

Kärnbränslecykelns slutsteg

Förglasat avfall från upparbetning

- I Allmän del
- II Geologi**
- III Anläggningar
- IV Säkerhetsanalys
- V Utländsk verksamhet

**KÄRN -
BRÄNSLE -
SÄKERHET**

Kärnbränslecykelns slutsteg

Förglasat avfall från upparbetning

II Geologi

**KÄRN-
BRÄNSLE-
SÄKERHET**

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	BAKGRUND	3
2	DET GEOLOGISKA UNDERSÖKNINGSPROGRAMMET	5
2.1	Syfte	
2.2	Omfattning	
2.3	Försöksstation Stripa	
3	VAL AV UNDERSÖKNINGSOMRÅDEN	9
4	UNDERSÖKNINGSRESULTAT	11
4.1	Allmänt	
4.2	Karlshamnsområdet	
4.3	Finnsjöområdet	
4.3.1	Läge och topografi	
4.3.2	Berggrundsförhållanden	
4.3.3	Geofysiska markmätningar	
4.3.4	Borrningar	
4.4	Kråkemålaområdet	
4.4.1	Läge och topografi	
4.4.2	Berggrundsförhållanden	
4.4.3	Geofysiska markmätningar	
4.4.4	Borrningar	
4.5	Övriga områden	
4.5.1	Ävrö	
4.5.2	Bussvik	
4.5.3	Forsmark	
5	GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDEN	33
5.1	Grundvattenhydrologi	
5.1.1	Berggrundens vattengenomsläpplighet	
5.1.2	Grundvattenmängder	
5.1.3	Strömningsvägar	
5.1.4	Utspädningseffekter	
5.1.5	Avfallets värmepåverkan	
5.1.6	Avsänkning och återfyllning av grundvattenmagasinet	
5.1.7	Grundvattennivåns korttidsvariationer	
5.1.8	Grundvattnets ålder	
5.2	Grundvattnets sammansättning	

2		
6	AVFALLSÄMNE NAS FÖRDRÖJNING OCH KVARHÅLLANDE	45
7	FRAMTIDA BERGGRUNDSRÖRELSER	47
7.1	Bergrörelser vid Karlshamn	
7.2	Förkastningsrörelser i undersökningsområdenas omgivning	
7.3	Förkastningar i Skåne	
7.4	Unga bergrörelser av förkastningstyp	
7.5	Bergmekaniska studier	
7.6	Sprickbildningsprognos	
7.7	Landhöjning och nedisningar	
7.8	Jordskalv i Sverige	
8	SAMMANFATTNING OCH BEDÖMNING	59
9	FÖRSÖKSSTATION STRIPA	61
9.1	Översikt	
9.1.1	Motiv för en försöksanläggning	
9.1.2	Anläggningsarbeten	
9.1.3	Samarbete med US ERDA	
9.2	Undersökningar i KBS regi	
9.2.1	Bergkarakterisering	
9.2.2	Bergspänningsmätningar	
9.2.3	Materialegenskaper hos Stripagraniten	
9.2.4	Bergets permeabilitet vid olika tryck och temperatur	
9.2.5	Temperaturspänningar	
9.2.6	Injektering	
9.2.7	Vattenanalyser	
9.3	Undersökningar inom samarbetsavtalet med US ERDA	
	Referenser	71
A	Arbetsrapporter från SGU	
B	Övriga referenser	

1 BAKGRUND

Frågan om deponering av högaktivt avfall i geologiska formationer har sedan länge diskuterats. Man har därvid i regel utgått från att avfallet skall slutförvaras i det land där det producerats och beroende på förekomst har också olika typer av formationer aktualiserats i olika länder (salt, leror, skiffer, kristallint berg). För Sveriges del, bl a i AKA-utredningen, har intresset varit inriktat på urbergsformationer (gnejs, granit).

De geologiska undersökningar som utfördes för AKA-utredningen har i vissa delar kompletterats av programrådet för radioaktivt avfall, PRAV. Dessutom har apparatur för vattenförlustmätning och geofysisk borrhålsloggning samt en speciell borrhåls-pump utvecklats inom PRAVs program. Sedan KBS-projektet påbörjade sin verksamhet omkring årsskiftet 1976-77 har det fortsatta geologiska undersöknings- och utredningsarbetet varit koncentrerat till detta projekt.

I februari 1977 träffades överenskommelse mellan KBS och Sveriges geologiska undersökning, SGU, som är centralt ämbetsverk för frågor rörande landets berggrund, om genomförande av ett geologiskt arbetsprogram avseende förutsättningarna för en slutlagring av högaktivt avfall i svensk berggrund. I detta kapitel lämnas en sammanfattande redogörelse för programmets innehåll och huvudresultat. Mer detaljerad redovisning av undersökningsmetoder och resultat återfinnes i de rapporter, som anges under pkt A i referensförteckningen.

2 DET GEOLOGISKA UNDERSÖKNINGSPROGRAMMET

2.1 SYFTE

Det geologiska arbetsprogrammets mål är att genom undersökningar inom några områden ta fram grundläggande data rörande de berggrunds- och grundvattenförhållanden, som är bestämmande för långtidssäkerheten hos ett slutförvar för högaktivt avfall. Dessa undersökningar kompletteras av teoretiska studier.

Arbetet avser bl a att klarlägga att berggrunden utgörs av en lämplig och enhetlig bergart som har tillräcklig utbredning även på flera hundra meters djup. Detta är av betydelse, då sämre förhållanden kan befaras i gränsen mellan olika bergarter. Förekomsten av sprick- och krosszoner, som kan påverka förvarets utformning eller dess säkerhet, måste också belysas.

I fråga om grundvattnet behövs uppgifter på hur mycket vatten, som kan komma i beröring med avfallet. Detta kräver mätningar av bergets vattengenomsläpplighet och teoretiska beräkningar av hur flödet avtar med djupet. Sådana beräkningar ger också underlag för att bestämma utspädningen av det vatten, som varit i kontakt med avfallskapslarna.

När avfallet eller dess kapsling kommer i beröring med grundvattnet kan en viss upplösning ske. Denna beror på materialens egenskaper och den kemiska sammansättningen hos vattnet. Provtagning och analys av grundvattnet på aktuella djup ingår därför i programmet.

Om avfallsämnena går i lösning är det av vikt att känna deras uppehållstid i berget. Om denna är lång hinner vissa radioaktiva ämnen sönderfalla innan de når biosfären. Upphållstiden kan belysas genom bestämningar av grundvattnets ålder.

De flesta avfallsämnena fördröjs på sin väg genom berggrunden pga sorptionseffekter och kemiska reaktioner. Även detta har undersökts med laboratoriearbeten, teoretiska analyser och fältförsök, av vilka de sistnämnda faller inom geologiprogrammet.

Frågan om och i vilken utsträckning de geologiska förutsättningarna för en säker förvaring kan ändras i framtiden måste besvaras. Detta kan ske bl a genom att studera bergrörelsernas geografiska och tidsmässiga fördelning.

Det geologiska programmet har i första hand inriktats på att ge underlag för den tekniska utformningen och säkerheten av en berganläggning som är anpassad till de förhållanden, som råder i svensk berggrund. En mera vetenskaplig bearbetning materialet har hittills inte medhunnits.

2.2 OMFATTNING

KBS uppdrag till SGU har omfattat följande huvuddelar.

- Markgeofysiska mätningar, håll- och sprickkartering, borrhning, utvärdering av borrhärlor, borrhålsloggning samt TV-granskning av borrhål.
- Vattenförlustmätningar och -beräkningar, vattenprovtagning för kemisk analys och åldersbestämning.
- Teoretiska studier av grundvattenrörelser (utförda genom institutionen för kulturteknik vid Tekniska Högskolan i Stockholm).
- Fältförsök med spårämnen i sprickigt berg före och efter injektering (tidigare påbörjat av PRAV).

Den sammanlagda längden av utförda kärnborrhål utgör något över 5 000 m fördelade på fem undersökningsområden, varav tre utvalts för närmare undersökning, nämligen Sternö nära Karlshamn, Kråkemåla nära Oskarshamn och Finnsjön nära Forsmark. Urberget på dessa platser är av olika typ och valet av undersökningsområden har bl a betingats av att man önskar få egenskaperna hos de olika bergartstyperna belysta.

Förutom vad som ingår i uppdraget till SGU har KBS låtit genomföra

- en sammanställning och komplettering av kända data rörande den blekingska kustgnejsen,
- en matematisk modellstudie avseende grundvattenrörelser och bergspänningar i och omkring ett slutförvar,
- en matematisk principstudie av förväntad uppkomst av nya sprickor då ett bergmassiv utsätts för enkel skjuvning,
- studier av grundvattnets kemiska sammansättning,
- studier av sorptionseffekter, som kan uppträda då olika avfallsämnen transporteras med grundvatten i buffertmaterial och bergsprickor,
- studier av unga bergrörelser och jordskalv.

Resultaten av dessa studier kompletterar SGU:s egna undersökningar.

I början av februari 1977 kallade KBS och PRAV ett stort antal geovetare till en konferens för diskussion av frågor av betydelse för ett slutförvar för högaktivt avfall i svenskt urberg. Därvid diskuterades bl a sannolikheten för att rörelser i berggrunden skulle äventyra förvarets säkerhet. Ett antal förslag till utredningsinsatser lämnades av deltagarna i konferensen och ett flertal förslag ledde senare till uppdrag från KBS. I början av oktober 1977 redovisades och diskuterades resultaten på en andra konferens anordnad av KBS.

Inom KBS har etablerats en särskild grupp av specialister, den så kallade "geogruppen" med uppgift

- att utgöra ett forum för behandling av frågor berörande geologi, hydrogeologi och bergteknik,
- att medverka vid utformningen av planer för utredningar och försök,
- att medverka vid uppföljning och värdering av resultat från beslutade utredningar och försök.

Den redovisning som lämnas i följande kapitel 2 till 8 har utarbetats av SGU. Förutom SGU:s egna undersökningar utgöres underlaget av ovan nämnda, särskilda utredningar, som utförts på uppdrag av KBS.

2.3 FÖRSÖKSSTATION STRIPA

I kapitel 9 beskrives den verksamhet som av KBS bedrivs i Stripa gruva. Där har gruvbrytningen nyligen upphört och möjligheter erbjudits att utföra praktiska försök i ett granitmassiv på ca 350 m djup. Försöken avser att öka kännedomen om egenskaperna hos granit på detta djup dels i ostört skick, dels efter uppvärmning, samt att studera uppsprickningen vid utsprängning av tunnlar. Avtal har träffats med US Energy Research and Development Administration, ERDA, om samarbete för genomförande av ett omfattande uppvärmningsförsök. Resultat härifrån kan dock väntas föreligga först om ett par år. Även KBS egna försök kräver så lång tid att de väsentliga resultaten inte kan redovisas i denna rapport. Försöken är dock av sådan karaktär att de inte påverkar de principiella slutsatserna utan får sin huvudsakliga betydelse som underlag för en tekniskt-optimal detaljutformning av ett slutförvar.

3 VAL AV UNDERSÖKNINGSOMRÅDEN

Förarbetet för undersökningarna har varit inriktat på att finna områden med lämplig berggrund av tillräcklig storlek i närheten av ostkusten från Uppland till Blekinge. Med den valda dimensioneringsgrunden - avfall från drift av 13 reaktorer i 30 år - krävs ett område av ca en km². Närheten till kusten betingas av att man önskar undvika långa landtransporter. Kärnkraftverkens läge och önskvärdheten att undvika seismiskt aktiva områden har lett till att förarbetena begränsats till ostkusten från Uppland till Blekinge.

För att kunna genomföra borrhningar och undersökningar på djupet på den korta tid, som stått till buds, har det varit nödvändigt att utelämna flera geologiskt lovande områden, där markägarförhållandena varit komplicerade, eller markägarens tillstånd inte kunnat erhållas.

I fråga om naturliga förutsättningar har flacka områden med mycket berg i dagen eftersträfvats. Där är grundvattenytans lutning i allmänhet låg, vilket ger låg potential för grundvattenrörelser. Det är också vanligt att berggrundens sprickzoner i sådana områden är smala och ligger glest, vilket skulle ge stora mellanliggande volymer av bra berg. Mellan de större sprickzonerna bör berggrunden uppvisa relativt glest liggande, små och oregelbundna sprickor, så att bergets genomsläpplighet för grundvatten är låg. Detta kan studeras där berget går i dagen. Där kan man också se om berggrunden är enhetlig och består av någon vanlig bergart - granit eller gnejs - som saknar särskilt värde, och därför inte kan locka till framtida gruvdrift. De slutliga undersökningsområdena har valts så att de ger exempel på förhållandena i en massiv granit, som undgått urbergets bergkedjeveckning, en förgnejsad granit och en tydligt veckad gnejs. Tillsammans med den ådergnejs, som tidigare undersökts för AKA-utredningen, har härigenom fyra viktiga typfall av urbergets bergarter undersökts.

För att finna lämpliga områden har topografiska, ekonomiska och geologiska kartor, kompletterade med satellit- och flygbilder, studerats. På så sätt har terräng, ägareförhållanden och bergartsfördelning i olika områden kunnat jämföras, och berggrundens större spricklinjer kunnat kartläggas. Därefter har lovande områden besiktigats i fält. För att bedöma berggrundsförhållandena också i jordtäckta delar och mot djupet, har geofysiska mätningar utförts, huvudsakligen med elektromagnetiska metoder, som urskiljer berggrundens grundvattenförande zoner på grundval av deras bättre elektriska ledningsförmåga.

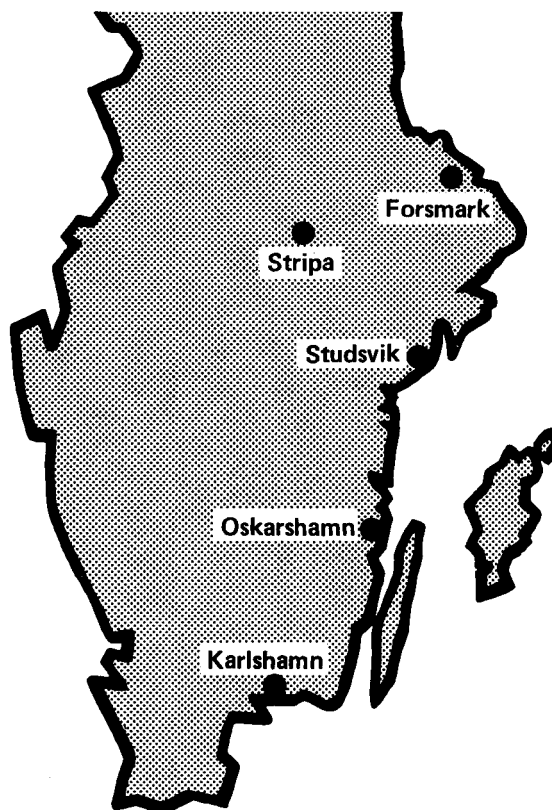
I vissa fall har seismiska metoder använts för att mäta hastigheten hos tryck- och skjuvvågor i berggrunden, varigenom en uppfattning erhålles om dess elasticitetskonstanter och sprickighet.

Tre områden har slutligen valts för vidare undersökning och borrhningar, se fig 3-1.

- Karlshamn, dvs verksamheten kring Karlshamns kraftverk.
- Finnsjön, ett område öster om norra delen av Finnsjön, ca 16 km WSW om Forsmarks kärnkraftverk i nordöstra Uppland.
- Kråkemåla, ett område 1,5 km NW om Kråkemåla by och 7,5 km NNW om Oskarshamns kärnkraftverk vid Simpevarp i östra Småland.

Vissa undersökningar har dessutom utförts på följande platser.

- Ävrö, ca 1,5 km N om Simpevarp
- Bussvik, ca 4,5 km NNW om Simpevarp
- Forsmark, ca 3,5 km W om Forsmarks kärnkraftverk



Figur 3-1. Karta över undersökningsområdena. Provborrhningar till ca 500 meters djup har företagits vid Karlshamn (Sternö), norr om Oskarshamn (Kråkemåla och Ävrö) och Forsmark (Finnsjön och Forsmark). I Stripa gruva ligger KBS försöksstation. Fältförsök har genomförts i Studsvik.

4 UNDERSÖKNINGSRESULTAT

4.1 ALLMÄNT

Genom kärnborrhningar erhålles kännedom om berggrundsförhållandena på djupet. Borrhålen ger dessutom möjlighet till bestämning av bergets vattengenomsläpplighet i olika sektioner samt provtagning för analys av grundvattnets kemiska sammansättning och ålder.

Undersökningsresultaten har redovisats i borrhprotokoll, kärnkartor, RQD- och permeabilitetsdiagram samt protokoll från geofysiska borrhålmätningar. Dessutom finns TV-inspektioner registrerade på band.

RQD står för "Rock Quality Designation" och betecknar en av amerikanen Deere angiven metodik för att översiktligt ange bergkvaliteten med hjälp av borrhkärnor. Den s k RQD-faktorn utgör kvoten mellan den sammanlagda längden av hela kärnbitar större än 10 cm och längden av motsvarande borrhålslängd. RQD-faktorn har här i regel beräknats för tvåmetersintervall.

Permeabilitetsvärdena har bestämts genom att mäta det vattenflöde som vid bestämda tryck pressas in i berget på en med tätande manschetter avgränsad sträcka av borrhålet, vanligen två meter.

En uppfattning om bergets kvalitet, inte bara i själva borrhålet, utan även i dess omgivning kan erhållas genom olika geofysiska mätmetoder. Vid dessa mätningar utnyttjas bl a den elektriska ledningsförmågan och den radioaktiva strålningen i berget.

I det följande redovisas endast de väsentliga resultaten från borrhålsundersökningarna områdesvis. Mera detaljerade uppgifter finns dokumenterade i de rapporter, som anges i referensförteckningen.

4.2 KARLSHAMNSOMRÅDET

Tidigare undersökningar och observationer i befintliga bergrum gör att Karlshamns-området kan anses vara det geologiskt bäst kända av de tre undersökningsområdena. En redogörelse för traktens berggrunds- och grundvattenförhållanden lämnas i KBS tekniska rapport 25 /4-1/.

Området uppbyggs av Blekinge kustgnejs, som utbreder sig söder och väster om Karlshamn. Bergarten kännetecknas av stor täthet och ringa vattenförekomst. Den utgöres av en grå, små- till fin-

kornig, otydligt bandad gnejs, som i huvudsak består av plagioklas, mikroklin, kvarts och biotit. Denna gnejs är ofta nära förbunden med likaledes grå och förgnejsade granitoida bergarter. I gnejsen uppträder många små gångar av pegmatit. Gnejsen uppvisar på många håll en skivighet med över stora områden flack lagerställning. I Karlshamns-området begränsas kustgnejsen mot öster av ett stort massiv av grovkristallin Karlshamns-granit. Dess utbredning på större djup är okänd.

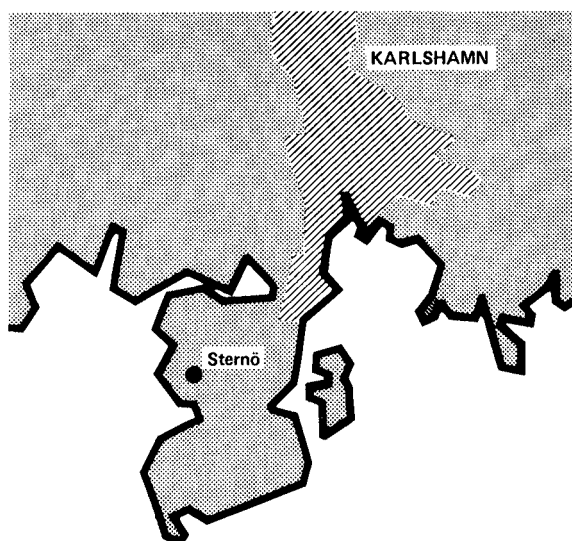
Kemisk analys av bergarten från västra Blekinge visas i tabell 4-1. Uppgifter från flera bergrumsanläggningar inom området visar låga förstärkningskostnader och låg vatteninläckning. På grundval av inläckningsuppgifter har permeabiliteten beräknats till omkring 10^{-9} m/s redan 50 m under dagytan. Den kärnbörning till 500 m djup, som utförts i Karlshamn, se fig 4-1, har därför som främsta uppgift att belysa berggrundsförhållandena på djupare nivåer. Borrhålsundersökningarna visar övervägande tätt berg mot djupet, se fig 4-2. Inga krosszoner har påträffats i undersökningsområdet.

Tabell 4-1. Kemiska analyser av bergarter från västra Blekinge.

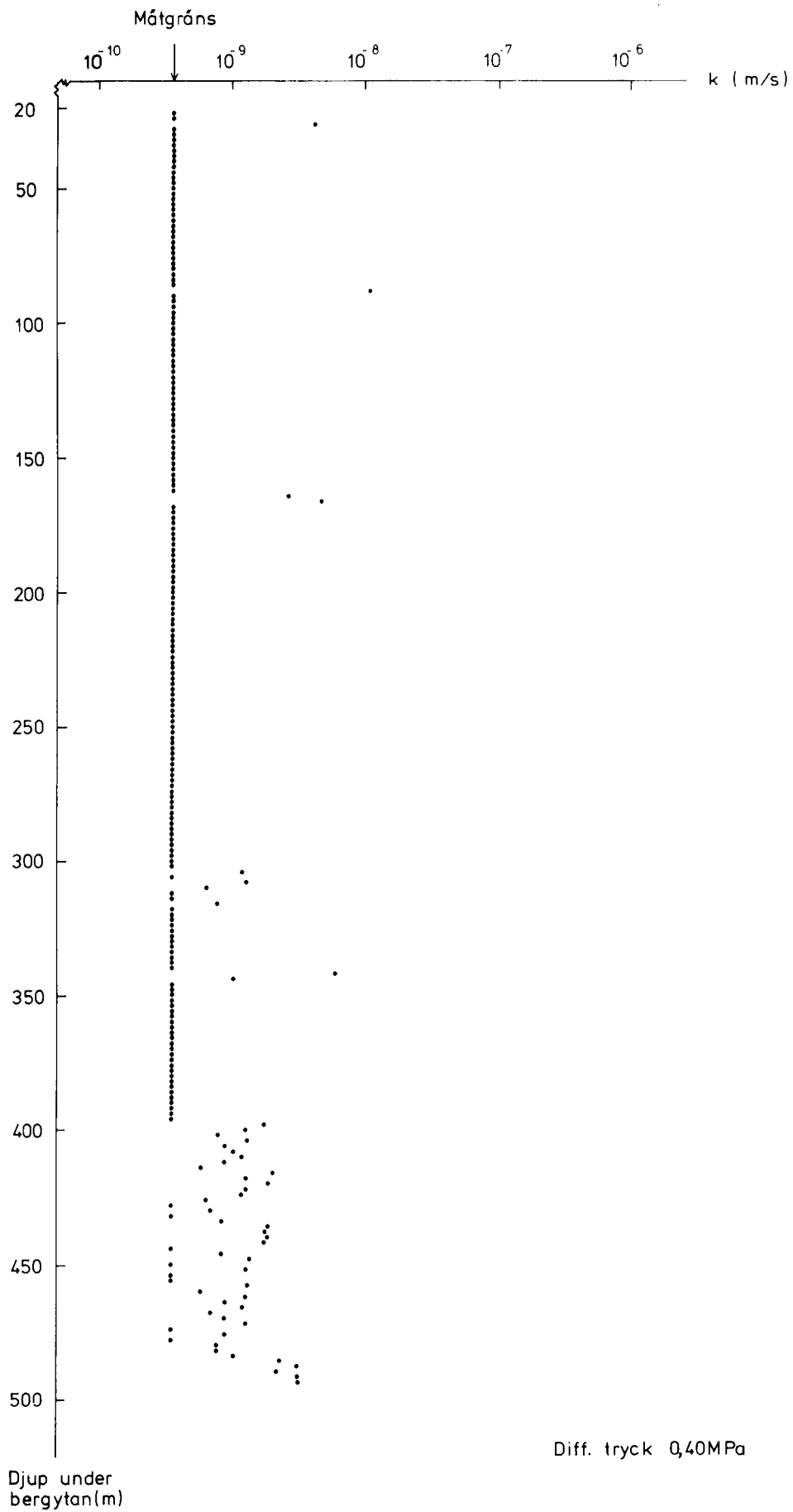
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	73,0	65,8	72,2	72,2	72,2	71,8	66,4	69,2	67,2	70,5	67,9	68,6	68,2	68,2
TiO ₂	0,31	1,18	0,36	0,33	0,21	0,30	0,75	0,49	0,66	0,55	0,66	0,51	0,60	0,43
Al ₂ O ₃	13,5	15,0	14,9	13,7	14,0	14,5	15,3	14,8	15,2	14,1	15,3	14,9	14,6	16,4
Fe ₂ O ₃	1,29	3,43	1,14	1,00	1,00	1,43	3,43	2,00	2,57	2,29	2,15	2,15	2,43	1,43
FeO	1,03	3,35	1,29	1,55	1,16	1,29	3,23	3,10	3,74	1,94	2,97	3,35	2,97	1,68
MnO	0,06	0,12	0,03	0,04	0,04	0,03	0,09	0,07	0,08	0,07	0,10	0,07	0,07	0,05
CaO	1,40	3,1	2,0	1,5	1,4	1,2	2,5	2,5	2,9	1,8	2,4	2,7	2,6	3,1
MgO	0,30	1,1	0,5	0,2	0,2	0,5	1,2	0,7	1,0	0,6	1,0	0,8	0,7	0,6
Na ₂ O	2,80	3,3	3,3	3,1	3,0	2,7	3,1	3,2	3,3	3,2	2,8	3,1	3,0	3,6
K ₂ O	5,50	4,9	4,6	5,0	5,4	5,9	4,6	4,7	4,4	5,2	5,6	4,5	4,7	4,2
BaO	0,14	0,17	0,14	0,14	0,09	0,13	0,16	0,12	0,11	0,12	0,16	0,13	0,12	0,16

1-5 Kustgnejs
6-8 Gnejsgranit
9 Karlshamnsgranit
11-14 "
10 Spinkamålagranit

Data från I Larsson et al.



Figur 4-1. Kärnbörning har genomförts på Sternö inom Karlshamns kommun. Stora bergrum finns i närheten och de ger en god inblick i bergets beskaffenhet.



Figur 4-2. Diagram över bergets vattengenomsläpplighet, permeabilitet, i kärnbrorrhål 1 vid Karlshamn.

4.3 FINNSJÖOMRÅDET

4.3.1 Läge och topografi

Finnsjö-området ligger ca 16 km VSV om Forsmarks kärnkraftverk i nordöstra Uppland, mellan väg 290 och norra delen av Finnsjön, se fig 4-3.

Landformerna styr yt- och grundvattnets rörelser och avspeglar berggrundens deformation. Landskapet i nordöstra Uppland får sin mycket flacka prägel av det s k subkambriska peneplanet, den nära nog plana och horisontella landytan, som här utformades som berggrundens överyta för mer än 570 miljoner år sedan, se Atlas över Sverige, Pl 6 /4-2/. Denna landyta är i stor utsträckning bevarad och odeformerad än i dag. Den bryts emellertid av ofta milslånga spricklinjer, som markerar mindre förskjutningar. I regel är höjdskillnaden vid dessa linjer mindre än 20 meter.

Undersökningsområdet vid Finnsjön utgör ett svagt snedställt nordsydligt block beläget mellan två sådana större linjer. Den västra av dessa, Finnsjölinjen, är sammansatt, men går i huvudsak i NNV-lig riktning genom norra delen av Finnsjön och vidare genom Ensjön. Därefter går den, försvagad eller upphörande, mot Skärplinge, där den förenar sig med Strömmaråns dal och går ut i Lövestabukten. Från Finnsjön och ca 10 km mot NNV ligger grundvattenytan i denna linje mycket nära 28 m ö h. Mot SSO nås en passpunkt ca 35 m ö h mellan Finnsjön och Älgsjön.

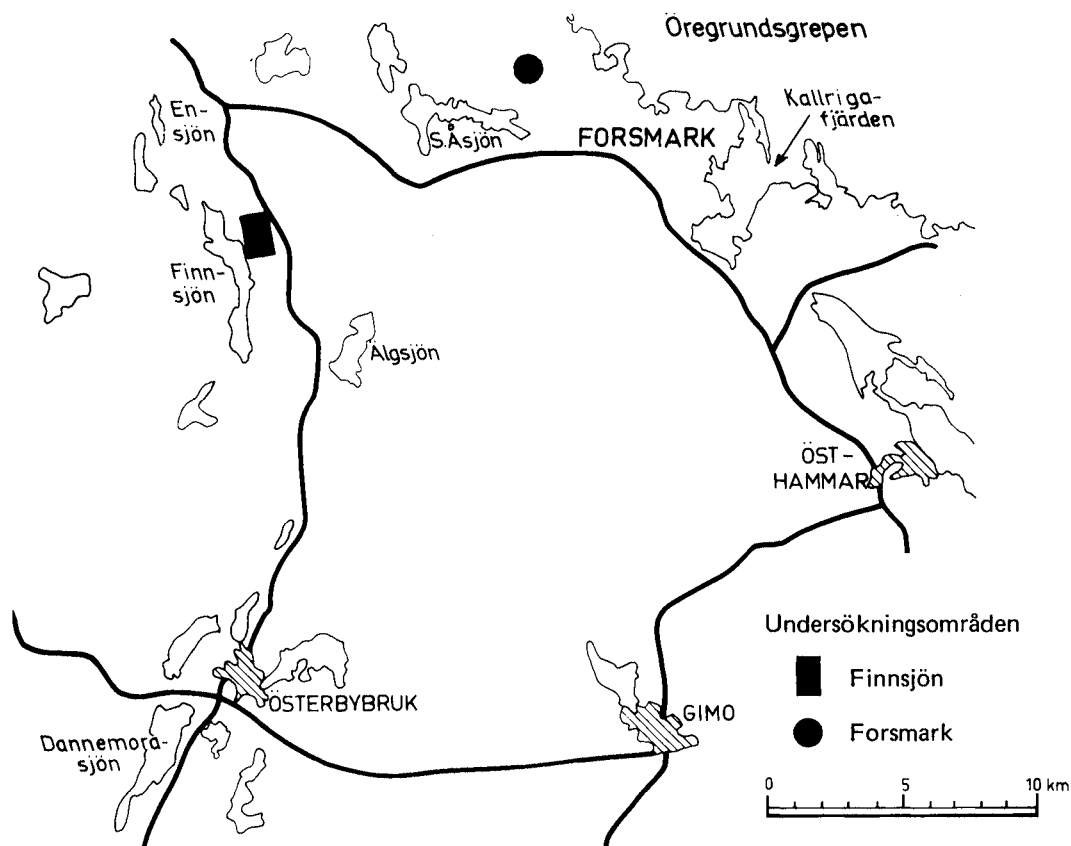
Den östra begränsande spricklinjen går genom Älgsjön mot norr till södra och norra Åsjön men kan inte entydigt följas ut i Gudingefjärden. Både Finnsjöns och Älgsjöns vatten går i stället genom Forsmarksån ut i Kallrigafjärden.

Finnsjölinjen kan sägas utgöra den västra begränsningslinjen för det berggrundsblock som rymmer själva undersökningsområdet. Områdets östra gräns utgörs av en mindre, parallell dal utmed väg 290.

Jordlagren verkar i huvudsak utjämnade på den av bergytan bestämda topografin. Lokala höjdskillnader är i regel mindre än 5 m. Små åsbildningar, exempelvis mellan Finnsjöns södra ände och Film, kan dock ge något högre kullar.

4.3.2 Berggrundsförhållanden

För en överblick av berggrundsförhållandena krävs en bild av bergartssammanhangen över större ytor, som kan erhållas av de officiella geologiska kartbladen Örbyhus och Öregrund /4-3, 4-4/, från 1869 och 1886. Nyare undersökningar har publicerats av Sund /4-5/. Arbeten om de lokala förhållandena vid Forsmark av A Carlsson och T Olsson /4-6/ är också av intresse.



Figur 4-3. Karta över läget av undersökningsområdena Finn-sjön och Forsmark.

Berggrunden i undersökningsområdet öster om Finn-sjön utgörs av grå till gråröd granodiorit, en granitlik bergart som i huvudsak består av plagioklas, mikroklin, kvarts, hornblände och biotit. Tabell 4-2 visar den kemiska sammansättningen. Kornstorleken ligger normalt mellan 3 och 10 mm. Bergarten är mer eller mindre förgnejsad. Granodioriten gränsar i söder och sydväst utanför undersökningsområdet mot leptit, dvs finkorniga, ofta skiktade bergartsled med lokala lager av kalksten och järnmalm. De stryker omkring $N65^{\circ}V$ och står nära vertikalt och är nära gränsen genom-satta av granodiorit.

I öster utgörs begränsningen av röd massformig "Håkansbo"-granit. Sammanhörande gångar av pegmatit och aplit förekommer också inom undersökningsområdet i granodioriten.

Fälthållandena liksom bergartskaraktären visar att granodioriten hör till de sk urgraniterna med en ålder av minst 1,8 miljarder år, Welin /4-7/.

Inom undersökningsområdet förekommer på flera ställen sk metabasit, en mörk småkornig metamorf bergart, som i form av dm-breda, delvis osammanhängande gångar genomdrar granodioriten i riktningen $N60-75^{\circ}V$ med brant stupning. Lokal förskifring och fältspat/epidot-ådror i metabasit antyder att denna bergart kan vara äldre än apliterna. Metabasiterna är mängdmässigt obetydliga men viktiga vittnesbörd om berggrundens strukturutveckling.

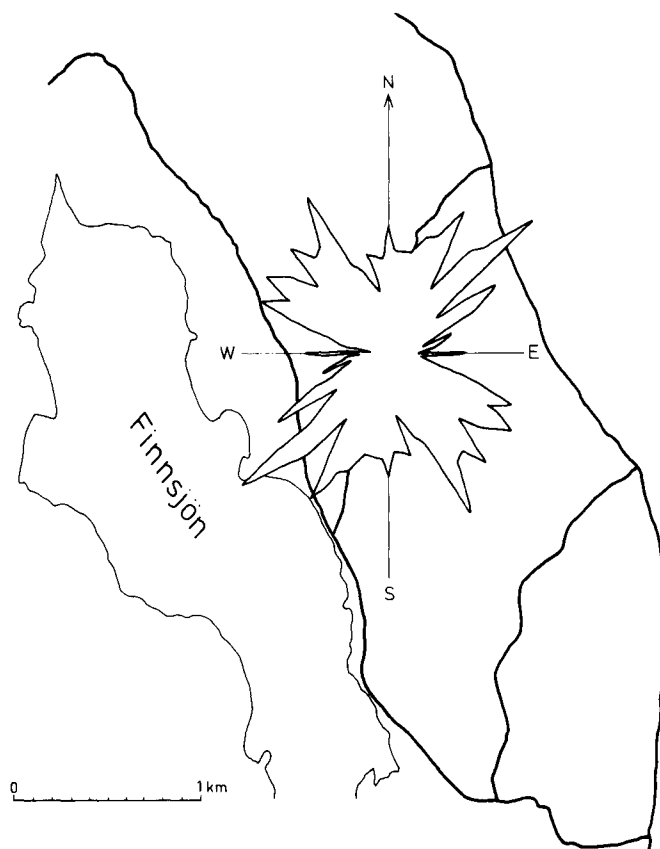
Tabell 4-2. Kemiska analyser av granodiorit från borrhål 1 i Finnsjön.

	Djup 23,30 m	Djup 189,50 m	Djup 228,50 m
SiO ₂ %	66,6	66,9	68,9
TiO ₂ %	0,59	0,54	0,51
Al ₂ O ₃ %	13,1	12,9	13,3
Fe ₂ O ₃ %	1,4	1,7	1,4
FeO %	3,9	3,7	3,4
MnO %	0,13	0,11	0,15
CaO %	4,9	4,8	2,1
MgO %	2,2	2,0	2,4
Na ₂ O %	2,7	2,6	3,1
K ₂ O %	3,4	3,6	3,7
BaO %	0,14	0,14	0,13
S %	0,02	0,03	< 0,02
U ppm	< 50	< 50	< 50

Förgnejsningen, metabasiterna och granit-aplit-pegmatitgångar utgör tidiga strukturdrag, som knappast påverkar berggrundens vattengenomsläpplighet inom undersökningsområdet, eftersom de inte ger upphov till öppna sprickor. Detsamma gäller systematiskt uppträdande, brantstående skjuvzoner i öst-västlig och nord-sydlig riktning, som i huvudsak markerar en plastisk deformation. Mylonitzoner, där granodioriten blivit nermalad och sammanläkt till en finkornig, tät bergart, som i regel visar täta kontakter mot omgivande berg, är sannolikt också av ringa betydelse för grundvattenrörelserna. Berggrundens sprickor, framför allt större spricklinjer och krosszoner, är däremot av stor betydelse.

Områdets centrala delar utmärks av stora sprickfattiga berggrundsblock med stora, släta hållformer och areor upp till 10⁵ m². De östra och västra randområdena kännetecknas av mera splittrade hållområden med högre sprickfrekvens.

Sprickbilden är i övrigt påfallande oregelbunden, vilket framgår direkt av flygbildernas hållkonturer. Flacka sprickor med växlande riktning och stupningar till 30^o utgör i allmänhet hållarnas överytor. Riktningvariationen hos de branta sprickorna återges av bifogade sprickdiagram, se fig 4-4, som visar breda och låga toppar i NV och NO. Toppen i N30^oV motsvarar Finnsjö-linjens riktning och den förkastningsdal, som begränsar undersökningsområdet mot öster. Topparna omkring N60^oV och N45^oO motsvarar mer regelbundna, rätlinjiga och genomskärande sprickor. N60^oV kännetecknar undersökningsområdets metabasiter men också en viktig

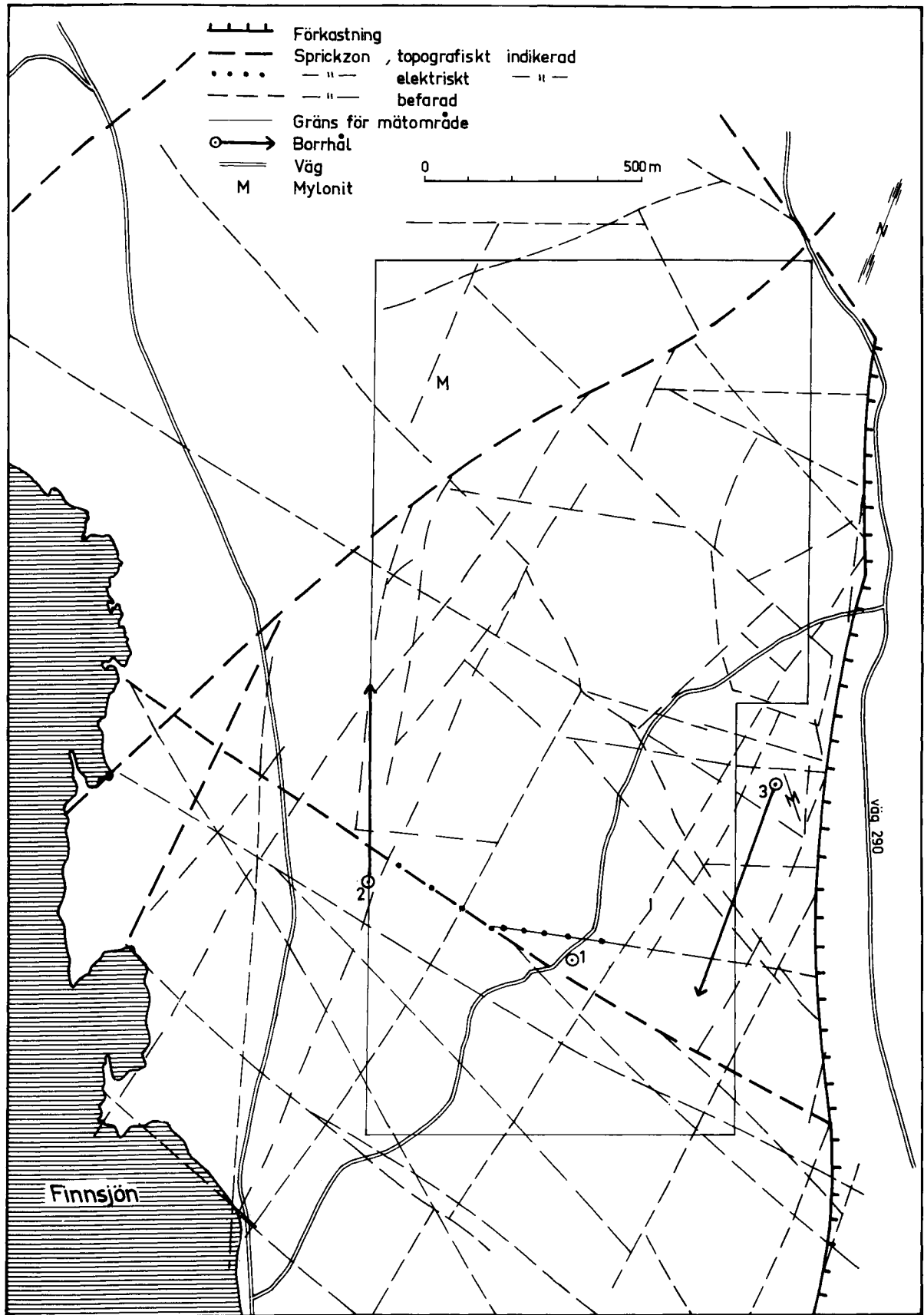


Figur 4-4. Diagram som visar riktningen av 448 branta sprickor inom undersökningsområdet vid Finnsjön. Sprickorna ligger oregelbundet och visar stor spridning med avseende på riktning. (Berggrundsbyrån SGU).

grupp av delvis öppna, breda och mycket långa sprickzoner, som är spridd över hela denna del av landet från Singö och Forsmark till Storviks-området, se Svedmark /4-8/, Lundegårdh /4-9/. De kännetecknas av att öppningarna ofta är klädda med vackra kristaller av kvarts och kalkspat. Små mängder av asfaltlika ämnen, s k bergbeck, förekommer också. I Finnsjö-områdets hållar är sprickor med denna riktning också fyllda på samma sätt. En horisontell längsförskjutning av 0,3 m har kunnat konstateras vid en av dessa. Sprickorna här är emellertid få och obetydliga och i regel mindre än 1 cm breda. Man måste i stället räkna med att större sprickzoner, om de finns, inte syns i hållarna utan ligger i de jordtäckta stråken däremellan. En noggrann tolkning av flygfoton för att se var eventuella spricklinjer kan finnas har därför utförts, se fig 4-5. Vid markkontroll har det visat sig att dessa linjer i stor utsträckning motsvaras av hållkanter, myrstråk och stråk med markerad växtlighet. Deras riktning överensstämmer med tidigare nämnda skjuvzoners. Den enda verkligt tydliga linjen inom undersökningsområdet går dock i nord-östlig riktning och visar "horsetail"-förgrening mot syd. För ytterligare kartläggning av strukturen har området täckts med geofysiska mätningar och kontrollerats med borrhning.

4.3.3 Geofysiska markmätningar

Ett nära två kvadratkilometer stort område har mätts med magnetometer och slingram. De magnetiska mätningarna visar inte några påtagliga strukturer. Slingramsmätningen visar att det finns en



Figur 4-5. Karta över området vid Finnsjön visande fördelningen av spricklinjer och borrhålens placering. Det angivna mätområdet har undersökts med magnetiska och elektriska metoder. (Berggrundsbyrån SGU).

enda markerad zon med högre elektrisk ledningsförmåga. Den ligger i områdets södra hälft och sträcker sig med avbrott från nära dess västra kant ca 500 m i östlig riktning och tycks överensstämma med den tydligaste fotogeologiskt indikerade öst-väst-linjen inom området. Övriga linjer har inte givit några slingramsindikationer.

4.3.4 Borrningar

Kärnborrhål Finnsjön 1, längd 500 m, diameter 56 mm, är ansatt vertikalt i bra berg, ca 50 m ifrån den interpolerade kärnlinjen för den elektriskt ledande zon som påvisats vid slingramsmätningen.

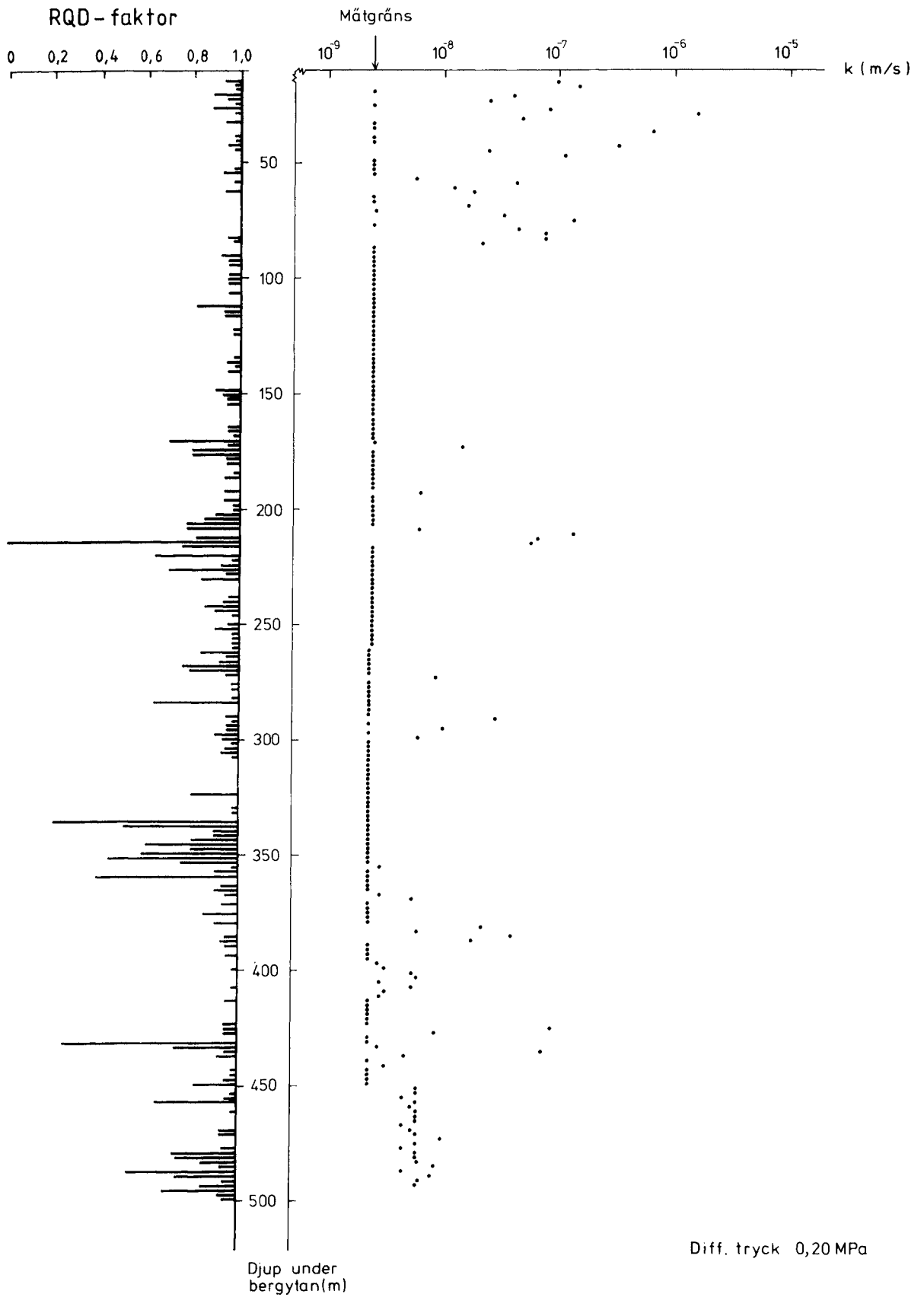
Sammanfattningsvis visar borrhålet att berggrunden är enhetlig och består av granodiorit med obetydliga variationer ned till 500 m djup. Helt underordnade inslag av enstaka tunna pegmatiter och metabasiter förekommer. Nedanför 85 m djup är sprickigheten låg, mera sprickrika zoner noteras i sektionerna 214 - 228 m, 336 - 362 m och mera allmänt mellan 432 och 500 m. Sprickorna är i stor utsträckning fyllda av klorit, kvarts (SiO_2) och kalcit (CaCO_3). De störda zonerna visar en allmän omvandling med rödfärgning av fältspaterna.

Vattengenomsläppligheten är låg och uppmätta permeabilitetsvärden ligger mestadels omkring 10^{-9} m/s eller lägre. Högre värden förekommer i ytskiktet och under 432 m där man kan notera en viss ökning i samband med ökad sprickighet och klorithalt. Sannolikt står detta i samband med att borrhålet här närmar sig en elektriskt ledande zon, som påvisats vid slingramsmätning från markytan. Permeabilitet och RQD-diagram visas i fig 4-6.

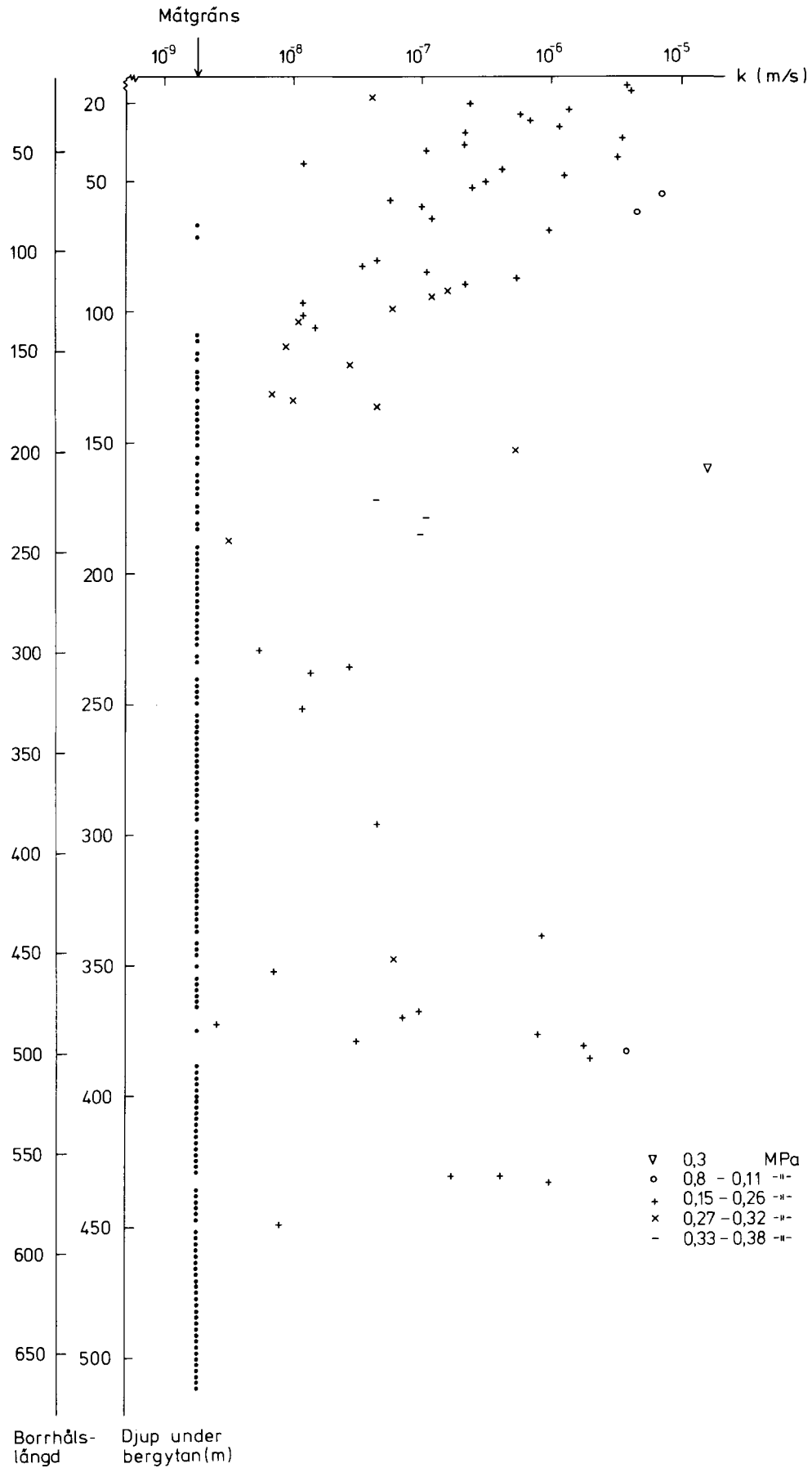
Kärnborrhål Finnsjön 2, diameter 56 mm, längd 698 m, djup ca 525 m, är ansatt med 50° lutning mot $\text{N}20^\circ\text{V}$. Det är lagt i mätområdet västkant och korsar de öst-västliga sprickzoner, som kan finnas, bl a den elektriska störningszonens förlängning mot väster. Härigenom belyses de sprickfattiga centrala berggrundsblockens avgränsning mot Finnsjön. Längst i norr förutsågs hålet också kunna få kontakt med de sydliga förgreningarna från den större störningszonen, som här med nordostlig riktning drar genom mätområdet utan att ge upphov till en elektrisk indikation.

Bergartsförhållandena i detta borrhål motsvarar mycket nära dem i borrhål 1. Mellan 36 och 110 m finns dock en allmän uppsprickning som åtföljs av rödfärgning och bildning av klorit, kalcit och kvarts, både i bergarten och som sprickfyllnad. Mellan 102,6 och 103,6 m påträffades en skivig kloritsköl med något smektit, som vållade både kärn- och vattenförluster. Skölen följs av en zon med intensiv uppkrossning. Detta läge stämmer väl med en vertikal projektion av den elektriska störningens förlängning och motsvarande fotogeologiskt indikerade sprickzon.

Vid 688 m påborrades i spetsig vinkel (ca 20°) en krosszon som mellan 688,4 och 688,9 m var fylld av en finkornig krossprodukt. Materialet från denna halvmeterbreda zon fyllde 4,5 m kärnrör. Denna anmärkningsvärda volymökning indikerar närvaron av svällande lermineral, som i sitt ursprungliga läge har låg vattenhalt och därför börjar svälla när de genom borrhållningen får kontakt med spolvattnet och det grundvatten som samlas i borrhålet. En mot-



Figur 4-6. Diagram över bergets vattengenomsläpplighet, permeabilitet, ($t h$) och sprickighet uttryckt som RQD-faktor ($t v$) i kärnborrhål 1 vid Finnsjön. (Berggrundsbyrån SGU).



Figur 4-7. Diagram över bergets vattengenomsläpplighet, permeabilitet, i kärnborrhål 2 vid Finn-sjön. Borrhålet är ansatt i 50° vinkel mot horisontalplanet. (Berggrundsbyrån SGU).

svarande "torr" fyllning också i den nordöstliga huvudzonen skulle ge en förklaring på att denna inte har givit någon elektrisk indikation. Alternativt kan denna zon utgöras av mylonit.

Borrhålet avslutades vid 698 m (ca 525 m vertikalt djup), fortfarande i trasigt berg. Mellan 110 och 680 m utgörs borrhålets kärna däremot av övervägande bra berg. Förekommande sprickor är i stor utsträckning fyllda av klorit, kalcit, kvarts och prehnit, vilket i likhet med förhållandena i borrhål Finnsjön 1 ger god täthet, se fig 4-7.

Prov av granodiorit samt kloritskölen på ca 103 m djup och krossmaterialet från 688,4 m har undersökts med röntgendiffraction för att belysa med vilka mineral grundvattnet står i kontakt. Resultaten visar att bergarten har en viss halt av illit, att kloritskölen innehåller smektit och eventuellt något blandskiktmineral samt att krossmaterialet innehåller svällande mineral av blandskiktstyp. Detta innebär att både bergarten och störningszonerna innehåller jonbytande mineral och att det i störningszonerna finns svällande mineral, som i viss mån kan verka självtätande.

Kärnborrhål Finnsjön 3, diameter 56 mm, längd 700 m, djup 550 m, är ansatt med 50° lutning mot söder i mätområdets östra kant för att belysa dess relativt sprickrika randzon mot förkastningsdalen i öster. Bergarten här är också enhetlig granodiorit fast den är intensivare uppsprucken och i samband härmed visar rödfärgning och en förhöjd kvartshalt. Även här är sprickorna i stor utsträckning mineralfyllda. Trots många mindre kross- och sprickzoner har inga stora skölzoner påträffats.

Borrhålets vinkel mot förkastningsdalen medför att avståndet till denna ökar med ökande djup. Resultaten hittills indikerar att zonen med nedsatt bergkvalitet sträcker sig ca 300 m in från dalsidan. Det kan vara värt att framhålla att samtliga borrhål i Finnsjöområdet visat att störningszonerna är omgivna av rödfärgat berg med mineralfyllda sprickor. Vid planering och anläggning av ett bergförvar medför detta att man i god tid blir förvarnad om att man närmar sig sådana zoner. Praktiskt taget inga kärnförluster har noterats vid borrhållning genom dessa zoner. De förväntas inte heller förorsaka speciella bergtekniska svårigheter.

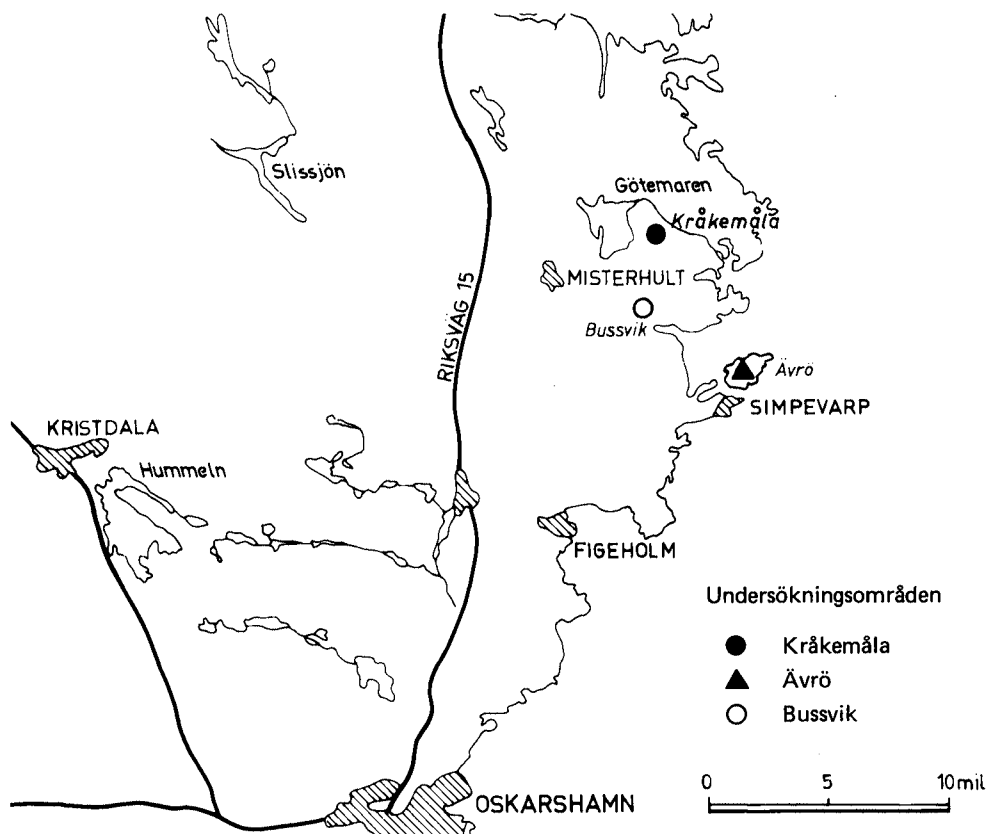
4.4 KRÅKEMÅLAOMRÅDET

4.4.1 Läge och topografi

Undersökningsområdet i Kråkemåla ligger ca 7,5 km NNV om Oskarshamns kärnkraftverk vid Simpevarp och ca 1,5 km NW om Kråkemåla by mellan Östersjön och sjön Götemaren, se fig 4-8.

Kråkemåla-området ligger nära övergången mellan det subkambriska peneplanet utmed Östersjökusten i söder och det spricklandskap som kännetecknar norra Smålands och Östergötlands kusttrakter. Landskapet karaktäriseras av flacka landformer som dock är brutna av markerade sprickdalar med i huvudsak nord-sydliga, öst-västliga och nordvästliga riktningar, se fig 4-9.

Undersökningsområdet utgör den östra delen av en lokal vattendelare mellan Östersjön och sjön Götemaren, vars medelvattenstånd



Figur 4-8. Karta över läget av undersökningsområdena Kråkemåla, Ävrö och Bussvik.

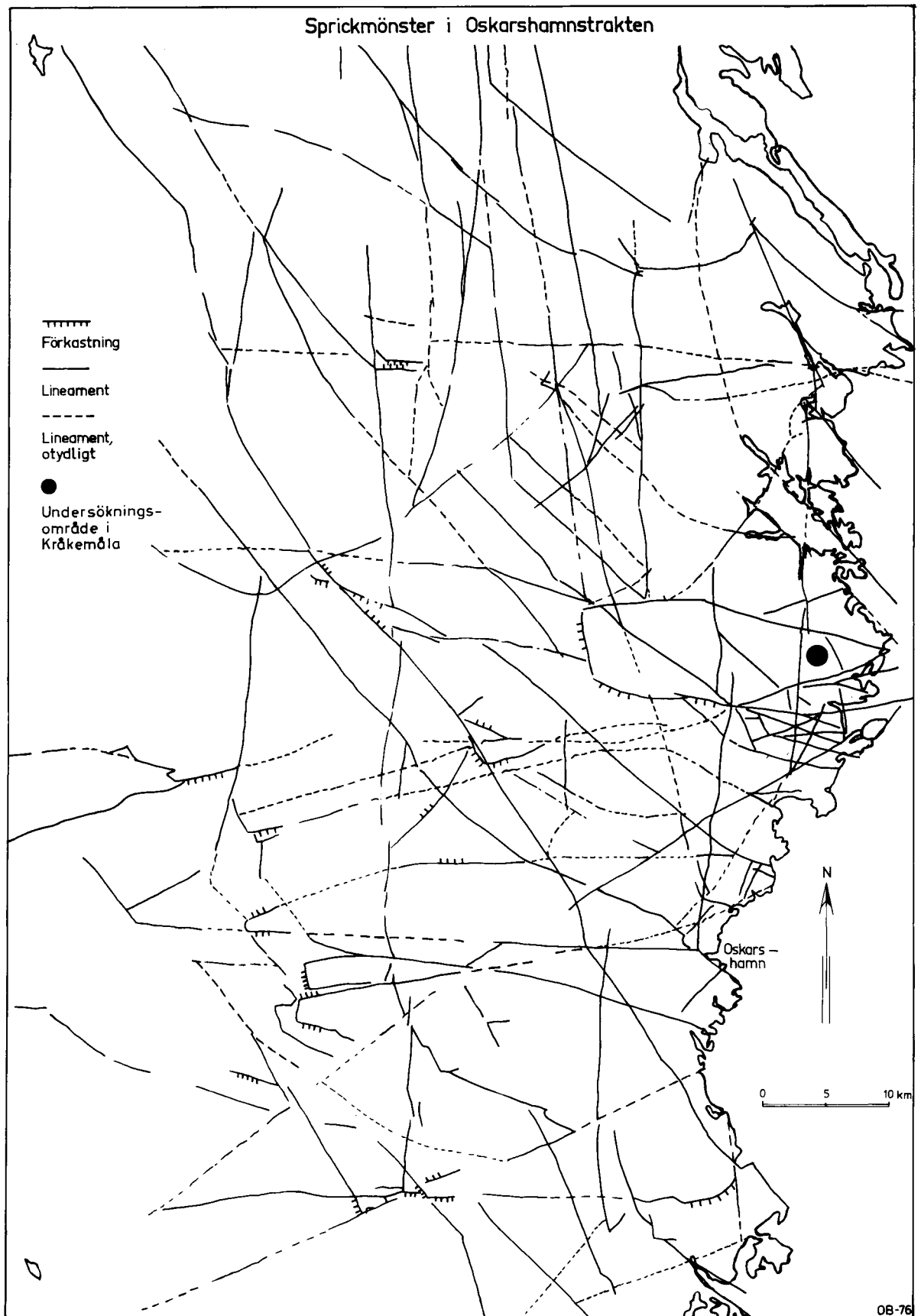
ligger endast 1 m ö h. Områdets nära horisontala överyta faller från 20 m ö h i väster till 15 m i öster och begränsas där av en nordvästlig sprickdal med passpunkten på ca 10 m ö h mellan Bussviken (Östersjön) och Götemarens utlopp. Sprickdalen är delvis fylld av grus- och sandavlagringar. Bottnarna i några mycket små grustag når den lokala grundvattenytan. I övrigt är jordtäcket tunt och stora ytor utgörs av berg i dagen.

4.4.2 Berggrundsförhållandena

För en överblick av berggrundsförhållandena hänvisas till det geologiska kartbladet Oskarshamn /4-10/. Trakten uppbyggs av s k Smålandsgraniter medan själva undersökningsområdet ligger inom Götemarmassivet, en i ytan cirkelformigt begränsad kropp av yngre granit, Götemargraniten, med en diameter av ca 9 km. Dess ålder har bestämts till 1,38 miljarder år, Åberg /4-11/. Massivet har nyligen beskrivits av Kresten och Chyssler /4-12/.

Götemargraniten uppbyggs av fyra varianter, som uppträder i olika delar av massivet och som främst skiljer sig i avseende på kornstorlek.

I undersökningsområdet dominerar en grovkornig röd granit med en kornstorlek omkring 15 mm, som i huvudsak består av mikroklin (60-75%), kvarts (20-35%), biotit och småmineral. Den gränsar i områdets västra del mot medelkornig granit med en kornstorlek under 10 mm, ofta något ljusare och muskovitförande men i övrigt



Figur 4-9. Karta över sprickmönstret i trakten av Oskarshamn. (Berggrundsbyrån SGU).

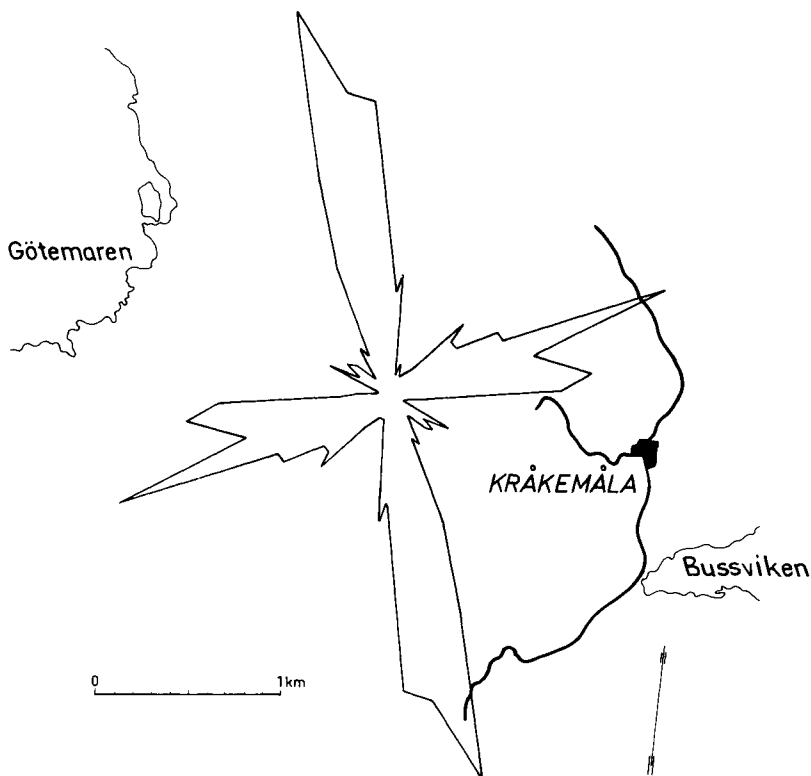
med snarlik sammansättning. Kemiska analyser av bergarter i Kråkemåla-området återges i tabell 4-3.

I båda granitvarianterna påträffas ofta flackt liggande kroppar av pegmatit, där kornstorleken kan nå omkring 10 cm. De är sällan mer än 0,5 cm tjocka och någon meter långa.

Regionens allmänna sprickmönster har analyserats av Asklund /4-13/ och Nordenskjöld /4-14/.

Götemarmassivet är mycket enhetligt i fråga om bergartsstrukturen. Det uppvisar fyra starkt markerade sprickriktningar. Brant stående sprickor parallella med massivets omkrets markerar ett koncentriskt mönster som kompletteras av ett radiale system som tillsammans med det föregående ger en mycket regelbunden nära rätvinklig sprickbild i varje lokal, se fig 4-10 och 4-11. Härtill kommer diagonalsprickor och vitt utbredda, nära horisontella sprickytor, som också styrt den flacka bergytan inom undersökningsområdet. Massivets olika granitvarianter kännetecknas av olika spricktäthet, se fig 4-12. Särskilt den grova graniten är ovanligt sprickfattig vid dagytan, vilket motiverade valet av detta undersökningsområde.

Samma sprickmönster återkommer i omgivande Smålandsgranit och är där fyllt av granit- och pegmatitgångar, som hör samman med Götemargraniten. Detta liksom sprickytorernas beläggning med primära mineral, exempelvis muskovit, visar att dessa sprickor hör till en sen fas i Götemargranitens egen bildning och därför har samma

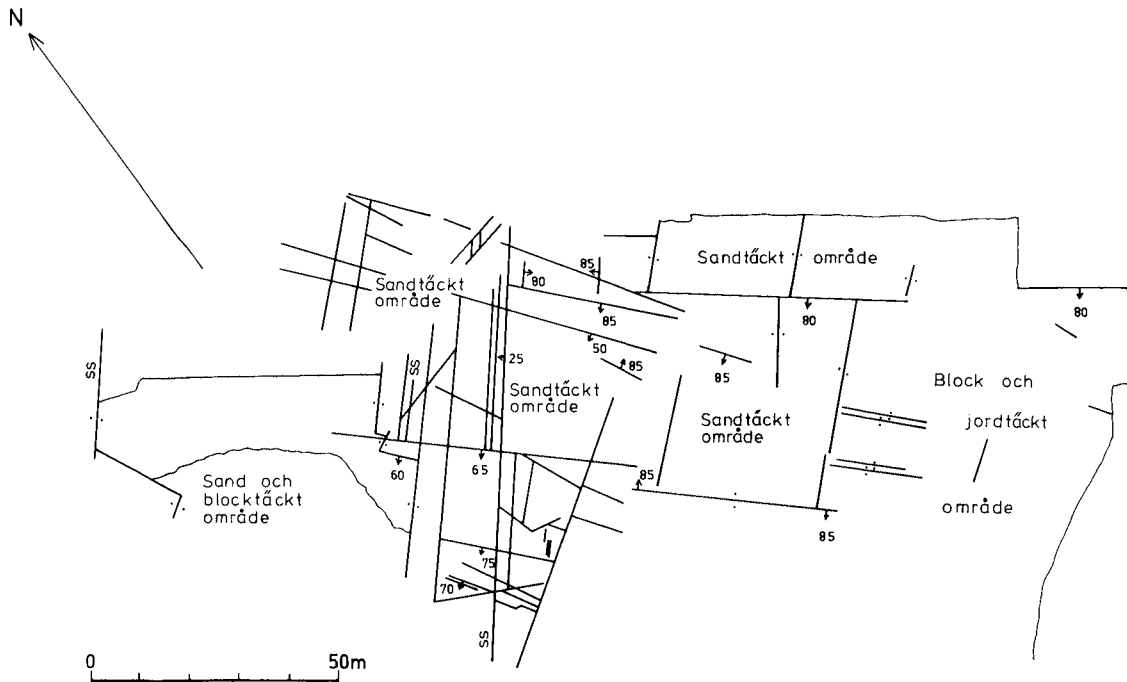


Figur 4-10. Diagram som visar riktningen av 327 branta sprickor inom undersökningsområdet vid Kråkemåla. Sprickorna ligger regelbundet och visar liten spridning i avseende på riktning. (Berg-rundsbyrån SGU).

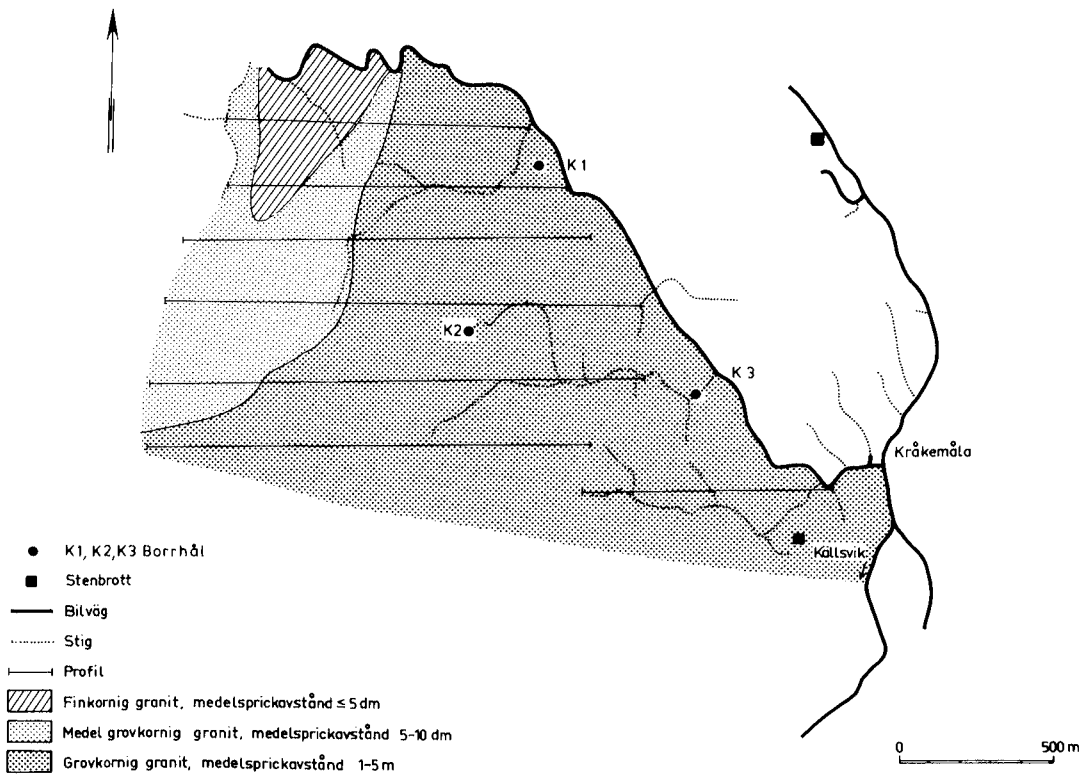
Tabell 4-3. Kemiska analyser av bergarten i Kråkemålaområdet efter Kresten och Chyssler 1976

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	73,2	71,9	75,9	72,2	72,4	76,1	74,4	71,7	74,9	73,8	73,3	76,1	67,1
TiO ₂	0,41	0,42	0,15	0,36	0,36	0,08	0,13	0,05	0,13	0,07	0,26	0,14	0,80
Al ₂ O ₃	13,7	13,8	12,6	13,2	13,2	12,6	14,8	15,9	12,7	14,3	13,0	12,5	14,5
Fe ₂ O ₃	0,8	0,9	0,1	0,8	0,7	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,1	0,5	0,1	1,5
FeO	0,6	0,9	0,5	0,8	1,1	0,3	0,1	0,3	0,6	0,3	0,8	0,4	2,3
MnO	0,04	0,06	0,03	0,03	0,05	0,02	0,01	0,18	0,07	0,06	0,04	0,04	0,07
MgO	1,2	1,2	0,8	1,3	1,2	0,5	0,3	0,10	0,6	0,10	1,1	0,5	1,1
CaO	0,6	0,6	0,08	0,33	0,36	0,02	0,2	0,02	0,08	0,4	0,25	0,06	1,9
Na ₂ O	3,1	3,7	3,6	3,7	3,6	4,2	2,9	6,1	3,9	4,0	3,5	4,0	3,1
K ₂ O	4,3	5,3	5,0	5,1	5,1	4,4	4,1	4,0	4,6	5,2	5,1	4,5	5,1
H ₂ O+	-	-	0,4	0,4	0,3	0,3	-	0,3	0,5	0,5	0,3	0,2	0,6
H ₂ O-	-	-	<0,1	0,1	0,1	<0,1	-	<0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	0,1
P ₂ O ₅	-	-	0,01	0,08	0,07	<0,01	-	<0,01	0,02	<0,01	0,05	0,01	0,22
CO ₂	-	-	0,03	0,01	0,11	0,04	-	0,03	0,03	0,02	0,19	0,01	0,12
F	0,49	0,56	0,56	0,59	0,51	0,31	0,06	0,41	0,55	0,24	0,51	0,32	0,18
S	-	-	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	-	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,04
BaO	0,08	0,08	0,02	0,08	0,08	0,01	0,02	<0,01	0,01	0,01	0,05	0,01	0,13
Sum	98,32	99,32	99,78	99,11	99,26	98,88	97,02	99,09	98,99	99,20	99,05	98,99	98,86
-O for F, S	0,21	0,24	0,24	0,25	0,21	0,13	0,03	0,17	0,23	0,10	0,21	0,13	0,09
Total	98,11	99,08	99,54	98,86	99,05	98,75	96,99	98,92	98,76	99,10	98,84	98,86	98,77
Norm:													
Q	35,7	27,2	33,7	29,1	29,8	32,9	40,0	19,4	32,9	28,1	31,7	33,7	26,9
Ab	28,7	33,7	32,9	34,0	33,0	38,4	27,1	54,8	35,9	36,5	32,1	36,6	26,6
Or	23,3	29,0	27,3	27,6	27,3	25,0	24,5	22,8	25,9	30,7	27,7	25,6	26,8
An	3,0	3,0	0,2	1,2	1,3	0,1	1,0	0,1	0,2	2,0	0,9	0,2	6,8
Bi	4,6	4,5	3,7	5,2	5,6	2,4	1,1	1,3	3,2	0,9	4,9	2,4	6,0

1. GÖT 11 Coarse-grained granite. 2. GÖT 24 Coarse-grained granite. 3. SL31A Coarse-grained granite. 4. GG 14 Coarse-grained granite. 5. GG 3 Coarse-grained granite. 6. GG 8 Medium-grained granite. 7. GÖT 26 Medium-grained granite, pale pinkish. 8. SL36B Fine- to medium-grained granite, white, with garnet and topaz. 9. SL1A Fine-grained granite, porphyritic. 10. G4a Medium-grained granite. 11. GG 2 Granite porphyry, dyke north of the massif. 12. GG 7 Porphyritic granite, eastern margin of the massif. 13. GG 1 Småland granite, reddish grey, porphyritic variety. Wall-rock to the north.



Figur 4-11. Sprickkarta över stenbrott norr om Kråkemåla (läge se figur 4-12). Den visar det regelbundna sprickmönstret. SS markerar sprickor som är fyllda av 550 miljoner år gammal kambrisk sandsten. (Berggrundsbyrån SGU).



Figur 4-12. Karta över undersökningsområdet vid Kråkemåla. Den visar variationerna i granitens kornstorlek. De tre kärnborrhålen är markerade. Medelsprickavståndet i de olika granittyperna varierar mellan 0,5 och 5 m. (Berggrundsbyrån SGU).

höga ålder som denna, medan senare deformationer varit helt underordnade.

En tidig tension med en sannolik ålder kring 1,2 miljarder år representeras av en diabasgång, som i NNV-lig riktning skär genom graniten. Öst-västliga sprickor, som är odeformerade och fyllda med sandsten av underkambrisk ålder, visar på närheten till det subkambriska peneplanet.

Yngre, post-kambriska rörelser kan påvisas helt lokalt. Hit hör den nord-sydliga förkastning, som går genom massivet ca 5 km väster om undersökningsområdet. På större avstånd noteras den öst-västliga förkastning vid Mönsterås, som bildar nordgräns för den underkambriska sandstenen där.

4.4.3 Geofysiska markmätningar

På uppdrag från PRAV har tidigare två kvadratkilometer inom Kråkemåla-området undersökts magnetiskt, elektriskt och seismiskt, Eriksson /4-15/. Mätningarna visade, i överensstämmelse med sprickbilderna, att den grova Göttemargraniten har mycket låg ledningsförmåga men är uppdelad i block som begränsas av zoner med högre ledningsförmåga. Bergartens elastiska egenskaper har bestämts seismiskt. Följande värden har erhållits: elasticitetsmodul 45-55 GPa, skjuvmodul 22.18 GPa, Poisson's tal 0,25.

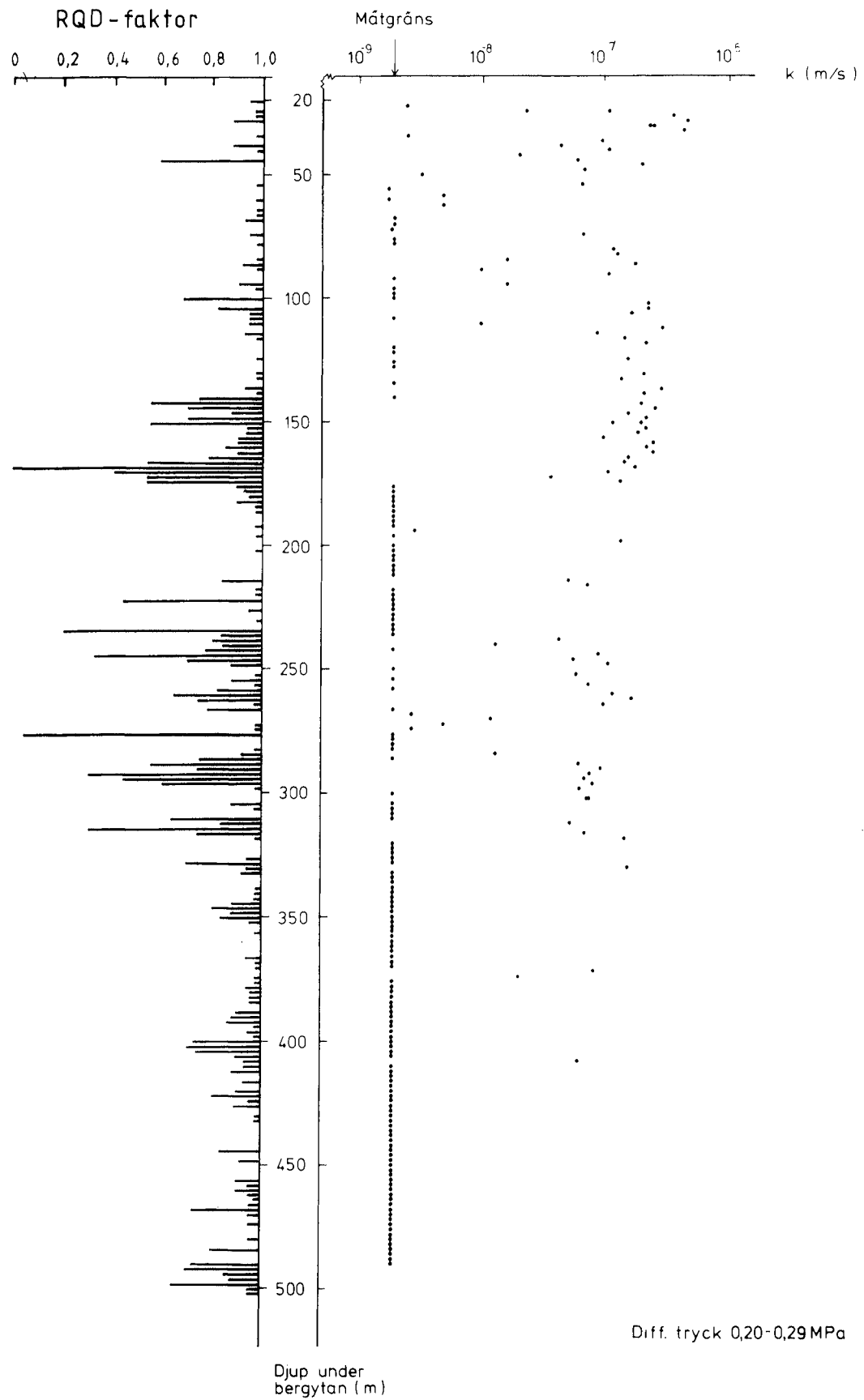
4.4.4 Borrningar

Det första hålet borrades för att fastställa om de grundläggande förutsättningarna i fråga om bergartens djupgående och enhetlighet var för handen. Då så visade sig vara fallet fullföljdes borrningarna. Borrhål 2 belyser den sprickfattiga, grovkorniga granitens avgränsning mot väster, där den medelkorniga graniten tar vid. Borrhål 3 belyser undersökningsområdets randzon mot den sprickdal som utgör dess begränsning mot öster.

Kärnborrhål Kråkemåla 1, diameter 56 mm, längd 504,65 m, är ansatt vertikalt i bra berg och går i nästan hela sin längd i likartad grovkornig röd massformig granit. På fem ställen finns dock inslag av finkornig, aplitisk granit med en sammanlagd tjocklek av 12,2 m. Den grovkorniga graniten utgör sålunda 97,6% av kärnan. Mellan 60 och 76 m djup uppvisar graniten spridda korn av svavelkis och molybdenglans.

Sprickfördelningen åskådliggörs av RQD-diagrammen, se fig 4-13. I övervägande grad har observerats friska sprickor tvärs över borrkärnan och många har uppkommit vid själva borrningen.

Vattenförlustmätningarna visar att vattengenomsläppligheten ned till 50 m sprider sig kring 10^{-7} m/s, se fig 4-13, medan man i de djupare delarna finner en tydlig uppdelning i höga och låga värden. De höga ligger även här kring 10^{-7} m/s medan de låga ligger vid eller under mätgränsen, dvs ingen vattenförlust har kunnat uppmätas med den använda utrustningen. Detta innebär att permeabiliteten är mindre än $1,9 \times 10^{-9}$ m/s när trycket varit 0,2 MPa och mindre än 8×10^{-10} m/s vid 0,6 MPa. I hela sektionen mellan 320 och 496 m har endast 4 st tvåmeterssektioner uppvisat mätbara vattenförluster. Dessa sektioner har släta, belagda sprickor me-



Figur 4-13. Diagram över bergets vattengenomsläpplighet, permeabilitet, ($t h$) och sprickighet uttryckt som RQD-faktor ($t v$) i kärnborrhål 1 vid Kråkemåla. (Berggrundsbyrån SGU).

dan sektioner med de mera vanliga, friska sprickorna inte givit upphov till mätbar vattengenomsläpplighet.

Sprickorna i Götemarggraniten uppvisar en skiftande mineraluppställning. Skrapprov från sprickväggarna i borrhåran från Kråkemåla 1 har därför närmare undersökts. Förutom granitens vanliga mineral och allmänna sprickmineral såsom klorit och kalцит, finns också sulfidmineralen pyrit (svavelkis) och blyglans, vidare flusspat och lermineralen kaolinit och smektit. Kaoliniten har med säkerhet påvisats endast i ett prov nära dagytan, smektiten däremot i fyra prov ned till 326 m, dock i underordnad mängd.

Kärnborrhål Kråkemåla 2, diameter 56 mm, längd 604,8 m, är ansatt vertikalt i bra berg nära västgränsen för den grovkorniga röda graniten. I kärnan avspeglas detta av många (25) inslag av fin-kornig granit, som totalt utgör 14% av hela längden och en allmänt högre sprickighet, se fig 4-14. Mellan 330 och 495 m uppvisar också detta borrhål god täthet med värden på vattenförlusterna som understiger mätgränsen. På större djup ökar åter sprickigheten. Det är därför realistiskt att räkna med att detta borrhål markerar västgränsen för den bergvolym, som kan utnyttjas för förvaringsutrymmen.

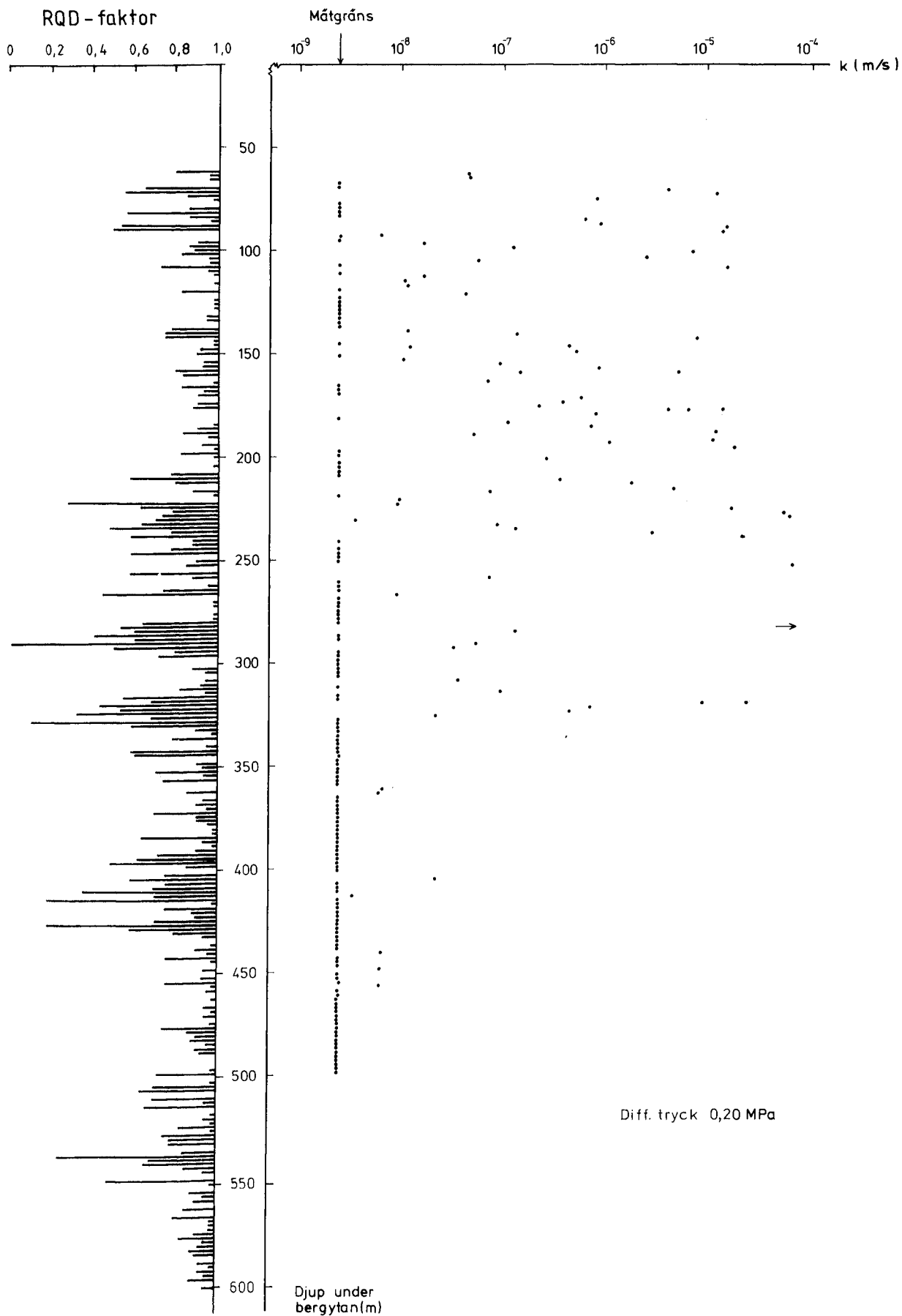
Kärnborrhål Kråkemåla 3, diameter 56 mm, längd 760 m, djup ca 560 m, är ansatt med 50° lutning mot VNV i bra berg på Solberget, som utgör en sprickfattig ribba mellan två nordvästliga sprickdalar öster om det geofysiskt undersökta området. Bergartsförhållandena i detta borrhål motsvarar mycket nära dem i Kråkemåla 1. Trots förekomsten av sprickor och smala krosszoner i de övre delarna blir berget sprickfattigt mot djupet. Detta visar att uppsprickningen av berget kring de topografiskt framträdande dalarna i Kråkemåla-området är begränsad.

4.5 ÖVRIGA OMRÅDEN

4.5.1 Ävrö

Ävrö ligger 1,5 km norr om Simpevarp, och marken tillhör huvudsakligen Oskarshamns Kraftgrupps AB, se fig 4-8. Topografiskt är det en ö med flera små sprickdalar. Berggrunden utgörs av röd till grå, medelkornig och massformig till svagt förgnejsad Smålandsgranit. En öst-västlig brantstående diabas har observerats i en håll. Geofysiska mätningar anger genomgående blockuppdelning med mellanliggande, elektriskt något ledande zoner. Seismisk undersökning gav följande data: elasticitets-modul 25-43 GPa, skjuvmodul 10-17 GPa, Poisson's tal 0,25.

Kärnborrhål Ävrö 1, diameter 56 mm, längd 502,2 m, ansattes vertikalt i bra berg, i ett område med hög resistivitet. Borrhålet visar röd granit, som trots påtaglig sprickighet har permeabiliteter under 10^{-7} m/s. Diabas påträffades i fyra avsnitt, sektionernas längd är sannolikt mycket större än diabasernas tjocklek pga deras branta lagerställning. Nedanför 400 m är graniten i detta borrhål starkt uppkrossad och vattengenomsläpande. Undersökningarna har därför inte fullföljts.



Figur 4-14. Diagram över bergets vattengenomsläpplighet, permeabilitet, ($t h$) och sprickighet uttryckt som RQD-faktor ($t v$) i kärnborrhål 2 vid Kråkemåla. (Berggrundsbyrån SGU).

4.5.2 Bussvik

Bussvik ligger 4,5 km nordväst om Simpevarp, se fig 4-8, och har endast undersökts från ytan geologiskt och seismiskt. Området kännetecknas av stora, relativt sprickfattiga hållar av Smålandsgranit. Goda seismiska värden har uppmätts: elasticitetsmodul 50-60 GPa, skjuvmodul 20-24 GPa, Poisson's tal 0,25. Inga borrhningar har hittills utförts i Bussvik.

4.5.3 Forsmark

Forsmark ligger ca 3,5 km väster om Forsmarks kärnkraftverk, se fig 4-3, och inom ett med geofysiska flygmätningar undersökt område kring kraftverket. Ytgeologi och geofysiska mätningar visar att området utgör ett sammanhängande berggrundsblock med hög resistivitet och låg sprickfrekvens. Berggrunden uppbyggs av medelkornig, svagt förgnejsad, grå kvartsdiorit, som i söder gränsar mot leptitgnejs med nordvästlig strykning. Leptiten är delvis småveckad och har övervägande nordostlig stupning.

Kärnbröthål Forsmark 1, diameter 56 mm, längd 478,3 m, är ansatt vertikalt i bra berg. Till 219 m genomborrades en ganska sprickfattig diorit med växlande halt av hornblände och biotit, samt enstaka omkring 2 m tjocka inslag av pegmatit och aplit. Mot djupet tilltar en från början obefintlig nära horisontell bandning och nedanför 375 m överväger bandade ljusa, delvis leptitliknande gnejser. Samtidigt inträder en stark försämring av bergkvalitén. Borrhningen avbröts därför vid 478,3 m. Borrhningsresultatet tyder på att undersökningsområdet utgör en u-formad omböjning och att dioriten saknar erforderligt djupgående. Området måste därför betraktas som mindre gynnsamt för ett djupt bergförvar.

5 GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDEN

5.1 GRUNDVATTENHYDROLOGI

Radioaktivt avfall, som förvaras på stort djup i berggrunden kan spridas endast genom grundvattnet. Grundvattenflödets storlek i aktuella områden, dess hastighet, uppehållstid och rörelsemönster är därför av stort intresse.

Den förutsedda inkapslingen av avfallet i metalliska eller keramiska material kan bli utsatt för korrosionsangrepp vid kontakt med grundvattnet. Angreppets art och den takt vari det utvecklas är beroende av grundvattnets kemiska sammansättning, som därför är av betydelse.

5.1.1 Berggrundens vattengenomsläpplighet

Såsom framgått av kapitel 4 har berggrundens vattengenomsläpplighet uppmätts i ett antal borrhål i 2 m (i vissa fall 3 m) långa sektioner från bergytan till borrhålets botten. Resultaten kan schematiskt sammanfattas på följande sätt.

Den övre delen av berggrunden, som kan sträcka sig till något tiotal eller hundratal meters djup, kännetecknas ofta av relativt hög vattengenomsläpplighet, vilket står i samband med ett välutbildat och sammanhängande nätverk av sprickor. De övre partierna av berggrunden motsvaras närmast av den modell för sprickigt berg, som utvecklats av Snow /5-1/ på grundval av ett stort antal borrhningar och permeabilitetsbestämningar ned till 100 m djup. Mot djupet tilltar andelen sektioner med mycket låg genomsläpplighet, och en övergång sker till förhållanden, som kännetecknas av stora partier med övervägande tätt berg, avbrutna av smalare vattenförande sprickzoner. De undre partierna motsvarar därför de förhållanden, som beskrivits från större djup i kristallina bergarter av Webster et al /5-2/.

Huvuddelen av grundvattenflödet i berggrunden sker i dess övre del, som ofta har permeabiliteter mellan 10^{-5} och 10^{-7} m/s. Det hydrauliska sambandet i denna del är i allmänhet gott, vilket ger upphov till en kontinuerlig och jämn grundvattenyta, se Larsson et al. /5-3/

En mindre del av grundvattnet rör sig genom berggrundens djupare del, och där är rörelsen väsentligen begränsad till vissa vattenförande zoner. Rikligt vattenförande zoner har i svenska gruvor påträffats ned till 900 m djup. Mellanliggande tätare partier av

berget har en permeabilitet under 10^{-9} m/s. I granit i Stripa har 5×10^{11} m/s /5-4/ uppmätts. Det hydrauliska sambandet mellan de enskilda sprickorna på stora djup synes vara starkt begränsat, vilket framgår av att inget mätbart vattenflöde kunnat påvisas i sektioner, där såväl borrhärna som TV-granskning visar förekomst av sprickor. Stora skillnader i kemisk sammansättning och ålder hos vattnet visar också att det hydrauliska sambandet mellan de vattenförande zonerna i samma borrhål kan vara begränsat på dessa djup. Ett visst hydrauliskt samband finns dock alltid via den mer vattengenomsläppliga övre delen av berggrunden.

5.1.2 Grundvattenmängder

Grundvattenflödets storlek bestäms av den fria grundvattenytans form, berggrundens permeabilitet och djupet under grundvattenytan. Grundvattenytan följer landskapsformerna med viss utjämning.

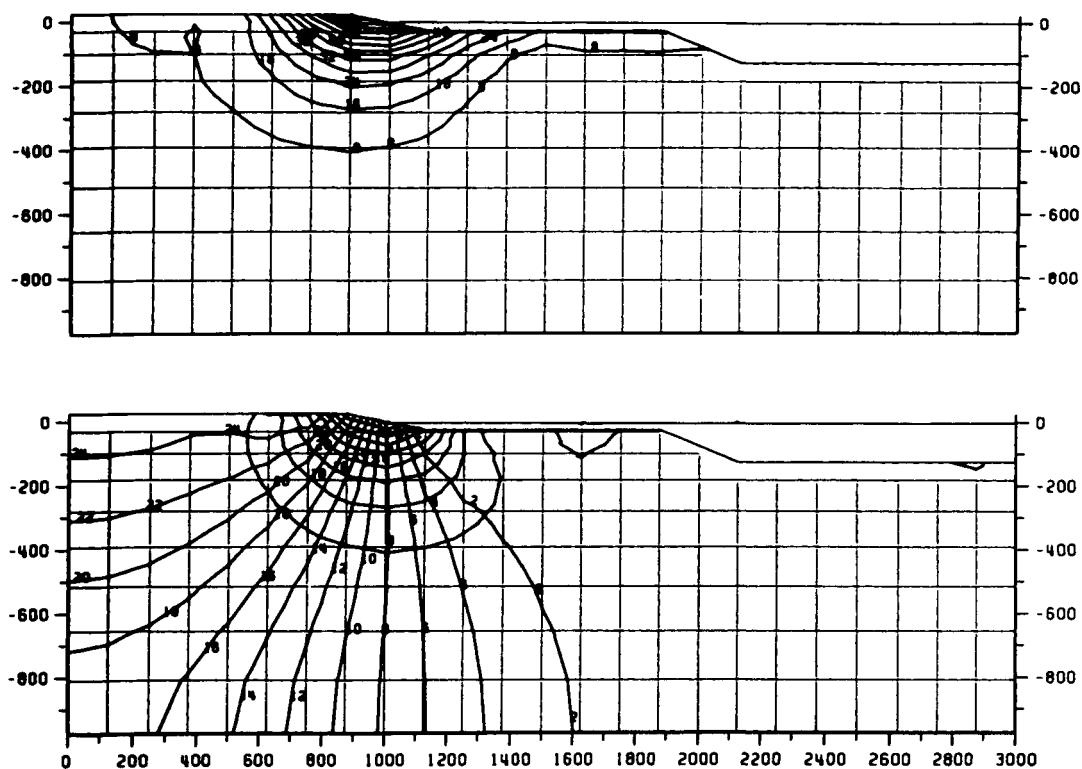
För att beräkna grundvattenflödet har ett stort antal tvådimensionella typexempel med olika form på grundvattenytan och skilda permeabilitetsförhållanden genomräknats med särskilda datorprogram /5-4, 5-5/. Fig 5-1 visar grundvattenflödet under en ö, från dess mitt och utåt. Beräkningen grundas på att permeabiliteten är känd nära ytan och avtar med djupet på ett lagbundet sätt. Detta diagram har använts som mönster för Karlshamnsområdet, som ligger på en halvö. För ett djup av 500 m, en ytnära permeabilitet av 10^{-9} m/s och grundvattenytans lutning 0,05 erhålles ett flöde av ca $0,2 \text{ l/m}^2$ och år.

Fig 5-2 visar grundvattenflödet under en sluttning, som är en kilometer lång. Vid beräkningen antas att permeabiliteten inte varierar med djupet, vilket leder till grundvattenflöden ned till stora djup. Detta fall har tillämpats på områdena vid Finnsjön och Kråkemåla. För Finnsjöområdet erhålles ett flöde av $0,1 \text{ l/m}^2$ och år, på djupet 500 m, då permeabiliteten är 10^{-9} m/s och grundvattenytans lutning 0,008. För Kråkemålaområdet erhålles ett flöde av $0,15 \text{ l/m}^2$ och år vid samma djup och permeabilitet då grundvattenytans lutning är 0,012.

Ovan beräknade flödesvärden är sannolikt betydligt högre än de verkliga, då den genomsnittliga permeabiliteten är lägre än angivet värde 10^{-9} , som utgjort mätbarhetsgränsen.

5.1.3 Strömningsvägar

Grundvattnets väg genom berggrunden kan belysas med samma typ av diagram, som visas på fig 5-1 och 5-2, om beräkningarna anpassas till de verkliga höjdförhållandena inom ett givet område. Vid tvådimensionella beräkningar förutsättes då att sluttningar och andra landskapsformer ligger vinkelrätt mot bildens plan och har stor utsträckning i denna riktning. För att bli verklighetstrogna bör beräkningarna avse ett plan som är vinkelrätt mot riktningen på förhärskande dalstråk. Vidare måste förutsättas att permeabiliteten inom området är konstant eller ändrar sig på ett lagbundet sätt. Inverkan av enskilda vattengenomsläppliga zoner, som svarar för en stor del av flödet i berggrundens djupare delar, kan därför inte åskådliggöras av modellen. Genom att variera förutsättningarna för beräkningarna och därvid fördela de enskil-

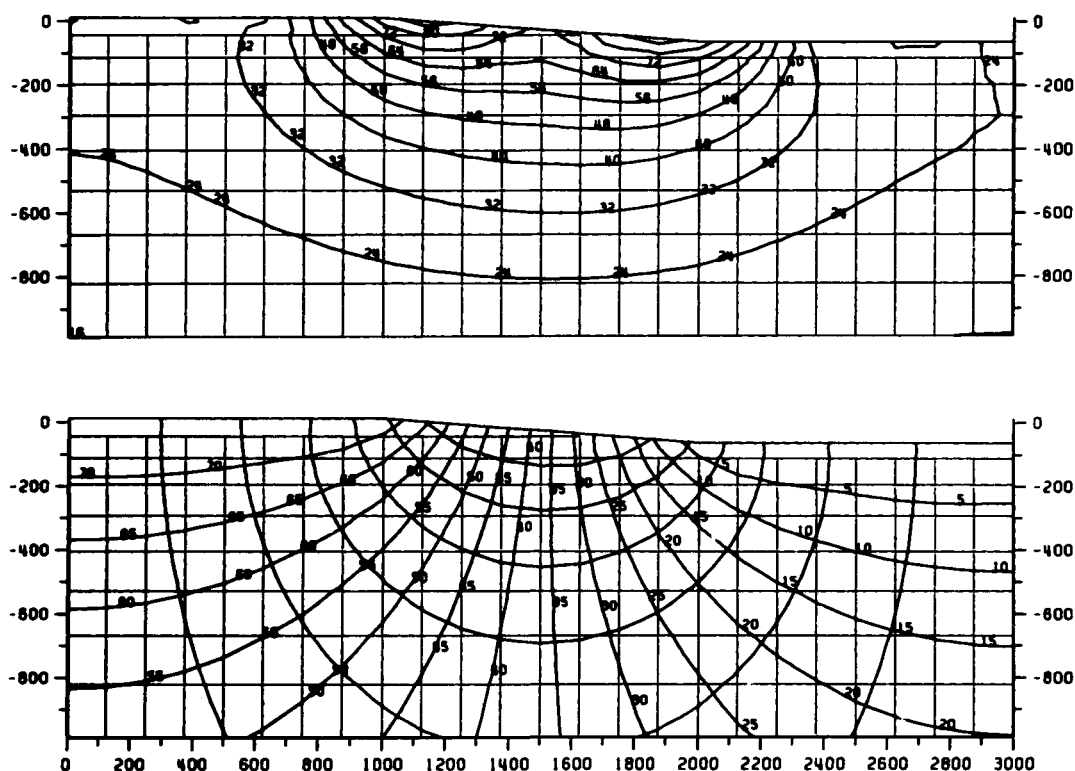


Figur 5-1. Diagram över den beräknade grundvattenströmningen under en ö från mitten och utåt. Höjd- och längdskalan är i meter. Övre bilden visar linjer för lika flöde uttryckt i $10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ och tvärsnittsarean 1 m^2 . Undre bilden, som visar strömlinjer och ekvipotentiallinjer, förutsätter en ogenomtränglig bottenyta på 1 000 meters djup och en ytlig permeabilitet av 10^{-6} m/s . Permeabiliteten avtar därefter exponentiellt till $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ på 1 000 meters djup. [5-5].

da zonernas effekt på större volymer kan de allmänna strömningsförhållandena ändå belysas. Detta har utförts för Finnsjöområdet, se fig 5-3 och 5-4.

Diagrammen visar allmänt, vilket tidigare varit känt, att grundvattnet strömmar ned i berggrunden i höjdområden, för att sedan vända och åter strömma upp mot angränsande större dalbottnar, där det kan nå ytan t ex genom grundvattenutträde i vattendrag. Inverkan av landskapsformerna sträcker sig ofta till flera tusen meters djup. Ju längre sluttningarna är, desto djupare når deras verkan. De ytor där grundvatten från stora djup kommer upp är små, och uppströmningen åtföljs av en mycket stark utspädning.

Dessa allmänna förhållanden betyder att grundvattenrörelserna inom ett större område är uppdelade på mindre strömningsceller, och att grundvattentransporten helt övervägande är av lokal natur. Denna bild blir mer utpräglad om dalgångarna följer sprickzoner i berggrunden, där vattengenomsläppligheten är hög.

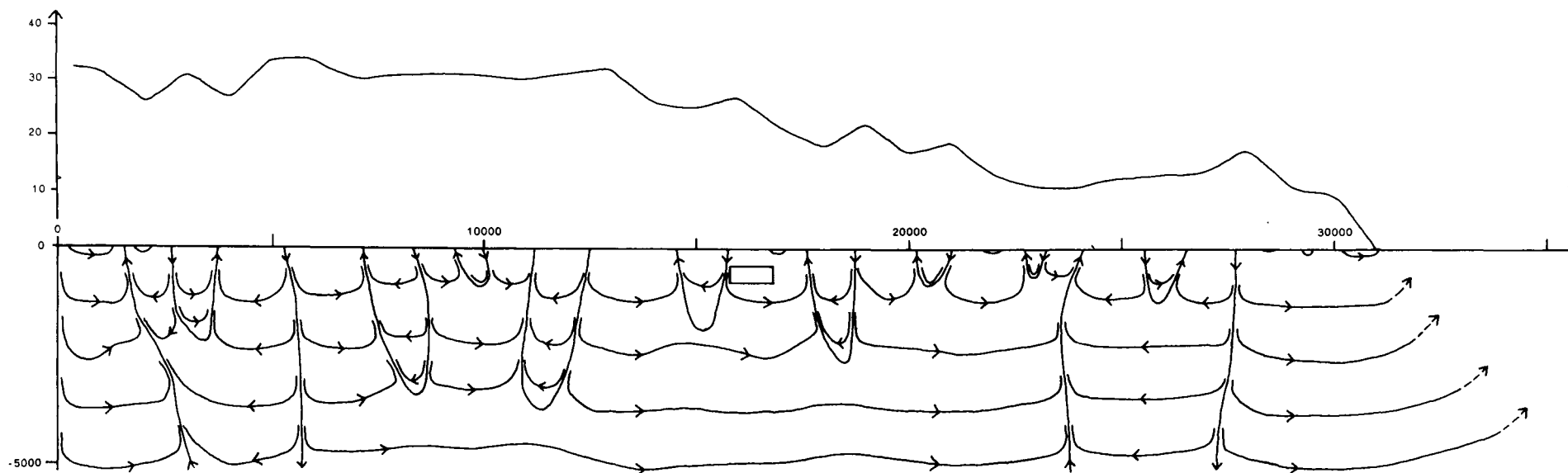


Figur 5-2. Diagram över den beräknade grundvattenströmningen under en sluttning. Höjd- och längdskalan är i meter. Övre bilden visar linjer för lika flöde uttryckt i $10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ och tvärsnittsarean 1 m^2 . Undre bilden visar strömningslinjer och ekvipotentiallinjer. Någon bottenyta på ändligt djup förutsätts inte i detta fall. Permeabiliteten är konstant lika med 10^{-6} m/s . [5-5].

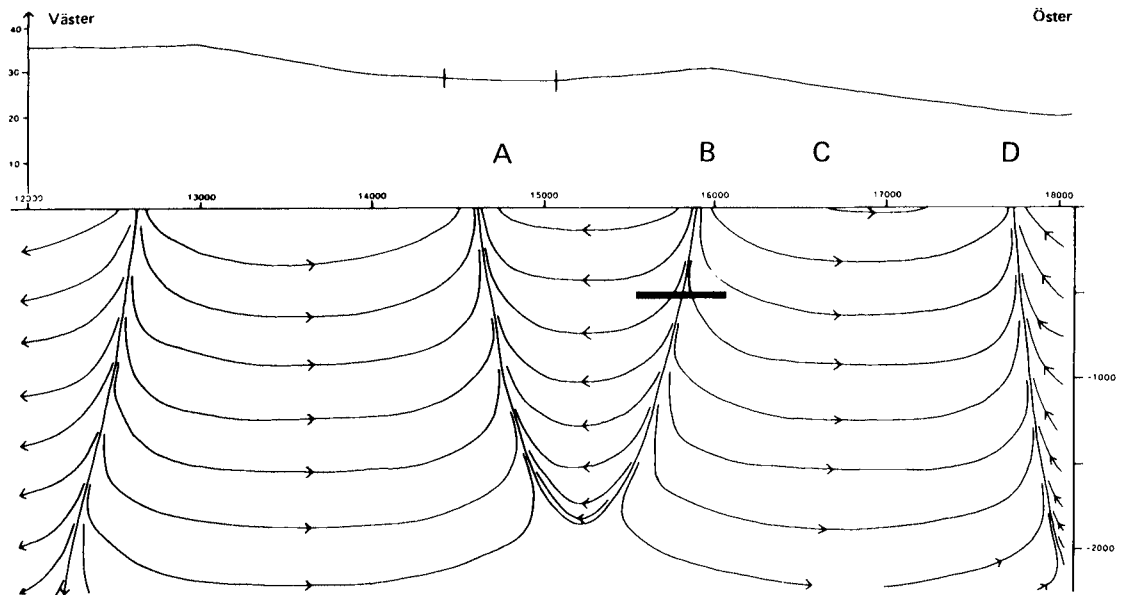
Diagrammen över Finnsjöområdet visar att strömningen där är riktad mot Finnsjön och mot en dal ca 2,5 km nordost om denna. En viss uppåtströmning förekommer sannolikt också i den förkastningsdal, som begränsar undersökningsområdet mot nordost. Inga kalkkällor har påträffats här, eller i andra delar av området, vilket indikerar att inget djupare grundvatten når upp till markytan. Grundvattnet bör därför totalt röra sig ungefär så som diagrammet visar.

5.1.4 Utspädningseffekter

Diagrammet i fig 5-4 kan läggas till grund för en bedömning av utspädningen av det grundvatten som skulle kunna komma i beröring med avfallskapslarna i ett bergförvar i Finnsjöområdet. Antag att förvaret förläggs på 500 m djup mitt i den nedåtgående grundvattenströmmen vid punkt B i figuren. Förvaret innehåller 9 000 kapslar med 1,8 m längd och 0,4 m diameter. Tvärsnittsarean av en



Figur 5-3. Diagram över grundvattnets strömningsmönster i en nordostlig profil genom området vid Finnsjön. Någon ogenomtränglig bottenyta på ändligt djup förutsätts inte i detta fall. Permeabiliteten antas avta nedåt med hälften för varje 100-tal meter. Strömlinjerna är så valda att flödet avtar med djupet 10 000 gånger mellan två visade strömlinjer. [5-5].



Figur 5-4. Detalj ur figur 5-3. Strömlinjerna är så valda att grundvattenflödet avtar med djupet 10 gånger mellan två visade strömlinjer. A markerar Finnsjön, B grundvattendelaren, C en förkastningsdal och D utströmningsområde. Förvaret är markerat med ett kraftigt streck under B. Observera att grundvattenrörelsen genom förvaret är nedåtriktad och når inte upp ovanför 500 meters djup förrän i utströmningsområdena. (Figuren är hämtad ur [5-5] dock har förvaret visats i något annat läge).

kapsel är sålunda $0,7 \text{ m}^2$. Flödena till Finnsjön resp mot nordost berör vardera halva antalet kapslar, med en area av ca $3\,000 \text{ m}^2$, och uppgår till $3\,000 \times 0,1 = 300 \text{ l/år}$.

Av diagrammet framgår att flödet vid förvaret är nedåtriktat och därefter i huvudsak går på djup större än 500 m, ända tills det svänger uppåt under Finnsjön (A i figur 5-4) respektive dalen i nordost (D i figur 5-4). På sin väg är det sålunda utom räckhåll för normala bergbrunnar.

I Finnsjön sker en utspädning med yt- och grundvattnet från Finnsjöns dräneringsområde, som är ca 100 km^2 . Med en årsnederbörd av 550 mm, och en avdunstning av 300 mm erhålles en totalvolym vatten av $2,5 \times 10^7 \text{ m}^3$. Som ovan angivits beräknas en grundvattenmängd av maximalt 300 l/år komma i beröring med avfallskapslarna och sedan ta sin väg till Finnsjön. Utspädningen blir då ungefär 1 på 8×10^7 .

Under dalen vid D sker på motsvarande sätt en utspädning av vattnet från en dräneringsyta på 10 km^2 . Den blir då 1 på 8×10^6 .

Beträffande förkastningen, som begränsar Finnsjöområdet mot nordost vid C i fig 5-4 antas försiktigvis att en uppåtströmning äger rum. Än mer försiktigt antas att denna uppåtströmning är så kraftig att den leder till en fullständig blandning av grundvattnet ned till slutförvarets nivå. Utspädningen sker med grundvattenmängden från ett infiltrationsområde på 2 km^2 , som beräknas till ca $0,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Avrinningen inom området betraktas som försumbar. Utspädningen blir då ca 1 på $1,7 \times 10^6$, vilket gäller för det vatten som kan tas upp ur en bergbrunn. Om uppåtströmningen ej når ytan och blandningen av grundvattnet i förkastningszonen är ofullständig, fylls brunnen företrädesvis eller helt av yt nära grundvatten, som ej varit i beröring med avfallet. Utspädningen blir då betydligt större.

5.1.5 Avfallets värmepåverkan

Beräkningar har också utförts för att belysa inverkan av den uppåtströmning över ett bergförvar, som under förvaringstidens inledande skede kan förorsakas av avfallets värmeutveckling. I överensstämmelse med tidigare amerikanska överslagsberäkningar, National Academy of Science /5-6/, har denna faktor visats ge en endast obetydlig störning av rådande strömningsbild i bergförvarets närhet.

5.1.6 Avsänkning och återfyllning av grundvattenmagasinet

Effekten av en läns-pumpning av ett bergförvar under anläggnings- och deponeringstiden har också undersökts, /5-4, 5-7/. Dessa beräkningar är av betydelse för ett fortsatt planerings- och konstruktionsarbete. Återfyllningstiden för grundvattenmagasinet kring slutförvaret, sedan detta förslutits, kan med erfarenhet från nedlagda gruvor, bedömas bli betydande. Under denna tid kan någon utströmning från området inte äga rum.

5.1.7 Grundvattennivåns korttidsvariationer

En genomgång av litteraturuppgifter och svenska undersökningar av grundvattennivåns korttidsvariationer har utförts /5-8/. Den visar att grundvattennivån i svenskt urberg uppvisar vissa korttidsvariationer, som sker utan att bergets vatteninnehåll ändras. Nivån påverkas bl a av ebb- och flod rörelser i berggrunden till följd av månens och solens dragningskraft samt av ändringar i lufttrycket. Också kraftiga jordbävningar, som inträffat på stort avstånd, t ex utanför Portugal och i Japan, påverkar grundvattennivån. Alla dessa variationer är små i jämförelse med de årstids- och nederbördsbetingade variationerna och någon inverkan av betydelse på förhållandena i och kring ett bergförvar har inte kunnat påvisas.

5.1.8 Grundvattnets ålder

Den tid grundvattnet uppehåller sig i berggrunden är av vikt med

hänsyn till de radioaktiva ämnenas naturliga sönderfall och deras fördröjande och kvarhållande reaktioner med berget. I en och samma bergvolym är uppehållstiden för vattnet minst i de större vattenförande sprickzonerna. I de mellanliggande berggrundsblocken med låg permeabilitet är uppehållstiden mångdubbelt större. Uppehållstiden i sprickzonerna har kunnat belysas med åldersbestämningar på vattenprov från borrhålen.

Åldersbestämning på vattenprov har utförts med kol-14-metoden, som anger hur lång tid som gått sedan vattnet isolerades från atmosfären. Fyra vattenprov från borrhålen i Kråkemåla har hittills undersökts. För varje bestämning krävs ca 70 l vatten, vilket medfört att prov endast kunnat erhållas från rikligt vattenförande zoner.

Två prov från 291 och 510 m djup i borrhål nr 2 gav åldrar på 4 400 resp 4 275 år. Två prov från 407 och 493 m i borrhål nr 1 gav 11 055 resp 8 205 år. Bestämningarna utfördes av laboratoriet för radioaktiv datering. Korrektion för utbyte med karbonatmineral har gjorts mot halten av kol-13.

Den analytiska osäkerheten hos dessa bestämningar är ca ± 100 år. Större fel i åldersbestämningarna kan emellertid följa av olika åtgärder i borrhålen före provtagningen. Under borrhningen pumpades stora mängder "yngre" ytvatten ned i hålen som spolvätska, och före provtagningen skedde kraftig länsumpning. Dessa störningar, som medför att vatten av olika åldrar blandas, torde medföra för låga åldersangivelser. Av vattenprovets kemiska sammansättning att döma är också provet med den högsta åldern det som är minst stört av ytvatten.

Skillnaden mellan åldrarna 4 275 och 4 400 år ligger inom de analytiska felgränserna. Skillnaderna mellan åldersuppgifterna 4 000 resp 8 000 och 11 000 år, i den mån de inte beror på ovan nämnda störningar, kan sannolikt förklaras av borrhålens olika läge och permeabilitetsförhållanden. Borrhål nr 1 ligger på en nära horisontell plåtårtad del av undersökningsområdet, inte långt från den sprickdal som utgör gränsen mot nordost. Grundvattenytan har sålunda en obetydlig lutning. Då borrhålet dessutom uppvisar en stor andel tätt berg, blir grundvattenomsättningen ringa, uppehållstiden lång och åldern hög. Skillnaden i ålder och sammansättning hos vattnet från de provtagna sprickorna i detta hål visar klart att dessa har endast ringa hydrauliskt samband.

Borrhål nr 2 i Kråkemåla ligger nära den lokala vattendelaren mellan Götemaren och Östersjön, och grundvattenytan ligger här ca 10 m under markytan. Detta talar för att grundvattnet här är på nedåtgående, vilket jämte den förhärskande högre vattengenomsläppligheten, kan förklara vattnets lägre ålder.

Kråkemålaområdet är med säkerhet inte något särfall i fråga om grundvattenålder. Den allmänna grundvattenomsättningen är här snarast högre än i de båda andra undersökningsområdena. Endast ett par åldersbestämningar på grundvatten från stora djup i urberget från annat håll är kända. En åldersbestämning på 4 010 år, på blandvatten från en 136 m djup urbergsbrunn i Finland, Donner och Jungner /5-9/ och en annan bestämning på 9 785 år på ett blandvatten från ca 300 m djup vid Storjuktan, som SGU utfört för PRAV, visar att åldersbestämningarna från Kråkemåla inte är ex-

ceptionella. I båda dessa fall har förutsättningarna för provtagningen varit något annorlunda, men också här torde uppblandningen med yngre vatten ha lett till för låga åldersuppgifter.

Åldersbestämningarna visar att det har tagit minst 11 000 år för vattnet att gå från inströmningsområdet till en av provtagningspunkterna i borrhålet Kråkemåla 1. Eftersom det daterade provet är taget i en vattenförande spricka på ca 400 m djup, kan man dra slutsatsen att grundvattnet, som går genom ett djupt bergförvar förlagt till inströmningsområdet i ett bergparti med låg vattengenomsläpplighet bör behöva ännu längre tid för att åter komma upp till ytan.

Grundvattnets uppehållstid i berget har beräknats i ett antal typfall med hjälp av de strömningsmodeller som tidigare behandlats. Resultaten har emellertid varit starkt växlande beroende på val av förutsättningar. I regel är de beräknade uppehållstiderna lägre än de åldrar, som bestämts med kol-14-metoden. Detta beror bl a på att uppmätta permeabilitetsvärden som använts i beräkningarna av mättekniska skäl är högre än de verkliga och att deras riktighetsberoende liksom de hydrauliska betingelser, som råder på stora djup, ännu inte är tillfredsställande klarlagda.

5.2 GRUNDTVATNETS SAMMANSÄTTNING

Grundvattnets sammansättning spelar en avgörande roll för avfalls- och kapslingsmaterialens beständighet, samt för berggrundens förmåga att fördröja och kvarhålla avfallsämnen. Bestämmande för grundvattnets sammansättning är det förhållandet att det står i långvarig kontakt med berggrundens mineral, som utgör fasta faser med relativt konstant sammansättning. Särskilt sprickmineralen är viktiga i detta sammanhang. Denna kontakt ger upphov till kemiska jämvikter, som också ger en lagbunden sammansättning åt grundvattnet, oavsett lokala eller tillfälliga störningar, Garrels /5-10/, Eriksson och Khunakasem /5-11/, Jacks /5-12/, Eriksson och Holtan /5-13/. Ett exempel härpå är att grundvattnet som lokalt blir surt, snabbt återtar ett pH kring 8 genom reaktioner med berggrunden. Om vattnet lokalt blir oxiderande genom tillförsel av syre, förbrukas detta åter snabbt genom reaktioner med bergartsmineralens halt av tvåvärt järn. Detta har illustrerats av några orienterande försök som utförts i närvaro av luftens syre:

I luft finmalda prov från Finnsjöområdet bestående av dels granodiorit, dels klorit och dels krossmaterial från en krosszon blandades ut med destillerat vatten med pH 5,6 och redoxpotentialen $E_h + 610$ m V. Efter centrifugering i slutna rör hade E_h i vattnet sänkts till + 0,315, + 0,267 resp + 0,084 m V, medan pH stigit till 8,9, 9,2 resp 9,4.

Grundvattenanalyser från bergbrunnar i Sverige finns inte systematiskt sammanställda. Däremot finns ett omfattande material från Finland, som har samma typ av berggrund och grundvatten som vårt land. Laakso /5-14/ ger en översikt som anger medelhalter och variationsbredd för de flesta huvudämnena i vatten från omkring 1 100 analyser från hela Finland, och Lahermo /5-15/ ger ett urval från kusttrakten i sydöstra Finland. Uppgifterna gäller dock i regel grunda brunnar. De enda analyser av vatten från djup

kring 500 m, som finns tillgängliga gäller gruvvatten, som av flera skäl inte kan betraktas som representativt i detta sammanhang.

Vattenprov från borrhålen i Kråkemåla och Forsmark har analyserats. I Forsmark har prov från 450 m djup tagits med en apparatur konstruerad för att kontakt med luftens syre skall undvikas /5-16/. Analyserna visar att grundvattnets syrehalt är mindre än 0,01 mg/l, (vilket utgör mätbarhetsgränsen) och att allt löst järn är tvåvärt samt att vattnet har en sulfidhalt, bestämd som svavelväte, av 5 mg/l.

I tabell 5-1 som är hämtad ur /5-16/ anges analysvärden från ett antal brunnar och borrhål i norra Uppland. I tabellen anges även inom vilka intervall olika analysvärden bedöms ligga.

Tabell 5-1

Analyser på naturliga vatten från Norra Uppland samt sannolika analysvärden på grundvatten

Analys	Sort	Vattenhygien art. (Wenner et al.) Forsmarksomr.	Norrskedika gruva 78 m	Hallstavik 70 m 1963	175 m 1977	Forsmark I 450 m 77-09-26 ^{x)}	Forsmark I 450 m 77-10-05	Ytvatten Forsmark	Grundvatten urberg sannolik analys intervall max ^{xx)}	Saltpåver- kad brunn i Uppsala- området, 100 m	Lakvatten bentonit- sand 95 ^o C 8 dygn		
Ledningsförmåga	$\mu\text{S/cm}$		580	504		440	460	121	154	400-600	1100	1920	
pH		7,1 - 7,5	7,1			8,1	7,2	7,0	6,9	7,2 - 8,5	9,0 min 6,5	8,0	
Färg	Pt mg/l		50	10				95	85				
KMnO ₄ -förbr	mg/l	16-32	32	11		32	33	73	68	5-35	50	-	140
COD _{Mn}	O ₂ mg/l		8							1,2-9	12,5	-	35
Ca ²⁺	mg/l		} 97 som Ca	} 35 som Ca				9	16	20-60	100	-	
Mg ²⁺	"								16	19	15-30	150	-
Na ⁺	"									(~20-40)	200	-	
K ⁺	"												
Fe-tot	"	0,4 - 0,7	7,9	0,12	2,0	29	15	0,26	0,22	1-20	30	0,13	
Fe ²⁺	"				0,5	11	15			0,5 - 15	30		
Mn ²⁺	"	0,1 - 0,4	1,1	0,08		0,30	0,37	0,05	0,06	0,1 - 0,5	3	0,05	
HCO ₃ ⁻	"	>90	381	246		390	390	53	55	150-400	500	92	
CO ₂	"	0-14	(9 aggr)	(1 aggr)		27	21	7 (aggr)	10 (aggr)	0-25	50	0	
Cl ⁻	"	30-60	18	27		40	45	9	11	20-100	400	558	
SO ₄ ²⁻	"		<1	22		10	9	8,8	7,4	20-40	100	40	
NO ₃ ⁻	"		0,38	2		0,14	0,23	0,72	0,78	0,1 - 2	10	0,01	
PO ₄ ³⁻	"		0,11	0,1				<0,01	0,13	0,1 - 0,6	1	0,19	
F ⁻	"					1,0	1,0	-	-	0,5 - 3	8	-	
SiO ₂	"		19			20	22	2,8?	17	15-40	60	14	
HS ⁻ (tot)	"				<0,1	5	5	-	-	<0,2 - 5	10	-	
NH ₄	mg/l		0,02	<0,1		0,04	0,14	0,10	0,04	0,1 - 0,4	5	0,02	
NO ₂	"		<0,001	0,01		0,075	0,11	0,00	0,0	0,01 - 0,1	0,5	0,00	
°dH	°dH	7-14	13,6	4,9		7,3	7,3	5,0	6,6	6-15	50	12,8	
O ₂	mg/l				(<0,6)	<0,01	<0,01			<0,01	1		
TU	-												
Ålder	år												

x) Grundvattnet kan vara påverkat av ytvatten.

xx) Uppskattad sannolikhet för att max.värdet ej skall överskridas är 95 %.

6 AVFALLSÄMNE NAS FÖRDRÖJNING OCH KVARHÅLLANDE

Olika s k sorptionseffekter och andra kemiska processer gör att i grundvattnet lösta ämnen vanligen fördröjs i förhållande till grundvattnets rörelser. Laboratorieundersökningar och fältförsök har gjorts för att belysa dessa förhållanden av Allard /6-1/, Landström et al /6-2/, Neretnieks /6-3/. Resultaten överensstämmer i stort med vad som anges i litteraturen, Burkholder et al /6-4/.

På grundval av försöksvärden, kan fördröjningsfaktorer för olika ämnen beräknas, Grundfelt /6-5/.

Hithörande frågor behandlas närmare i del IV, kapitel 6.5.

På uppdrag av PRAV har fältförsök rörande fördröjningseffekterna utförts i Studsvik. Vid försöken injicerades spårämnen i borrhål på 70 m djup i sprickigt berg med riklig vattenföring och permeabiliteter omkring 10^{-5} m/s. Grundvattenströmmen påskyndades genom pumpning i ett annat hål och provtagning skedde i ett hål beläget mellan injiceringshålet och pumphålet och i det uppfordrade vattnet. Vattnets gångtid bestämdes med hjälp av ett s k vatten-troget spårämne. Försöken bekräftade bl a fördröjningseffekten på strontium och cesium.

I en senare etapp, som utfördes för KBS räkning, upprepades motsvarande försök efter det att samma bergavsnitt tätats genom bentonitinjektering. Bentonit är ett många miljoner år gammalt naturmaterial, huvudsakligen bestående av mineralet smektit. Detta mineral förekommer på många ställen som naturlig sprickfyllnad i svensk berggrund och har också påträffats vid Kråkemåla och Karlshamn. Det är i kemisk jämvikt med grundvattnet och berggrundens andra mineral, Garrels /5-10/. Försöken pågår fortfarande, men det kan noteras att tillfört strontium ännu efter fyra månader inte kommit fram till mätpunkten femtio meter från det borrhål där det tillfördes. Landström och Klockars /6-6/. Grundvattnets transporttid på denna sträcka var före tätningen ca 10 timmar.

Vissa ämnen deltar i kemiska reaktioner så att de fastare kvarhålls i berget. En sådan fixering av cesium har påvisats i laborieförsök, Levi och Miekely /6-7/. Andra experimentella studier har visat att svavelväte eller mineral med tvåvärt järn redan vid rumstemperatur genom reduktion kan fälla ut olöslig urandioxid ur lösningar av karbonatkomplex med sexvärt uran, Rafalsky, Miller /6-8, 6-9/. Teoretiskt bör detsamma också inträffa med plutonium och andra transuraner.

Många exempel på sådana reaktioner finns i naturen. Sålunda har betydande uranmalmer bildats genom utfällning på detta sätt, Adler /6-10/, Dahl och Hagmaier /6-11/. I Sverige finns urandi-oxid som sprickfyllnad i urberget, bl a i norra Uppland, Welin /6-12/ och i Pleutajokk i Norrbotten, Adamek och Wilson /6-13/. I båda dessa fall har mineralet kvarhållits i berget mer än 1 500 miljoner år. Vid uranfyndigheten, Oklo i Gabon, har man också visat att transuraner, som bildats naturligt, icke utlösts eller bortförts av grundvattnet, /6-14/.

7 FRAMTIDA BERGGRUNDSRÖRELSER

Särskilda utredningar har ägnats åt frågan om de nuvarande berggrundsförhållandena kan komma att försämrats i avgörande grad på grund av framtida sprickbildning och berggrundsrorelser under den långa förvaringstiden. Bildningen av nya sprickor skulle i så fall kunna befaras medföra ökad vattengenomsläpplighet i berget. Framtida förskjutningar skulle också kunna ge upphov till skador på avfallskropparna och deras kapsling. Dessa frågor belyses härnadan.

7.1 BERGRÖRELSER VID KARLSHAMN

Bergblottningarna vid Karlshamns kraftverk ger goda tillfällen att undersöka hur stora förskjutningar, som inträffat vid sprickbildningen i ett utvalt urbergsområde. Där finns nysprängda vertikala vägskärningar och dessutom stora, släta och rena strandhällar med sammanlagt flera tusen kvadratmeters yta. Berggrunden innehåller talrika skivor av ljus pegmatit. Där dessa korsas av sprickor kan man mäta upp hur stor den vertikala (i vägskärningarna) eller horisontala förskjutningen (i strandhällarna) varit i varje enskild spricka alltsedan pegmatiternas bildning. Denna skedde för $1.45 \cdot 10^9$ år sedan, Welin och Blomqvist /7-1/.

Två av varandra oberoende observatörer har var för sig undersökt området. Ingen markant skillnad mellan de båda observatörernas redovisning föreligger. Resultaten sammanfattas i följande tabell:

Förskjutning (mm)	1	1-2	2-5	5-10	10-20
Antal, observatör I	(44) ^a	25	11	5	1
Antal, observatör II	37	16	15	4	
Procent	51	26	16	6	1

a) Beräknat i proportion till antalet sprickor med större förskjutning.

De studerade ytorna har varit utsatta för isrörelser, frostsprängning och andra ytnära uppluckringsprocesser (sprängning i vägskärningarna), som kunnat arbeta mot bergets fria överyta. Bergelement på större djup skulle ha varit allsidigt inspända i det omgivande berget. Man kan därför dra den slutsatsen att de vertikala och horisontala rörelsebeloppen vid likartade sprickor på större djup är mindre än 20 mm. Den resulterande genomsnitt-

liga förskjutningen har sålunda varit mindre än 0,02 mm/miljon år. Motsvarande observationer vid Finnsjön anger femton gånger högre värden. Rörelsernas tidsberoende behandlas senare.

7.2 FÖRKASTNINGSRÖRELSER I UNDERSÖKNINGSOMRÅDENAS OMGIVNING

Urberget visar, utöver sin inre uppsprickning också genomdragande, ibland flera mil långa spricklinjer. Dessa delar upp berggrunden i olikstora block, som förskjutits mer eller mindre i förhållande till varandra. Sådana sprickzoner kallas förkastningar. Storleken av de vertikala förskjutningarna i det subkambriska peneplanet, se 4.3.1, kan fastställas både i trakten kring Finnsjön och kring Kråkemåla. I norra Uppland rör det sig i allmänhet om mindre än 15 m, och i Oskarshamnstrakten ligger rörelsebeloppen kring 30 m. Detta ger en genomsnittlig vertikal förskjutning i dessa rörelsezoner av ungefär 6 cm/miljon år eller mindre under de 570 miljoner år som gått sedan peneplanet utbildades.

Av särskilt intresse är den nordsydliga förkastningen, som går genom Götemargraniten, väster om undersökningsområdet vid Kråkemåla. Det subkambriska peneplanet har här förskjutits ca 25 m, medan det totala rörelsebeloppet på urbergsgelogiska grunder uppges till omkring 500 m, Kresten och Chyssler /4-12/. Detta visar att ca 95% av rörelsen ägt rum för mer än 570 miljoner år sedan, och att den genomsnittliga hastigheten då var ungefär tio gånger högre än därefter.

7.3 FÖRKASTNINGAR I SKÅNE

En av Europas stora rörelsezoner går genom Skåne och kan följas mot sydost ända till Karpaterna, Yanshin et al /7-2/. I Skåne markerar denna zon den skandinaviska urbergssköldens gräns mot den yngre berggrunden söder härom. Gränssonen kännetecknas av förkastningar, som även under de senaste 570 miljoner åren visat stora rörelser.

Röshoff och Lagerlund /7-3/ har studerat två av dessa förkastningar i förhållande till Skånes sedimentära bergarter och deras åldrar, och på så sätt kunnat fastställa de vertikala förskjutningarna under fyra skilda tidsperioder, på respektive 180, 200, 130 och 65 miljoner år. Som resultat erhöles för den större förkastningen en total vertikal språnghöjd på nära 2 000 m, och en genomsnittlig vertikal förskjutning av 3,4 m/miljon år. För de olika perioderna noteras genomsnittliga förskjutningsbelopp av liknande storlek, variationen håller sig mellan 4,9 m/miljon år och 2,6 m/miljon år. Den mindre förkastningen har en total vertikal språnghöjd av omkring 240 m, och dess medelhastigheter varierar på liknande sätt mellan 0,59 m och 0,23 m/miljon år. Röshoff och Lagerlund betonar att dessa uppgifter anger medelvärden tagna över långa tidsperioder, och att rörelserna antas ha skett i snabba steg, åtskilda av långa perioder av nära stillastående.

Det är också av intresse att de yngre bergarterna i Skåne visar färre förkastningar än det äldre underliggande urberget. Antalet förkastningar i kritavlagringarna utgör bara 20% av urbergets. Ungefär en tredjedel av förkastningarna i silurlagren, och hälften av dem i triaslagren, når inte ned i urberget. Detta överens-

stämmer med förhållandena i många andra områden med sedimentär berggrund, och har också efterbildats i instruktiva modellförsök /7-4/.

7.4 UNGA BERGRÖRELSER AV FÖRKASTNINGSTYP

Bergrörelser, som inträffat i Sverige under eller efter istiden och ännu pågår, är sedan länge kända, men har ofta betraktats med viss tvekan. I AKA-utredningen påtalades särskilt förekomsten av sådana rörelser i sydvästra Sverige. Sedan dess har nya och mer klarläggande observationer framkommit. En sammanställning av dessa och en översiktlig regional inventering av unga brottzoner i södra Sverige har utförts av Röshoff och Lagerlund, /7-3/. Ett motsvarande arbete för mellersta och norra Sverige redovisas av Lagerbäck och Henkel, /7-5/.

De viktigaste exemplen på unga förkastningar finns, enligt dessa sammanställningar vid Kullaberg i Skåne och i vissa geologiskt nykarterade delar av Norrbotten och Västerbotten. Ett område med indicier på ung uppsprickning av annan karaktär har dessutom uppmärksamats på Fulufjället i Dalarna. Också de oregelbundenheter i landhöjningen, som påtalats av Mörner /7-6/, bör nämnas här.

Den genomförda inventeringen har omfattat studier av satellitbilder och genomgång av topografiska kartor och flygfoton. Några säkra, tidigare okända, unga förkastningar har inte framkommit, möjligen med undantag av en brottzon vid Ekorva på topografiska kartbladet Åsheda.

Detta utgör ingen garanti för att unga förkastningar inte förekommer på andra håll, men talar för att stora delar av Sverige saknar klart markerade exempel på sådana rörelsezoner. Särskilt borde det ha funnits goda möjligheter att upptäcka unga förkastningar, om sådana funnes, i de utpräglade flacka områden, där KBS berggrundsundersökningar utförts.

För en fullständig belysning av bildningen och betydelsen av hittills rapporterade unga bergrörelser krävs fortsatta undersökningar. Ett viktigt drag, som återkommer i de anförda rapporterna, är dock att dessa unga rörelser är anslutna till äldre rörelsezoner i urberget. Om förhållandena vid Kullen i Skåne heter det att förkastningarna anlades för mer än 570 miljoner år sedan, och att rörelser därefter skett under flera geologiska perioder, bl a efter istiden. Likaså konstateras, att de unga förkastningarna i Norrbotten och Västerbotten i hög grad följer äldre förkastningar. Även Mörner visar att av honom påtalade oregelbundenheter i strandlinjer och landhöjningshastighet orsakas av att rörelser fortfarande sker i urbergets bergartskontakter och förkastningslinjer. Detta överensstämmer med de grundläggande geologiska iakttagelserna att större sprickor och sprickzoner är mycket gamla och åter har aktiverats i senare deformationsperioder, Cloos /7-7/. Detta har även bekräftats i en stor genomgång av hela Eurasiens struktur av Yanshin et al /7-2/, och i Norden av Tuominen et al /7-8/ samt Strömberg /7-9/. Kännedomen om befintliga sprickzoner är av stor vikt för ett bergförvar. Genom att lokalisera förvaret till ett område utan stora förkastningslinjer, och till ett berggrundsblock, som begränsas av svaghetszoner, där eventuella spänningar kan utlösas, kan påverkan av unga förkastningsrörelser undvikas.

BERGMEKANISKA STUDIER

En orsak till att unga sprick- och förkastningsrörelser följer äldre spricklinjer är att dessa representerar redan befintliga svaghetszoner, där uppkommande spänningar lättare kan utlösas. Detta har belysts med bergmekaniska beräkningar av Stephansson /7-10/. Resultaten visar att risken för sprickbildning avtar när antalet befintliga sprickor ökar och avståndet mellan dem minskar. Ett beräkningsexempel visar att en förskjutning av 10 m/km i berg med ett sprickavstånd på två meter inte ger upphov till nya sprickor. Rörelsen fördelar sig i stället jämt på befintliga sprickor, och ändringen i sprickvidden, och därmed i vattengenomsläppligheten, blir försumbar.

I detta sammanhang bör också redovisas att vissa bergmekaniska parametrar har bestämts i laboratorium på prov av borrhärdar från områdena vid Finnsjön och Kråkemåla. Prov på material från Karlshamn pågår. Hittills erhållna resultat framgår av tabell 7-1.

Tabell 7-1. Bergmekaniska parametrar från borrhärdar bestämda vid avdelningen för bergmekanik vid Luleå högskola.

	Tryckhåll- fasthet	Draghåll- fasthet	Elastici- tetsmodul 50% brott- last	Poisson's tal
Kråkemåla 1 (6 prov)	MPa	MPa	GPa	
M, (medelvärde)	188,2	8,92	61,4	0,20
d, (Standard- avvikelse)	17,8	0,94	4,3	0,03
Kråkemåla 2 (6 prov)				
M	152,7	6,77	57,1	0,21
d	18,7	1,59	6,7	0,05
Finnsjön 1 (6 prov)				
M	252,5	13,47	81,5	0,18
d	7,7	2,30	3,6	0,01
Finnsjön 2 (6 prov)				
M	228,8	13,50	83,6	0,21
d	11,2	1,50	2,4	0,02

Inga mätningar av berggrundens spänningstillstånd (egenspanningar) har företagits inom undersökningsområdena. Ett relativt stort antal spänningsmätningar har emellertid utförts i skandinavisk berggrund på varierande djup ner till ungefär 900 m under åren 1951-1976. Resultaten visar en mycket stor spridning både geografiskt och lokalt. En del av denna spridning synes bero på att tidiga mätningar /7-11/ angivit väsentligt större spänningar än

senare mätningar /7-12, 7-13/ med förbättrade och mera väldefinierade mätmetoder. Det föreligger emellertid otvivelaktigt reella starka regionala och lokala variationer hos bergets egenspanningar förorsakade av olika geologiska faktorer, topografi m m /7-13/.

Allmänt kan konstateras att mätningarna visar på förekomsten av större horisontalspänningar än som kan förväntas på rent elasticitetsteoretiska grunder. Samma förhållande gäller för den maximala skjuvspänningen, som bestämmer risken för brott i bergmassan. Bergets skjubrotthållfasthet ökar emellertid nära linjärt med ökande djup på grund av trycket från ovanliggande bergmassor /7-14/. Att döma av de utförda bergspänningsmätningarna finns det därför, bortsett från enstaka undantagsfall, betryggande säkerhetsmarginaler mot bergbrott på grund av bergets egenspanningar på aktuella djup. Detta gäller även om man beaktar de tidigare mätningarnas resultat. Denna slutsats står också i full överensstämmelse med praktisk erfarenhet från gruvbrytning på olika djup.

Vid lokalisering av slutförvar i berg ingår givetvis bergspänningsmätning i den arsenal av förundersökningsmetoder, som kommer att utnyttjas för att fastställa lämpligt läge.

7.6 SPRICKBILDNINGSPROGNOS

En prognos rörande nybildningen av sprickor och sprickrörelser under förvaringstiden kan göras genom att utgå från enkla genomsnittsvärden och undersöka vilka avvikelser, som kan väntas. För varje område kan man då utgå från berggrundens ålder och den lokala sprickfrekvensen. De berggrundssprickor som finns utgör nämligen en naturlig registrering av alla tidigare tillfällen, när bestående sprickor bildats.

Som exempel kan man ta en 1 000 m lång sträcka i en bergart, som är 1 000 miljoner år gammal och där antalet sprickor också är 1 000 (medelavståndet mellan sprickorna är sålunda en meter). Då erhålles att i genomsnitt en ny spricka bildats på en miljon år. Antag att denna sträcka är representativ för berget runt ett bergförvar. En förvaringstid på en miljon år med genomsnittliga bergrörelser innebär då att sprickligheten, och därmed vattengenomsläppligheten i berget, ökar med en tusendel av det nuvarande värdet. En mera kvalificerad prognos av denna typ, rörande framtida förkastningar, har utarbetats av Ringdahl et al /7-15/. En sådan prognos är sålunda beroende av om bergrörelserna under prognosperioden är högre eller lägre än genomsnittet. Vidare måste hänsyn tas till att risken avtar för att en ny spricka bildas vid en given deformation, ju mindre avståndet mellan redan befintliga sprickor är.

Frågan huruvida förvaringstiden kommer att karakteriseras av bergrörelser, som motsvarar ett medeltal för en mycket lång tid, kan belysas om bergrörelserna sätts in i sitt tidsmässiga geologiska sammanhang. Det är då viktigt att först konstatera att sprickbildningen i urberget utanför Skåne till allra största delen skett för mer än 570 miljoner år sedan, dvs före bildningen av det subkambriska peneplanet. I Karlshamnsområdet ägde sprickbildningen huvudsakligen rum för ca 900 miljoner år sedan eller tidigare. Sprickmönstret vid Kråkemåla är i huvudsak 1,3 miljar-

der är gammalt. I Finnsjöområdet talar sprickornas allmänna mineralisering och närheten till de jotniska bergarterna vid Gävle för en liknande eller högre ålder, se Wiman /7-16/, Welin /6-12/, Gorbatshev /7-17/, samt Welin och Lundqvist /7-18/.

Den allmänt ringa omfattningen av berggrunds rörelser i urberget under de senaste 570 miljoner åren framgår av den stora utbredningen och begränsade deformationen av det subkambriska peneplanet och av den i huvudsak ostörda skiktningen i överlagrande alunskifferar och kalkstenar. Inträffade störningar i peneplanet utgörs av en upphöjning av landytan på upp till några hundra meter, som kan följas från västkusten till Skellefteå och utgör peneplanets västgräns. Dessutom finns redan tidigare nämnda förkastningar, som delar upp urberget i berggrundsblock. Normalt är förkastningarna branta, och förskjutningen övervägande vertikal.

Allt detta visar att sprickbildningen och rörelserna i urberget under de senaste 570 miljoner åren varit små och ligger under genomsnittet för en längre period. Ovan anförda data från Göttemarförkastningen visar att deformationsbeloppet där varit ca tjugo gånger mindre, och deformationshastigheten mellan fem och tio gånger lägre, under denna tid än tidigare. Liknande förhållanden har också redovisats från andra håll av Röshoff och Lagerlund /7-2/. Denna avtagande tendens hos berggrörelserna innebär att den tidigare prognosen utgår från för höga genomsnittsvärden. Förändringarna i berget under förvaringstiden blir sålunda väsentligt mindre.

Rörelserna i urberget har emellertid inte heller varit likformiga under de senaste 570 miljoner åren. Toppar i uppsprickningen kan fastläggas med hjälp av det allmänna samband, som finns mellan jordskorpan uppsprickning och vulkanisk aktivitet. Följande åldersbestämningar har rapporterats för vulkaniska bildningar i Sverige, som är yngre än urberget, se Klingspor /7-19/, Byström et al /7-20/, Kresten et al /7-21/:

- 540 miljoner år, alkalina bergarter från Alnön och Åvike nära Sundsvall.
- 450 miljoner år, bentonit från Kinnekulle i Västergötland.
- 295-280 miljoner år, basaltiska bergarter i norra Skåne och Västgötaberget, alkalina bergarter i Särna.
- 167 miljoner år, basalter, norra Skåne.
- 108 miljoner år, basalter, norra Skåne.

Ingen yngre basaltisk vulkanism har förekommit i Sverige, men förkastningar i Skånes kritavlagringar visar på rörelser som ägt rum under de senaste 65 miljoner åren.

Dessa data visar att också de senaste 570 miljoner åren, med sitt lägre genomsnittsvärde på sprickrörelserna, haft perioder med högre aktivitet. Koncentrationen av dessa företeelser till Skåne är tydlig.

Åldersbestämningar ger möjlighet att sätta in rörelserna i urberget i ett större sammanhang. Tre stora och genomgripande deformationsperioder har under de senaste 570 miljoner åren lett till omfattande bergskedjeveckning, granitbildning, brottrörelser och vulkanism i områden mellan Medelhavet och Nordatlanten. Under hela denna tid har det nordiska urbergsområdet varit ett utpräglat

stabil område, vars ringa deformation bevisas av det subkambriska peneplanet och överlagrande bergartsskikt. Tilläggas kan att många andra urbergsområden i världen visar ett motsvarande uppträdande, medan områden med starka bergrörelser och livlig vulkanism också i övrigt kännetecknas av andra förhållanden i fråga om ålder, bergartstyper och geologiska strukturdrag.

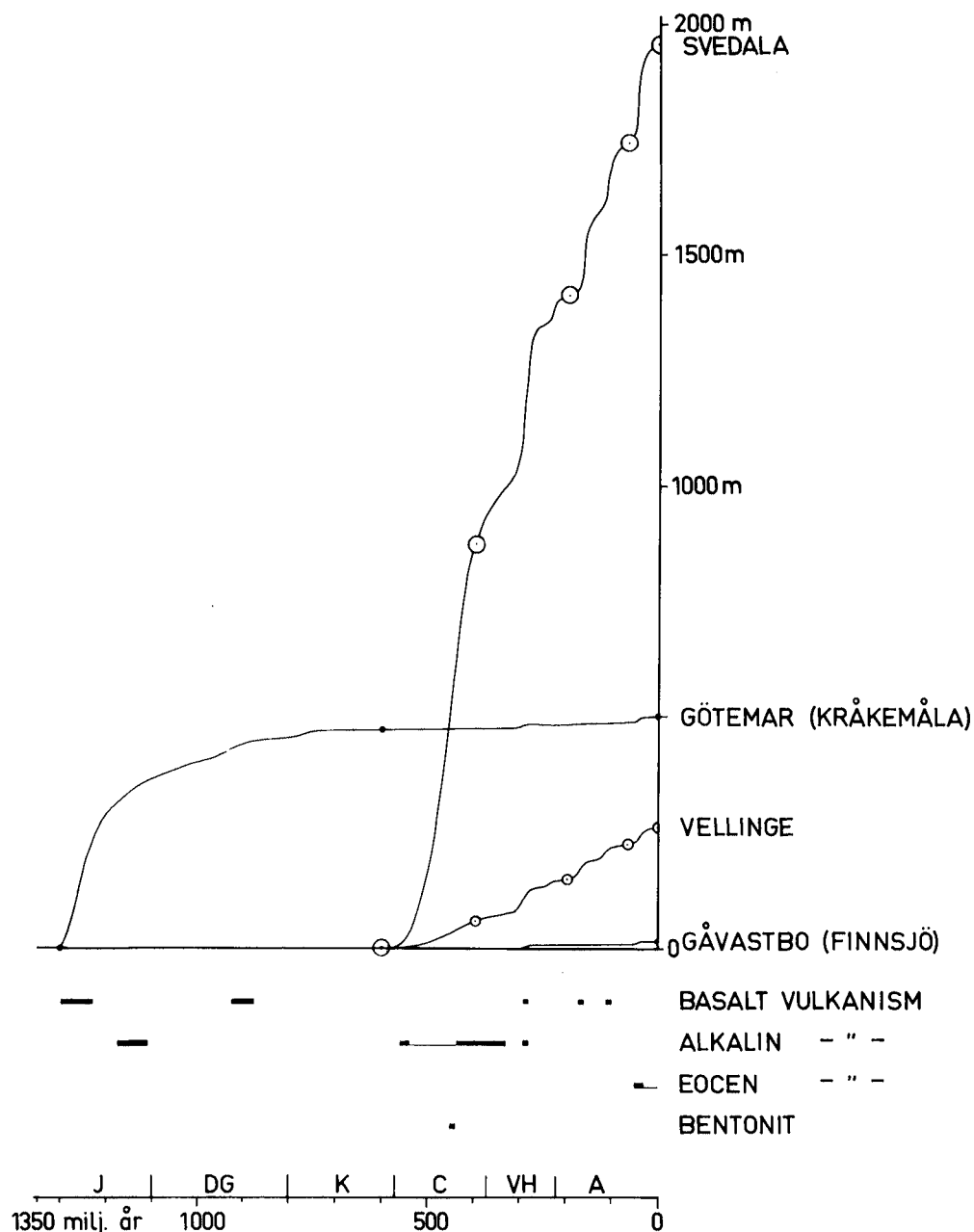
Mera i detalj kan noteras att basaltvulkanism i Sverige och uppbyggnaden av det subkambriska peneplanet i samband med denna för ca 290 miljoner år sedan i tiden sammanfaller med motsvarande företeelser i bl a Grönland, Europa, Östafrika, Madagascar och västra Australien, se Kent /7-22/, Turner & Verhoogen /7-23/. På liknande sätt kan den senare basaltiska vulkanismen och de yngre förkastningsrörelserna i Skåne tidsmässigt knytas till andra områden, av vilka Nordatlanten samt de kontinentala delarna av Europa norr om Alperna är av största intresse för vår prognos.

En översikt över berggrunds-rörelserna och deras åldersförhållanden i Nordatlanten har nyligen lämnats av Bott /7-24/. Den vulkaniska aktiviteten i området sammanfattas av Turner & Verhoogen. Den geologiska utveckling som skildras började för ungefär 180 miljoner år sedan, och kulminerade för ca 40 miljoner år sedan. Då sträckte sig den vulkaniska aktiviteten från Grönland, Jan Mayen och Spetsbergen ända till Irland, samtidigt som Nordeuropa avskildes från Nordamerika. Bergrörelserna i Skåne kan ses som en marginell del av detta skeende, där vulkanism utgjorde en inledande fas. Samma skeende berörde också, fastän långt svagare, övriga delar av nordvästra Europa. Hit hör sannolikt den svaga uppvälvning som utgör det sukambriska peneplanets västgräns i Sverige, den långt större upplyftning som givit upphov till Norges branta kust mot Atlanten, samt den nedsänkning av de tidigare skogbärande delarna av Östersjön, som utgör källan till den baltiska bärnstenen. Undersökningarna i Nordatlanten gör det sålunda möjligt att följa utvecklingen också under de senaste 100 miljoner åren, fastän observationerna i Sverige beträffande denna tid är mycket ofullständiga. Minskningen i bergrörelserna under de senaste 40 miljoner åren, liksom det faktum att vulkanism numera i huvudsak är begränsad till Island, visar att hela regionen nu befinner sig i en period med obetydliga och avtagande bergrörelser.

En motsvarande bild erhålles av de kontinentala delarna av Europa norr om Alperna, Rutten /7-25/. I denna region har det funnits en något splittrad vulkanprovins, som sträckte sig från Frankrike till Polen. Aktiviteten här sätts i samband med sena faser i Alpernas bildning. Liksom i Nordatlanten nådde vulkanism i denna provins sitt maximum i tertiär tid, och har sedan dess avklingat. Det sista vulkanutbrottet skedde för 11 000 år sedan i södra Tyskland. Självfallet kan bergrörelserna i Norden också ses som en del av denna utveckling.

De rörelser, som ägt rum vid några förkastningar i Sverige under olika skeden och som kan härledas ur geologiska iakttagelser, har sammanställts i fig 7-1 för att åskådliggöra rörelseförloppet och skillnaden mellan urbergsskölden och angränsande områden.

Det finns sålunda ett mycket stort regionalt observationsunderlag för slutsatsen att bergrörelserna i Sveriges urberg är en del av ett omfattande och långvarigt skeende, som tydligt är i långsamt avklingande. Realistiska värden på hur snabbt nya sprickor kan



Figur 7-1. Diagram över förkastningsrörelser, deformationsperioder och vulkanism under de senaste 1350 miljoner åren. Diagrammet visar höjningen i meter av det upplyfta bergblocket gentemot det sänkta vid fyra studerade förkastningar. Kurvorna mellan mätpunkterna är dragna med hänsyn till urbergets peneplanbildning (flacka kurvdelar), vulkanism (branta kurvdelar) samt den sedimentära berggrundens karaktär och tjocklek. De mindre branta kurvdelarnas höjdlägen för förkastningarna i Svedala och Vellinge är approximativa mellan mätpunkterna. De stora rörelserna för mellan 400 och 600 miljoner år sedan i Skåne (Svedala och Vellinge) har endast obetydliga motsvarigheter inom urbergsområdet. Endast Götemarksförkastningen kan följas tillbaka längre än 600 miljoner år. Bentonit indikerar omfattande vulkanism i området för den Skandinaviska fjällkedjan. Eocen vulkanism ägde rum utanför Skandinavien. Tjockleken av den vertikala axeln svarar mot de närmast kommande 4 miljoner åren.

Följande deformationsperioder har markerats på tidsaxeln:

J = Jotnum	C = Caledon
DG = Dalsland - Grenville	VH = Variskisk - Hercyn
K = Katanga	A = Alpin

uppstå måste därför ligga klart under de medelvärden, som erhålles vid prognoser, som grundas enbart på berggrundens ålder och den lokala sprickfrekvensen. Härav följer att förändringarna i bergets sprickighet och vattengenomsläpplighet på grund av berg-rörelser under förvaringstiden kommer att vara så små, att de inte kan menligt påverka funktionen hos ett bergförvar som är lämpligt lokaliserat i förhållande till befintliga kross- och sprickzoner.

7.7 LANDHÖJNING OCH NEDISNINGAR

Den pågående landhöjningen i Sverige har studerats på grundval av fältobservationer, Mörner /7-6/ och på grundval av tyngdkraftsförhållanden, Bjerhammar /7-26/. Trots skillnaderna i ursprungsdata och analysteknik erhålles i stort sett likartade resultat. På några punkter finns emellertid avvikelser, som bör bli föremål för vidare studier.

Sammanfattningsvis kan sägas att landhöjningen efter istiden har haft sitt maximum vid Ångermanlands kust och där nått ett maximumbelopp på nära ett tusen meter. I huvudsak representerar den en återgång efter den nedpressning, som förorsakades av belastningen från inlandsisen. Enligt Mörner avslutades denna återhämtning för 2 000 - 3 000 år sedan och nu pågående landhöjning skulle ha andra orsaker. En återhämtning från den höjning av västra Skandinavien och sänkning av Östersjön, som berörts i föregående avsnitt, skulle eventuellt kunna förklara ett sådant förlopp. Enligt Bjerhammars analys pågår återhämtningen efter inlandsisens nedpressning fortfarande.

Sprickbildningen och rörelser i berggrunden i samband med landhöjningen och vid en kommande istid kan bedömas på grundval av den befintliga sprickfördelningen i berggrunden. Permeabilitetsvärdena från utförda undersökningsborrhål visar att uppsprickningen i huvudsak är begränsad till de översta 100 eller 200 m av berggrunden. Djupare delar, som varit med om samma rörelser har god täthet. Detta visar att landhöjningen, och den föregående nedpressningen, inte i sig påverkat berggrundens täthet. Härtill kommer att det totalt har förekommit tio till tjugo tidigare kvartära nedisningar, Kukla /7-27/, och att berggrundens nuvarande beskaffenhet avspeglar den sammanlagda effekten av dessa. Detta leder till slutsatsen att en ytterligare nedisning inte kan störa ett djupt liggande bergförvar.

7.8 JORDSKALV I SVERIGE

Hur ett bergförvar påverkas av jordbävningar har nyligen belysts av Dowding /7-28/ och Yamahara et al /7-29/. Den senare har särskilt studerat japanska förhållanden. Inledningsvis konstateras att inga allvarliga jordbävningsskador rapporterats från Japans många gruvor och tunnlar. Det visas också med bergmekaniska beräkningar att jordbävningrörelser i berg avtar snabbt med djupet. På ca 100 m djup uppgår berggrörelserna till mellan 1/4 och 1/3 av vad de är vid ytan. Den största inducerade bergspänningen vid hundra meters djup, när ytaccelerationen är $2,24 \text{ m/s}^2$, uppgår endast till 1,2 MPa. Även vid den största tänkbara jordbävningen i Japan beräknas den maximala spänningen uppgå till endast 3,0 MPa. Dessa spänningar är försumbara för i Sverige

aktuella bergarters hållfasthet. Dowding visar med praktikfall att inga skador inträffat på bergrum vid jordskalv, där accelerationen vid markytan varit 1.9 m/s^2 eller mindre. Detta motsvarar intensiteten VII - VIII enligt den modifierade mercalliskalan (MM), som är ett mått på verkningarna vid markytan. Mindre skador, stenfall och sprickbildning, har observerats vid accelerationer upp till 5 m/s^2 motsvarande intensitet VIII - IX. Det största kända jordskalvet i Femnoskandia, vid Oslo 1904, hade en intensitet av VII - VIII. Förvarets tunnlar och förvaringshål återfylls med packat jordmaterial, varför mindre skador i ytliga bergpartier är betydelselösa.

I Sverige är jordskalv sällsynta och svaga. Det tidigast kända inträffade år 1497. Sedan 1891 har en systematisk rapportering av jordskalv skett, Båth /7-30, 7-31/. Fr o m 1951 sker registreringen med känsliga instrument så att också skalv till havs och i obebodda trakter kommer med. En översikt över kända observationer t o m 1972, har givits i en utredning av Kulhánek och Wahlström /7-32/. En karta över svenska jordskalv 1951-1976, med kommentarer och annat material har erhållits av Båth /7-33/.

Skalvens frekvens uppvisar stora variationer under observations-tiden. Deras geografiska fördelning i Sverige och angränsande områden har däremot varit relativt oförändrad.

Sydöstra Sverige uppvisar ytterst få skalv. På den preliminära kartan i fig 7-2, som ställts till förfogande av Båth /7-33/ visas för perioden 1951-1976 endast tre skalv, som ligger i nära anslutning till förkastningszonen Roxen - Motala. Huvuddelen av skalven ligger i stället i ett stråk från västkusten, över Vänerregionen, där de är relativt talrika, mot Gävle, och sedan längs Bottenvikskusten. Från Bottenvikens nordligaste del svänger stråket mot nordväst och vänder sedan mot sydväst i Norska havet och längs med Norges kust och bildar därigenom en krans runt centrala Skandinavien /7-34/. I sin fördelning ansluter sig skalven sålunda till berggrunds rörelserna vid och utanför norska kusten, och i Sverige kan man se ett samband med förkastningslinjerna i Väner-Vätternregionen, det subkambriska peneplanets västgräns, samt områdena med unga bergrörelser i Skåne, Västerbotten och Norrbotten. Detta talar, som framhållits av Kvale /7-35/, för att de skandinaviska jordskalven står i samband med berggrunds rörelser, som är oberoende av istiden.

3 SAMMANFATTNING OCH BEDÖMNING

Berggrunds- och grundvattenförhållandena har undersökts i fem områden, vid Karlshamn, Finnsjön, Kråkemåla, Ävrö och Forsmark.

I de tre förstnämnda områdena har stora volymer av enhetligt och bra berg med en vattengenomsläpplighet kring 10^{-9} m/s eller mindre påträffats.

Karlshamnsområdet uppvisar minsta förekomsten av kross- och sprickzoner.

Grundvattenflöden i bra berg inom områdena på djup kring 500 m har beräknats till 0,2 l/m² och år eller mindre.

Åldersbestämningar på grundvatten visar att grundvattnets transporttid till jordytan från ett bergförvar i ett inströmningsområde kan uppgå till flera tusen år.

Djupa grundvattenprov har visats vara syrefria och svagt alkaliska med pH mellan 7 och 9. De innehåller tvåvärt järn i lösning. Sulfid, bestämd som svavelväte, har påträffats i grundvattnet i Forsmark.

De radioaktiva avfallsämnena, med undantag av jod och teknetium, fördröjs i berggrunden, i förhållande till grundvattnets rörelser.

Uran, plutonium och andra transuraner kan fällas som olösliga oxider av tvåvärt järn och sulfid eller svavelväte i lösning.

Effekten av framtida bergrörelser i bergpartier utan större sprick- och rörelsezoner kan försummas.

Förändringarna omkring ett bergförvar, som orsakas av utsprängningen och avfallets värmealstring, är mycket lokala. Risken för att nya strömningsvägar för grundvattnet skall uppstå på detta sätt är försumbar.

Ovanstående ger, tillsammans med säkerhetsanalysen, grund för bedömningen att de tre närmare undersökta områdena Karlshamn, Finnsjön och Kråkemåla uppvisar de grundläggande förutsättningar som krävs för ett säkert bergförvar för högaktivt avfall. Det förutsättes därvid att detta utformas med hänsyn till befintliga lågpermeabla bergpartiers geometri. Undersökningsområdena på Ävrö och vid Forsmark har visat sig ha sämre förutsättningar och undersökningarna där har inte fullföljts.

Med dagens kunskapsnivå är av de undersökta områdena Blekinge kustgnejsområde från geologisk synpunkt mest attraktivt för ett slutförvar.

Även den något förgnejsade graniten vid Finnsjön erbjuder synbarligen stora volymer med god täthet. Förekommande interna sprick- och krosszoner kan dock ge vissa tekniska problem av för tunnel- och bergrumsbyggnad normal art. Till skillnad mot Blekinge kustgnejs ger denna bergartstyp större valfrihet vid lokaliseringen av ett framtida bergförvar, eftersom liknande bergartsförhållanden är vanliga i stora delar av sydöstra Sverige.

Götemargraniten vid Kråkemåla visar, trots partier med mycket god täthet, flera drag, som kan kräva större förstärknings- och tätningåtgärder under anläggningsskedet. Hit hör den lägre hållfastheten, det regelbundna spricksystemet med utbredda horisontella sprickytor och den lokalt rikliga vattenföringen, som också kan vara förbunden med radonproblem.

De tre undersökningsområdena ger en tydlig prioritetsordning - Blekingegnejs, förgnejsad granit i Finnsjöområdet och odeformerad stockformig granit i Kråkemålaområdet. Detta bekräftar tidigare erfarenheter av dessa bergartstypers vattenföring och struktur. Mot denna bakgrund kan också andra gnejsområden vara av intresse.

9 FÖRSÖKSSTATION STRIPA

9.1 ÖVERSIKT

9.1.1 Motiv för en försöksanläggning

Grundläggande data för berg på stort djup under markytan, 500 - 1000 m, är i dag tillgängliga endast i mycket begränsad omfattning. För framtida lokalisering och konstruktion av ett slutförvar för högaktivt avfall bör detta kunnande kompletteras och en försöksstation på stort djup är därvid av stort värde. Den ger även möjlighet till demonstration av arbetsmetoder och utformning av slutförvarets olika delar.

När KBS organiserades i slutet av 1976 visade det sig att möjligheter fanns att i projektet inkludera en dylik försöksanläggning i Stripa Gruva, 15 km norr om Lindesberg. Malmen i gruvan var i det närmaste slut och järnmalmsbrytningen skulle upphöra i början av 1977. Omedelbart intill gruvan finns ett granitmassiv, som var direkt åtkomligt på en nivå 350 m under markytan. Då dessutom den personal och utrustning som behövdes för en omedelbar start av bergarbetena var tillgänglig kunde stora tids- och kostnadsvinster härigenom uppnås jämfört med en nyetablerad försöksstation.

Motiven för en försöksanläggning i berg är att man där kan utföra bl a

- utprovning och demonstration av arbetsmetoder för ett slutligt avfallsförvar
- noggrann karaktärisering och kartläggning av ett bergmassiv på stort djup
- analyser och jämförelser mellan olika mätmetoders resultat och verkliga förhållanden syftande till säkrare bedömningar vid framtida bergundersökningar
- undersökningar av hur sprängning, uppvärmning och injektering påverkar berget och dess egenskaper
- analys av grundvattenrörelser och grundvattnets sammansättning på stort djup
- undersökningar av egenskaper hos material som kan ifrågakomma i ett slutförvar

För planering av lämpliga undersökningar kontaktades ett antal forskare och institutioner med bergteknisk sakkunskap. En rådgivande expertgrupp, "Geogruppen", bildades med uppgift att bl a föreslå lämpliga undersökningar i Stripa. Gruppen medverkar även i utvärderingen av provresultaten.

Hittills har undersökningar inom följande områden påbörjats i Stripa

- Sprängningars inverkan på omgivande berg
- Bergkaraktärisering
- Bergspänningsmätningar
- Materialegenskaper hos Stripagraniten
- Bergets permeabilitet vid olika tryck och temperatur
- Temperaturspänningar
- Injekteringsstudier
- Vattenanalyser

Huvuddelen av de resultat som erhålles vid KBS försök i Stripa avses att bli redovisade under första kvartalet 1978.

9.1.2 Anläggningsarbeten

Sprängningsarbetena för provstationen påbörjades i december 1976. De utsprängda berggrummens slutliga utseende framgår av fig 9-1. Tunnlarna har sprängts med sk försiktig sprängning och i det närmaste cirkulär eller oval sektion för att uppnå lägsta möjliga påkänningar på berget. Tunnelarean har varierat från 12 m² till 26 m² beroende på behovet av utrymme för arbetsmaskiner eller plats för provverksamheten.

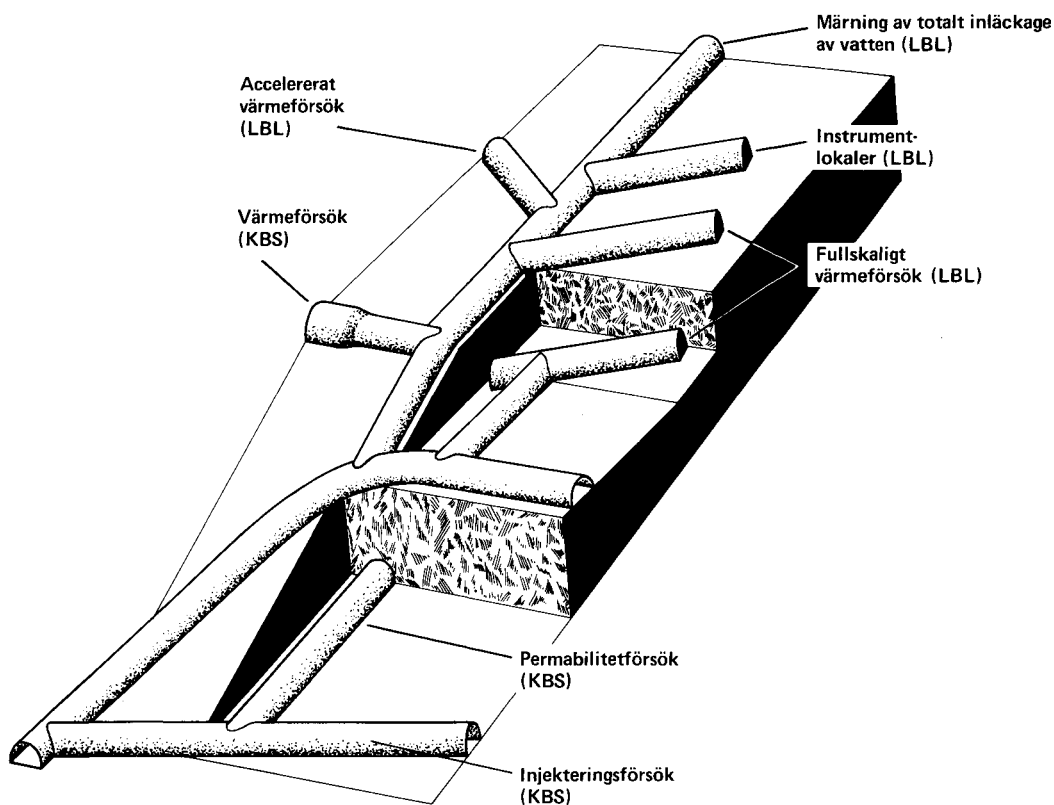
Stripagranitens kvalitet och hållfasthet är mycket god. Inga förstärkningsåtgärder har ansetts nödvändiga och inga ras har observerats.

För att kunna utföra planerade prov har ett stort antal hål med varierande längder och diametrar borrats från tunnlarna. Totalt har för KBS egna prov borrats ca 1500 m hål utöver vad som erfordras för sprängningsarbetena. Hålen har till största delen diamantborrats med en diameter av 56 mm.

Sprängnings- och borrhningsarbetena har pågått i ca 10 månader och sysselsatt omkring 20 man.

9.1.3 Samarbete med US ERDA

KBS provverksamhet i Stripa har rönt internationellt intresse och under våren 1977 kontaktades KBS av en grupp från USA för att diskutera möjligheterna till ett gemensamt forskningsarbete för avfallsförvaring i kristallint berg. Under försommaren klargjordes förutsättningarna för ett samgående i Stripa och ett avtal



Figur 9-1. KBS försöksstation i Stripa. De utsprängda berggrummens utseende och de olika provens placering är illustrerade i figuren.

undertecknades mellan SKBF, Svenska Kärnbränsleförsörjning AB, och US ERDA, United State Energy Research and Development Administration. Enligt detta avtal skall SKBF svara för gruvans öppethållande t o m oktober 1979, bergsprängningsarbeten, bergborrning (ca 3800 m) och viss service på arbetsplatsen. US ERDA å sin sida svarar för och bekostar det egentliga undersökningsarbetet. Handläggningen av de svenska åtagandena åvilar KBS under dess verksamhetstid.

US ERDA har uppdragit åt företaget Union Carbide att administrera och genomföra ett omfattande utvecklingsarbete avseende slutdeponering av högaktivt avfall. För detta arbete har inom Union Carbide organiserats en särskild enhet, OWI, Office of Waste Isolation. Genomförandet av Stripa-programmet har i sin tur anförtrotts en grupp forskare vid Lawrence Berkely Laboratory, LBL, vid University of California.

Forskningsprogrammet har uppgjorts av LBL, men SKBF/KBS hålls kontinuerligt informerade om planering och genomförande av försöken och har även möjlighet att påverka försöksuppläggningsen. De uppnådda resultaten blir parternas gemensamma egendom.

9.2 UNDERSÖKNINGAR I KBS REGI

9.2.1 Bergkaraktärisering

För att kunna värdera alternativa förläggingsplatser för hög-aktivt avfall krävs tillförlitliga och ekonomiskt rimliga metoder för fastställande av bergets egenskaper. Provstationen i Stripa ger möjlighet att prova och värdera sådana undersökningsmetoder. Därvid måste Stripa-granitens egenskaper vara väl kända. Därför genomförs en s k bergskaraktärisering, vari bl a ingår

- sammanställning av tillgänglig geologisk information om det aktuella området
- sprickkartering av de bergtyper som frilagts för provverksamheten
- kärnkartering och TV-granskning i diamantborrhål nära tunnlarna före och efter sprängning
- undersökningar i ett vertikalt djupborrhål från gruvans botten (från nivån 410 m till 900 m)
- vattenförlustmätningar i samtliga borrhål. Där sprängning skett i hålets närhet, utföres mätning såväl före som efter sprängning

Den dominerande bergarten i försöksområdet i Stripa gruva är en rödligt till grå, medelkornig, massformig granit. I graniten förekommer några få smala, brant stående gångar av pegmatit och yngre diabas.

Kornstorleken hos granitens huvudmaterial varierar mellan 1 och 5 mm. Ett typiskt prov visar följande mineralsammansättning

kvarts	44%
plagioklas (delvis omvandlad)	39%
mikrolin	12%
klorit	3%
muskovit	2%

Graniten i Stripa kan sägas vara representativ för en stor grupp av mellersta Sveriges yngre graniter.

Graniten är, trots sin relativt höga sprick-frekvens, mycket tät med permeabilitetsvärden kring 10^{-10} m/s. Detta kan förklaras av den höga sprickfyllnadsgraden.

9.2.2 Bergspänningsmätningar

Avsikten med proven är att fastställa det primära spänningstillståndet i Stripa-graniten, vilket dels behövs för vissa andra försök, dels bildar underlag för teoretiska beräkningar av spännings- och strömningsförhållanden.

De tredimensionella spänningstillstånden har uppmätts i 19 punkter längs ett 20 m långt borrhål från en sidoort. Vid mätningarna har mätceller som bygger på Leemans metod använts.

Mätningarna har visat att den största huvudspänningen är 10 MPa och riktad parallellt med granitens strykning. Den mellersta huvudspänningen, 5,7 MPa, är nära horisontell och riktad vinkelrätt mot kontakten. Minsta huvudspänningen är 2,7 MPa. Den uppmätta vertikala spänningen 9,8 MPa, är av samma storleksordning som den teoretiskt beräknade, 9,2 MPa. Detaljerad redovisning av erhållna resultat återfinns i KBS Teknisk rapport nr 49 /9-1/.

9.2.3 Materialegenskaper hos Stripa-graniten

För att tolka erhållna data och för att utföra teoretiska beräkningar behövs uppgifter om bergets mekaniska och fysikaliska egenskaper. Teoretiska beräkningar och praktiska försök kan sedan jämföras och säkrare underlag erhållas för värdering av planerade områden för avfallsdeponering.

Nedanstående data har framtagits:

- Elasticitetsmodul, Poisson's tal och enaxlig brotthållfasthet vid 25°C, 50°C, 100°C och 200°C
- Brotthållfasthet och elasticitetsegenskaper som funktion av sidotryck
- Utvidningskoefficienten som funktion av radiella belastningen.
- Draghållfasthet
- Residual skjuvhållfasthet som funktion av normalspänningen
- Anisotropi i hållfasthet och elasticitetsegenskaper
- Värmeledningstal

Nedanstående data för Stripa-graniten har beräknats och visar inga större avvikelser från vad som normalt gäller för mellan-svensk granit.

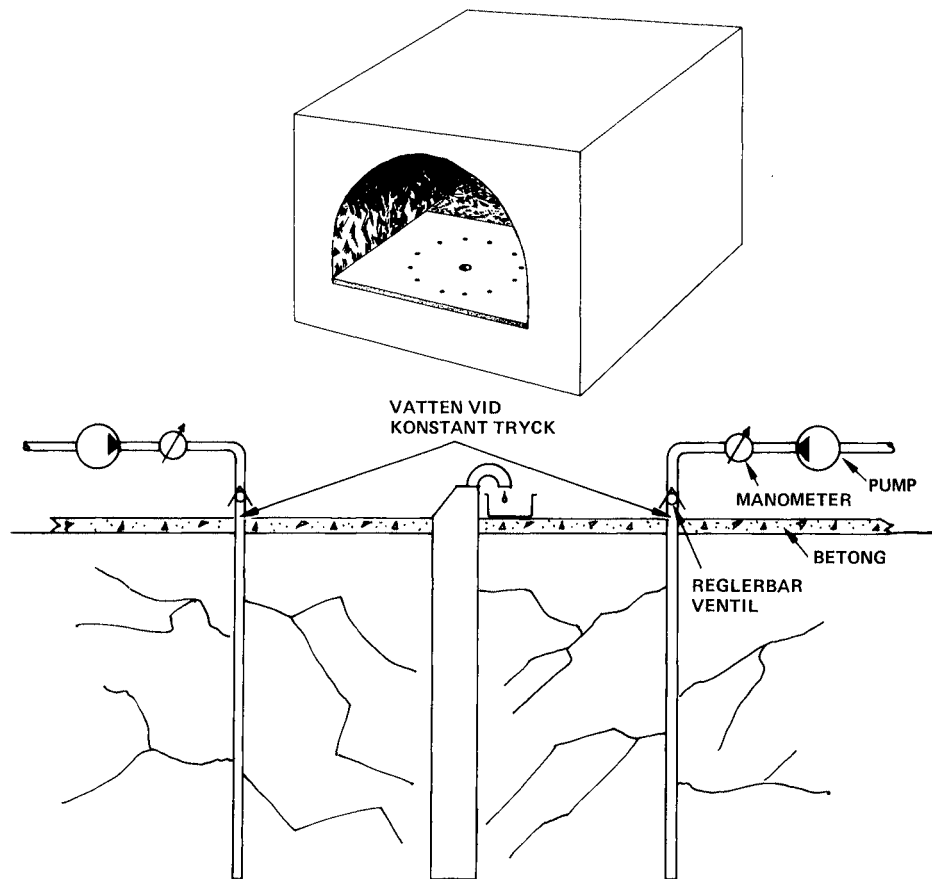
Poisson's tal	0,21
Youngs modul	69,4 GPa
Enaxlig tryckhållfasthet	207,6 MPa
Draghållfasthet	15,0 MPa
Värmeledningstal	3,0-3,6 W/C ^o m

Detaljerad redovisning av erhållna resultat återfinns i KBS Teknisk rapport nr 48 /9-2/.

9.2.4 Bergets permeabilitet vid olika tryck och temperaturer

Försöket avser att ge information om variationer i bergets vattengenomsläpplighet vid olika temperaturer.

Försöksanordningarna visas i fig 9-2. Vid försöket uppmättes den utläckande vattenmängden till ett 300 mm grovt och 10 m långt vertikalt borrhål. I en cirkel och på ett avstånd av ca 1 m från 300 mm hålet har 16 st 3" hål borrats. Till dessa pumpas vatten med visst tryck och temperatur. Bergmassan uppvärms till önskad



Figur 9-2. Permeabilitetsmätningar. Genom att ändra vattentrycket och temperaturen mäts hur vattengenomsläppligheten i berget varierar med tryck och temperatur.

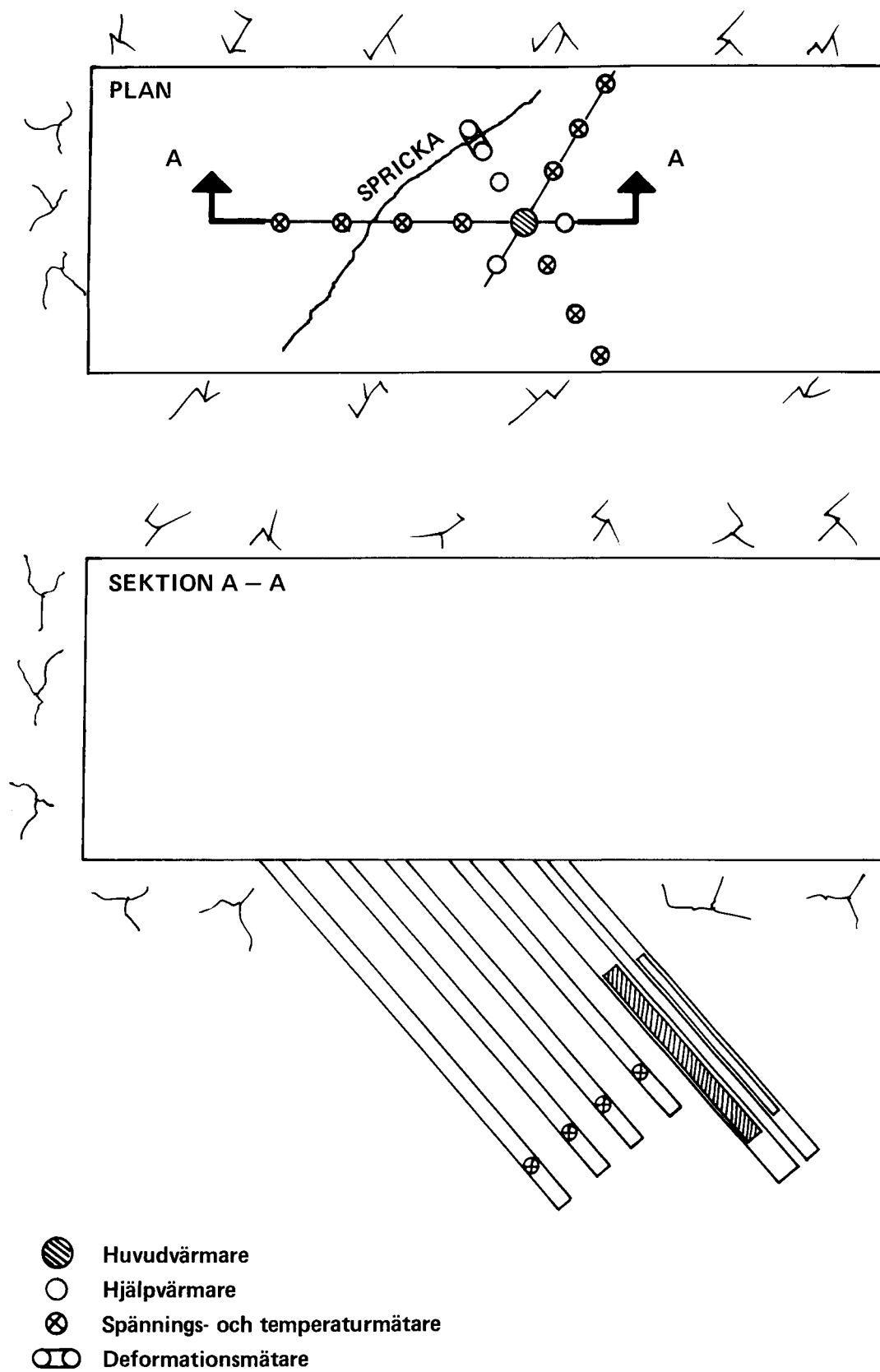
temperatur genom att cirkulera varmt vatten i borrhålen. Genom att ändra vattentrycket vid olika temperaturer och mäta den från centrumhålet utläckande vattenmängden kan vattengenomsläppligheten bestämmas som en funktion av tryck och temperatur. Resultaten av proven skall jämföras med teoretiska beräkningar.

Hittills utförda mätningar av bergets permeabilitet har givit värden som är ca tio gånger lägre än vad som erhållits vid mätning på konventionellt sätt med manschetter i borrhål. Försöket ger sannolikt korrekta värden på den verkliga permeabiliteten för ett större bergparti. Detta antyder att de permeabilitetsvärden, som erhållits från borrhål vid genomförda fältundersökningar kan vara något för höga. Preliminära försöksresultat har också visat att permeabiliteten sjunker till ungefär hälften, då berget uppvärms från 10^o till 40^o C.

9.2.5 Temperaturspänningar

Försöket avser att belysa de förändringar i existerande bergspänningar och sprickförhållanden som uppträder i ett bergparti vid en lokal uppvärmning. På grund av bergets låga värmeledningsförmåga fordras för ett dylikt prov en relativt lång försökstid.

Försöksanordningarna visas i fig 9-3. Intill försöksorten uppmättes de primära, tredimensionella bergspänningarna. Värmarna och mät hålen orienteras så att deras riktning sammanfaller med riktningen på en av huvudspänningarna.



Figur 9-3. Mätningar av förändringar i bergspänningar och sprickvidder vid lokal uppvärmning.

Värmekällan består av en specialkonstruerad 5 kW elvärmare, som nedsänkes i ett 300 mm borrhål. Runt detta centrumhål på ett avstånd av ca 1,25 m, nedsänkes tre hjälpvärmare med effekten 1 kW. Mätning av temperatur och bergspänningar utföres sedan kontinuerligt i tio borrhål parallella med centrumhålet och placerade i tre riktningar och på ett avstånd varierande mellan 2 m och 6 m från centrumhålet. Instrument registrerar även förändringar i sprickvidden hos större sprickor inom testområdet.

Försöket avser även att registrera förhållandena vid en avsvalningsperiod sedan en max temperatur av 60°C uppnåtts i testområdets centrala delar. Erhållna resultat kommer att jämföras med teoretiska beräkningar.

9.2.6 Injektering

Ett slutförvar för aktivt avfall bör förläggas i ett så tätt berg som möjligt. Man får emellertid alltid räkna med, att vissa lokala bergpartier inte har den önskvärda tätheten. Man kan då tillgripa injektering med material som har god beständighet under mycket långa tidsperioder.

Ett lämpligt injekteringsmedel synes vara kiseldioxid (kvarts), som är mycket beständigt och dessutom kan erhållas i mycket finfördelad form och förutses tränga in även i små sprickor. Under förberedelsearbetet för ett planerat försök, befanns bergets genomsläpplighet vid vattenprovtryckning dock vara så låg att en sprickinjektering inte kunde anses meningsfull.

9.2.7 Vattenanalyser

Grundvattnets kemiska sammansättning har betydelse för kapslings- och buffertmaterialens korrosionshastighet samt lakningshastigheten hos avfallsglasat.

Relativt få data finns på sammansättningen av grundvatten på stora djup.

I Stripa är grundvatten åtkomligt på olika nivåer från 350 m ned till ca 900 m under markytan. Då gruvan varit dränerad under lång tid - gruvan öppnades för ca 500 år sedan - är grundvattenförhållandena störda, särskilt ned till i höjd med gruvans lägsta punkt (-490 m). De prover som insamlats är därför inte representativa för grundvatten på motsvarande nivå vid ostörda förhållanden.

Av hittills tillgängliga analysresultat av grundvattnet kan nämnas:

- att dess ålder 340 m under markytan är ca 15 - 20 år
- att den kemiska sammansättningen visar låga mineral- och salthalter samt
- att vattnets Ph är ca 8,5.

9.3 UNDERSÖKNINGAR INOM SAMARBETSAVTALET MED US ERDA

Ett omfattande undersökningsarbete planeras av LBL i Stripa. Innebörden av dessa undersökningar kan sammanfattas i nedanstående punkter.

- 1 Undersökning av hur bergets egenskaper (tryck, utvidgning, värmeledning m m) påverkas av en lokal uppvärmning.
- 2 Kartläggning av bergsprickor (omfattning, storlek, riktning, innehåll m m) med hjälp av borrhålsundersökningar och geofysiska undersökningar.
- 3 Laboratoriebestämning av olika materialdata för berget (mikrosprickor och permeabilitet som funktion av tryck och temperatur).
- 4 Mätning av det totalt inläckande vattenflödet till ett bergrum för bestämning av bergets täthet.
- 5 Mätning av bergtryck med hjälp av vatteninpressning i borrhål till brott (hydraulic fracturing).

Som tidigare nämnts avser man att utföra dessa experiment under 1978 och 1979. De första resultaten av proven torde därför inte föreligga förrän 1978. Ingen redovisning kan därför ske i KBS huvudrapport och endast begränsade delresultat torde föreligga då KBS avslutar sin verksamhet i mitten av 1978.

REFERENSER

A **ARBETSRAPPORTER FRÅN SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING, september 1977**

BRUSEWITZ A M, SJÖDIN A
Laboratoriearbete för PRAV, KBS. (Mineralogisk undersökning av
borrkärneprov från Finnsjöområdet).

ERIKSSON L, ÖNSBO och BRÄNDAN
Grundundersökning med slingram och magnetometer.

GIDLUND G
Analyser och åldersbestämningar av grundvatten på stora djup.

GIDLUND G, HULT A och THOREGREN U
Permeabilitetsbestämningar i berggrunden.

LANDSTRÖM O och KLOCKARS C E
Lägesrapport vecka 38, 1977, av pågående spår försök i Studsvik
(etapp C).

MAGNUSSON K Å och DURAN O
Geofysisk borrhålsloggning.

SCHERMAN S och WIİK N G
Berggrundsundersökning, Finnsjön.

SCHERMAN S, OLKIEWICZ A och AGRELL I
Berggrundsundersökning, Kråkemåla.

SCHERMAN S, OLKIEWICZ A och AGRELL I
Berggrundsundersökning, Ävrö.

SCHERMAN S och OLKIEWICZ A
Berggrundsundersökning, Forsmark.

SJÖDIN A
Mineralogisk undersökning av borrhärnematerial från Kråkemåla.

B ÖVRIGA REFERENSER

KAPITEL 4

- 4-1 LARSSON I, LUNDGREN T och WIKLANDER U
Blekinge kustgnejs, geologi och hydrogeologi, KBS Teknisk rapport 25, 1977.
- 4-2 RUDBERG S
Geomorfologi, Pl 5-6
Atlas över Sverige, Sv Sällskap Antropol Geogr, Generalstaben, Stockholm, 1970.
- 4-3 STOLPE M
Bladet Örbyhus; SGU 32, Stockholm, 1869.
- 4-4 BLOMBERG A
Beskrivning till kartbladet Öregrund; SGU ser Aa, 101, Stockholm 1886.
- 4-5 SUND B
Nyare undersökningar inom nordöstra Upplands berggrund; SGU ser C 552, Stockholm 1957.
- 4-6 CARLSSON A och OLSSON T
Water leakage in the Forsmark tunnel, Uppland, Sweden; SGU, ser C 734, Stockholm 1977.
- 4-7 WELIN E
Uranium mineralizations and age relationships in the precambrian bedrock of central and southeastern Sweden; Geol Fören Förh, Stockholm, 88, p 34-67, 1966.
- 4-8 SVEDMARK E
Orografiska studier inom Roslagen; Geol Fören Förh, Stockholm, 9, p 188-210, 1887.
- 4-9 LUNDEGÅRDH, P H
Berggrunden i Gävleborgs län; SGU ser Ba 22, Stockholm 1967.
- 4-10 SVEDMARK E
Beskrivning till kartbladet Oskarshamn; SGU ser Ac 5, Stockholm 1904.
- 4-11 ÅBERG G
Muntligt meddelande, planer publ i Geol Fören Förh, Stockholm, 1978.
- 4-12 KRESTEN P och CHYSSLER J
The Götömar massif in south-eastern Sweden; Geol Fören Förh, Stockholm, 98, p 155-161, 1976.
- 4-13 ASKLUND B
Bruchspaltenbildungen in südöstlichen Östergötland; Geol Fören Förh, Stockholm, 45, p 249-285, 1923.

- 4-14 NORDENSKJÖLD C E
Morfologiska studier inom övergångsområdet mellan Kalmar-
slätten och Tjust. Medd Lunds Geogr Inst Avh VIII.
- 4-15 ERIKSSON L, MAGNUSSON K Å
Geofysisk undersökning i Oskarshamn, SGU, PRAV, 1977.
- MAGNUSSON K Å
In situ determination of elastic constants in rock, using a
hammer seismograph. Geol Fören Förh, Stockholm, 98,
p 244-250, 1976.

KAPITEL 5

- 5-1 SNOW D T
Rock fracture spacings, openings and porosities; Journ Soil
Mech Found Div, AICLÉ, 94, p 73-91, 1968.
- 5-2 WEBSTER D S, PROCTOR J F and MARINE I W
Two well tracer test in fractured crystalline rock; U S Geol
Surv, Water-Supply Paper 1544-1, 1970.
- 5-3 LARSSON I, FLEXER A, ROSEN B
Effects on groundwater caused by excavation of rock store
caverns; Eng Geol 11, 1977.
- 5-4 LINDBLOM U
Groundwater movements around a depository, Final report,
Hagconsult. KBS Teknisk rapport 54, 1977.
- 5-5 STOKES J
Hydrologiskt och topografiskt betingade grundvattenrörel-
ser; Inst Kulturteknik, KTH, KBS Teknisk rapport 47, 1977.
- 5-6 NAT ACADEMY OF SCIENCE, COMMITTEE ON RADIOACTIVE WASTE
MANAGEMENT
An evaluation of the concept of storing radioactive waste in
bedrock below the Savannah River plant; Washington D C,
1972.
- 5-7 THUNVIK R
Lokal grundvattenavsänkning kring lagringsutrymmen;
Inst Kulturteknik, KTH, KBS Teknisk rapport 47, 1977.
- 5-8 NILSSON L Y
Korttidsvariationer i grundvattnets trycknivå. Inst Kultur-
teknik, KTH, KBS Teknisk rapport 47, 1977.
- 5-9 DONNER I J, JUNGNER H
Radio-carbon dating of salt water found in wells drilled
into the bedrock in the coastal area of Finland; Bull Geol
Soc Finland, 47, p 79-81, 1975.
- 5-10 GARRELS R M
Genesis of some groundwaters from igneous rocks in Research-
es in geochemistry, Abelson, P H ed, 2, p 405-420, John
Wiley, New York 1967, 663 p.

- 6-8 RAFAELSKY R P
The experimental investigation of the conditions of uranium transport and deposition by hydrothermal solutions. Proc second United Nations internat conf peaceful uses of atomic energy, 2, p 432-444, Geneva 1958.
- MILLER L J
The chemical environment of pitchblende, Economic Geology, vol 53, 1958, pp 521-545.
- 6-9 RAFELSKY R P, KUDINOVA K F
Experimentelle Untersuchung der Reduktion und Fällung von Uran durch Mineralien. Kernenergie, 3, p 535-538, 1960.
- 6-10 ADLER H H
Concepts of uranium-ore formation in sandstones and other sediments, in Formation of uranium-ore deposits, Proc Symp IAEA, p 141-166, Vienna 1974.
- 6-11 DAHL A R, HAGMAIER J L
Genesis and characteristics of the Southern Powder Basin uranium deposits, Wyoming, USA, in Formation of uranium-ore deposits, Proc Symp IAEA, p 201-215, Vienna 1974.
- 6-12 WELIN E
Uranium disseminations and vein fillings in iron ores of northern Uppland, central Sweden. Geol Fören Förh, Stockholm, 86, p 51-82, 1964.
- 6-13 ADAMEK P M, WILSON M R
Recognition of a new uranium province from the precambrian of Sweden, in Recognition and evaluation of uraniferous areas, IAEA, p 199-215, Vienna, 1977.
- 6-14 IAEA, The Oklo phenomenon, Proc Symp Libreville, Vienna 1975.

KAPITEL 7

- 7-1 WELIN E och BLOMQVIST G
Further age measurements on radioactive minerals from Sweden. Geol Fören Förh, Stockholm, 88, p 3-18, 1966.
- 7-2 YANSHIN (Chief ed) et al
Tectonic of Eurasia, Acad Nauk USSR, Moscow 1966.
- 7-3 RÖSHOFF K, LAGERLUND E
Tektonisk analys av södra Sverige, Vättern - Norra Skåne. Luleå och Lund, KBS Teknisk rapport 20, 1977.
- 7-4 CLOOS H
Zur Mechanik grosser Brüche und Gräben. Centralbl Mineral etc, Abt B, p 237-286, 1932.
- 7-5 LAGERBÄCK R, HENKEL H
Studier över neotektonisk aktivitet i mellersta och norra Sverige, SGU, KBS Teknisk rapport 19, 1977.

- 7-6 MÖRNER N-A
Rörelser och instabilitet i den svenska berggrunden. Stockholms Universitet, KBS Teknisk rapport 18, 1977.
- 7-7 CLOOS H
The ancient European basement blocks. Am Geophys Un Trans 29, p 99-103, 1948.
- 7-8 TUOMINEN V H, AARNISALO J, SÖDERHOLM B
Tectonic patterns in the central Baltic shield. Bull Comm Geol Soc Finland, 45, p 205-217.
- 7-9 STRÖMBERG A G B
A pattern of tectonic zones in the western part of the East European Platform. Geol Fören Förh, Stockholm 98, p 227-243.
- 7-10 STEPHANSSON O
Deformationer i sprickigt berg, Höskolan i Luleå, KBS Teknisk rapport 29, 1977.
- 7-11 HAST N
The State of Stress in the Upper Part of the Earths Crust as Determined by Measurements of Absolute Rock Stress, Naturwissenschaften 61, pp 468-475, 1974.
- 7-12 LI B
Natural Stress-Values Obtained in Different Parts of the Fennoscandian Rock Masses, Proc ISRM 2:nd Congress, Belgrad, vol I:28, 1970.
- 7-13 MYRVANG A
Practical Use of Rock Stress Measurements in Norway, Symp on Investigation of Stress in Rock-Advances in Stress Measurements, Sydney 11-13 Aug, pp 92-99, 1976.
- 7-14 PUSCH R
The influence of rock movement on the stress/strain situations in tunnels or bore holes with radioactive canisters embedded in a bentonite/quartz buffer mass. Höskolan i Luleå, KBS Teknisk rapport 22, 1977.
- 7-15 RINGDAL F, GJÖYSTDAL H, HUSEBYE E S
Seismotectonic risk modelling for nuclear waste disposal in the Swedish bedrock, Norsar, KBS Teknisk rapport 51, 1977.
- 7-16 WIMAN E
Studies of some Archean rocks in the neighborhood of Upsala, Sweden, and of their geological position. Bull Geol Ins Upsala, XXIII, 1930.
- 7-17 GORBATSHEV R
Petrology of Jotnian rocks in the Gävle area, east central Sweden. SGU, ser C, 621, 50 p 1967.
- 7-18 WELIN E, LUNDQVIST TH
K-Ar ages of Jotnian dolerites in Västernorrland county, central Sweden. Geol Fören Förh, Stockholm, 97, p 83-88, 1975.

- 7-19 KLINGSPOR I
Radiometric age-determination of basalts, dolerites and related syenite in Skåne, southern Sweden. Geol Fören Förh, Stockholm, 98, p 195-216, 1976.
- 7-20 BYSTRÖM-ASKLUND A M, BAADSGAARD H, FOLINSBEE R E
K/Ar age of biotite, sanidine and illite from middle ordovician bentonites at Kinnekulle, Sweden, Geol Fören Förh, Stockholm 83, p 92-96, 1961.
- 7-21 KRESTEN P, PRINTZLAU I, REX D, VARTIANEN H, WOOLLEY A
New ages of carbonatitic and alkaline ultramafic rocks from Sweden and Finland. Geol Fören Förh, Stockholm 99, p 62-65, 1977.
- 7-22 KENT P
Mesozoic development of aseismic continental shelves, in Geodynamics today, The Royal Society, p 119-121, London 1975.
- 7-23 TURNER F J, VERHOOGEN J
Igneous and metamorphic petrology, 694 p, Mc Graw-Hill, New York, 1960.
- 7-24 BOTT M H P
Eastern atlantic continental margin, in Geodynamics today, The Royal Society, p 113-118, London, 1975.
- 7-25 RUTTEN M G
The geology of Western Europe, 520 p, Elsevier, Amsterdam, 1969.
- 7-26 BJERHAMMAR A
The gravity field in Fennoscandia and postglacial crustal movements KTH, KBS Teknisk rapport 17, 1977.
- 7-27 KUKLA J
Correlations between loesses and deep sea sediments. Geol Fören Förh, Stockholm, 92, p 148-180, 1970.
- 7-28 DOWDING C H
Seismic stability of underground opening. Rock store, int symp, preprint 2, p 23-30, Stockholm, 1977.
- 7-29 YAMAHARA H, HISATOMI Y, MORI T
A study on the earthquake safety of rock cavern, p 151, Rock store int symp, preprint 2, p 159-164, Stockholm 1977.
- 7-30 BÅTH M
An earthquake catalogue of Fennoscandia for the years 1891-1950. SGU, ser C, 545, 52 p 1956.
- 7-31 BÅTH M
Introduktion till seismologin. Natur och Kultur, Stockholm 1970.
- 7-32 KULHANEK O, WAHLSTRÖM R
Earthquakes of Sweden 1891-1957, 1963-1972. Uppsala Univ, KBS Teknisk rapport 21, 1977.

- 7-33 BÅTH M
Seismicity of Sweden and related problems - a progress report. Seismologiska Inst, Uppsala universitet, okt 1977.
- 7-34 HUSEBYE E S, RINGDAL F, LANDE G
Jordskalvet i Oslofjorden, Forskning och Framsteg, H 6, 1976, p 24-26.
- 7-35 KVALE A
Earthquakes in Geology of Norway, p 490-506, O Holtedahl ed, 540 p, Norges Geol Unders nr 208, Oslo 1960.

KAPITEL 9

- 9-1 CARLSSON H
Bergspänningsmätningar i Stripa gruva, Högskolan i Luleå, KBS Teknisk rapport 49, 1977-08-29.
- 9-2 SWAN G
The mechanical properties of Stripa granite, Högskolan i Luleå, KBS Teknisk rapport 48, 1977-09-14.