det snakk om
- hvor **farlig** er det
- hvilken **type** avfall er det
- hvordan kan det sammenlignes med **bakgrunnsnivåer** i naturen?

DET NORSKE AVFALLET

Det norske avfallet er beskjedent i mengde, i volum ca. 0,1% av LMR-avfall vi finner i Storbritannia eller Sverige. I de sistnevnte land stammer avfallet i hovedsak fra kjernekraftsindustrien og fra Forsvaret. Kjernekraft har vi ikke i Norge, men to forskningsreaktorer har vi, på Kjeller og i Halden. De frambringer visse avfallsmengder (tabeller 1 & 3), hvorav hoveddelen av aktiviteten skyldes de kortlivede isotopene Sr-90 og Cs-137 (halveringstid ca. 30 år). I tillegg kommer avfall fra medisinsk bruk, industri og oljefeltene. Mht. mengde aktivitet, stammer hoved-

delen fra selvlysende utgangsskilt som finnes f.eks. på fly. Disse bruker tritium som energikilde — en annen kortlivet, og mindre farlig isotop (halveringstid 12,3 år, ALI verdi = 1 GBq). En ny avfallstype er såkalt «scale» eller avleiringer fra borerør i Nordsjøen, som inneholder små mengder radium; og det kan stilles spørsmål ved om man bør behandle dette avfallet på linje med annet radioaktivt avfall pga. stort volum og lav aktivitet.

Så langt er det få problematiske komponenter i avfallet. Men det inneholder spor av «forurensning» fra enkelte langlivede isotoper som plutonium, americium og uran. Disse har radiotoksiciteter ca. 1000—100.000 ganger høyere enn tritium, og dette har skapt en del kontroverser omkring den norske deponiløsningen. Men selv med slike avfallstyper er det viktig å tenke på mengder. Figur 1 viser nedgangen i



Figur 1. Tidsforløp for den totale aktiviteten og radiotoksisiteten i avfallet etter år 2030.

total aktivitet i avfallet over tid. Den avtar fort og har nesten forsvunnet etter et par hundre år. Radiotoksisitet reduseres også raskt, men ikke fullt så raskt fordi avfallet etter noen hundre år er dominert av de langlivede isotopene. Det er foretatt en nøye vurdering av hvor farlig disse spor av langlivede stoffer er, mht. stråledoser. Man har funnet at de langlivede stoffene ikke kan resultere i stråledoser som har helsemessig betydning, selv etter deponiets levetid, og selv om man i modellene antar de verst tenkelige hendelser.

Avfallet er nøye karakterisert, og dets sammensetning er fremstilt i tabellene 1 & 3. Hvis de ovenfornevnte argumentene virker lite overbevisende, så presenteres her noen sammenligninger som jeg håper vil sette litt perspektiv på saken:

- 1) Avfallsets innhold av uran er det samme som uranmengdene i den sprengstein som vil tas ut av deponihallen hvis deponiet anlegges i typiske gneisbergarter.
- 2) Summen av langlivede isotopers aktivitet i avfallet er av samme størrelsesorden (dvs. innen én tipotense) som et tilsvarende utsprengt volum av alusklifer.
- 3) Selv om alt avfall blir fullstendig løst opp i Øyeren i løpet av ett år, fører dette ikke til overskridelser av drikkevannsgrenser.
- 4) Total aktivitet fra alt avfall tilsvarer aktiviteten i strålekniven som er i daglig bruk ved Haukeland sykehus.
- 5) Total strålingsenergi fra avfallet tilsvarer i størrelsesorden 40 W — dvs. en liten lyspære.

Kort sagt, et katastrofe-scenario med det norske avfallet er helt utelukket — det er rett og slett ikke nok av det!

DEPONERINGSFILOSOFIER

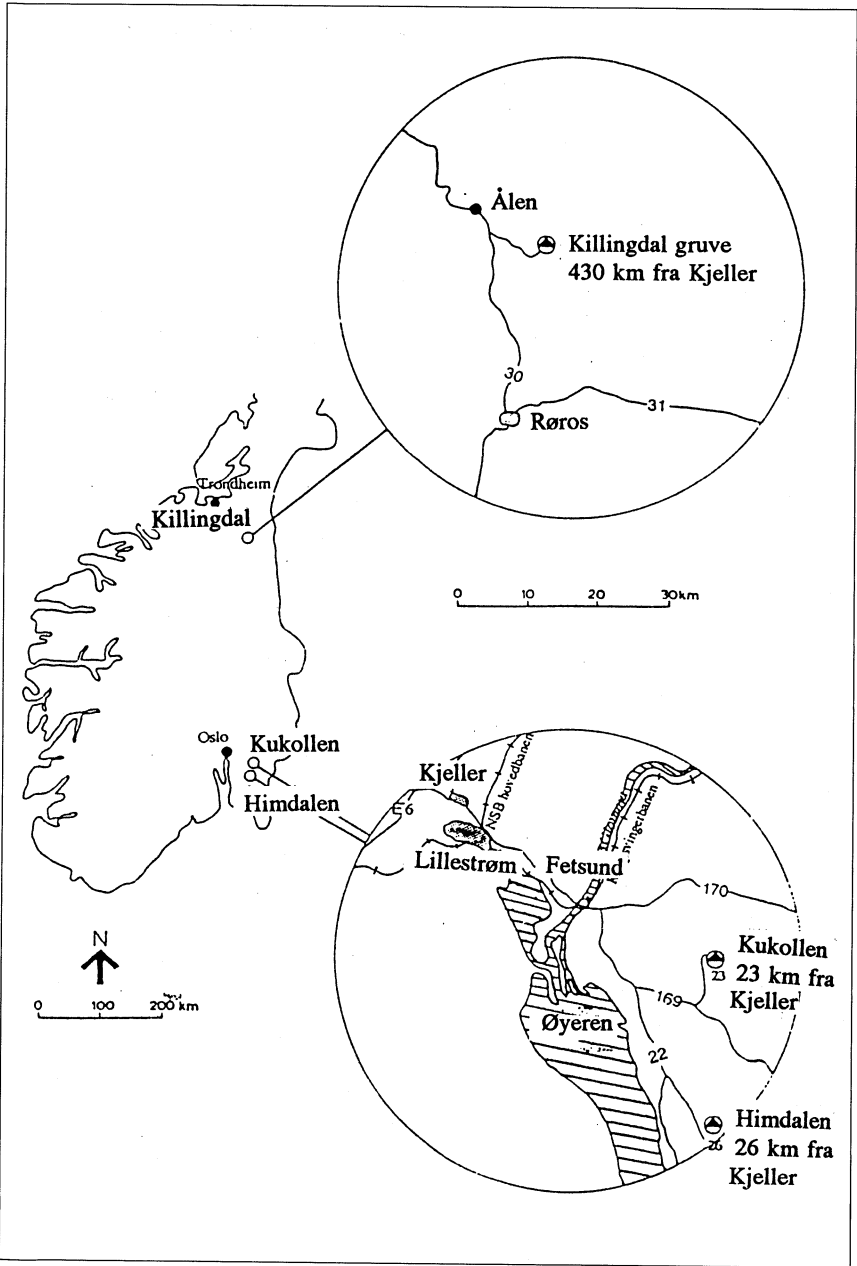
Deponeringsfilosofien avhenger av:

- mengde avfall
- type avfall
- økonomi

Vanlige deponeringsfilosofier i utlandet omfatter dyp deponering i krystallint grunnfjell (f.eks. Sellafield i Storbritannia). Dette på grunn av de store, og potensielt farlige, avfallsmengdene. Med slike løsninger bruker man geologien som «beholderen» for å hindre at avfallet slippes ut til overflatemiljøet. Fordi grunnvann vil være hovedtransportmedium for forurensningsstoffer, er det ytterst viktig at man finner et sted med de riktige hydrogeologiske egenskapene, dvs.:

- tett fjell med lite oppsprekking
- få eller ingen hydraulisk ledende sprekkesoner
- reduserende kjemisk miljø (hvor de fleste tunge isotopene er lite mobile)
- lav hydraulisk gradient (og dermed lav grunnvannshastighet)

Slike steder er meget vanskelig å finne, og deponering under havnivået (som mange motstandere av deponiløsningen i Norge har foreslått som alternativ) er ingen garanti for at disse forholdene skal oppnås. F.eks. er det nå oppstått tvil om Sellafield-deponistedet i England, som ligger under havnivået, på grunn av dyp grunnvanns-sirkulasjon (Bowler 1993). Dyp deponering er også selvfølgelig en meget dyr metode. USA har brukt 15 år og skal videre bruke 6 milliarder dollar for å prøve (hittil uten resultat) å finne et egnet sted for deres høytaktive avfall ved Yucca Mountain, Nevada (Lowry 1993).



Figur 2. Norgeskart som viser de tre mulige lokalitetene.

Mange geologer har forståelig nok reagert meget sterkt på de tre foreslåtte norske alternativene, fordi ingen av dem oppfyller de ovenfornevnte krav. Men dette bør ikke være overraskende; man har **ikke** valgt deponeringsfilosofien som er beskrevet ovenfor. Den norske filosofien, som er mulig pga. de beskjedne avfallsmengdene, er at man bruker geologien kun for å *isolere* avfallet fra inngrep fra det ytre miljøet og for å skjerme utsiden for direkte stråling. Man bruker **ikke** geologien som en vanntett beholder. Man stoler på følgende prinsipper for å hindre at et utslipp av radioaktivitet fra deponiet forekommer:

- at avfallet står tørt i en selvdrenerende fjellhall, også med selvdrenerende adkomsttunnel.
- at dette skaper en innovervendt grunnvannsgradient som umuliggjør spredning av forurensningsstoffer til grunnvann.
- at avfallet forsegles i egnede betong- og bly-beholdere og at det hele forsegles i en betong sarkofag.

Selv om den norske deponeringsfilosofien ikke er den vanligste internasjonalt sett (i utlandet er det større avfallsmengder), anerkjenner også utenlandske geologer at en selvdrenerende tunnel (selv for høyaktivt avfall!) stiller færre krav til hydrogeologi enn dyptliggende deponier. Roedder (1990), for eksempel, skriver at en selvdrenerende fjellhall er «much less site-specific in its requirements» enn de fleste andre deponeringsfilosofier. Han mener at «the concept has so many apparent virtues... that I believe it should be investigated thoroughly», men han beklager: «as far as I can determine... this procedure in par-

ticular has dropped into relative obscurity».

DE AKTUELLE LOKALITETENE

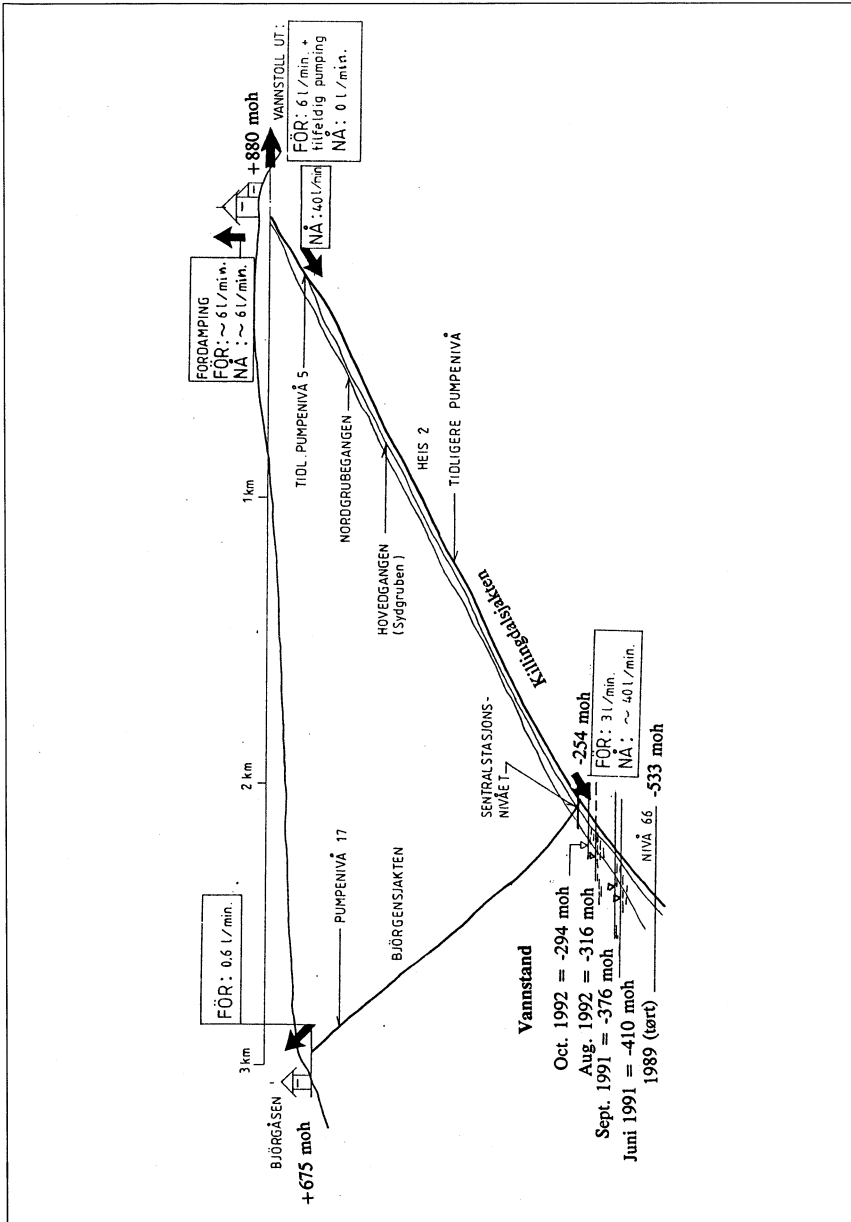
1) KILLINGDAL GRUVE

Killingdal gruve ligger i den kaledonske fjellkjeden (figur 2). Bergarten er en skifrig fyllitt som er en bløt og mekanisk svak bergart. Den har en strøkretning ca. nord—sør, og faller ca. 34° mot vest. Malmkroppen forekommer grovt sett langs grensen mellom de såkalte Kjurudalsfyllittene og Hersjøskifrene. Malmen opptrer som to kroppar av massiv sulfidmalm, hovedsakelig svovelkis, med mektighet ca. 3—12 m parallelt med skifrene. Malmen har blitt drevet på kobber, sink og svovel.

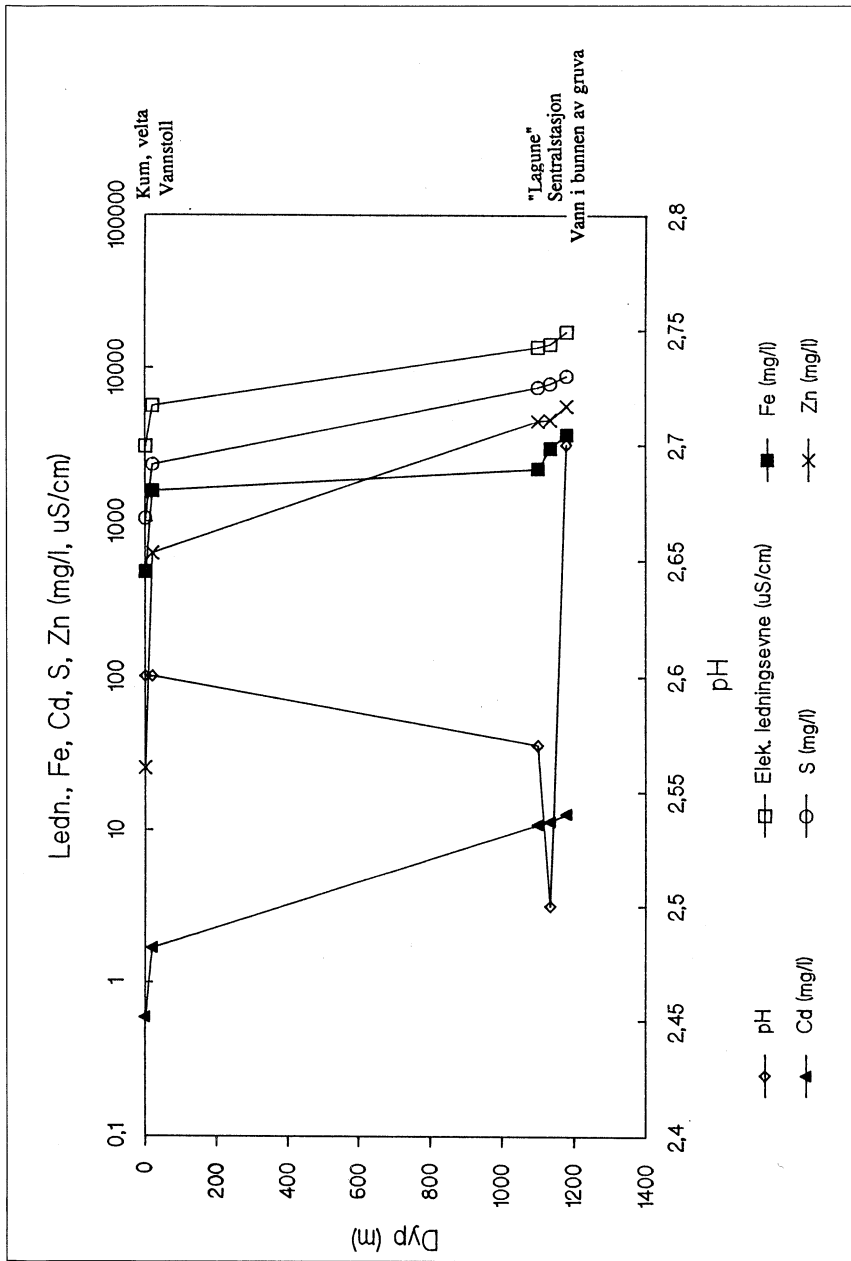
Deponihallen ble foreslått anlagt ved sentralstasjonsnivået, drøyt 1000 m under bakken, ved treffpunktet av Bjørgan-sjakta og Killingdal-sjakta (figur 3).

Det er ikke observert sprekkesystemer, forkastninger eller svakhetssoner i nærheten av sentralstasjonsnivået som kan virke negativt inn på bergmassens kvalitet som lagringsmedium. Det er imidlertid kjent at et regionalt skyveplan av kaledonsk alder ligger ca. 120 m under og parallelt med malmkroppen (Rui 1973). Dets betydning for grunnvannsstrømning er ukjent. Sideberget er velegnet for bygging av nye fjellrom, men på grunn av den markerte skifrigheten er det viktig at fjellrom orienteres riktig. Bergarten ved sentralstasjonsnivået fremtrer som tørr og tett.

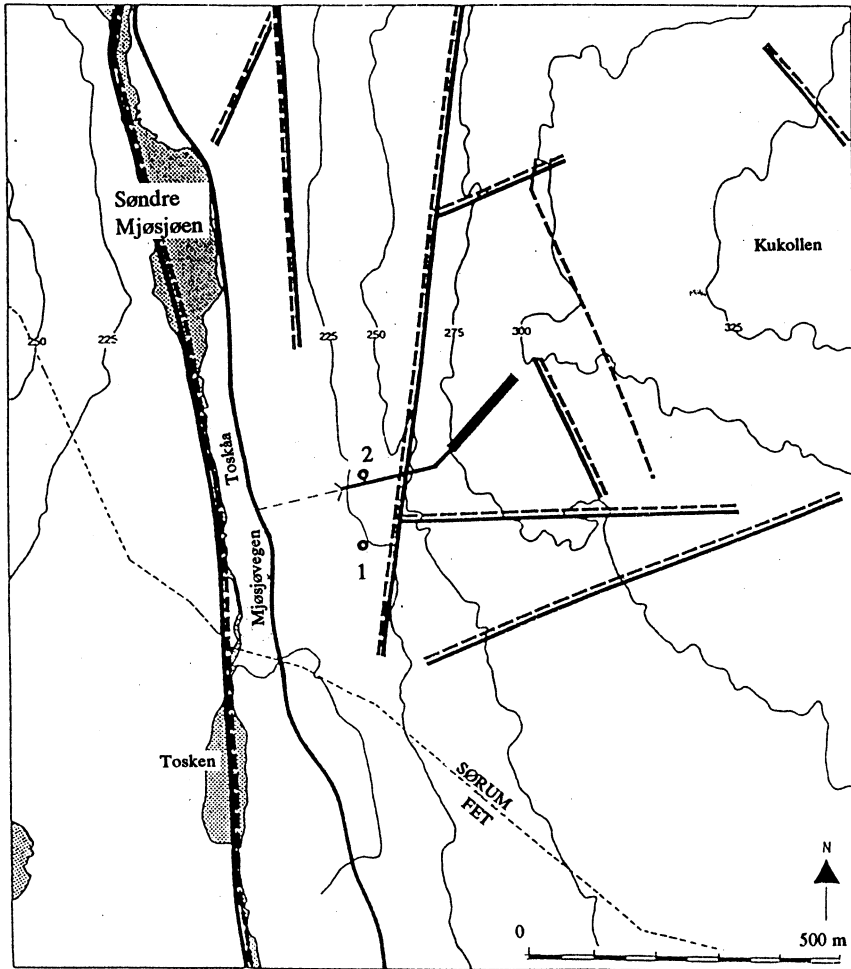
Gruva var tidligere ansett som tørr (NOU 1991), men det er antydninger til at innlekking av mindre mengder overflatevann og grunnvann alltid har funnet sted. Det skjer en kraftig ventilasjon gjennom gruva. Fordampningshastigheten var opp til 6 liter vann pr. min.





Figur 3. Tverrsnitt gjennom Killingdal gruve som viser vannbalansen ved gruva før og etter tiltak ved gruveveltene, og økende vannivå i gruva.



Figur 4. Endring i kjemien i det vann som renner inn i Killingdal gruve.



Markert svakhetszone. Usikkert forløp 
 Sprekk med usikkert forløp 

BOREHULL

- 1. Lengde 90 m, fall 40° fra horisontalen
- 2. Lengde 96 m, fall 38° fra horisontalen

Figur 5. Kart over lokalisering og sprekkesoner ved Kukollen.

Det er videre kjent at ved høyere nivåer i gruva måtte beskjedne mengder grunt grunnvann pumpes ut. Noe av det innsigende vannet ble ført ned til sentralstasjonsnivå og brukt som drikkevann og prosessvann. Ca. 2—3 l/min rant tidligere forbi sentralstasjonsnivå og forsvant enten ved forbruk eller fordampning. Imidlertid vet ingen nøyaktig hva det naturlige innsiget av grunnvann/markvann til gruva har vært. Noen få liter pr. min. må ansees som sannsynlig. Selv med ca. 4 l/min innsig av naturlig grunnvann forventes oversvømmelse av deponiet ved sentralstasjonsnivået om 10—20 år, og oppfylling av gruva om noen hundre år.

Under drift ble gruveavfall deponert i velter (hauger) omkring inngangen til Killingdalssjakt. Dette førte til svært sur og tungmetallholdig avrenning til Gaula. Ved nedleggelse av gruva i 1986 ble det gjennomført spesielle miljøløstak ved gruveveltene for å hindre avrenning til Gaula. Det forurensede sigevannet fra veltene har deretter blitt ledet ned i gruva gjennom Killingdalssjakt. Det ledes nå rundt 20 000 m³ (40 l/min) vann ned i gruva hvert år og den fylles raskt. I oktober 1992 sto vannstanden 40 meter under sentralstasjonsnivået og vannstanden stiger ca. 7 meter/måned, — dette vil variere avhengig av sesong og størrelsen på de bergrommene som fylles. Sentralstasjonsnivået hvor deponiet er tenkt etablert, vil stå under vann i løpet av 1993 dersom forholdene ikke endres. Oversvømmelse av gruva ventes om ca. 40—50 år, hvis ikke forholdene endres.

Vannet fra veltene er surt (pH = 2,5), svært sulfatholdig og bringer med seg flere typer tungmetaller (figur 4). Det representerer dermed et korrosivt miljø.

2) KUKOLLEN

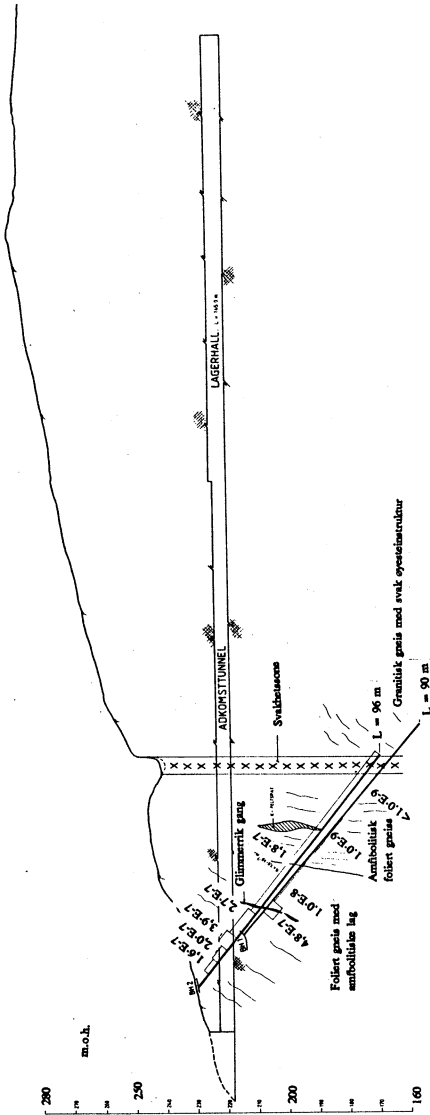
Bergarten i Kukollen er en grunnfjells-gneis av prekambrisk alder (figur 5).

Den foreslåtte lokaliteten ligger i et område hvor en deponihall kan bygges uten å komme i berøring med større svakhetssoner, men adkomsttunnelen vil krysse en markert knusningssone. Det er observert sprekkeminerisering i form av svellende leirmineraller på sonen som vil krysse adkomsttunnelen. Dette er ikke uvanlig i en norsk grunnfjells-gneis.

Det er boret to boreringer ved Kukollen og permeabilitetstesting er gjennomført med enkle metoder for å få en grov oversikt over hydrogeologiske egenskaper. Målte verdier av hydraulisk ledningsevne i borehull ved Kukollen (figur 6), er av størrelsesorden 10⁻⁷ m/s i overflaten til lavere enn det målbare, <10⁻⁹ m/s, i dybden. Dette betraktes som «typisk» til «forholdsvis lav permeabilitet» i fast-fjells sammenheng. Sprekkesonen som ville krysses av adkomsttunnelen ble funnet å være forholdsvis tett (<10⁻⁹), sannsynligvis pga. leirminerisering. Total naturlig innlekking til hallen og adkomsttunnelen er anslått til 10—120 l/min, men injiseringstetting vil kunne redusere dette til 3—7 l/min (NOTEBY 1992).

Grunnvannsdrainering fra deponiområdet vil være mot Toskåa. Langs Toskåa-dalen forekommer det en sprekkeseone som betraktes som liten (NVE 1975) i regional sammenheng. Sprekkesonens transmissivitet mht. grunnvann er imidlertid ikke kjent.

Analyser av grunnvannet fra et borehull 1,5 km fra anlegget viser at vannkvaliteten er innenfor «det normale» for det sørøst-norske grunnfjellsområdet, som ikke forventes å være spesielt korrosivt.



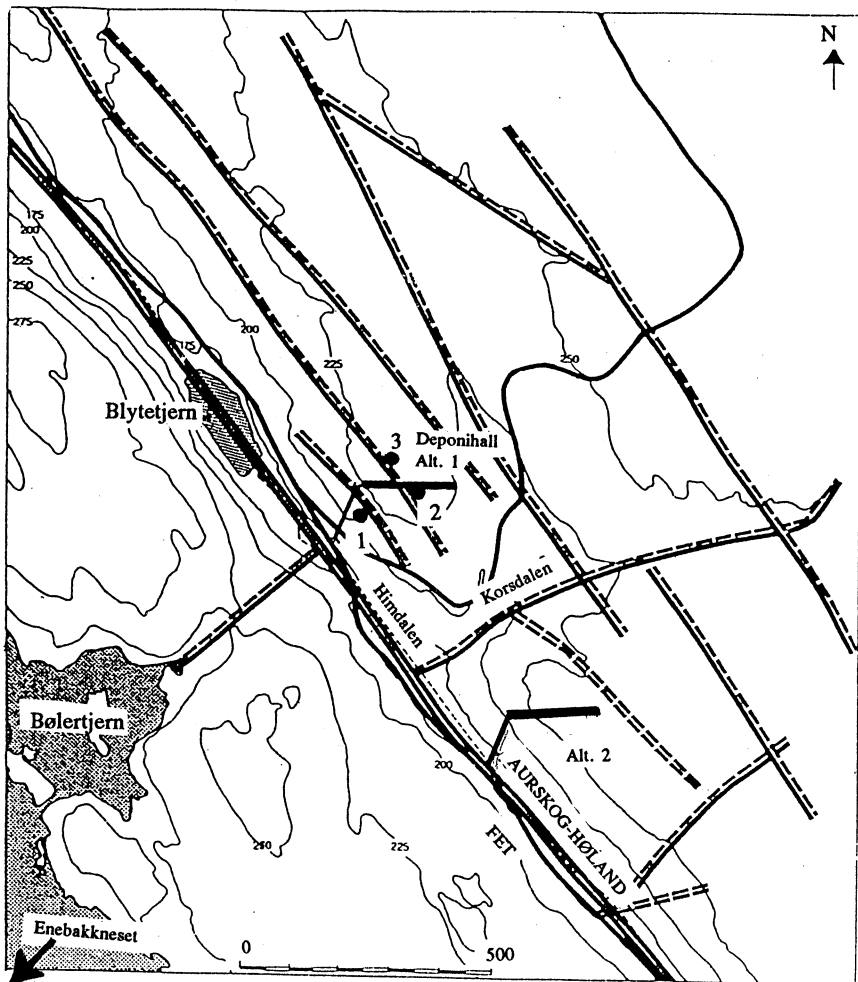
Figur 6. Tverrsnitt gjennom et deponi ved Kukollen. Målt permeabilitet oppgis i m/s.




3) HIMDALEN

Bergarten i Himdalen er en mylonitiseret (forskifret) prekambrisk grunnfjellsgneis. Himdalen er en lang «rett» dal langs en av sørøst-Norges mest markerte svakhetssoner (Skjerna 1972). Bevegelser langs sonen i prekambrisk tid pulveriserte og forskifret gneisbergarten som ga mylonittbergarten. Dette høres kanskje litt voldsomt ut, men detaljerte undersøkelser ved Äspö i Sverige har påvist at mylonittbergartene kan være en av de minst permeable bergartstypene (Gustafsson og Krásný [1993] skriver «It should be emphasized, however, that mylonite, which is associated with large shear zones, shows the lowest hydraulic conductivity. It is thus not obvious that large tectonic zones make the best hydraulic conductors through the rock»).

Svakhetssonen har sannsynligvis vært aktiv i permisk tid (Skjerna, pers. meddel., Ramberg & Larsen 1978). Selv om dens grunnvannsførende egenskaper ikke har blitt direkte undersøkt, er det antatt under konsekvensutredningen at den kan være betydelig grunnvannsførende.

Ved alternativ 1 (figur 7) antas størst sannsynlighet for vannlekkasjer å være ved kryssing av en sprekkessone ved adkomsttunnelen. Fra boredata og kartlegging i området er det påvist mindre sprekker som vil kryse hallen. Eventuelle mindre vannlekkasjer vil kunne forekomme i forbindelse med kryssingen av disse sprekkenes. Målte verdier av hydraulisk ledningsevne (enkel permeabilitetstesting — figur 8) i borehull ved Himdalen er i størrelsesorden 10^{-7} m/sek i enkelte fjellpartier til lavere enn det målbare, $<10^{-9}$ m/sek (for hoveddelen av bergarten). Dette

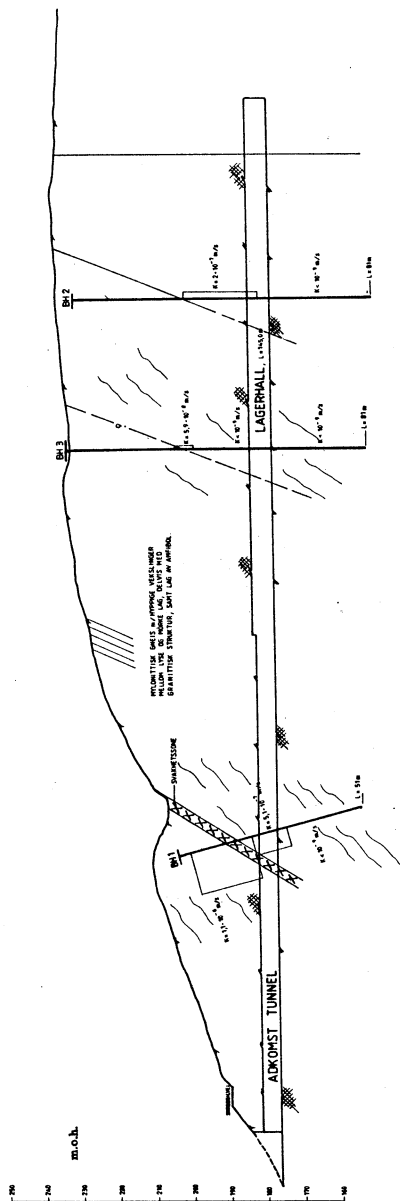


Hovedforkastningslinje, ca. vertikal 
 Markert svakhetszone 
 Markert svakhetszone, usikkert forløp 

BOREHULL

- 1. Lengde 51 m, fall 80° fra horisontalen
- 2. Lengde 81 m, vertikal
- 3. Lengde 81 m, vertikal

Figur 7. Kart over lokalisering og sprekkesoner ved Himdalen.



Figur 8. Tverrsnitt gjennom et deponi ved alternativ 1, Himdalen. Målt permeabilitet er oppgitt i m/s.

betraktes som «forholdsvis lav permeabilitet» i fastfjells sammenheng. Ved en mindre sprekkesone som krysser adkomsttunnelen er det beregnet en hydraulisk ledningsevne på ca. 10^{-6} m/sek i testseksjonen som inkluderer sonen.

Ved alternativ 2 er det ikke foretatt undersøkelser ved boring, men fjelllets egenskaper antas ikke å være vesentlig forskjellige fra alternativ 1. Fjellhallen her synes å være mer gunstig lokalisert i forhold til sprekkesoner enn alternativ 1.

Den foreslåtte lokaliteten ligger i et område på NØ-siden av Himdalen hvor deponihall kan bygges uten å komme i direkte berøring med den antatt grunnvannsførende, store svakhetssonen.

Lekkasjer inn i hallen vil være knyttet til enkelte sprekker i fjellet. Total naturlig innlekkasje til hallen og adkomsttunnelen er anslått til 15–120 l/min, men injiseringstetting kan redusere dette til 3–7 l/min.

Grunnvannsdrenering fra deponiområdet vil være mot Himdalen, og utfra erfaringer med lignende nedbørsfelt i utlandet forventes det en hydraulisk gradient oppover i sprekkesonen.

Analyser av grunnvann fra to av borehullene som er etablert i forbindelse med undersøkelsene, viser at vannkvaliteten er representativ for det sørøstnorske grunnfjellsområdet. Borehullet fra hallområdet indikerer at vannet har hatt lengre oppholdstid i grunnen enn prøven fra borehullet som krysser sonen i adkomsttunnelen. Vannkvaliteten betraktes ikke som spesielt korrosiv ovenfor anlegget.

Tabell 4. En kvalitativ vurdering av de tre lokalitetene. ÷ = lite tiltrekkende, 0 = tilfredsstillende, + = egnet.

	Killingdal	Kukollen	Himdalen
Tett fjell	+	+	+
Vannførende sprekker ved lokaliteten	+	+	÷
Avstand til store sprekkesoner	÷	÷	÷
Jordskjelv	+	0	0
Korrosivt miljø	÷	+	+
Bergmekaniske egenskaper	0	0	0
Fremtidige mineralressurser	0 ??	+	+
GEOLOGISK VURDERING	÷	+	0
Trivelig arbeidssted	÷	0	0
Avstand til Kjeller	÷	+	+
Selvdrenerende	÷	+	+
Arealbruk og naturbetraktninger	÷	÷	0
Verneinteresser	÷	0	0
Friluftsliv	÷	÷	0
Kostnad	÷	0	0
IKKE GEOLOGISKE FAKTORER	÷	0	+
TOTAL VURDERING	÷	+	+

DEN ANBEFALTE LOKALISERINGEN

I utgangspunktet ble KU-gruppen bedt om å vurdere lokalitetene i forhold til aksepterte internasjonale krav (se seksjonen «Deponeringsfilosofier») som er utarbeidet med tanke på dyptliggende, ikke-selvdrenerende deponi som bruker geologi som tett-barriere.

De viktigste geologiske egenskapene, med en grov +/- vurdering for alle lokaliteter, vises i tabell 4. Det er klart at ingen av lokalitetene tilfredsstillende alle disse kravene, men sett fra et rent geologisk synspunkt er Kukollen kanskje mest tiltrekkelige, ut fra avstand til regionalt store sprekkesoner og påvist tetting av enkelte sprekker med leirmineraler. Killingdal gruve kan utelukkes som mulig løsning på grunn av:

- Den er ikke selvdrenerende, men er derimot i ferd med å fylles med vann (selv om man kunne hindre innrenning av overflatevann, renner det fremdeles inn noen få l/min naturlig grunnvann).
- Den representerer et meget korrosivt miljø
- Dens utforming er lite oversiktlig
- Den er et mindre trivelig sted og (etter forfatterens oppfatning) et nokså farlig sted å jobbe på.
- Den har allerede nok problemer med mulig oversvømmelse av tungmetallholdig vann, uten å tilsette radioaktivt avfall inn i «gryta».

For å finne ut om noen av de andre to lokalitetene kunne være tilfredsstillende, måtte KU-gruppen stille seg spørsmålet:

HVOR VIKTIG ER HYDROGEOLOGI?

Og svaret ble faktisk (og det er vanskelig for en hydrogeolog å innrømme det!) — ikke så viktig!

For at et utslipp av radioaktive stoffer skal kunne skje via grunnvannet fra en selvdrenerende deponihall, må det forutsettes at:

- 1) Dreneringssystemet tettes i så stor grad innen deponiets levetid, at dets permeabilitet ligner på fjellets, og at den innadrettede grunnvannsgradienten reverseres.
- 2) At det ikke eksisterer et samfunn som kan vedlikeholde dreneringssystemet. Dvs. at det skjer et sammenbrudd av samfunnet, som vil utsette oss alle for langt større risiko i våre daglige liv enn man kan tenke seg fra deponiet.
- 3) At radioaktive stoffer lekker ut av sarkofagen i konsentrasjoner som har helsemessig betydning. Beregninger som er gjort av Scandpower (Statsbygg 1992), som antar de verste tilfellene (fullstendig oppsmuldring av betongsarkofagen, nærliggende grunnvannsbrønn som trekker inn all forurensning) indikerer at det er umulig å få ut slike konsentrasjoner fra avfallet. Dette pga. avfallets små mengder og lave mobilitet.

Derfor er konklusjonen uunngåelig at de strenge geologiske krav som stilles ved mange dyptliggende deponi i utlandet **ikke** er relevante for den norske filosofien. Tross alt er det lite poeng i å krangle om fjellet bør ha en hydraulisk ledningsevne på 10^{-8} eller 10^{-10} m/s, når man har en svær selvdrenerende adkomsttunnel som alltid vil være hovedtransportveien for en eventuell forurensning! Vår vurdering var, at for å kunne bygge et sikkert deponi, må lokaliseringen kun tilfredsstillende minimumskrav til geologi:

- at lokaliteten ikke representerer et korrosivt miljø

- at lokaliteten er stabil nok for å kunne bygge en fjellhall som tåler styrken av jordskjelv som ventes innen deponiets levetid. At dette vil være mulig ved Himdalen og Kukollen er dokumentert gjennom NORSARs (1992) utredning.
- at bergarten skal være tett nok, og at deponihallen ikke direkte skal krysses av betydelig vannførende sprekkesoner, slik at man ikke skal få uhåndterbare mengder vann som overbelaster dreneringssystemet. Foreløpige prøveboringer med enkle testmetoder indikerer at dette skal være mulig både ved Himdalen og Kukollen. Dette skal bekreftes (evt. avkrefte) ved videre, mer detaljerte, geotekniske og hydrogeologiske undersøkelser før utsprengningsarbeidet settes i gang. Innen det aktuelle deponiområdet skal også videre sprekkekartlegging foretas slik at fjellhallen bygges i en fjellblokk som er minst mulig oppsprukket.
- så lenge man kan finne en tilfredsstillende fjellblokk i sidebergartene, har tilstedeværelsen av den store sprekkesonen langs Himdalen (eller for den saks skyld langs Toskåadalen ved Kukollen) etter styringsgruppens mening liten betydning for en vellykket deponiløsning. Det vil si at, etter etablering av deponiet, kan man uten risiko etablere et grunnvannsanlegg i Himdalen sprekkesone, hvis den viser seg å være hydrogeologisk egnet.

Vi konkluderte at man **kan** bygge et sikkert deponi enten ved Kukollen eller Himdalen, selv om de kanskje ikke er de helt ideelle lokalitetene, sett fra en geologs synspunkt! Andre forhold enn geologi (arealbruk, naturverdier, jord-

bruk osv.) talte nokså sterkt imot Kukollen som alternativ, og utfra dette anbefalte gruppen at man først og fremst skulle betrakte Himdalen som et aktuelt deponisted.

ET LITE TANKEEKSPERIMENT

Hydrogeologer kan reagere nokså kraftig på deponilokaliseringer i nærheten av sprekkesoner, med høy grunnvannsgradient og ikke 100% tett fjell. Men disse hydrogeologiske egenskapene er en naturlig følge av at man ønsker et deponi i Prekambrisk gneis, med selvdrenerende adkomst-tunnel og minst 50 m fjelloverdekning. Dette fører til at mulige lokaliteter vil ligge i bratte dalsider, og i daler som høyst sannsynlig er kontrollert av sprekkesoner.

Mange har tatt opp sprekkesoner som det mest kontroversielle temaet innen konsekvensutredningen. Dette fordi mange hydrogeologer reager sterkt mot slike soner, nesten som en «refleks-reaksjon». Selv om flere forskere har påvist at det ikke nødvendigvis er noen korrelasjon mellom en sprekkesones størrelse og dens transmissivitet mht. grunnvann (se f.eks. Nilssen 1988, Banks et al. 1992a, b, 1993, og Gustafson & Krásný1993), kan vi for «moro» skyld anta at Himdalen-sprekkesonen er betydelig vannførende, og at det ligger en betydelig forurensningskilde i nærheten av sonen. Jeg vil understreke her at jeg fremfører dette kun som tankeeksperiment og **ikke** som argumentasjon for et deponi i Himdalen. (Argumentasjonen for dette er gitt i tidligere avsnitt og baserer seg på at deponiet ikke kan betraktes som forurensningskilde i grunnvannssammenheng).

Hvis et forurensningstilfelle fant sted

ved en stor sprekkese (f.eks. Himdalen); ville sprekkeseonen har følgende ugunstige virkninger:

- i) Høy grunnvannshastighet. Forurensningen ville raskt transporteres nedstrøms mot Øyeren.
- ii) Liten dispersjon i sprekkeseonen
- iii) Liten oppholdstid for å adsorbere forurensningsstoffer.

Men, man kan også tenke seg følgende positive konsekvenser:

- I) Grunnvannsstrømningen i sprekkeseonen vil ha en betydelig uttynningseffekt, på samme måte som en større overflatevassdrag
- II) Sprekkeseoner har ofte utviklet sekundære mineraliseringer på sprekkeflater, f.eks. svelleleirer, som kan virke sterkt adsorbierende på mange forurensningsstoffer
- III) Sprekkeseonen, med sin oppoverrettede hydrauliske gradient, definerer et klart avgrenset grunnvannsfelt. Man kan si med rimelig sikkerhet at en arealmessig stor spredning av forurensning ikke vil skje. All forurensning vil havne i sprekkeseonen og deretter transporteres enten nordvestover langs sprekkeseonen eller oppover til Himdalsbekken. Dette gjør et eventuelt tiltak eller rehabilitering mot forurensning lettere.
- IV) Sprekkeseonen virker som en avskjærende grøft, og hindrer spredning av forurensning på tvers av sonen. Sprekkeseonen beskytter dermed grunnvannsbrukere på f.eks. Enebakkneset (i Himdalsammenheng) fra eventuelle forurensninger.

KONKLUSJONER

Det norske radioaktive avfallet er beskjedent, både med hensyn til mengde og farlighetsgrad. Det faller ikke innenfor kategorien «verdens farligste avfall», slik som atomavfall ofte fremstilles. Avfallet består hovedsaklig av selvlysende skilt (f.eks. fra fly), mindre forurensede deler fra Halden- og Kjeller-reaktorene, avleiringer fra Nordsjøvirksomhet og avfall fra medisinsk bruk. Avfallet lagres idag på Kjeller, delvis nedgravd og delvis i en betong bunker, men ønskes deponert i et deponi i fjell med en prosjektert levetid på 3—400 år.

Selv om både Kukollen og Himdalen ikke er de *ideelle* lokalitetene geologisk sett, kan de betraktes som *tilfredsstillende* lokaliseringer for et sikkert deponi. Ved disse lokalitetene brukes **ikke** geologi som en tett barriere for å hindre utslipp av forurensning. Dette oppnås imidlertid ved selvdreneringsprinsippet, innstøpning av avfallet i en sarkofag, samt avfallets beskjedne volum og farlighetsgrad.

For at grunnvannet skal kunne forurennes må følgende punkter oppfylles:

- (i) Dreneringssystemet må tettes slik at den innadrettede grunnvannsgradienten reverseres, og dermed tillate utslipp til grunnvannet.
- (ii) Samfunnet kan ikke rehabiliterer dreneringssystemet; dvs. sammenbrudd av samfunnsstrukturen i løpet av deponiets levetid.

Selv om dette skjer, har modellering av sarkofagen bekreftet at forurensningsutslippet allikevel ikke vil oppnå konsentrasjoner som har helsemessig betydning.

Ambisjonsnivået for det norske deponiet ($<1 \mu\text{S}/\text{år}$ for den mest utsatte personen) er ifølge modellberegning-

gene som er utført, innfridd. Disse antar de verst tenkelige hendelser for utslipp av radioaktive stoffer, og resultatene bør derfor betraktes som maksimumverdier. Det understrekes at det norske ambisjonsnivået er vesentlig strengere enn i de fleste andre land, hvor det ofte benyttes verdier på 10—100 $\mu\text{Sv}/\text{år}$ pr. pers.

Den norske deponeringsfilosofien er helt annerledes enn den som vanligvis brukes i andre land hvor man både har

større mengder og farligere avfall som må tas hånd om. Norge kan selvfølgelig benytte «internasjonale» løsninger som et alternativ til Himdalen eller Kukollen, med et dyptliggende og tett deponi i fast fjell. Men en slik løsning vil kreve meget omfattende undersøkelser over flere tiår før et område med egnet geologi kan regne med å bli funnet. Den vil dessuten bli svært kostbar og er unødvendig for det norske avfallet.

REFERANSER

- Banks, D., Solbjørg, M.L. & Rohr-Torp E. 1992a. Permeability of fracture zones in a Precambrian granite. *Quart. J. Eng. Geol., London*, 25, 377-388.
- Banks, D., Rohr-Torp, E., & Skarphagen, H. 1992b. An integrated study of a Precambrian granite aquifer, Hvaler, Southeastern Norway. *Nor. Geol. Under. Bull.*, 422, 47-66.
- Banks, D., Rohr-Torp, E., & Skarphagen, H. 1993. Groundwater resources in hard rock — do any general rules exist? Experiences from the Hvaler study, Southeastern Norway. In Banks, S.B. & Banks, D. (eds.) *Proc. XXIVth Congress Int. Assoc. Hydrogeol. «Hydrogeology of Hard Rocks», Ås, Oslo*, 1993.
- Berdal Strømme og Scandpower 1991a. Deponi i fjell på Romerike for norsk lav- og middelaktivt atomavfall. Lokalisering, utforming, sikkerhetsvurdering. *Rapport for Statens Atomtilsyn, Des. 1991*.
- Berdal Strømme og Scandpower 1991b. Deponi for norsk lav- og middelaktivt radioaktivt atomavfall i Killingdal gruve. Utforming, sikkerhetsvurdering. *Rapport for Statens Atomtilsyn, Des. 1991*.
- Berdal Strømme og Scandpower 1991c. Deponi for norsk lav- og middelaktivt radioaktivt atomavfall. Melding i henhold til plan og bygningsloven. *Rapport for Statens Atomtilsyn, Des. 1991*.
- Bowler, S. 1993. Nuclear dump could pollute water. *New Scientist*, Nr. 1874, 22/5/93.
- Gustafson, G. & Krásný 1993. Crystalline rock aquifers — their occurrence, use and importance. In Banks, S.B. & Banks, D. (eds.) «Hydrogeology of Hard Rocks», *Proc. XXIV. Congress Int. Assoc. Hydrogeol., Ås, Oslo*.
- Lowry, D. 1993. 2010 : America's nuclear waste odyssey. *New Scientist*, 6/3/93.
- Nilsen, B. 1988. Norwegian sub-sea tunnels — A review with emphasis on water leakages. In Serrano, J.M. (ed.), *Proc. Int. Congr. on Tunnels and Water, Madrid, 12-15 June 1988*; Balkema, Rotterdam, 913-918.

- NORSAR 1992. Deponi for lav- og middelaktivt radioaktivt avfall. Belastninger fra jordskjelv. *NTNF/NORSAR rapport, 15/10/92.*
- NOTEBY 1992. Konsekvensutredning om deponi for lav- og middelradioaktivt avfall; geologiske og hydrogeologiske forhold. *NOTEBY A/S report no. 43386/1.*
- NOU 1991. Deponi for norsk lav- og middelaktivt atomavfall. *Norges offentlige utredninger, NOU 1991: 9.*
- NVE 1975. NVE nuclear power plants, Oslofjord. Oslo region tectonic map. Utarbeidet av NGI, 1975.
- Ramberg, I.B. & Larsen, B.T. 1978. Tectonomagmatic evolution. In «The Oslo Paleorift, a review and guide to excursions». *Nor. geol. unders. 337, 55—73.*
- Roedder, E. 1990. Formation, handling, storage and disposal of nuclear wastes. *Jl. of Geol. Education, 38, 380—392.*
- Rui, I.J. 1973. Structural control and wallrock alteration at Killingdal mine, Central Norwegian Caledonides. *Economic Geology, 68, 859—883.*
- Skjernaa, L. 1972. The discovery of a regional crush belt in the Ørje region, South-east Norway. *Norsk geol. tidsskrift 52, 459—461.*
- Statsbygg 1992. Deponi for lavt og middelsaktivt radioaktivt avfall — Konsekvensutredning etter plan- og bygningsloven. *Statsbygg rapport, 16/11/92*

Denne artikkelen gjenspeiler forfatterens vurdering av deponeringspolemikken i Himdalen, og er skrevet på hans initiativ. Den gjenspeiler ikke nødvendigvis arbeidsgiverens (Norges geologiske undersøkelse) synspunkt.