

**NORD
NORD**

JANUARI 1990

GEOLOGIFRÅGOR

I SAMBAND MED SLUTFÖRVAR AV KÄRNBRÄNSLE

I DET FENNOSKANDISKA URBERGET



nka

Nordiska
kontaktorganet för
atomenergifrågor

GEOLOGIFRÅGOR I SAMBAND MED SLUTFÖRVAR AV KÄRNBRÄNSLE

I DET FENNOSKANDISKA URBERGET

Sammanfattande rapport från NKA-projekt KAV 330

**Redaktör
Alf Björklund
Geologiska institutionen
Åbo Akademi**

Januari 1990

Pärbilden

Pärvie-förkastningen i nordligaste Sverige. Förkastningen utbildades i samband med inlandsisens avsmältning i området. Förkastningen är 150 km lång och uppemot 10 m hög. Bilden är tagen vid fjället Tsåktso (syns i bakgrunden) ca 70 km norr om Kiruna och i bakgrunden syns flera lägre förkastningsbranter.

Foto R. Lagerbäck 1975

Denna rapport kan rekvireras från:
The present report is available on request from:

Åbo Akademi
Biblioteket
SF-20500 Åbo
Finland

Graphic Systems AB, Göteborg 1990

ISBN 87 7303 418 5
NORD 1990:25

ABSTRACT

Inom det nordiska samarbetsprojektet har man studerat aspekter av djupa grundvatten, datering av sprickmineral och neotektoniska rörelser relevanta för problem relaterade till deponering av kärnbränsleavfall i kristallint urberg.

Salta (upp till 17 %) gashaltiga vatten med förmodad lång residenstid i berget påträffades i många djupa borrhål redan på 50 - 400 m djup. Vattnen, som antas få sitt huvudsakliga innehåll på salter genom lakning av omkringliggande bergarter, indelas i bikarbonat, sulfat- och kloridvatten på basen av den dominerande anjonen. För provtagning av djupa grundvatten utvecklades en ny typ av vattenprovtagare.

För datering av sprickmineral i tektoniskt aktiverade sprickor visade sig studier av ¹⁴C-analyser på sprickfyllnadskalcit samt analyser av uranserien i sprickfyllnader ge positiva indikationer.

Studierna av neotektoniska rörelser i urberget har koncentrerats till Lansjärv i norra Sverige och till Pasmajärvi i norra Finland. Resultaten visar på stor tektonisk aktivitet under sen- och postglacial tid (8000 - 10000 år sedan). Förskjutningar på upp till över 10 m i vertikal led har konstaterats huvudsakligen i form av reaktivering av gamla skjuvzoner. Förekomsten av flackt liggande aktiva förkastningar har också påvisats, men deras frekvens och betydelse har inte kunnat klargöras inom projektet.

Key words: *waste disposal, radioactive waste, bedrock, groundwater, saline composition, absolute age, neotectonics, fractures, faults, Baltic Shield.*

Denna rapport utgör en del av det Nordiska projektarbetet inom kärnsäkerhetsprogrammet 1985 - 1989, initierat av NKA, det Nordiska kontaktorganet för atomenergifrågor. Arbetet har delvis finansierats av Nordiska Ministerrådet och delvis av de deltagande organisationerna.

SAMMANDRAG

Utnyttjande av kärnenergi förutsätter hantering och slutdeponering av radioaktivt avfall. Av flera alternativ är deponering i kristallin berggrund i gamla urbergssköldar ett, som allmänt anses attraktivt på grund av den relativt stora stabilitet dessa enligt gängse uppfattning har.

Berggrunden i den Fennoskandiska skölden, det så kallade urberget, hör till den äldsta på jorden. Huvuddelen av kontinentalskorpan i denna sköld bildades genom plattetektoniska bergveckningsprocesser och magmaintrusioner, så kallade orogenier, under prekambrisk tid. Den äldsta berggrunden, som ligger i sköldens nordöstra delar, har daterats till över 3 000 miljoner år mellan berggrunden i sköldens sydvästra delar bildats för litet över 1 500 miljoner år sedan. Efter denna tid har skölden inte direkt varit involverad i någon egentlig orogenisk process, men den har dock utsatts för flera episoder av reaktivering under perioder av bergveckning utanför. Sådan reaktivering har omfattat intrusion av rapakivi och diabasgångar och deformation av jordskorpan närmast i form av förkastningar.

Under de senaste tre miljoner åren har skölden upprepade gånger varit nedisat, senast för 10 000 till 100 000 år sedan. De mera eller mindre rytmiskt återkommande nedisningarna har "masserat" jordskorpan genom att gång på gång trycka ner den till flera hundra meters djup. Ett tätt nätverk av frakturer och förkastningar har sålunda hållits aktiva och delvis öppna för cirkulerande grundvatten och gas i vårt urberg. Plintar av någorlunda helt berg i detta förkastningssystem har föreslagits som deponeringsplatser för kärnbränsleavfall.

Trots att vårt urberg systematiskt studerats och karterats i över ett århundrade, finns dock en rad frågeställningar, vilka är viktiga vid avgörande av bergets lämplighet som förvaringsplats för kärnbränsleavfall, men som inte varit föremål för speciell uppmärksamhet inom traditionell berggrundsforskning. Sådana frågeställningar berör bl.a berggrundens och de olika bergarternas stabilitet i recent tid, vatten och dess innehåll på salter och gas och vattnens rörelser på några hundra meters djup, grundämnarnas mobilitet i berggrunden samt processer som kan tänkas ske i berggrunden under en kommande nedisning. Inom ramen för det nordiska samarbetsprojektet KAV 330 har djupa grundvatten, dateringsmetodik för neotektoniska sprickor och neotektoniska mönster i urberget studerats.

Djupa grundvatten har studerats inom projektet för att klarlägga förekomsten och utbredningen av salta djupa vatten samt ursprunget till dessa genom omfattande provtagningar i gamla djupa borrhål. Eftersom salta vatten kan ha en negativ effekt på kärnavfallskapslar och eftersom uppförandet hos sådana vatten kunde ge en vink om vattenomsättningen i berget, vore det av vikt att studera deras utbredning och kemiska sammansättning. För studien gjordes snabbprovtagning med plastslang för generell kartering medan en manschettprovtagare av liten diameter utvecklades för detaljerad provtagning. Arbetet har i huvudsak utförts i Finland och har omfattat provtagning i sammanlagt ca 50 djupa borrhål (normalt över 500 m djupa) i olika geologiska miljöer.

Största delen av vattenproven har insamlats med slangprovtagare. Härvid kan inte saltvariationer förorsakade av strömningar längs hålen identifieras med tillräcklig pålitlighet, varför en betydande osäkerhet finns i tolkningen av resultaten. Indikationer på många speciella drag har man dock kunnat påvisa. Salthalterna varierar mycket starkt även inom relativt korta sträckor och vattnen har indelats i tre huvudtyper enligt den anjon, som dominerar; bikarbonatvatten med salthalter under en promille, sulfatvatten med salthalter upp till några promille och kloridvatten med salthalter upp till 17 %, av vilka sulfatvatten påträffas endast i några enstaka fall. Normalt påträffas bikarbonatvatten överst i borrhålen, medan de normalt övergår i kloridvatten på några hundra meters djup. Salta vatten har i vissa fall påträffats ända upp till ytan, vilket delvis också verifierats med provtagning med dubbelmanchettprovtagaren. Tritiumhalterna är normalt låga i sulfat- och kloridvatten, vilket tyder på en ringa uppblandning med ytvatten.

I kustnära områden påträffas allmänt salta vatten i berggrundens översta delar, vilka på basen av kemisk sammansättning och isotopförhållanden ofta kan relateras till relikthavsvatten. I andra områden visar isotopsammansättning och extremt höga salthalter av speciell sammansättning på annat ursprung. Man kan inte utesluta möjligheten, att dessa vatten åtminstone till en del innehåller mycket gamla komponenter av metamorft, hydrotermalt och magmatiskt ursprung. Sr-isotopundersökningarna har dock visat, att salterna till stor del kan ha lakats ur omkringliggande bergarter, speciellt ur fältspater genom "water-rock interaction" i sådana fall, där vattnen haft en lång residens-tid i berget.

De djupa vattnen är som regel rika på lösta gaser. Vattenprov, som tas från t.ex. 1 km djup kan vid markytan avge en gasvolym som överstiger volymen vatten. Sammansättningen på dessa gaser har studerats i samarbete med kanadensiska forskare. Gasfasen består till övervägande del av metan och kväve. I vissa vatten utgör metan upp till omkring 80 %. Lokalt har även höga halter av helium och väte påträffats. Isotopsammansättningen visar i flesta fall på en abiogen källa till metangasen, men i ett enstaka fall har biogena drag påträffats.

Genom att kunna datera mineral i recenta sprickor skulle man indirekt kunna datera recenta rörelserna i dessa sprickor. I projektet har man sålunda testat olika metoder för datering av mineral i unga sprickor. Fissionsspårsmätningar i sprickmineral visade sig oanvändbara på grund av de mycket låga halterna av uran och på grund av att uran varit mobilt i systemet under en mycket lång tid. Undersökningen visade också, att kalcit inte kan bevara fissionsspår ens under korta tider vid rumstemperatur. Termoluminescensmätning visade sig ge för grova och svårberäknade resultat för datering, medan katodoluminescensmätningar visade sig ge lovande resultat för klassificering av kalcit i olika generationer.

^{14}C produceras i atmosfären och används allmänt för datering av organiskt material yngre än ca 40 000 år. Studier av de stabila isotoperna ^{18}O och ^{13}C i kalcit visade, att ytvatten påverkat kalciten ned till djup av 500 m, vilket antyder att detta mineral kunde dateras genom ^{14}C -analys. Sådan analys utfördes i borrhål från Klipperås i sydöstra Sverige både på vatten och karbonater. Resultaten tyder på en stor vattenomsättning

i området till flera hundra meters djup, men halterna av ifrågavarande isotop är låga och en uppenbar kontamination vid provberedning har höjt bakgrundsvärdena.

Mineralogiska studier och analyser på spårelement och uranserien i ett borrhål i Lansjärv visade, att sprickorna mineraliserats av hydrotermala vatten långt tillbaka i tiden. Analyserna visar, att sprickmineralen omvandlats vid reaktioner med lågtemperaturvatten i recent tid (under 1 milj. år) speciellt i det övre 300 m intervallet. Detta visar, att sprickmineral kunde användas för datering av neotektoniska rörelser, om man kan utveckla en tillförlitlig metod för datering av dessa mineral.

En betydande riskfaktor beträffande en tilltänkt deponering av kärnavfall i kristallint berg är förkastningar som kunde tänkas övertvåra ett avfallslager förrän radioaktiviteten avklingat. Neotektoniska rörelser i vårt urberg är relativt knapphändigt undersökta och för att studera dessa gjordes en undersökning baserad på regionala studier av seismik, geodetiska data, postglaciala förkastningsbranter och landhöjningsobservationer. I detalj har man studerat förekomsten av recenta rörelser i Lansjärv, norra Sverige och i Pasmajärvi, norra Finland genom borrhning, geofysikaliska mätningar och studier av förkastningsbranter i grävda diken. Resultaten av arbetet tyder på mycket stor seismisk aktivitet i senglacial och tidig postglacial tid. Härvid skedde förskjutningar, som i vertikal led på många ställen är över 10 m och som kan följas hundratals km i terrängen. Förskjutningar i horisontal led har inte kunnat storleksbestämmas på grund av omfattande jordtäckte. Recenta förkastningar verkar allmänt vara brantstående, men en rad observationer indikerar även flackt liggande förskjutningar. Sådana är dock svåra att observera och därför kan de vara allmänna än vad undersökningarna gett vid handen.

De neotektoniska rörelserna verkar att i huvudsak ha följt gamla tektoniska förkastningssystem, som under geologisk tid upprepade gånger reaktiverats under olika perioder av tektonisk aktivitet medan plintar mellan förkastningszonerna förblivit intakta. Här bör dock poängteras, att man i föreliggande arbete studerat postglaciala förkastningar av extrema dimensioner. Man kan därför inte utesluta möjligheten att mera diskreta serier av osammanhängande recenta förkastningar kan förekomma inne i plintarna trots att de inte observerats här. Sådana har rapporterats av Mörner (bl.a 1988) från flera lokaliteter i södra Sverige.

Det nordiska projektarbetet rörande geologifrågor har under perioden 1985 - 1989 fått sammanlagt 1,175 milj. DKK nordiska bidrag medan de nationella insatserna, i huvudsak finska och svenska, uppskattas till ca 12 milj. De nordiska medlen har i huvudsak använts för resor till gemensamma möten och fältexcursioner, till arvoden för forsknings- och rapporteringsarbeten, till att inbjuda utländska forskare att delta i projektarbeten och seminarier, till specialanalyser och till utveckling av ny utrustning. Projektet har förbättrat samarbetet både på det nordiska och det internationella planet. De nordiska forskargrupperna intar för närvarande en internationellt ledande ställning inom ifrågavarande problemområde. De nordiska medlen har varit betydelsefulla för utvecklandet av ny teknik och för samarbete över gränserna.

SUMMARY

The use of nuclear power involves handling and disposal of radioactive waste. A number of methods for disposal have been proposed, one of which is the construction of repositories in crystalline bedrock of old continental crust. This possibility is usually considered reliable because of the relative stability of such bedrock.

The bedrock of the Fennoscandian Shield is one of the oldest on Earth. Most of this continental crust was formed by plate tectonic processes in Precambrian time resulting in fold belts and large magmatic intrusions. The northeastern part of the Shield was formed more than 3 000 million years ago, whereas the southwestern part of the Shield is some 1 500 million years old. After this period the Fennoscandian Shield has not been directly involved in any major orogenic event, but it has experienced a number of minor modifications induced by episodes of orogenic activity elsewhere. Such reactivation has resulted in the intrusion of rapakivi and diabase dykes as well as large-scale faulting in the Shield.

The Fennoscandian area has repeatedly been glaciated during the past 3 million years. The last glacial event terminated some 10 000 years ago. Each advancing glacier has pressed down the crust several hundred m and has been followed by periods of isostatic uplift. This "massage" has maintained a dense network of fractures and faults open for circulating water and ascending gas. Blocks of relatively unfractured bedrock have been proposed as suitable sites for the disposal of nuclear waste.

Despite the fact, that the bedrock of the Fennoscandian Shield has been studied systematically for more than one hundred years, there are a number of questions of fundamental importance for the safety of a repository, which are incompletely known. Such questions concern neotectonic activity, the movement, salt content and amount of water at a few hundred metres depth, the mobility of elements in the bedrock as well as the geological processes which might be active beneath any future ice cap. Deep groundwaters, dating of young fracture minerals and neotectonic movements have been studied during 1985 - 1989 in a Nordic research program sponsored by NKA, the Nordic Liaison Committee for Atomic Energy.

Deep saline groundwaters may have a negative effect on repositories of nuclear waste and the knowledge of the location of such waters may also give a hint as to the pattern of water movement in the bedrock. Therefore the composition, origin and location of deep groundwaters were studied in the project. Deep waters were sampled in holes drilled mainly for mineral exploration purposes. Low-cost sampling was conducted with plastic tube equipment designed for this purpose. A portable pump packer equipment was designed for detailed sampling of waters in drill holes of small diameter. The main part of the work has been conducted in Finland in some 50 drill holes situated in different types of bedrock. Most of the samples were collected with the plastic tube which may render the results somewhat unreliable because the waters may have become mixed within the holes in some instances. However, some interesting features were identified, one of which is a considerable compositional variation within short distances in the bedrock. Based on the anion contents

the waters were classified into three types; bicarbonate waters (salinity below 1 per mil), sulphate waters (salinity up to a few per mil) and chloride waters (salinity up to 17 %). Sulphate waters have been found only in a few cases. Normally, bicarbonate waters are encountered in the uppermost parts of the holes. At depths of a few hundred metres they usually change to chloride waters. Only on a few occasions chloride waters have been found close to the surface. The contents of tritium are normally very low in sulphate and chloride waters, which indicates that mixing with surface waters does not occur to a significant degree.

In coastal regions the chemical composition and isotopic evidence point to a marine source of slightly saline waters. Most saline waters in many regions could be a result of mixing with waters of other sources such as very old hydrothermal fluids as well as metamorphic and magmatic waters. However, Sr-isotope analyses indicate, that the salinity may be a product of leaching of surrounding rocks, especially feldspars, where the residence time of the water in the bedrock has been considerable.

The deep waters generally contain large amounts of dissolved gases. Degassing at surface of waters from depths of 1 km may produce a larger volume of gas than the volume of water degassed. The gases, which have been studied in cooperation with Canadian researchers, mainly contain methane (up to 80 %) and nitrogen. In some cases high contents of helium and hydrogen have been encountered. The isotopic composition normally points to a abiogenic origin of methane, but in one specific case some biogenic indications have been recognized.

If young fissure minerals could be dated the results could indirectly be used to date neotectonic movements in the bedrock. Different methods suitable for dating minerals in young fissures were tested in the project. Measurements of fission tracks in fracture minerals gave unreliable results because of the very low amount of uranium and because of its high mobility in the system. The study showed, that fission tracks are not preserved in the calcite at room temperature even for very short periods of time. Measurements of the thermoluminescence and cathodoluminescence in minerals gave too unreliable results for dating purposes. The results of the latter method gave promising results for classification of calcite into different generations.

^{14}C is produced in the atmosphere and is normally used for dating of organic material younger than ca 40 000 years. Studies of the stable isotopes ^{18}O and ^{13}C in calcite showed that surface waters have influenced calcite to depths of 500 m, which indicates that this mineral could be dated with ^{14}C analysis. Such analyses were carried out on water and carbonates in a drill hole at Klipperås in southwestern Sweden. The results indicate a considerable water movement to depths of several hundred metres but the reliability of the results were hampered by contamination and consequent increase in background values during the preparation of the samples.

Mineralogical studies and analyses of trace elements and of elements of the uranium series in drill cores from Lansjärv in northern Sweden showed, that the fissures have been mineralized by hydrothermal waters in the past. The fissure minerals have been altered by low-temperature waters in recent time (less than 1 million years), especially in the upper-

most 300 m interval. Thus fissure minerals could be used for dating of neotectonic movements if a suitable method for dating of such minerals could be developed.

The development of faults in the bedrock through a site of waste disposal before the radioactivity in the waste has decayed to a safe level is considered a serious risk factor. Neotectonic movements and fracturing of the bedrock is relatively incompletely known. For this reason the project used regional studies of seismicity, geodetic data, observations on postglacial fault escarpments, and observations on land up-lift to study recent movements. Bedrock drilling, geophysical surveys and studies of fault escarpments in trenches were carried out in Lansjärv, northern Sweden, and in Pasmajärvi, northern Finland, to study neotectonic faulting in detail. The results indicate very high tectonic activity in late glacial and early postglacial time (8000 - 10000 years ago). Movements of more than 10 m in a vertical direction can be followed for hundreds of km in the terrain. The extent of movements in the horizontal or subhorizontal direction could not be measured because of the extensive cover of glacial overburden. In general, vertical movements seem to predominate in the study areas but some observations on subhorizontal faults indicate, that such may exist and they may even be more common than has generally been thought.

The neotectonic movements have mostly followed old faults and fracture zones in the bedrock, which repeatedly have been reactivated during geological time, leaving blocks between the faults tectonically undisturbed. It should be stressed, however, that the project has focussed its interest on neotectonic faults of abnormal dimensions. Therefore, it is not possible to exclude the possibility of the existence of irregular and subdued neotectonic fault systems within seemingly unfaulted blocks. Such systems have been reported by Mörner (e.g., 1988) from several localities in southern Sweden.

The project on geological problems related to disposal of radioactive waste in the bedrock has received 1.175 mill. DKK from Nordic funds, whereas in all some 12 mill. DKK have been spent by the national participating organizations. The Nordic funds have mainly been used for participation in meetings and field excursions, for consulting fees, for the costs of visiting guest researchers, for chemical and isotope analyses and for development of equipment. The project has improved the national and the international cooperation and the Nordic research groups are at present internationally in a leading position within the areas of research included in the project. The Nordic funds have been of especially great importance for the development of new techniques and for the cooperation between different Nordic and international groups of researchers.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sida
FÖRORD A. Björklund	1
DJUPA GRUNDVATTEN R. Blomqvist	3
INLEDNING	3
VAL AV PROVTAGNINGSSOMRÅDEN	4
PROVTAGNINGSSUTRUSTNING	5
Slangprovtagare	5
Dubbelmanchettump	6
RESULTAT	7
Grundvattentyper	7
Faktorer som påverkar fördelningen av olika grundvattentyper	10
Ursprunget till salta grundvatten	11
Strontiumisotopbaserade bevis på "water-rock interaction"	14
Gaser i djupa salta grundvatten	15
SLUTSATSER	17
DATERING AV SPRICKMINERAL E-L. Tullborg och J. Lehtovaara	19
INLEDNING	19
MÅL OCH METODIK	19
STUDIER AV FISSIONSSPÅR	19
Inledning	19
Fissionsspår i kalцит	20
Längdmätningar av fissionsspår	20
Slutsatser om fissionsspårsmetoden	21
KATODLUMINESCENS- OCH TERMOLUMINESCENSMÄTNINGAR	21
¹⁴ C-ANALYSER PÅ SPRICKFYLLNADSKALCIT	21
Inledning	21
Provtagning	22
Resultat	24
Slutsatser om ¹⁴ C-analyser på sprickfyllnadskalcit	26
MINERALOGISKA OCH GEOKEMISKA STUDIER AV SPRICK- FYLLNADER	26
Inledning	26
Beskrivning av borrhärnan	27
Provtagning och analys	27
Mineralogi	27
Spårelementanalys på sprickläkningar	28
Analys på uranserien	29
Sammanfattning	31
SLUTORD	32

NEOTEKTONISKA RÖRELSER P. Vuorela	33
INLEDNING	33
INDIKATIONER PÅ POSTGLACIALA RÖRELSER	35
Landhöjning	35
Postglaciala förkastningsbranter	35
Studier i Lansjärv och Pasmajärvi	36
Diken över förkastningar	37
Borrhålsundersökningar	37
Geofysik	39
Seismik	41
Paleoseismik	41
Seismiska stationsnät	41
Geodetiska mätningar	42
TEKTONISK TOLKNING	43
SAMMANFATTNING	44
REFERENSER	45
APPENDIX I Deltagarlista	

FÖRORD

Utnyttjande av kärnenergi förutsätter hantering och slutdeponering av radioaktivt avfall. Av flera alternativ är deponering i kristallin berggrund i gamla urbergsskoldar ett, som allmänt anses attraktivt på grund av den relativt stora stabilitet dessa enligt gängse uppfattning har. Trots att berggrunden systematiskt studerats och karterats i över ett århundrade, finns dock en rad frågeställningar, vilka är viktiga vid avgörande av bergets lämplighet som förvaringsplats för kärnbränsleavfall, men som inte varit föremål för speciell uppmärksamhet inom traditionell berggrundsforskning. Sådana frågeställningar berör bl.a. berggrundens och de olika bergarternas stabilitet i recent tid, vatten och dess innehåll på salter och gas och vattnens rörelser på några hundra meters djup, grundämnenas mobilitet i berggrunden samt processer som kan tänkas ske i berggrunden under en kommande nedisning. Alla dessa frågeställningar utreds inom de nationella forskningsprogrammen för kärnavfallshantering. Inom ramarna för projekt 330, "geologifrågor i samband med slutförvar", som utgör en del av programområdet "Kärnavfallshantering" (KAV), initierat av Nordiska kontaktorganet för atomenergifrågor (NKA), planerades ursprungligen tre delprojekt:

1. Vätskeinnestutningar i mineral (335)
2. Åldersdatering av sprickmineral ("fission tracks") (340)
3. Neotektoniska rörelser (340)

Namnet på det först nämnda delprojektet ändrades på förslag av projektledaren till "Djupa grundvatten"

Projektet har letts av Alf Björklund, Åbo Akademi och delprojekten har letts av Runar Blomqvist (335), Geologiska forskningscentralen (Finland), Eva-Lena Tullborg (340), Sveriges Geologiska AB och Paavo Vuorela (345), Geologiska forskningscentralen. För koordinering och informationbefrämjande inom de nordiska länderna valdes en referensgrupp, som bestått av Lars-Jørgen Andersen i Danmark, Paavo Vuorela i Finland, Craig Smalley i Norge samt Fritz Kautsky och Roy Stanfors i Sverige. En förteckning över dessa och övriga projektdeltagare finns i Appendix 1.

Arbetet påbörjades under andra hälften av 1985 som ett förprojekt under vilket främst litteraturstudier (Poutiainen, 1985; Lahtinen et al., 1985; Tullborg et al., 1986) och olika utredningar gjordes. I detta skede gjordes den huvudsakliga planeringen av huvudprojektet, vars arbeten påbörjades 1986. Studierna inom "Djupa Grundvatten" kom snabbt igång, medan arbetena inom de två andra delprojekten fördröjdes i Sverige på grund av omläggningar av de nationella insatserna.

Projektet har i huvudsak inriktats på koordinering och komplettering av olika arbeten, som pågår i de olika länderna. Den huvudsakliga finansieringen av projektarbetena har därför kommit från de olika nationella organisationer, som deltagit. Av de nordiska länderna är det endast Finland och Sverige som bortsett från forskningsreaktorer producerar kärnbränsleavfall. Därför är det naturligt, att nästan hela den nationella finansieringen av arbetena gjorts i dessa länder.

En exakt beräkning av de nationella insatserna låter sig inte göras på grund av att vissa deltagande finansiärer vill hålla sådana uppgifter konfidentiella. En grov uppskattning ger dock vid handen, att de sammanlagda nationella insatsen under 1985 - 1989 varit av storleksordningen 12 miljoner DKK. NKA/KAV har under samma tid bidragit med sammanlagt 1 175 000 DKK för projektet, av vilka 50% använts för resor, 31% för arvoden och 19% för övriga utgifter, främst för grundämnesanalyser och isotopanalyser. Dessutom har Nordiska Ministerrådets Nordiska Forskar-

kurser gett sammanlagt 90 000 DKK som stöd för tre symposier, ett 1986 i Esbo om djupa grundvatten och neotektonik, ett annat 1987 i Sverige om neotektonik och ett tredje 1987 om djupa vatten och geokemi. Vad delprojektet för djupa grundvattnen beträffar, har insatserna i huvudsak gjorts i Finland, medan de svenska insatserna dominerat inom delprojekten för datering av sprickmineral och studier av neotektoniska rörelser.

Projektet har väl uppnått de målsättningar, som uppställdes och delvis har resultaten överträffat förväntningarna, framför allt vad undersökningarna av de djupa grundvattnen och vissa delar av det neotektoniska delprojektet beträffar för vilka en även internationellt sett unik kompetens byggts upp. Man har med hjälp av de framtagna resultaten kunnat utöka den kunskap man har om flera för kärnavfallsdeponering viktiga aspekter. Man har också etablerat ett nordiskt och internationellt samarbete som varit av stor betydelse för projektarbetet. Trots att de nordiska projektmedlen varit små i jämförelse med de nationella insatserna, har de varit viktiga för ett framgångsrikt arbete. Dessa medel har gett projektdeltagarna möjligheter till regelbundna kontakter, till diskussionstillfällen, till att besöka varandras fältundersökningsområden och till att inbjuda internationellt högt kvalificerade forskare till seminarier och gemensamma forskningsprojekt. Det stora antalet publikationer, som åstadkommit inom projektets ramar, och som till betydande del publicerats i internationella facktidskrifter, visar även de på ett framgångsrikt arbete. Trots den betydelse ovan nämnda typ av samarbete och aktiviteter kan ha på uppbyggnaden av kompetens inom ett nytt område, som det nu aktuella projektarbetet visar, ställer det sig oftast mycket svårt att få nationell finansiering för denna del och därför har den nordiska finansieringen varit av vital betydelse för genomförandet av projektet.

Åbo den 30 januari 1990

Alf Björklund,
projektledare

DJUPA GRUNDVATTEN

Runar Blomqvist

INLEDNING

I slutet av år 1985 bildades vid Geologiska forskningscentralen i Finland (GFC) ett arbetsteam med syfte att studera djupa grundvatten i den prekambrika kristallina berggrunden i Finland. Arbetsteamet etablerades inom forskningsgruppen för kärnavfallsdeponering, men forskare från geokemiavdelningen deltog också i projektet. Utgångspunkten för arbetet var att kunskapen om grundvattenförhållanden i kristallin berggrund var otillräcklig, med tanke på en eventuell deponering av använt kärnbränsle djupt inne i berggrunden. En annan inverkan var att det fanns ett stort antal djupa borrhål, ursprungligen gjorda för prospekteringsändamål, utspridda över hela landet, som kunde utnyttjas för att öka kunskapsläget om djupa grundvatten i kristallin berggrund.

Målsättning var att komplettera kunskapen om djupa grundvatten främst på följande sätt:

1. Kartering av sammansättningen och förhållanden i djupa grundvatten i olika geologiska omgivningar.
2. Studium av utvecklingen och ursprunget av djupa, salta grundvatten i områden med kristallin berggrund.

Utgångspunkter för projektarbetet vid GFC var att utnyttja befintliga prospekteringsborrhål för att relativt snabbt och med små kostnader få en omfattande databas om djupa grundvatten i varierande litologiska omgivningar. Utredningen planerades för fem år. Den årliga arbetsinsatsen var i början cirka 2 personår, men utvidgades senare till cirka fyra personår. Arbetets huvudsakliga finansiär var energiavdelningen vid handels- och industriministeriet i Finland men medel bl.a. från Geologiska forskningscentralen, Strålsäkerhetscentralen i Finland och Industrins Kraft Ab bidrog också. För tillfället pågår projektarbetets intensivaste rapporteringsskede.

I delprojektet "Djupa grundvatten" representerade Runar Blomqvist Finland och fungerade samtidigt som delprojektledare. Peter Wikberg (numera på Svensk Kärnbränslehantering Ab) och Marcus Laaksoharju från Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) representerade Sverige och Craig Smalley från Institutet för Energiteknik (numera på BP Research Center, London) har varit representant för Norge. I ett senare skede anknöts Lars Jörgen Andersen från Danmarks Geologiske Underøkele, som representant för Danmark.

Aktiviteten koncentrerades kring det pågående arbetet med djupa grundvatten, emedan de finska nationella insatserna på detta område var relativt omfattande. Den svenska aktiviteten koncentrerades på planeringen och uppbyggandet av en provtagare för kärnborrhål av liten diameter. I Norge vidare utvecklades en teknik för "water-rock interaction" studier baserad på strontiumisotopförhållanden. Studier av gaser i djupa grundvatten gjordes i samarbete med kanadensiska och tyska experter.

VAL AV PROVTAGNINGSSOMRÅDEN

Vid valet av de borrhål, som skulle studeras, beaktades förutom litologisk mångsidighet även borrhålens geografiskt jämna fördelning samt deras djup och tillgänglighet.

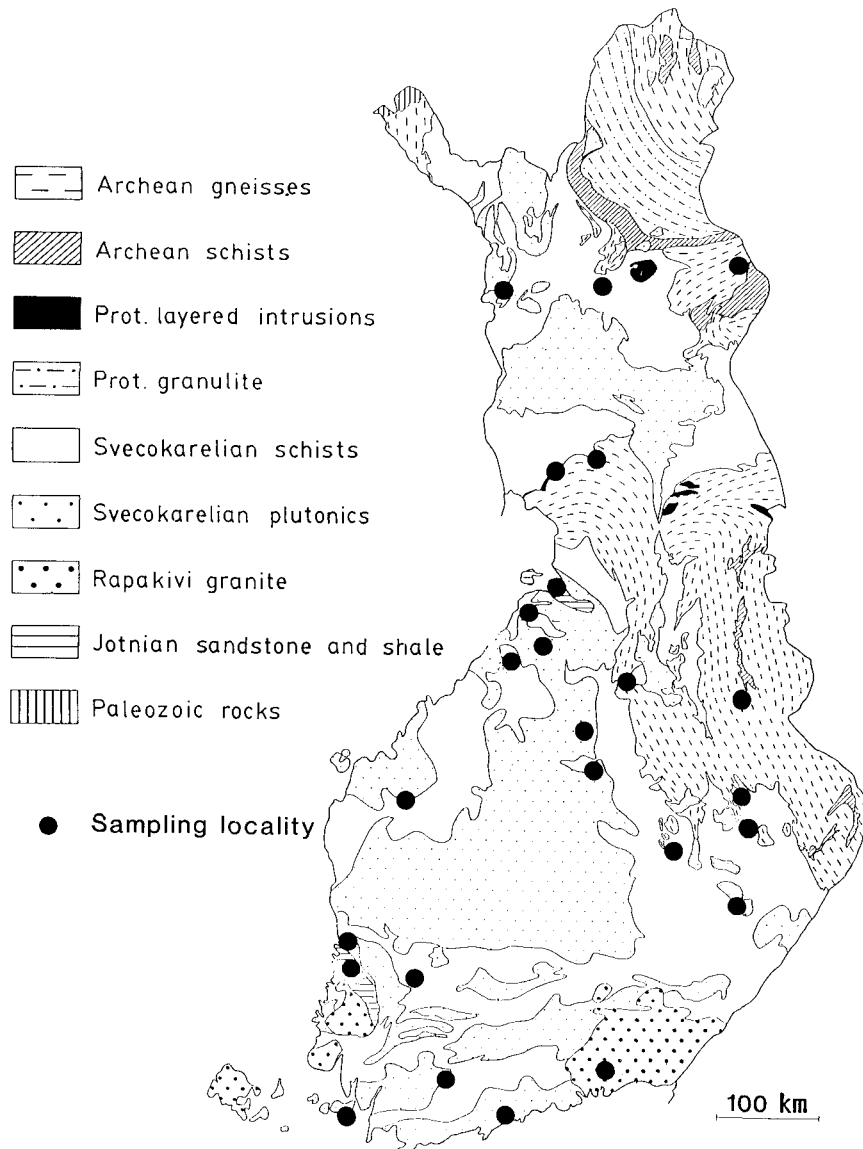


Fig.1. Lokalisering av de viktigaste områden där djupa grundvatten har provtagits med slangprovtagaren. Geologiska bottenkartan enligt Simonen (1980).

Under åren 1986 - 1989 provtogs omkring 50 borrhål i Finland vilka med undantag av enstaka borrhål var gjorda för malmletningsändamål, vilket betyder att materialet till viss grad representerar en speciell litologi. De flesta borrhålen ligger i eller nära skifferbälten (Fig.1) vilket betyder att glimmergnejser och -skiffrar samt sura, basiska och ultrabasiska intrusioner samt till en mindre grad även vulkaniter, grafitskiffer och serpentinit är väl representerade. Enstaka borrhål ligger i mera avvikande litologiska omgivningar som i karbonatitintrusioner samt i sedimentära sandstens- och lerstensformationer. Granitoider och migmatitgnejser är i viss mån underrepresenterade. Detta kompenseras dock genom de omfattande arbeten som utförs i dessa bergarter vid de pågående platsundersökningarna för deponering av använt kärnbränsle både i Sverige och Finland (Smellie et al., 1985, 1987; Wickström & Lampén, 1986; Lampén, 1988a, 1988b; Wickström & Nurmi, 1989a, 1989b, 1989c)

PROVTAGNINGSUTRUSTNING

Slangprovtagare

Provtagningen utfördes med en nyligen konstruerad slangprovtagare som lämpade sig för provtagning i befintliga prospekteringsborrhål av liten diameter (46 mm). Provtagningsutrustningen, i princip en slang med en baktryckventil på bottenändan (Fig.2), visade sig arbeta tillfredställande ner till 1300 m. Provtagaren har närmare beskrivits av Nurmi & Kukkonen (1986).

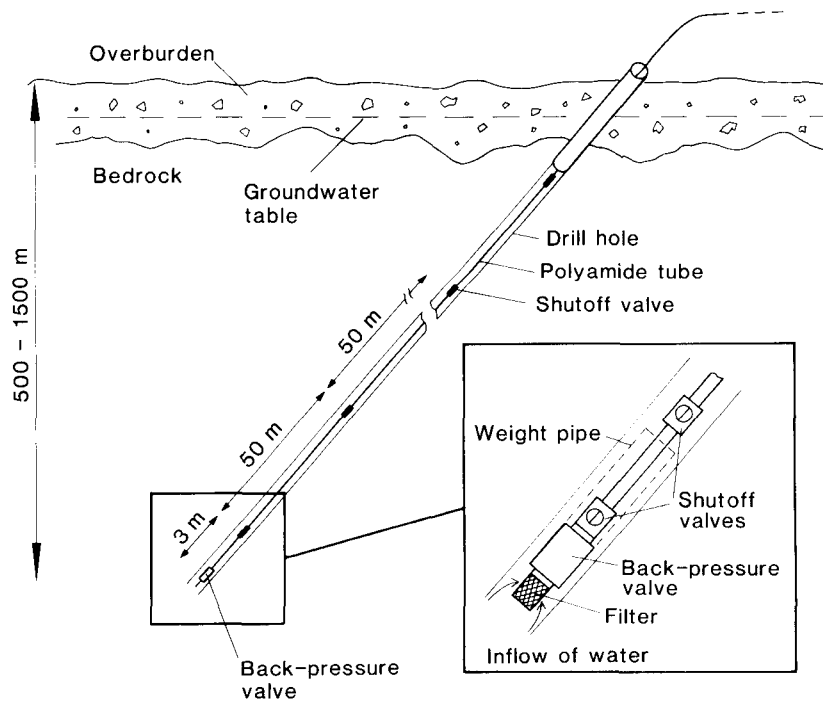


Fig.2. Principbild av slangprovtagaren för djupa grundvatten i små borrhål (Nurmi & Kukkonen, 1986)

Dubbelmanchettpump

Redan vid att tidigt skede framkom det att slangprovtagaren, trots dess flera praktiska fördelar, var otillräcklig för vissa detaljerade studier och att en kompletterande utrustning med dubbelmanchetter skulle behövas. Emedan en utrustning som lämpade sig för 46 mm:s hål inte fanns tillgänglig konstruerades en sådan. Marcus Laaksoharju planerade och uppbyggde en prototyp för en hydraulisk-pneumatisk pumputrustning

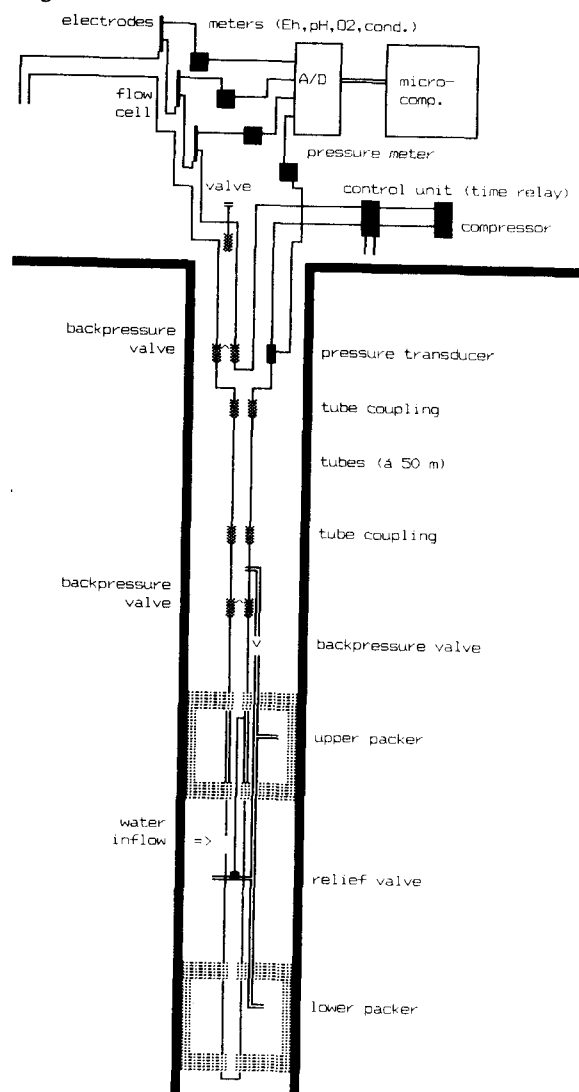


Fig.3. Principskiss av den portabla manchettumpen (Laaksoharju et al., under utarbetning).

med dubbelmanschetter. Arbetets första skede utfördes 1986 med medel från NKA-/KAV, GFC och KTH. Följande år ombyggdes utrustningen så att den även lämpar sig för pietsometriska tryckmätningar. Tryckmätningens utrustning skaffades med NKA/KAV medel från BAT Envitech Ab. Under praktiska testningar vid GFC förbättrades utrustningens funktion tekniskt 1987 - 1989 och försågs med en portabel enhet för datainsamling och -behandling. Under fältsäsongen 1989 fungerade utrustningen tillfredsställande och representativa grundvattenprov från sprickor i berggrunden kunde tas.

En skiss av utrustningen ges i Fig.3 och en beskrivning ges av Laaksoharju et al., (under utarbetning). Erfarenheterna visar att det är tidskrävande att få representativa vattenprov från sprickor i berget. Med ett manchettavstånd på 25 m kan en pumpningstid på upp till sex timmar och en pumpningsvolym på 300 l vara nödvändig för att t. ex. få representativa Eh-värden (Fig.4). Svenska undersökningar visar (Wikberg, 1987) att även betydligt längre pumpningstider i viss fall kan erfordras.

RESULTAT

Grundvattentyper

Sammansättningen av djupa grundvatten i den kristallina berggrunden i Finland varierar kraftigt. Grundvattentyper med antingen bikarbonat, sulfat eller klorid som dominerande anion, samt olika blandningar av dessa, har påträffats. Bikarbonattypen karakteriseras av salthalter (TDS; Total Dissolved Solids), under 1 g/l; sulfatvatten har TDS upp till några g/l och kloridvatten varierar från några g/l till över 100 g/l. Också den lokala fördelningen av olika grundvattentyper varierar starkt. Ställvis kan borrhål ha söta bikarbonatvatten från markytan ner till flera hundra meters djup. Ofta påträffas borrhål, där salta kloridvatten av olika salthalter, ligger under ett bikarbonatvattenlager av varierande tjocklek. I enstaka fall har borrhål med saltvatten ända upp till markytan påträffats. Provtagning med dubbelmanchettutrustningen från sprickor i två av dessa fall har bekräftat, att saltvattnet påträffas också i berggrundens sprickor nära markytan (på 100 m djup) (Fig.5).

Också djupet på vilket bikarbonatvatten övergår i salt vatten varierar kraftigt; övergångszonen ligger vanligtvis på ett djup av ett par hundra till flera hundra meter. Variationen i salthalt, mätt som kloridhalt, är extrem med en nedre gräns på några ppm/l och en övre gräns på 100 000 ppm/l, dvs. 10 % (Fig.5). Djupa grundvatten, där sulfat är den dominerande anionen, är relativt få. Enstaka fall i finska Lappland har dock påträffats (Kolari och Sodankylä). I det första fallet har man kunnat identifiera relativt lösligt gips som mellanlager eller spickfyllnad i omgivande bergarter (Fig.6). En del borrhål som ligger i gruvor eller penetrerar massiva sulfidmalmshorisonter har också höga sulfathalter.

Tritiumhalterna i de salta grundvattnen är i regel nära detekteringsgränsen. Halterna är också låga i en del bikarbonatvatten, vilket tyder på en långsam eller ringa infiltration av ytligt meteoriskt vatten i dessa områden. Bikarbonatvatten har dock oftast höga tritiumhalter, vilka vanligen klart minskar med djupet. I de mest ytnära fallen kan tritiumhalten vara av samma storleksordning som i lokala sjövattnen och ytliga grundvattnen (Fig.7).

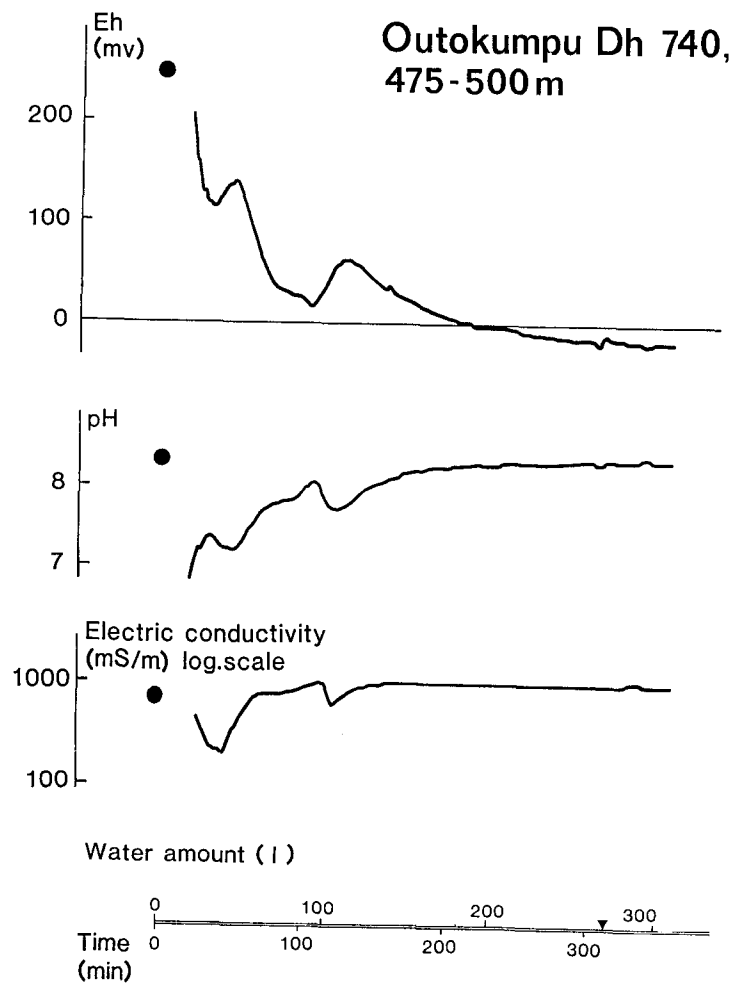


Fig.4. Exempel på erhållna resultat med dubbelmanchettpumpen i borrhål 740 i Outokumpuområdet. Förändring av Eh, pH och elektrisk konduktivitet som funktion av pumpningstid och vattenmängd. Manchetterna på 475 - 500 m djup. De svarta punkterna visar motsvarande värden erhållna med slangprovtagaren (Blomqvist et al., 1989a)

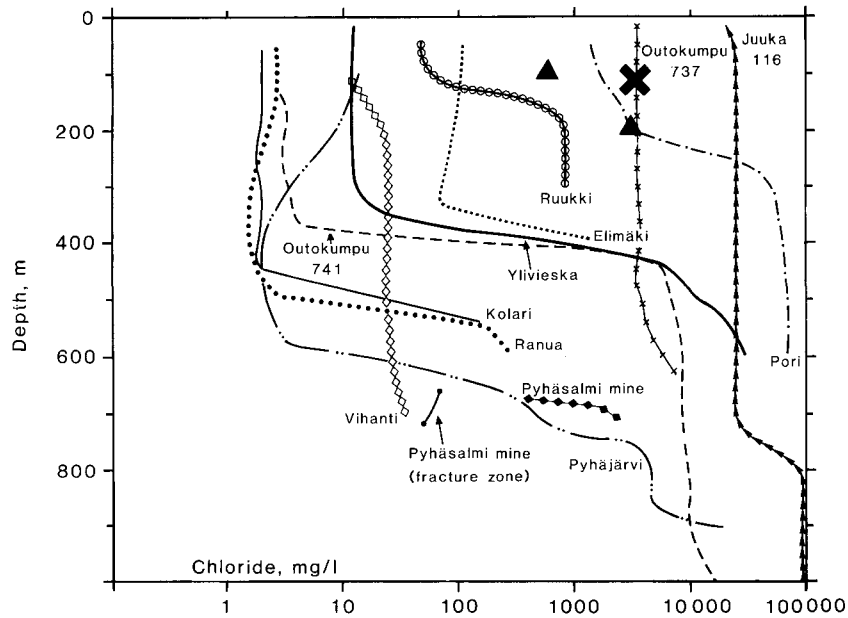


Fig.5. Kloridhalt versus djup i utvalda borrhålsvatten provtagna med slangprovtagaren (Blomqvist, 1989). Som jämförelse presenteras enstaka resultat erhållna med dubbelmanchettutrustningen från sprickzoner: Pori (Björneborg) (triangel) och Outokumpu 737 (kryss).

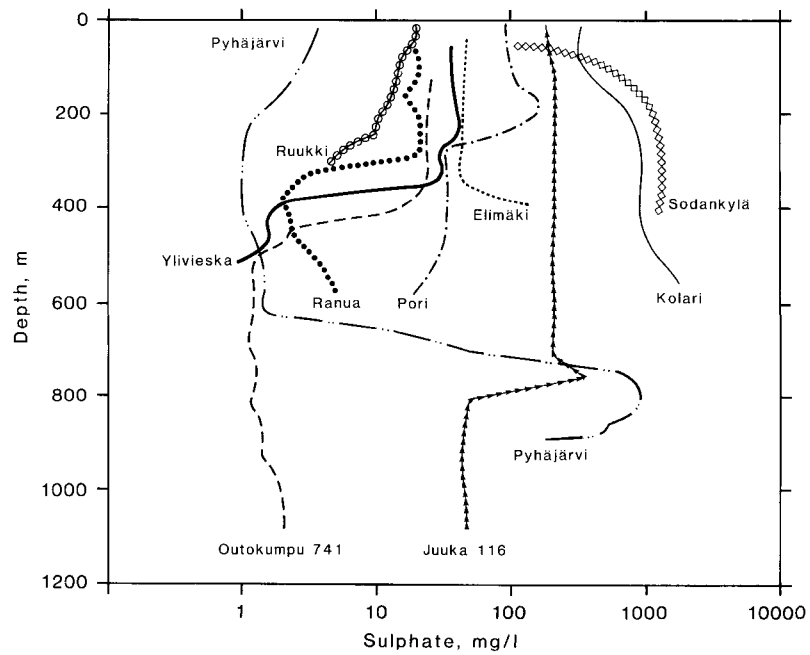


Fig.6. Sulfathalt versus djup i utvalda borrhålsvatten (Blomqvist et al., 1989b). Kolari och Sodankylä borrhålen har sulfatdominerande grundvattentyper.

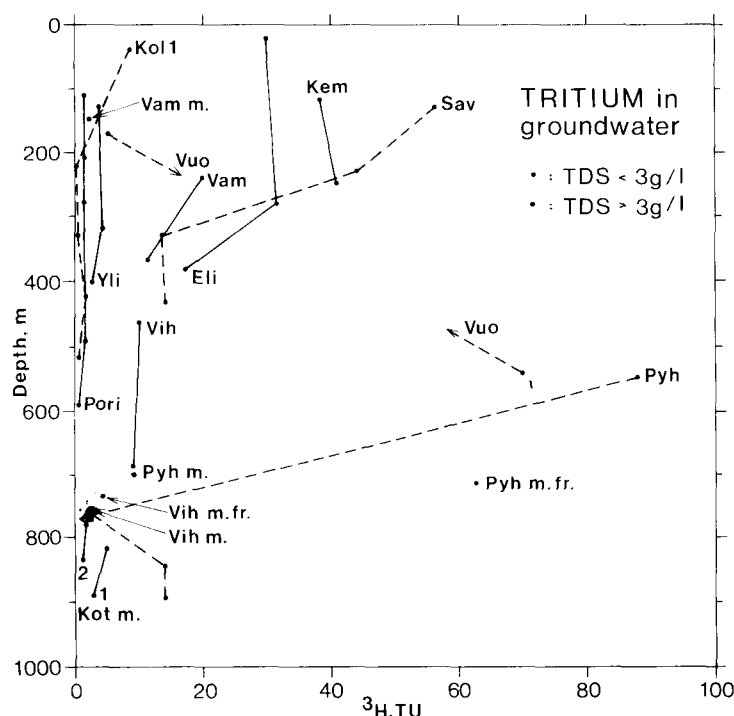


Fig.7. Tritiumhalter versus djup i utvalda borrhålsvatten (Blomqvist et al., 1989b).

Faktorer som påverkar fördelningen av olika grundvattentyper

Ofta påträffas kloridhaltiga vatten på ett djup av 300 - 500 m. Dock kan salthaltiga vatten påträffas betydligt högre upp i borrhål som är belägna i kustområden. Detta bekräftas även av tidigare resultat och tolkningar (Lindevald, 1985; Kankainen, 1986; Lahermo & Lampén, 1987), enligt vilka svagt salta vatten (nära motsvarande det nuvarande östersjövattnet) förekommer relativt nära markytan på de kustområden som var täckta av det postglaciala Littorinahavet.

Fenomet med salta kloridvatten som ligger under bikarbonatvatten i praktiskt taget vart annat borrhål, som har undersökts på GFC, verkar till viss grad avvika från resultat som har erhållits annorstädes i den Fennoskandiska skölden. Resultaten av grundvattenprovtagningar utförda på utvalda platser för kärnavfallsdeponering både i Sverige och Finland (Smellie et al., 1985, 1987; Wickström & Lampén, 1986; Lampén 1988a, 1988b; Wickström & Nurmi 1989a, 1989b, 1989c) visar nämligen, att bikarbonatvatten allmänt kan hittas även djupt nere i berggrunden och endast få fall av kloridrika vatten har påträffats tidigare.

Berggrundens litologi utgör den väsentligaste skillnaden mellan de områden, där platsundersökningar för kärnavfallsdeponering har gjorts, och GFC:s provtagningsområden. I de förstnämnda områdena påträffas mest granitoider, granitgnejser och migmatiter, som hör till de mest typiska bergarterna. Dessa är massiva och har ett typiskt regulärt sprickmönster med glest förekommande men öppna och kontinuerliga subhorisontella sprickor. GFC:s provtagningsområden är för det mesta belägna i eller nära skifferbelten i vilka berggrunden är mera heterogen och där

olika skiffrar intruderas av en del sura, basiska och ultrabasiska intrusioner och gångar. Sprickfrekvensen i de kraftigt skiffriga bergarterna är hög, men grundvattenflödet (enligt statistiska pumpningsresultat; c.f. Lahermo, 1971; Rönkä et al., 1980), är genomsnittligt betydligt mindre än i granitoider. De basiska och ultrabasiska intrusionerna har typiskt ett mera oregelbundet sprickmönster, där grundvattenflödet delvis verkar vara begränsat av sprickfyllnader.

Föregående beskrivning poängterar bergarternas och den med dem förknippade sprickgeometris inverkan på grundvattenflödet i berggrunden (c.f., Blomqvist, 1989). Grundvattens flöde och kemiska sammansättning verkar ha en del starka samband. Till exempel ett obetydligt eller mycket restriktivt grundvattenflöde har allmänt ansetts vara en av förutsättningarna för utveckling och förekomst av starkt salthaltiga grundvatten i berggrunden (c.f., Frøpe et al., 1984; Sheppard, 1986). Ökningen av salthalt i grundvatten beror på långsam upplösning och omvandling av bergarternas mineraler. Ett kontinuerligt tillskott av grundvatten försäkras av kontinuerlig utspädning och ett kontinuerligt flöde ur systemet, vilket sänker salthalten. Sålunda indikerar förekomsten av söta bikarbonatvatten djupt nere i berggrunden ett konduktivt kanalsystem, där ett relativt kontinuerligt grundvattenflöde pågår. Detta förutsätter tillräckligt stora tryckgradienter som anses bero på topografiskillnader, men en del andra faktorer kan också inverka.

Glacialcykeln som försäkras stora absoluta vertikala förskjutningar i jordskorpan övre del och ständiga relativa vertikala förskjutningar mellan de närliggande berggrundsblocken, försäkras ett mönster av över- och undertryck som varierar med tiden. De därmed förknippade insugnings- och urpressningseffekterna mobiliserar berggrundens grundvattentillgångar längs befintliga sprickzoner. Sålunda kan kemiskt totalt olika grundvattentyper och blandningar av dessa väntas förekomma i berggrundens övre delar med salta grundvatten nära markytan så väl som bikarbonatvatten med ytnära egenskaper på flera hundra meters djup. Stora lokala variationer i fördelningen av olika grundvattentyper inom begränsade berggrundspartier kan också förväntas (c.f. Blomqvist et al., 1989a). Ett exempel, där relativt stora variationer i de djupa grundvattens sammansättning lokalt kan ses visas i Fig.8 där elektriska konduktivitetsvärden för vatten i tio olika borrhål i Miihkali serpentinitmassivet (Lahermo et al., 1989) presenteras. Det största avståndet mellan borrhålen är 7 km. Konduktiviteten varierar från värden typiska för ytnära bikarbonatvatten (10 mS/m) till värden för ytterst salta kloridvatten (17 ‰; 12 000 mS/m). Också djupet där bikarbonatvattnet övergår till en mera salt typ växlar starkt.

Ursprunget till salta grundvatten

De svagt salta grundvattnen i kustområdena har geokemiska särdrag, som delvis motsvarar egenskaperna i det nutida östersjövattnet. Enligt detaljerade studier i Hästholmen området (Kankainen, 1986) innehåller grundvattnet en stor portion av Littorina-havsvatten uppblandat med glaciala smältvatten. På grund av liknande geokemiska och isotopkemiska resultat anses allmänt (c.f. Lahermo & Lampén, 1987; Nurmi et al., 1988), att övriga svagt salta grundvatten i kustområden har ett liknande ursprung. Variationen anses bero på varierande proportioner av recenta ytliga grundvatten samt små mängder av djupa salta grundvatten. Delvis kan dessa vatten också vara påverkade av reaktioner med den omgivande berggrunden.

Utvecklingen av och ursprunget till saltinnehållet i de övriga djupa grundvatten, som har påträffats över hela den kristallina berggrunden i Finland, är svårare att tolka.

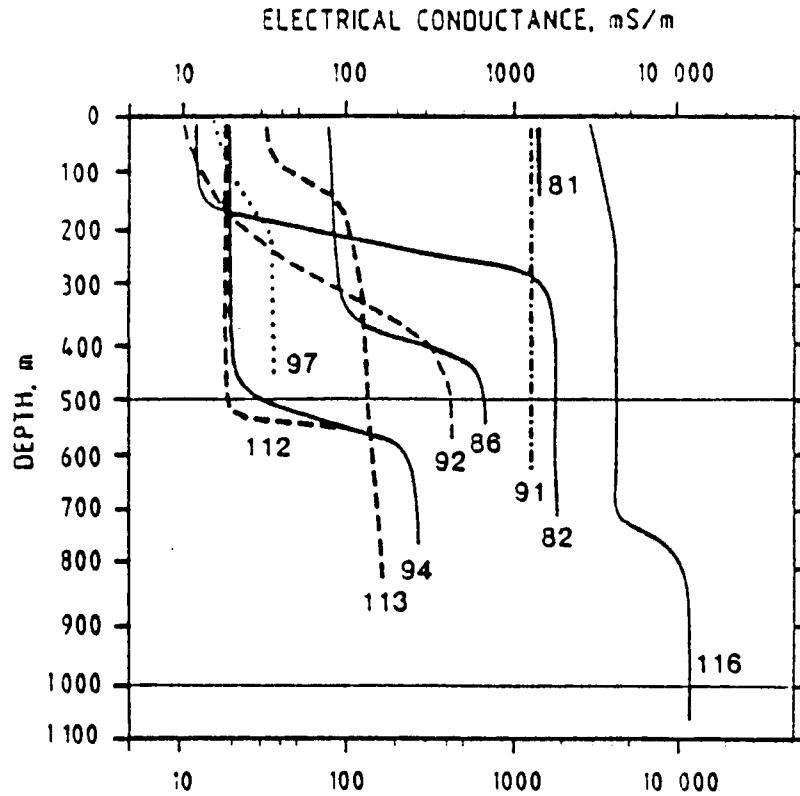


Fig.8. Elektriska konduktivitetsvärden i grundvatten i tio olika borrhål, som går i eller genom Miihkali serpentinitmassiv (Lahermo et al., 1989).

Jonförhållanden påvisar inga entydliga bevis på en kraftig havsvatteninverkan, men utesluter inte heller möjligheten, att havsvattenkomponenter någon gång under vattnets evolutionshistoria skulle ha medverkat (c.f. Nurmi et al., 1988; Blomqvist et al., 1989b). De tydligaste spåren av havsvattenpåverkan kan mycket väl i hög grad vara uttraderade genom omfattande reaktioner under långa tider mellan grundvattnen och omgivande berggrund (c.f. Frape et al., 1984).

Omfattande bevis på "water-rock interaction" processer finns tillgängliga. Till exempel borrhålsvattnen, som ligger i magnesiumrika bergarter kan ha mycket höga Mg-halter under gynnsamma pH-förhållanden. I den mafisk-ultramafiska intrusion i Ylivieska överstiger Mg-halterna 5000 ppm. Bergarter med höga fluorithalter har också höga fluorhalter i grundvattnet som t. ex. vattnet i Elimäki borrhålet i rapakivigraniten. Resultat från kanadensiska undersökningar (Frape et al., 1984) visar, att grundvattnets och de omgivande bergarternas kemiska sammansättning i genomsnitt korrelerar tydligt, vilket antyder en omfattande "water-rock interaction" av lokal karaktär. Andra resultat visar att mycket stabila huvudelementförhållanden (Ca/Cl och Na/Cl) förekommer i de saltaste djupa grundvattnen på olika områden. Denna likhet tros bero på att långt framskridna "water-rock interaction" processer kontrolleras av endast vissa specifika mineralreaktioner (Frape & Fritz, 1987).

I diagrammet deuterium versus syre-18 (Fig.9) uppvisar de flesta djupa grundvattnen

en klar meteorisk karaktär. Isotopvärden för alla bikarbonatrika vatten samt en stor del av djupa salta grundvatten ligger på linjen för globala meteoriska vatten (GMWL) eller nära den, vilket påvisar vattnets allmänna meteoriska karaktär. De mest salta grundvatten och "brines" (salthalt över 100 g/l) avviker dock tydligt från övriga salta vatten och ligger klart över GMWL-linjen. Ett undantag bland de mest salta vattnen är dock vattnet i Björneborg (Pori), som också geologiskt ligger i en avvikande omgivning, nämligen i en icke-kristallin sandsten. För övrigt har de mest salta vattnen mycket unika isotopförhållanden, även när resultaten jämförs med de hittills helt exceptionella isotopvärden från den kanadensiska skölden (Frape & Fritz, 1982; Fritz & Frape, 1982).

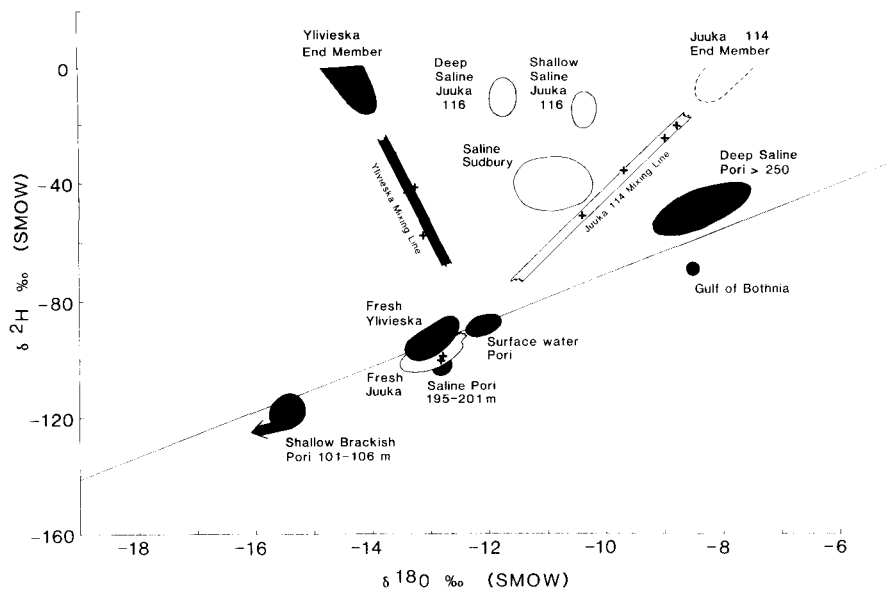


Fig.9. Deuterium/syre-18 diagram för de mest salta djupa grundvattnen i Finland samt till dessa relaterade övriga vattentyper (Blomqvist et al., under bearbetning). Som jämförelse presenteras också resultat från Sudbury området (Frape et al., 1984).

Vattnets ursprung i dessa mest salta "brines" är tills vidare oklar och en intensiv internationell diskussion pågår som bäst (c.f. Frape et al., 1984; Sheppard 1986; Frape & Fritz, 1987). Ursprunget kan anses vara meteoriskt eller gammalt havsvatten, men hydrotermalt, metamorft eller magmatiskt ursprung samt en blandning av dessa kan inte heller uteslutas. Oberoende av vilken eller vilka komponenter som är inblandade, fodras effektiva mekanismer, som kan fraktionera vattnets isotoper så att en radikal förskjutning ovanför GMWL-linjen kan ske. Flera olika processer har framförts som förklaring, av vilka följande anses vara de mest sannlika; 1) utbyte mellan vattnets och mineralernas syre- och väteisotoper, 2) fraktionering i samband med en hydrering av primära silikater vid omvandling till lermineral, och 3) utbyte av isotoper mellan vatten och en gasfas (Frape & Fritz, 1982; IAEA, 1983; Sheppard, 1986). Som en ytterligare process bör nämnas 4) fraktioneringsmekanismen i samband med en in situ produktion av olika väterika gaser (H_2 och kolväten) i den kristallina berggrunden. Denna process har blivit aktuell främst på grund av nya gasanalytiska resultat.

Alla dessa processer kan ge upphov till omfattande "water-rock interaction" reaktioner,

som i ytnära temperaturer kan anses vara ytterst långsamma och som dessutom erfordrar stagnanta grundvattenförhållanden med ringa grundvattenflöden (Frape et al., 1984; Sheppard, 1986). Under dessa förhållanden finns det förutsättningar för uppkomsten av ytterst höga TDS värden (t.ex. 170 g/l i Miihkali serpentiniten).

Strontiumisotopbaserade bevis på "water rock interaction"

Studier baserade på strontiums isotoper 86 och 87 kan framgångsrikt användas för att bekräfta pågående "water-rock interaction" processer och för att demonstrera ursprunget till en del upplösta komponenter i salta vatten. Arbeten med strontiumisotoper påbörjades därför i ett tidigt skede i det pågående projektet. De första arbetena utfördes på material från Outokumpu området (Smalley et al., 1988).

Sr-isotopförhållandena i vatten i borrhål OKU-741 minskar systematiskt med ökande djup och salthalt, och de tre olika grundvattentyperna, som kemin påvisar, återspeglas också i Sr-isotopvärdena (Fig.10). Överst ligger ett bikarbonatvatten med Sr-isotopvärden omkring 0,733; detta efterföljs först av ett Ca-Na-Cl vatten och därefter av ett mera salthaltigt Ca-Na-Mg-Cl vatten med Sr-isotopvärden omkring 0,724 resp. 0,723. Sr-isotopvärdena i de salta vattentyperna minskar mjukt, och verkar inte alls vara påverkade av den mycket stora litologiska variationen i omgivande berggrund.

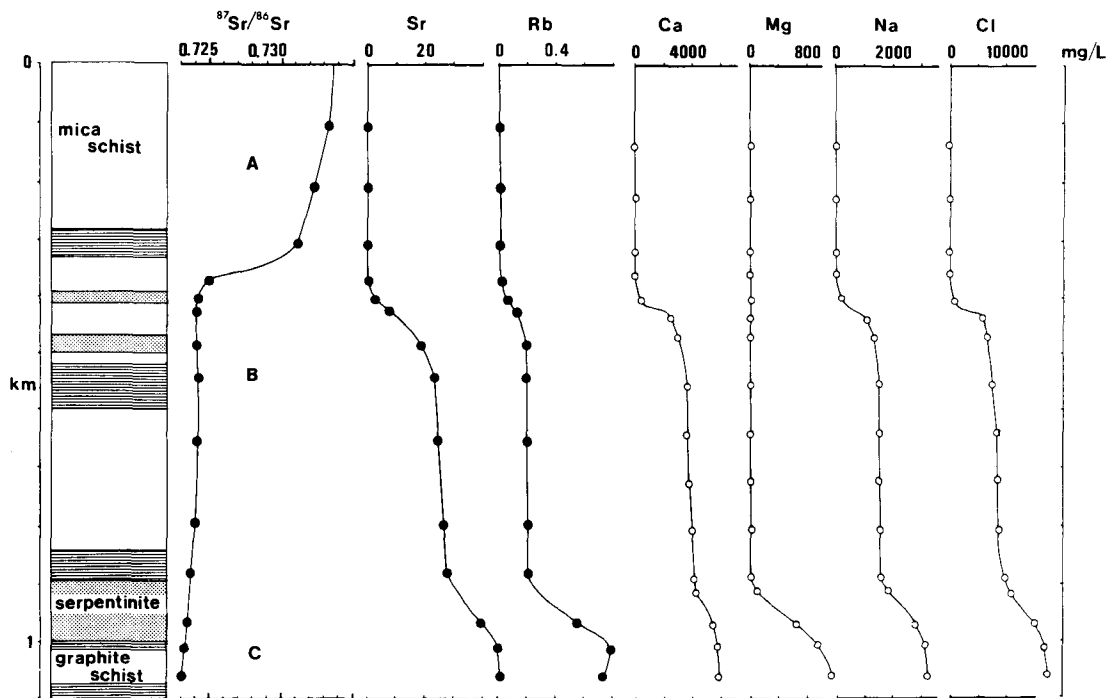


Fig.10. Berggrundens litologi samt vattenkemi och strontiumisotopvärden i grundvattent i borrhål OKU-741 i Outokumpu området (Smalley et al., 1988).

Emedan Sr-halterna korrelerar bra med halterna av flera andra joner (Ca, Na och Cl), kan dessa alla också ha ett gemensamt ursprung. Havsvatten kan inte tänkas vara källan till strontiumhalterna, emedan Sr-isotopförhållanden i havsvatten både under proterozoisk och paleozoisk tid varit mycket lägre (c. 0,710) än i de studerade vattnen (0,723 - 0,733). Sr-isotopförhållandena i Outokumpu områdets bergarter framgår ur Fig.11. Serpentiniten har 0,710, fältspatrik skiffer c. 0,750, glimmerik skiffer omkring

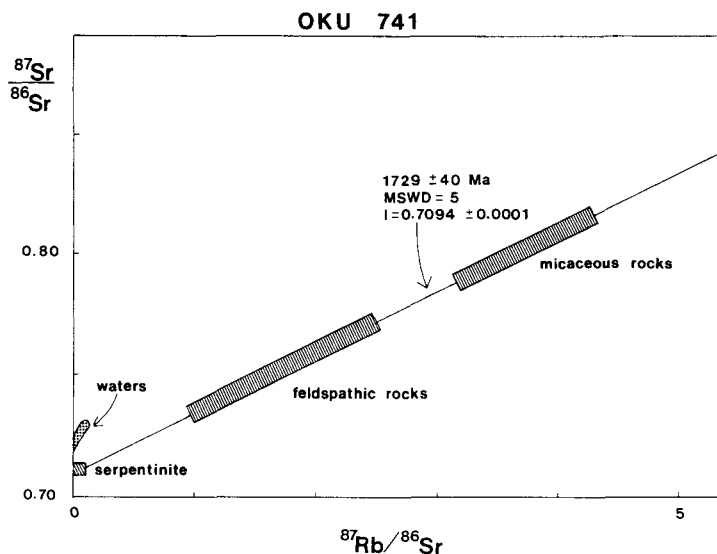


Fig. 11. Bergarternas och grundvattnens $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ och $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ förhållanden i borrhål OKU-741 i Outokumpu området (Smalley et al., 1988).

0,80 medan medelvärdet för de av borrhålet penetrerade litologierna är omkring 0,760. Av dessa bergarter har fältspatrika skiffer värden som närmast motsvarar grundvattnens Sr-isotopvärden. Ännu bättre motsvarighet har plagioklasens Sr-isotopvärde, som torde ligga omkring 0,72 - 0,73. På basen av Sr-isotopresultaten kan plagioklas mycket väl anses vara en donator för Sr och också till relaterade katjoner t.ex. Ca och Na. Detta utspelas i mängden av sekundära mineraler i plagioklas, t.ex. serisit, och i det, att zeolitmineral allmänt finns som sprickfyllnad i områdets bergarter. Det faktum att Sr-isotopvärdena ändrar mycket långsamt med djupet och är opåverkade av tvärlitologiska skillnader i omgivande bergarter tyder på att "water-rock interaction" processerna pågår volymmässigt i en relativt stor skala. Det är troligt, att dessa processer i grunden beror på att de metamorfa mineral, som bildats vid en relativt hög temperatur, är i kemisk ojämvikt i nuvarande yttnära förhållanden och att de under miljontals år har reagerat med vatten för att uppnå en ny jämvikt. Uppkomsten av salta grundvatten är då främst beroende på om vattenmassan kan ligga intakt och ostörd av andra vattenmassor, vilket förutsätter ett ytterst litet grundvattenflöde.

Gaser i djupa salta grundvatten

Ett internationellt gasanalytiskt arbete påbörjades 1987 i delprojektet. Syftet med arbetet var, att med hjälp av expertis och avancerade analytiska metoder skaffa kunskap om gaserna i djupa salta grundvatten, och att studera deras ursprung. Arbetet leddes

av S.K. Frapce och hans forskargrupp från Waterloo University i Kanada. I arbetet deltog även experterna på gasanalys från Memorial University, Kanada, samt från Institut für Hydrologie, Väst-Tyskland. Gasprovtagningen och den vattenkemiska tilläggsprovtagningen sköttes gemensamt av GFC och Frapes grupp.

Provtagningen utfördes under sommrarna 1987 och 1988 på 10 olika områden, varav fyra lokaliteter provtogs dubbelt. Provtagningen för gas utfördes med en ny kanadensisk utrustning. Provtagaren sänktes ner i borrhålet några meter ovanför det önskade provtagningsdjupet. Provbehållaren "tvättades" med hjälp av pumpat borrhållsvatten varefter provtagaren sänktes till det egentliga provtagningsdjupet. Provet togs in i ett kopparrör och provets in situ tryck bibehölls ända fram till analyskedet.

De första resultaten och tolkningarna av gasfasens sammansättning och ursprung har redan presenterats (Sherwood Lollar et al., 1989). Gasfasen består, liksom motsvarande prov i den kanadensiska skölden, främst av CH_4 och N_2 , och har lokalt höga He och H_2 halter, upp till 20% resp. 30%. I Fig.12 ligger en del av metangasen i fältet för termogena gaser, men i de flesta fall är metan klart deuteriumfattigt, liksom det är i de flesta motsvarande kanadensiska gasprov, och ligger utanför fältet för termogena gaser. Outokumpu områdets gaser har delta $^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ som motsvarar värden i Sudbury området och liknar närmast de kända abiotiska gaserna vid "East Pacific Rise".

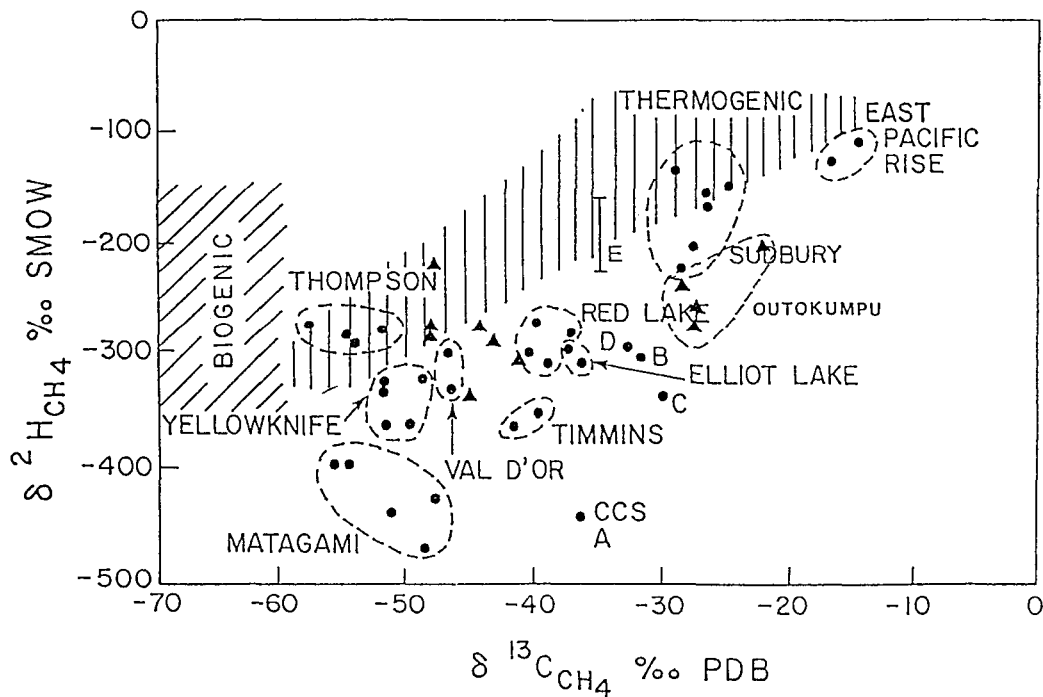


Fig.12. Delta ^{13}C - och delta ^2H -värden för metan från olika områden i Kanada (punkter) och Finland (trianglar). Gruppen kallad Outokumpu innehåller prover från Outokumpu och Miihkali, övriga trianglar representerar prover från Björneborg, Ylivieska och Vammala (Sherwood Lollar et al., 1989).

Gasen från borrhålen i Enonkoski gruva är mycket specifika, emedan de påvisar tydliga biogena signaturer (Sherwood Lollar et al., under bearbetning.), och ligger inom nedre hälften av fältet för biogena gaser i Fig. 12 (inte utprickade). Resultaten måste dock ytterligare verifieras.

H₂-rika gasfaser i geologiskt relativt unga formationer har tidigare påträffats i till exempel Oman, där serpentiniseringsprocessen i samband med oxidation av Fe²⁺ har förklarats vara förorsakad av reduktion av vattenmolekylen varvid H₂ frigjorts (Coveney et al., 1987). Deuteriumbestämningar i en del H₂-rika gasblandningar både i Kanada och Finland påvisar en betydande deuteriumförlust i H₂ jämfört med CH₄, vilket kan betyda, att H₂ medverkar i en oorganisk process, som producerar CH₄ in situ i kristallina mafiska-ultramafiska bergarter. Den på deuteriumvärden (CH₄ och H₂) baserade kalkylerade jämnvikten påvisar en bildningstemperatur på mellan 250 och 350°C, som passar inom ramerna för serpentiniseringsprocessen.

Analys och tolkningen av resultaten pågår som bäst och under 1990 torde alla resultat kunna presenteras (Sherwood Lollar et al., under bearbetning).

SLUTSATSER

Enligt de resultat som har erhållits vid Geologiska forskningscentralens undersökningar varierar sammansättningen på djupa grundvatten i den kristallina berggrunden kraftigt. Grundvattentyper med antingen bikarbonat, sulfat eller klorid som dominerande anjon samt olika blandningar av dessa, har påträffats. Ställvis kan borrhål ha söta bikarbonatvatten från markytan ner till hålets botten på flera hundra meters djup, men ofta förekommer salta kloridvatten under ett bikarbonatvattenlager av varierande tjocklek. Endast i enstaka fall har saltvatten påträffats ända upp till markytan. Övergångszonen mellan bikarbonatvatten och salta vatten ligger vanligtvis på ett djup av ett par hundra m till flera hundra m. I kustområden, som har varit täckta av Littorinahavet, kan saltvattenlagret vara betydligt närmare markytan. Resultaten verkar i viss grad avvika från de resultat, som har erhållits vid platsundersökningar för kärnavfallsdeponering både i Sverige och Finland, där främst bikarbonatvatten påträffats även djupt nere i berggrunden medan kloridvatten av hög salthalt påträffats endast i enstaka fall.

Vid en jämförelse av undersökningsområden kan vissa specifika litologiska och sprickgeometriska skillnader påvisas. Dessutom kan också en generell skillnad i altitud- och topografiförhållanden utpekas. Dessa faktorer kan ha en kraftig inverkan på grundvattnets volym och omsättning i berggrunden och därmed på vattnets sammansättning. Förekomsten av starkt salthaltiga grundvatten i berggrunden förutsätter ett obetydligt eller mycket begränsat grundvattenflöde. Ett kontinuerligt tillskott av ytnära grundvatten med låga salthalter ger en kontinuerlig utspädning och en kontinuerligt transport av salt ur systemet, vilket motarbetar förekomsten av lokalt starkt förhöjda salthalter i berggrunden.

Förekomsten av för ytnära förhållanden typiska bikarbonatvatten djupt nere i berggrunden påvisar förekomsten av ett relativt konduktivt kanalsystem, som möjliggör grundvattenflöde. En förutsättning är tillräckligt stora tryckgradienter. En allmänt accepterad faktor som förorsakar tryckgradienter är befintliga topografiskillnader, men tryckskillnader förorsakade av med glacialcykeln förknippade förskjutningar i jordskorpans övre del kan även bidra. På grund av sådana gradienter kan kemiskt totalt olika grundvattentyper och blandningar av dessa väntas förekomma i den kristallina berggrundens övre delar. Man kan också förvänta sig stora lokala variationer i

grundvattentyper, främst i samband med sprick- och förkastningszoner.

Emedan det i de delar av berggrunden, där salthaltiga grundvatten har påträffats finns tydliga tecken på ett mycket restriktivt grundvattenflöde, kunde en sådan berggrund också vara av intresse som en potentiell slutdeponeringsplats.

DATERING AV SPRICKMINERAL

Eva-Lena Tullborg
Jyrki Lehtovaara

INLEDNING

Det vatten som transporteras i berget rör sig huvudsakligen i sprickor. Sprickväggen är således en kontaktyta mellan bergarten och grundvattnet. Denna kontaktyta utgöres oftast av mineral som uppkommit genom; 1) omvandling av moderbergarten och 2) utfällningar från cirkulerande hydrotermala eller lågtemperaturlösningar. De mineral som återfinns i sprickorna kan ge information om de olika fysiko-kemiska förhållanden som har rått eller råder. Vidare kan studier av olika generationer av sprickläkningar ge en bild av de tektoniska händelserna som drabbat berggrunden. Datering av sprickmineral kan på så sätt, under lyckosamma förhållanden, ge åldersbestämningar av tektoniska händelser.

MÅL OCH METODIK

Målet med det sprickmineralogiska arbetet inom NKA/KAV-projektet har varit att med hjälp av olika geokemiska analyser, däribland radiometrisk datering, försöka; 1) beskriva den geokemiska miljön i berget och grundvattnet och 2) utvärdera olika metoder för att åldersbestämma sprickmineral och därmed rörelser i berggrunden. Arbetet har framför allt inriktats på yngre (neotektoniska) händelser.

STUDIER AV FISSIONSPÅR

(J. Lehtovaara)

Inledning

Möjligheten att använda fissionsspår (FT-metoden; Fission Track) för datering av unga rörelser i berggrunden har diskuterats. Metoden bygger på studier av de gitterdefekter, s.k. fissionsspår som uppkommer i samband med framför allt sönderfall av uran och dess dotternuklider. Dessa spår kan läkas ut vid förhöjda temperaturer. Olika mineral har olika läkningstemperaturer. Angränsande berggrundsblock kan uppvisa olika fissionsspårsmönster t.ex. utläkning av fissionsspår ned till olika djup på ömse sidor om en förkastning.

FT-metoden har använts bl.a. vid studier av den finska prekambrika berggrunden (Lehtovaara, 1976), på Grönland (Hansen, 1988) samt vid studier av sedimentära bergarter på norska kontinentalsockeln (Quale et al., 1988). Kunskap om fissionsspårstudier finns sålunda inom Norden. Dock fanns inga studier av unga rörelser utförda med FT-metoden. Arbetet inleddes således med en datorbaserad litteraturundersökning. Ungefär 400 titlar samlades in men praktiskt taget ingen av dessa behandlade metodens användbarhet för datering av yngre händelser. Vidare togs kontakter med fyra aktiva FT-forskare; Wagner (Max Plancks Institut), Gleadow (University of Melbourne), Naeser (USGS i Denver) och Kohn (Ben Gurion University).

Slutsatsen från litteraturstudien är att bestämningar av "unga" åldrar med FT-metoden är svåra att genomföra därför att:

- 1) Det finns oftast inte tillräckligt höga uranhalter i naturliga mineral för att få en bra åldersbestämning.
- 2) Det kemiska systemet måste vara låst så att inte uranet mobiliseras. Detta är framför allt ett problem vid datering av sprickmineral.

Trots dessa svårigheter beslöts att undersöka och utveckla möjligheten till FT-datering av lågtemperaturmineral såsom t.ex. kalcit. Vidare beslöts att göra längdmätningar av fissionsspår för temperatur-bestämningar och på så sätt indirekta åldersbestämningar.

Fissionsspår i kalcit

Studier av fissionsspår inleddes under våren 1986. Ett antal etsningsförsök av kalcitprover inleddes men uranhalten visade sig vara för låg (ca 1 ppm) för att erhålla mätbara fissionsspår. För att förhöja antalet fissionsspår och på så sätt kunna förhöja antalet mätbara spår användes neutronbestrålning. Trots detta kunde inga fissionsspår observeras i kalciten vilket tolkas som att kalciten inte kan bevara defekter som t.ex. fissionsspår i sitt gitter ens vid rumstemperatur. Detta har endast delvis tidigare varit känt (Sippel & Glover, 1964).

Undersökningen fortsatte med prover från TVO's djupa forskningsborrhål i Lavia, där sex prover av sprickfyllnader insamlades. Sprickfyllnaderna bestod av kvarts, kalcit, hematit, magnetit samt epidot. Tyvärr var uranhalterna för låga i dessa mineralprover.

Längdmätningar av fissionsspår

Då läkningsgraden av fissionsspår är beroende av temperaturen och till viss del av tiden (fullständig utläkning i det minst resistent mineral apatit sker vid ca 100°C) så skulle man kunna förvänta sig olika läkningsgrader på ömsesidor om en förkastning. För spårlängdmätningarna valdes således ut ett antal prover av granodiorit från varierande djup i forskningsborrhålet i Lavia. Apatiten studerades sedan i tunnslip där fissionsspårlängderna mättes under 2500 ggr förstoring. Det var dock svårt att göra detaljerade observationer då mängden spår var mycket hög. De kortaste spår som kunde uppmätas var 2 mikrometer. Resultatet visas i Tabell I.

Tabell I. Fissionsspårlängder i apatit från djupborrhålet i Lavia. Medeltal av ca 200 mätningar per prov.

Djup (m)	Spårlängd (mikrometer)
122	4.8
453	4.4
578	4.7
697	4.1
803	4.4
855	4.6

Resultaten visar ingen signifikant minskning av fissionsspåren mot djupet. Förklaringen kan vara att upphöjningen av berggrunden i denna del av den Fennoskandiska skölden har varit så långsam under fanerozoisk tid att skillnader i spårlängder inte går att observera inom det undersökta djupintervallet.

Slutsatser om fissionsspårmetoden

För närvarande kan inte FT-metoden anses lämpad för datering av neotektoniska rörelser i yttre prekambrisk berggrund, framför allt beroende på de låga halterna av uran i de intressanta mineralen samt på att systemet ofta är öppet för uranmobilitet under en lång tid.

KATODOLUMINESCENS- OCH TERMOLUMINESCENSMÄTNINGAR

(J. Lehtovaara)

Termoluminescensmätningar (TL) har använts på sprickfyllnadsmaterial för datering. Det visade sig dock snart att denna metod är alltför grov för datering av sprickmaterial bl.a. på grund av de mängder prov som behövs (ca 1 g). Dessutom är den bestrålning som provet har utsatts för i berget alltför inhomogen och svår att beräkna.

Beträffande katodoluminescensmätningar är dessa framför allt tänkta som ett komplement till andra metoder och ett sätt att välja ut lämpliga prover genom att man skulle kunna skilja olika generationer av t ex kalcit. Detta visade sig dock ske med varierande framgång. Metoden kan dock vara värdefull för vissa prover.

¹⁴C-ANALYSER PÅ SPRICKFYLLNADSKALCIT

Inledning

¹⁴C är en kolisotop som sönderfaller med en halveringstid på 5730 år. ¹⁴C produceras i atmosfären genom reaktionen $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C}$ och tillförs sedan allt levande material genom dess upptag av CO₂. På så sätt kommer den radioaktiva kolisotopen även att inkorporeras i geologiskt material såsom t.ex. karbonatutfällningar. Detta gör att ¹⁴C-analyser kan användas för datering av karbonatmineral med åldrar upp till ca 40 000 år. ¹⁴C-datering med konventionella metoder (baserade på registrering av ¹⁴C atomens sönderfall), har utförts med framgång på olika typer av kvartärgeologiskt material (skalbankar mm). Problemet med den konventionella tekniken är kravet på stora provmängder (större ju äldre provet är). En vidare utveckling av tekniken där man använder masspektrometri för att "räkna" alla ¹⁴C isotoper öppnar möjligheter till datering av prover som förut inte alls har kunnat analyseras. Denna möjlighet har riktat intresset mot sprickfyllnadskalcit i kristallint berg. Ett stort antal borrhälsningar finns tillgängliga men de karbonatmängder som går att få ut från varje spricka är mycket små (vanligen < 100 mg).

¹⁴C-analyser av sprickfyllnadskarbonater i kristallin berggrund är intressant av två anledningar; 1) för datering av neotektoniskt aktiverade och sedan igenläkta sprickor och 2) för fastställande av det djup till vilket recent vattencirkulation för ner ¹⁴C.

Studier av stabila isotoper i kalcit ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) visar att vatten med samma isotopsammansättning som dagens har påverkat sprickfyllnadskalcit till djup av 500 m i utpräglade intrömningsområden (Tullborg, 1989). Sålunda är det möjligt att ^{14}C har inkorporerats i sprickfyllnadskalcit på relativt stora djup.

Det beslöts att metoden skulle testas i ett av SKB's typområden, Klipperås i sydöstra Sverige. Studien har finansierats av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB). En slutrapport till SKB föreligger i manuskript (Possnert & Tullborg).

Provtagning

Klipperås området karakteriseras av ett antal NW-SE och E-W strykande, relativt brantstående, sprickzoner. Vidare penetreras området av ett antal N-S strykande mafiska gångar. Inom området finns 14 kärnborrhål (7 st av ca 200 m längd och 7 som är mellan 700 och 1000 m långa; Fig.1). Borrhål Kl 12 korsar 5 sprickzoner och visar vidare en relativt djup ytlakning av kalcit (ca 100 m). Detta antyder ett relativt stort nerflöde av ytvatten i denna del av området. Borrhål Kl 12 valdes således ut för provtagning.

Vidare inkluderades ett prov från borrhål Kl 7 som penetrerar en potentiellt neotektonisk krosszon på ca 100 m djup. Dessutom togs kompletterande prover från olika djup i borrhål Kl 7.

Provtagning av grundvatten har ägt rum i tre olika borrhål och på olika djup inom området för analys med avseende på ^{14}C -innehåll (Se Tabell II). Sprickfyllnadskarbonater från de vattenprovtagna nivåerna har också inkluderats i studien. Sprickmineralen från borrhållorna analyserades på ^{14}C i Tandemacceleratorlaboratoriet i Uppsala.

Tabell II. ^{14}C -analyser av grundvattenprover från Klipperås. pmC = % modernt kol. Kl 1:406 m = borrhållsnummer och provtagningsdjup.

Prov	pmC
Kl 1:406 m	2.91
Kl 9:696 m	2.15

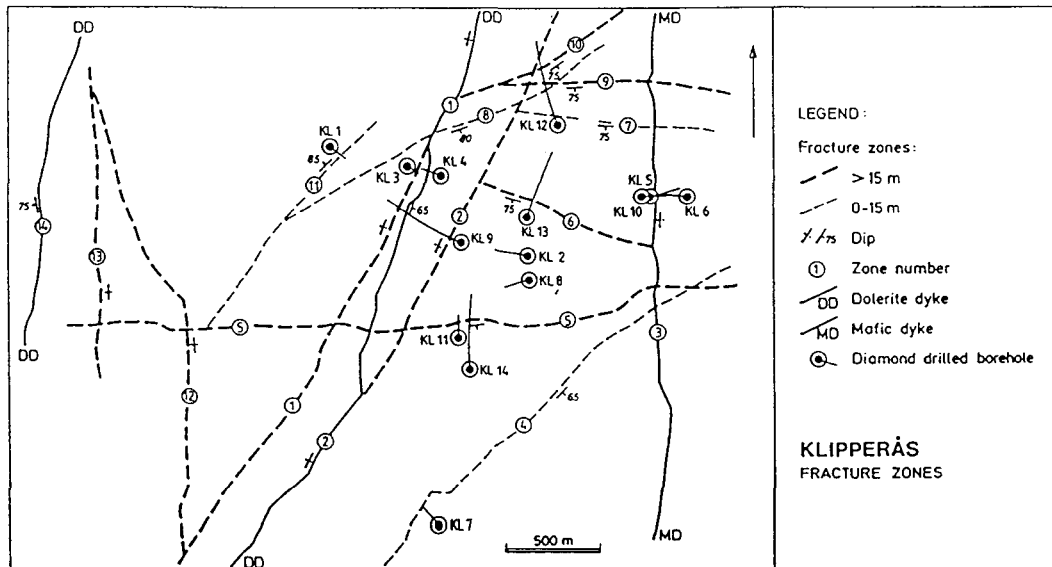
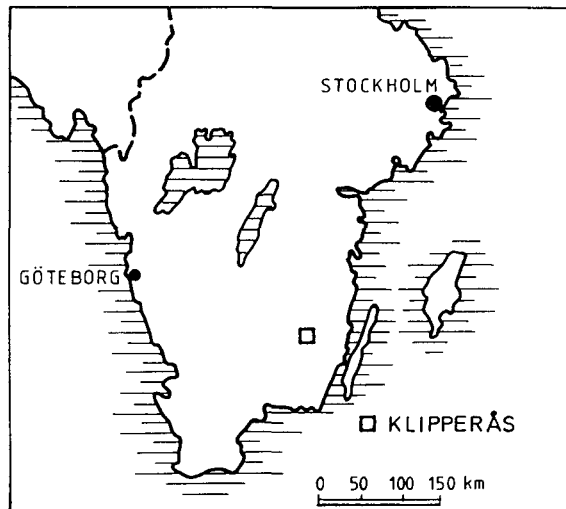


Fig.1. Klipperås: Geografiskt läge samt karta över undersökningsområdet (sprickzonernas och borrhålens lägen)

Resultat

Resultaten redovisas i Tabell III. Mycket låga värden erhöles generellt förutom i provet från den potentiellt neotektoniskt aktiverade zonen. Det bör dock påpekas att de extremt små provmängderna i prov Kl 7:125 m gör detta analysresultat mycket osäkert.

De analyserade proverna visar varierande men inte signifikanta halter av ^{14}C . Däremot syns ett tydligt samband mellan procent modernt kol (pmC) och kolhalt i proverna vilket påpekats av Göran Possnert, Tandemacceleratorlaboratoriet (jmf Fig.2). Denna korrelation är en produkt av kontamination av atmosfärisk koldioxid som troligen äger rum dels under lagringen av borrhälen och dels under provberedningen då proverna pulveriseras och således får en mycket större aktiv yta.

Tabell III. ^{14}C -analyser av sprickfyllnadskalciter. pmC = % modernt kol. Provvikterna anges för rent kol.

Prov	pmC	provsvikt(mg)
Kl 1:100.4	1.36 ± 0.09	1.14
Kl 1:140.4 A	0.76 ± 0.09	5.14
Kl 1:233.4	1.37 ± 0.10	3.21
Kl 1:435.3	0.79 ± 0.07	2.14
Kl 1:436.25	2.77 ± 0.17	0.17
Kl 7:80.3	1.16 ± 0.11	2.68
Kl 7:125*	72.5 ± 2.3	0.16
Kl 7:143.0	0.92 ± 0.10	1.28
Kl 9:705.6	2.76 ± 0.18	0.86
Kl 12:102.9	0.81 ± 0.11	1.93
Kl 12:203.8-9 A	2.15 ± 0.16	1.50
Kl 12:203.8-9 B	4.72 ± 0.51	0.16
Kl 12:297.45	2.93 ± 0.21	0.27
Kl 12:302	1.23 ± 0.13	1.07
Kl 12:321.1	9.33 ± 0.57	0.107
Kl 12:377.2	0.83 ± 0.09	2.03
Kl 12:378.1	0.74 ± 0.09	1.50
Kl 12:478.0	0.65 ± 0.08	2.89
Kl 12:616.9 A	1.22 ± 0.14	1.71
Kl 12:616.9 B	1.41 ± 0.13	1.18
Fi 6:351 ¹ A	0.44 ± 0.04	7.7
Fi 6:351 ¹ B	3.81 ± 0.43	0.16
"- -"-	2.82 ± 0.32	0.48
"- -"-	1.95 ± 0.16	0.80
"- -"-	1.48 ± 0.13	8.3

A och B representerar olika sprickläkningar i samma spricka.

* = resultat tidigare redovisat av Tullborg (1986).

¹ = Referensprov från hydrotermalt läkt spricka, Finnsjön bh 6

För att få en uppfattning om det "bakgrundsvärde" som den ovan beskrivna kontaminationen kan ge upphov till, analyserades en läkt kalcit-spricka av hydrotermalt ursprung (ett prov från Fi 6:351 m). Olika provmängder från en och samma spricka analyserades och gav som väntat högre ^{14}C -innehåll i de prover som innehöll mindre. En plot av samtliga analyserade prover från Klipperås (utom det tidigare analyserade provet från Kl 7:125 m) samt referensproverna visar att ett fåtal ligger över den "bakgrundsnivå" som referensproverna utgör. De prover som med detta resonemang ligger över bakgrundsnivån är Kl 12:321 m, Kl 12:203.8-9 m A och dito B samt prov från de vattenprovtagna sektionerna Kl 1:436.25 m samt Kl 9:705.6 m (se Fig. 2). Beträffande proverna från Kl 12 kan konstateras att de alla tre är belägna inom sektioner i borrhålet som uppvisar hög hydraulisk konduktivitet samt att Kl 12:321

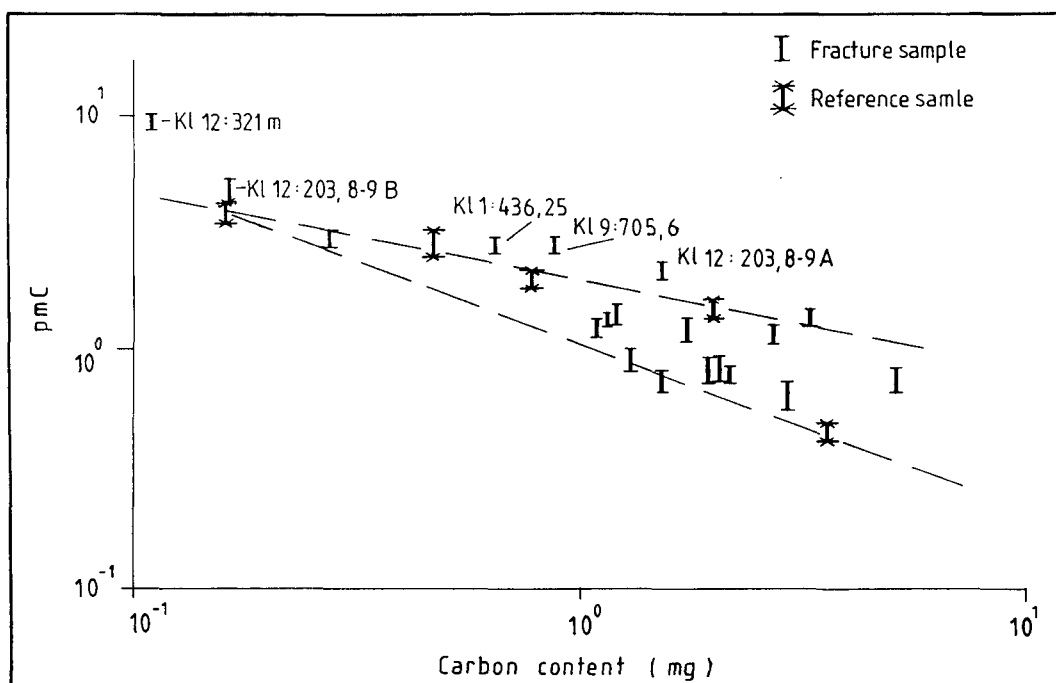


Fig.2 pmC (% modernt kol) i de analyserade proverna plottat mot respektive provs vikt i mg.

m (som uppvisar det högsta ¹⁴C-värdet 9.33 pmC) ligger i en rejäl sprickzon. Det är alltså "logiskt" att finna förhöjda ¹⁴C-halter i dess prover. Proverna Kl:436.25 samt Kl 9:705.6 m uppvisar ungefär samma ¹⁴C-halter som grundvattnet i respektive borrhål (2.77 och 2.76 pmC i kalcitproverna samt 2.91 och 2.15 pmC i karbonat utfällt från vattenproverna). Om kalciten i sprickorna skulle vara i jämvikt med vattnet skulle kalciten med säkerhet ha ett högre ¹⁴C-värde än vattnet (pga fraktionering karbonat/vatten). Vi kan dock förvänta oss att vi har en ¹⁴C-zonering i sprickläkningskalciten och att de värden vi erhåller är ett "medelvärde" och därför sannolikt alltid för lågt.

Klipperås är ett område där sprickmineralogi, vattenkemi och hydraulisk konduktivitet antyder en omfattande omsättning på grundvattnet, åtminstone i de övre 100-200 m. Å andra sidan är den hydrauliska gradienten (inducerad av topografien) låg vilket snarare talar för relativt stagnanta förhållanden. De låga ¹⁴C-halterna i de provtagna grundvattnen kan tolkas så. Det är alltså svårt att, med de data vi har tillgängliga, ge en helt entydig bild av hur omfattande vattentransporten är i området.

Sprickfrekvensen är mycket varierande i de olika borrhämnorna och hela området uppvisar en uppdelning av berggrunden i block vilka är begränsade av vertikala sprickzoner. I närheten av de mest markanta sprickzonerna syns en upplösning av

kalcit liksom en avsättning av rost till större djup än i de helare bergplintarna. Detta understryker att en ökad vattentransport i vertikalled äger rum i anlutning till zonerna och borde ge förutsättningar för en tillförsel av ^{14}C -haltigt vatten. Dessutom tyder resultatet från ^{14}C -analysen i sprickzon 4, Kl 7:125 m som gav 72.5 pmC definitivt på ett tillskott av ^{14}C till sprickor/sprickzoner i berggrunden.

Slutsatser om ^{14}C -analyser på sprickfyllnadskalcit

De erhållna resultaten från Klipperås kan tolkas på två olika sätt:

- 1) Det sker en omfattande vattenomsättning i området vilket leder till en nedtransport av ^{14}C -haltigt HCO_3 i sprickor i berggrunden. Dock utarmas grundvattnet relativt snabbt på sitt ^{14}C i samband med utfällning av kalcit och/eller sorption på kalcitresten i nedre delen av kalcitlaknings zonen (Ca 50 till 150 m, förmodligen även djupare i sprickzoner). Detta skulle kunna förklara det höga värdet i Kl 7:125 m och de förhöjda värdena i Kl 12:321 m (sprickzon) och Kl 12:203-8-9m.
- 2) Det sker en kraftig omsättning av vatten i de övre 100-200 m medan man på större djup har praktiskt taget stagnanta förhållanden dvs två separata akviferer. Detta skulle i så fall också kunna förklara det höga värdet i Kl 17:125 m. De förhöjda värdena i Kl 12:321 och 203.89 skulle i så fall kunna vara ett resultat av en "mixing" zon i gränsen mellan de olika akvifererna.

Om alternativ 1 är det mer sannolika så leder detta till att man borde hitta fler kalcitprover med höga ^{14}C -halter, på de djup där endast mycket små mängder kalcit går att påträffa i de vattenförande sprickorna och att kalciter under denna nivå inte kan erhallå speciellt höga ^{14}C -halter eftersom vattnet redan är utarmat på ^{14}C .

En annan slutsats är att det bevisligen äger rum en betydande kontamination av kalciten såväl under lagringstiden som under provberedning. För att gå vidare är det alltså nödvändigt att, så långt som möjligt, eliminera kontaminationsrisken, t.ex. genom att prover tas direkt vid borrhningen och lagras så att de inte kommer i kontakt med luftens CO_2 .

Slutligen kan konstateras att den viktigaste frågan att besvara för att kunna använda ^{14}C vid datering (alternativt som "tracer"), är hur stort bidrag man kan förvänta sig i sprickfyllnadskalcit på olika djup, dvs hur stark ^{14}C -signal vi kan förvänta oss i sprickor i kristallin berggrund. Med största sannolikhet varierar detta starkt från område till område och platsspecifika bedömningar är nödvändiga för att kunna använda metoden. Studier av detta slag planeras fortsätta inom ramen för SKB's arbeten.

MINERALOGISKA OCH GEOKEMISKA STUDIER AV SPRICKFYLLNADER

Inledning

Ett antal områden i norra Sverige uppvisar spår av neotektoniska rörelser. Ett av dessa områden är Lansjärv, där detaljerade undersökningar har utförts i SKB's regi (jmf följande artikel); bl.a. borrades ett 500 m långt kärnborrhål (KLJ 1) i syfte

att penetrera en neotektoniskt aktiv förkastning. Senare visade den tolkning av undersökningarna i Lansjärv som redovisas av Landström et al. (1989), att den postglaciala förkastning, som observerats i ytan, sannolikt inte har penetrerats av borrhål KLJ 1.

Föreliggande kapitel behandlar mineralogiska och geokemiska studier av borrhårnan (KLJ 1). Dessa undersökningar har bekostats av SKI (Statens Kärnkraftsinsektion). De hittills slutförda undersökningarna inklusive den sprickmineralogiska studien finns redovisade av Landström et al. (1989)

Syftet med det geokemiska/mineralogiska arbetet har varit att:

- Identifiera mineralogiska och/eller mikrotexturella bevis på att neotektoniska rörelser har ägt rum.
- Att bestämma om reaktioner mellan vatten och mineral vid låg temperatur har bidragit till förändringar i mineralogi och kemi.

Beskrivning av borrhårnan

Borrhårnan KLJ 1 karakteriseras av en hög sprickfrekvens och huvudsakligen en hög hydraulisk konduktivitet ned till ca 300 m djup. På större djup avtar sprickfrekvensen drastiskt. Borrhålskarteringen visar att klorit och hematit/Fe-oxyhydroxid är de vanligaste sprickmineralen och de återfinns i sprickor längs hela borrhårnan. Kalcit däremot förekommer mycket sparsamt och saknas så gott som helt i de övre 150 metrarna. Epidot och zeolitmineral förekommer underordnat i sprickor längs hela borrhårnan. Det finns anledning att tro att en omfattande vattencirkulation kan äga rum ned till ca 300 m djup i det område som genomborrats av KLJ 1.

Provtagning och analys

Prover av sprickmineral har tagits längs hela borrhårnan med tyngd på den subhorisontella zonen som penetreras på ca 150 m djup. Tunnslip har tillverkats från ett 20-tal sprickor. XRD-analyser har utförts för identifiering av mineralfaser. Spårelementanalyser inkluderande REE, U och Th har utförts på sprickbeläggningar samt närliggande sprickväggar. Dessutom har 14 sprickbeläggningar från olika djup analyserats med avseende på U och Th-isotoper i syfte att detektera störningar i isotopsystemet yngre än 1 miljon år.

Mineralogi

Den dominerande bergarten i Lansjärv är en medel- till finkornig granit som består av kvarts, kalifältspat, plagioklas samt magnetit och biotit. Accessoriska mineral är zirkon, apatit och titanit samt i något enstaka fall pyrit. Alla prover visar mer eller mindre tydlig omvandling där fältspat övergår i sericit, biotit i klorit och magnetit i hematit och Fe-oxyhydroxider.

De flesta prover uppvisar en markant ökning av antalet mikrosprickor nära sprickytan. Runt de sprickor som kan antas vara vattenförande syns en tydlig rödpigmentering orsakad av oxidering av magnetit till hematit och Fe-oxyhydroxider.

Sprickläkningarna kan delas in i två huvudtyper:

- 1) Enkla läkningar vanligtvis bestående av klorit/sericit och hematit ± epidot.
- 2) Komplexa sprickläkningar med flera generationer av sprickmineral som överlagras varandra, t.ex. kvarts, epidot, zeolit + hematit och ytterst kalcit.

Av sprickmineralogin framgår att merparten av sprickorna har hydrotermalt ursprung och att en omfattande cirkulation av oxiderande hydrotermala lösningar har ägt rum.

Spårelementanalys av sprickläkningar

För att bättre kunna välja ut "rätta" prover för uranseriadatering gjordes analyser på ett antal spårelement med neutronaktivering både av sprickläkningar och angränsande sprickväggar. Resultatet från dessa har använts för tolkning av olika elements mobilitet mm.

Den geokemiska studien i Lansjärv visar att halterna av spårelement varierar mycket. Detta kan bero på:

- 1) Ursprungliga inhomogeniter i graniten.
- 2) Hydrotermal aktivitet under en eller flera perioder kan ha orsakat omfördelning av element som U, Th, REE, Fe, Sc, Ba, Sr, Cs, Rb and Na.
- 3) Omfördelning av speciellt U, Fe och lätta REE kan ha orsakats av cirkulerande lågtemperaturvatten.

Resultaten diskuteras ingående av Landström et al. (1989). Här redovisas enbart en figur över elementfördelningen i olika sprickmineral (Fig.3). Det bör påpekas att positiva (högre än i granitreferensprovet) såväl som negativa Ce-anomalier har påträffats i de analyserade proverna. Det är känt att Ce(III) (REE är vanligen trevärda positiva joner), när det oxiderats till Ce(IV), får kraftigt avvikande egenskaper t.ex. beträffande mobiliteten, som minskar betydligt. På så sätt minskar vattnets Ce-halt vid oxidation medan ett mineral kan få ökad Ce halt av samma anledning. De erhållna Ce-anomalierna i Lansjärv har tolkats på följande sätt: En oxidation av Ce har skett under hydrotermala förhållanden vilket orsakat positiva Ce-anomalier i ett antal sprickläkningar och prover från angränsade sprickväggar. Detta har enbart observerats i de övre 100-150 m intervallet av borrhålet. Att oxidationen detekteras just i det yt nära intervallet skulle kunna tyda på recent oxidation bl.a. mineralogin tyder på ett hydrotermalt ursprung på oxidationsprocessen. De negativa Ce-anomalierna kan ha ett mer komplext ursprung; eftersom REE omfördelas genom lakning/sorption erhåller det vatten som passerar och lakar REE ur mineral med positiv Ce-anomali istället negativ Ce-anomali. När REE från detta vatten sedan sorberas på andra sprickmineral (oftast djupare ned i berggrunden) erhåller dessa sprickläkningar en negativ Ce-anomali. Denna process kan äga rum såväl vid hydrotermala som lågtemperaturförhållanden.

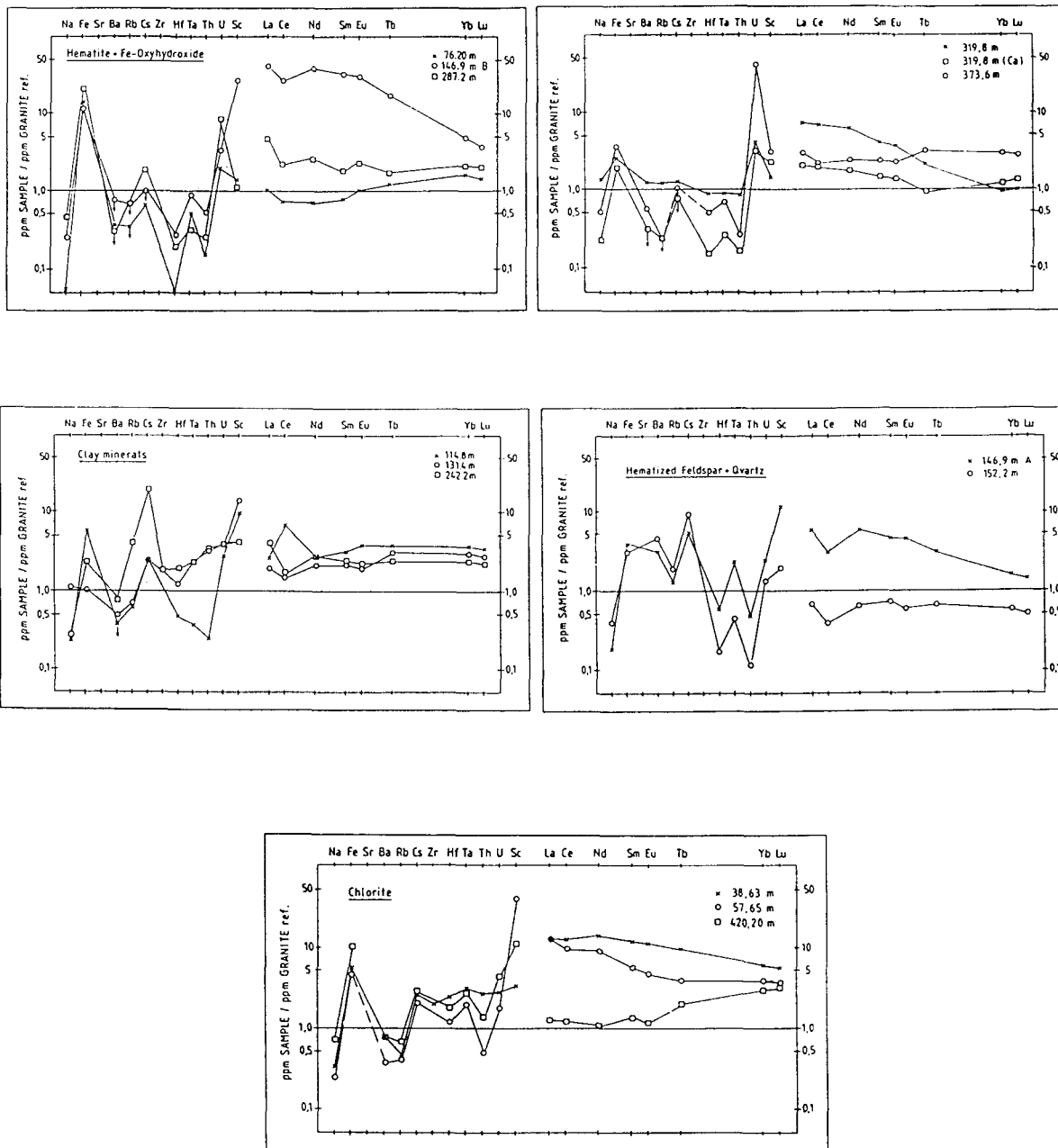


Fig.3 Koncentrationer av element i sprickmineralprover som kvot av halterna i modergraniten.

Analys på uranserien

Resultat av uranserieanalyserna redovisas i Tabell IV och Fig.4. Th-isotopanalyser saknas för proverna 242.20 m, 132.30 m och 146.9B m. Störningar i isotopför

Tabell IV. Uranserieanalyser av sprickbeläggningar. Resultaten redovisas i Bq/kg.

SAMPLE		^{236}U	^{234}U	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	^{232}Th	^{230}Th	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$
KLJ 01	38.63	155±7	155±7	1.00±0.04	73±5	148±8	0.95±0.06
KLJ 01	43.50	268±8	271±8	1.01±0.02	80±7	265±20	0.98±0.06
KLJ 01	57.65	61.8±3.3	71.7±5.0	1.16±0.07	87.0±4.0	97.8±4.3	1.16±0.07
KLJ 01	76.20	98.2±6.2	166.7±8.3	1.70±0.11	11.7±1.7	120.5±5.8	0.72±0.04
KLJ 01	86.0	212±7	214±6	1.01±0.04	267±12	333±13	1.56±0.07
KLJ 01	114.80	90.0±8.8	139.0±11.3	1.54±0.18	28.2±2.7	118.0±6.2	0.85±0.08
KLJ 01	131.40	160±5	194±6	1.21±0.05	75±3	130±5	0.67±0.04
KLJ 01	132.30	423±13	642±13	1.52±0.04	--	--	--
KLJ 01	146.9b	206.5±20.3	332.5±26.5	1.61±0.19	--	--	--
KLJ 01	242.20	168±7	157±5	0.93±0.03	--	--	--
KLJ 01	287.70	370±8	409±5	1.00±0.02	80±12	392±26	0.96±0.07
KLJ 01	319.80a	163±8	204±7	1.25±0.06	58±3	152±7	0.75±0.04
KLJ 01	319.80b (Ca)	96.7±5.0	101.2±5.0	1.05±0.05	21.7±2.8	88.0±5.0	0.87±0.05
KLJ 01	373.60	135.8±5.0	158.3±6.7	1.16±0.05	30.5±1.8	177.0±5.5	1.12±0.04

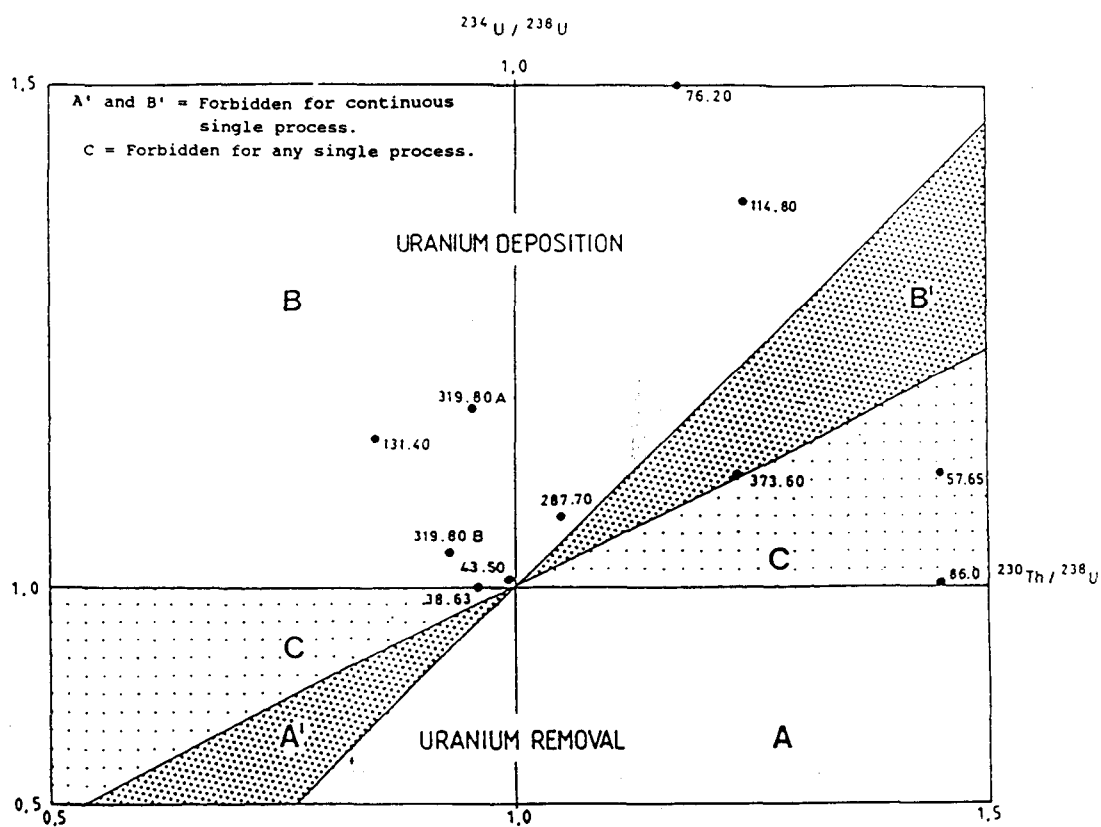


Fig.4. Thiel plot av uranserieanalyser.

hållandet $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ samt $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ indikerar att utbyte mellan vatten och mineral har skett inom 1 miljon år respektive under 250 000 år. De erhållna resultaten tolkas på följande sätt:

Två prover (38.63 m och 43.50 m) uppvisar isotopjämvikt vilket betyder att något utbyte mellan vatten och mineral inte har ägt rum under sistlidna 1 miljon år, dvs dessa sprickor är inte vattenförande.

- Två prover (287.70 m och 319.80B m) uppvisar marginell ojämvt. Detta kan bero på ett begränsat utbyte under en lång tidsperiod (1 miljon år) eller en helt recent störning.
- Fyra prover (76.20 m, 114.80 m, 131.40 m och 319.80A m) visar tydlig uranutfällning orsakad av en troligen pågående förändring från oxiderande till reducerande förhållanden. Resultatet innebär att omfattande reaktioner mellan vatten och mineral har ägt rum under sistlidna 250000 år - 1 miljon år.
- Av de återstående tre proverna, visar ett på möjlig uranutfällning (373.60 m). Ett uppvisar komplext ursprung (57.65 m) och ett uppvisar upplösning av uran, orsakat av cirkulerande oxiderande lösningar under senaste 1 miljon år.
- De tre prover som enbart analyserats på uranisotopförhållandet (242.20 m, 132.30m och 146.90B m) visar alla ojämvt till följd av utbyte mellan mineral och vatten under de sistlidna 1 miljon åren.

Sammanfattning

1) En omfattande hydrotermal aktivitet kombinerad med cirkulation av oxiderande lösningar har påverkat området och orsakat mineraliseringar av hematit, kvarts, epidot, zeoliter och som sista fas kalcit följt av Fe-oxyhydroxid. Denna påverkan är tydligast i det övre 300 m intervallet av borrhålet. Anrikning av U, Th, Fe och REE, liksom de positiva Ce-anomalierna som har detekterats i sprickläckningar och angränsande bergartsprover, relateras till samma hydrotermala aktivitet. Det kan dock inte utslutas att flera hydrotermala händelser har påverkat området.

2) Efter perioder av hydrotermal aktivitet har lågtemperaturvatten cirkulerat i sprickorna och orsakat omfördelning av såväl mineral som spårelement. Som resultat har man fått t.ex. upplösning av kalcit, utfällning av Fe-oxyhydroxid och lakning av U samt lätta REE i de övre delarna av borrhålet, medan utfällning/sorption av samma element huvudsakligen på hematit/Fe-oxyhydroxider skett djupare ned. Beträffande Ce finns ingen indikation på oxidation vid låg temperatur. Däremot har pågående laknings-/sorptionsprocesser accentuerat de negativa Ce-anomalier som observerats i sprickbeläggningar.

3) Uranserieanalyserna visar att recent (yngre än 1 miljon år) utbyte mellan mineral och vatten har ägt rum i 12 av de 14 provtagna sprickorna. Sex av dessa prover på djup mellan 76 till 320 m visar på förändringar från oxiderande till reducerande förhållanden vilket har lett till uranutfällning. Uranlakning (beroende på oxiderande förhållanden) har bara påvisats i ett prov (86 m).

4) Borrhål KLJ 1 penetrerar sannolikt inte den zon som man på ytan, med kvartärgeologiska bevis, betraktar som neotektonisk (jmf Landström et al., 1989). Det har därför varit omöjligt att relatera de erhållna resultaten till neotektonisk aktivitet. Däremot kan konstateras att borrhårnan visar mycket stark hydrotermal omvandling och uppspräckning (speciellt tydlig i 0-300 m intervallet). Förekomsten av "gamla" kraftigt omvandlade zoner är kanske en anledning till att neotektoniska rörelser har manifesterats i Lansjärvsområdet. Det är logiskt att tänka sig en ökad

vattencirkulation (en ökad lågtemperaturpåverkan på mineral), i ett område nära en postglacial förkastning eftersom många sprickläkningar bryts och öppnas i samband med en sådan händelse. Den lågtemperaturpåverkan som observerats i borrhål KLJ 1 är relativt omfattande.

SLUTORD

Sena (neotektoniska) rörelser och postglaciala geokemiska och mineralogiska förändringar har varit i fokus för de sprickmineralogiska undersökningar, som ägt rum inom projekt 340 under 3-årsperioden 1986-1989. Inom den prekambrika polymetamorfa berggrunden, som täcker merparten av Skandinavien, kan man dock inte bortse från de omvandlingar och omställningar, som ägt rum i prekvartär tid. Effekten av dessa händelser måste kartläggas för att man skall kunna tolka recenta processer. Ett annat problem är att neotektoniska rörelser oftast ger upphov till ökad vattencirkulation och att det öppna systemet kan bestå, vilket gör direkt datering av en specifik händelse med hjälp av radiometrisk datering svårigenomförbar.

De arbeten, som utförts, har understrukit de möjligheter respektive svårigheter som finns beträffande geokemiska och isotopgeologiska undersökningar av sprickmineral. Det är t.ex. uppenbart att god områdesspecifik kunskap är nödvändig beträffande såväl geologi, hydrogeologi som geokemi för att man skall kunna göra relevanta tolkningar av resultat från radiometrisk datering. Trots att trovärdiga radiometrisk datering av neotektoniska rörelser hittills inte har kunnat genomföras, har arbetet ändå varit mycket värdefullt för kunskapsuppbyggnad. I denna ingår "spin off"-effekter såsom möjligheter att använda Ce(III/IV) respektive ^{14}C för tolkning av grundvattens rörelser ("tracer").

NEOTEKTONISKA RÖRELSER
Paavo Vuorela
(Svensk översättning: Marjaana Stedt)

INLEDNING

Långtidsbeteendet hos berggrunden runt kärnavfallsförvaringsrummen är i hög grad beroende av berggrundens strukturer. Strukturerna påverkar förutom grundvattnets strömning och dess mängd även lokaliseringen av kommande berggrunds rörelser. Framtida rörelser i berggrunden kan förutsägas genom att studera spåren efter istida rörelser och genom mätning av nutida berggrunds rörelser.

Med hjälp av seismiska observationer och precisionsavvägningar har man erhållit en tämligen klar uppfattning om berggrundens nutida rörelser och om rörelsezonernas orientering. Den seismiska aktiviteten och omfånget och antalet berggrunds rörelser förefaller att kraftigt öka under det sista skedet av istiden och genast efter detta. Som ett bevis för detta kan man se de i norra delarna av Fennoskandia observerade jordskred som förekommer i samband med postglaciala förkastningar.

I det nordiska samarbetet har man koncentrerat sig på att utreda strukturerna hos, och uppkomsten av postglaciala förkastningar. Det mest omfattande forskningsarbetet har gjorts av SKB i norra Sverige i trakten av den postglaciala förkastningen i Lansjärv. Forskningsarbetet fokuserades på ett område av storleken 150 x 200 km och omfattade en kronologisk redogörelse för utvecklings- och deformationshistorien i de geologiska formationerna. Strukturen hos den postglaciala förkastningen i Lansjärv och dess samband med regionala rörelsezoner i riktningarna NW-SE och N-S har mångsidigt studerats.

I Finland har postglaciala förkastningar undersökts i Pasmajärviområdet i västra Lappland med hjälp av geofysiska mätningar, borrhningar och geodetiska mätpunkter. Man deltog även i uppföljningen av förkastningsundersökningar i Egersundsområdet i Mellan-Norge och i Masiområdet i norra Norge.

Med finansieringshjälp från NKA/KAV kunde man arrangera exkursioner och möten för de olika forskningsgrupperna. Till dessa möten kunde man även inbjuda utländska experter som föreläsare. Förkastningsundersökningarna i Pasmajärv finansierades delvis av NKA genom en uppsättning nya geodetiska mätpunkter. Så var fallet även i Egersund i Norge där nordisk finansiering användes för att komplettera mätningsslinjen. NKA-finansieringens största betydelse inom projektet var dock upprätthållandet av de nordiska forskarkontakterna och utbytet av kunskap.

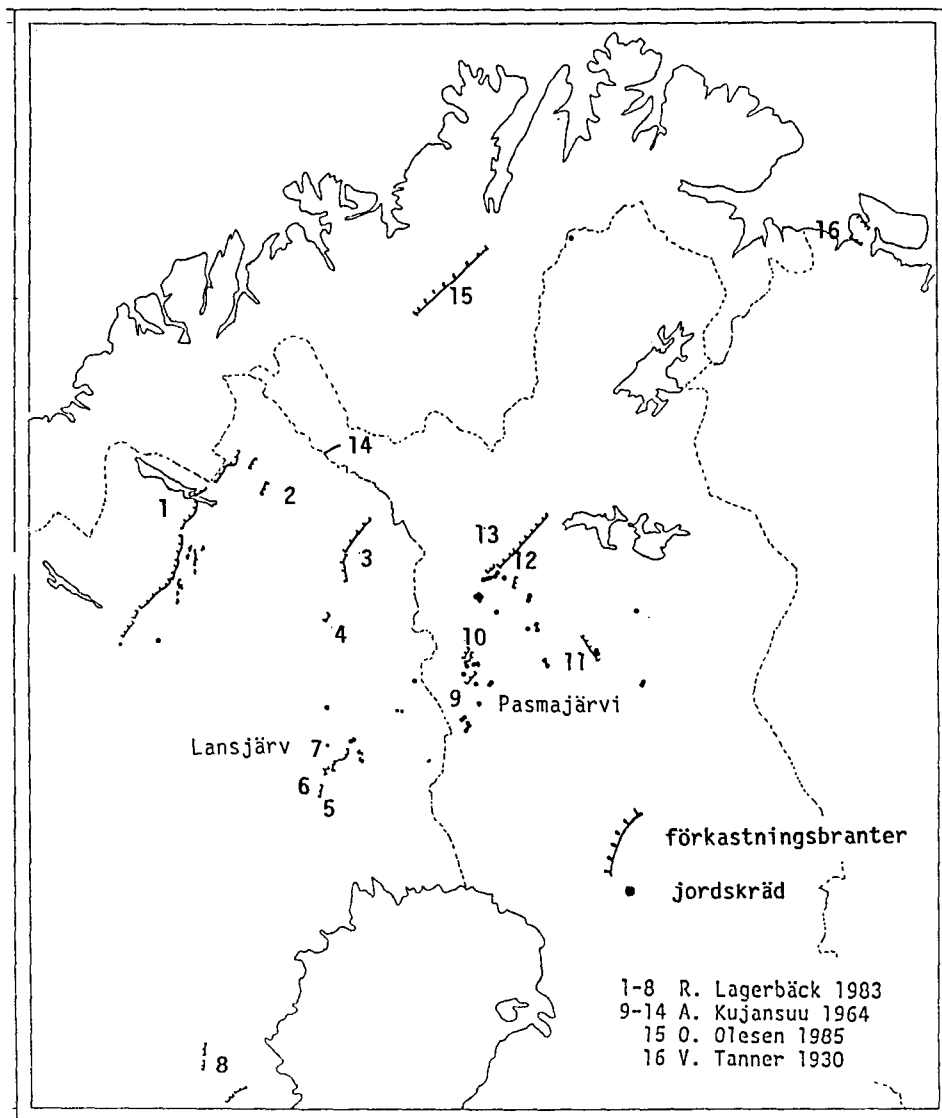


Fig. 1. Jordskräd och postglaciala förkastningsbranter i norra Fennoskandia.

INDIKATIONER PÅ POSTGLACIALA RÖRELSER

Landhöjning

Den totala landhöjningen är approximerad bl.a. efter den högsta strandlinjen som bildats vid randen av det supra-akvatiska landområdet. Den högsta strandlinjen kommer tydligt fram bl.a. längs Ishavets kuster. Observationer av fornstränder och strandförsjutningar förekommer både vid oceanstränder, vid Östersjöns stränder samt vid sjö- och åstränder. Strandförsjutningarna anger landhöjningens storlek och varierande hastighet inom olika områden. Abrupta försjutningar av strandlinjen vilka kan tänkas ha förorsakats av postglaciala förkastningar har emellertid inte påträffats. Däremot har man i sedimentavlagringar funnit tydliga spår av berggrundsrorelser i anslutning till istidens yngsta skeden.

Under inlandsisens avsmältningsskede och genast efter detta var landhöjningen intensivast. Därefter har landhöjningen mycket snabbt avtagit (Artyushov, 1983; Mörner, 1980). I Kvarken har den maximala landhöjningen approximerats till 700 m varav ca 10 % antas bero på rörelser mellan enskilda berggrundsblock (Kuivamäki, 1981, 1985). Enligt Kakkuri (1984) skulle den återstående landhöjningen maximalt vara ca 78 - 128 m.

Orsaken till landhöjningen är uppenbarligen den av inlandsisen förorsakade nerpressningen av jordskorpan vilken även kommer till synes genom sambandet mellan variationerna i landhöjningens hastighet och motsvarande variation i gravitationsmätningarna (Elo, 1981).

Med hjälp av de nutida geodetiska observationerna av landhöjningen har uppfattningen om att landhöjningen sker blockvis bekräftats. Tydliga tecken på skillnader i landhöjningshastighet mellan de olika berggrundsblocken har erhållits vid beräknade landhöjningshastigheter mellan den första och andra och mellan den andra och tredje finska precisionsavvägningen (Tuominen et al., 1973; Kakkuri, 1984). Det senaste forskningsobjektet i samband med berggrundsrorelser är en approximering och bedömning av mängd och storlek hos horisontala rörelser. Både jordskorpan horisontala spänningstillstånd och de mätbara äldre horisontala rörelserna i denna tyder på att dessa rörelser kan vara av samma storleksordning som de vertikala rörelserna.

Postglaciala förkastningsbranter

Förkastningar, som varit aktiva under den sista istiden eller genast efter denna, benämnes postglaciala förkastningar. Förkastningarna förekommer ofta i samband med äldre brottzoner i berggrunden eller eventuellt med tidigare istider. Det har visat sig att de nu undersökta förkastningarna inte är nya uppkomna efter istiden i osprucken berggrund. Alla observationer gällande sk. postglaciala förkastningar har dock ej undersökts. I Fennoskandia och i Kanada känner man till sammanlagt ca 70 förkastningar som klassificeras som postglaciala. Förkastningsbranternas ålder är ca 10 000 år och de är till sin uppbyggnad vanligen "reverse" förkastningar. I Fig.1 visas de kända postglaciala förkastningarna inom norra Fennoskandia. Att de iakttagna postglaciala förkastningarna är koncentrerade i huvudsak till de norra delarna av Fennoskandia, kan vara en följd av att nednötning och avlagring i de södra delarna i samband med inlandsisens avsmältning har lett till att man inte kan identifiera förkastningsbranterna eller att dessa har begravts djupt nere i dalarnas krosszoner.

Förekomsten av postglaciala förkastningar kan vara betydligt mera allmän än vad man allmänt trott. T.ex. Talbot (1989) framför en modell i vilken de nordost-

sydväst riktade förkastningsbranterna upprepar sig i norra Sveriges berggrund med några kilometers mellanrum i samband med att en djupare nedgående subhorizontal förkastningssvärm skär berggrundens yta. Lagerbäck (1989) har dock konstaterat att de postglaciala förkastningsbranterna oftast är mera brantstupande.

I Finland har postglaciala förkastningar beskrivits av Tanner (1930), Edelman (1949), Tynni (1966), Kujansuu (1964), Kukkonen (1985), Kuivamäki (1986), Paananen (1987) och Vuorela (1987). Även den av Donner (1980) presenterade "gångjärnszonen" vid Finska vikens kuster kan räknas som en studie i postglaciala förkastningar.

De största postglaciala förkastningarna har observerats i norra Sverige, där man även mest forskat i dem (Lundqvist & Lagerbäck, 1976; Lagerbäck & Henkel, 1977; Lagerbäck, 1978, 1988). Under de senaste tre åren har de postglaciala förkastningsbranterna i norra Finland och Sverige varit föremål för intensiv forskning.

Studier i Lansjärv och Pasmajärvi

I Sverige har man inom ramen för SKB:s projekt "Bergets stabilitet" koncentrerat talrika undersökningar till området kring den postglaciala förkastningen i Lansjärv. Följande sammandrag är lånat från projektets slutrapport (Bäckblom et al., 1989).

Henkel (1988) genomförde en geofysikalisk undersökning med avsikt att frambringa grundläggande information för placering av borrhål och deformationsmätningar.

Talbot et al. (1987, 1988) utförde fältundersökningar av geologiska strukturer samt gjorde en regional tektonisk tolkning.

Lagerbäck (1988) undersökte förkastningsbranter längs utgrävda diken för att kunna åldersbestämma förkastningsrörelser i den kvartära stratigrafien.

Slunga (1988) rapporterade resultaten från mätningar med ett seismologiskt nät omfattande sex stationer i norra Sverige. Ett stort antal seismiska episoder har lokaliserats och analyserats.

Ett mobilt nät av seismiska stationer har varit i operation under två sommarsäsonger i närheten av förkastningarna i Lansjärv området. Flera episoder av seismisk aktivitet har registrerats och analyserats av Wahlström (1988).

För att kontrollera den föreslagna hypotesen om en flackt liggande brottzon, som antas ha varit aktiv under postglacial tid (Henkel & Talbot, 1987), har ett borrhål sänkts ned till 500 m djup 5 km nordost om Lansjärv. Flera olika undersökningar har gjorts i borrhålet; Larsson (1989) rapporterar en hydrologisk undersökning, Bjarnason (1989) har gjort primära stressmätningar, Tullborg (1989) har gjort en undersökning om sprickmineral och Wikberg (1989) har undersökt grundvattenkemin. Bjarnason et al. (1989) har sammanställt resultaten från borrhålet. Undersökningen av sprickmineral var finansierad av Svenska Kärnkraftsinspektionen (SKI).

Stephansson et al. (1987, 1988) har i samband med Lansjärv undersökningen rapporterat datormodellering av storskalig blockig berggrund med avsikt att utröna effekterna av bl.a. nedisning, isrörelser och deglaciation.

I den västra delen av finska Lappland har man undersökt strukturerna hos de postglaciala förkastningarna i Pasmajärvi och i tre andra lokaler. Dessa undersökningar har dock varit i betydligt mindre skala än motsvarande undersökningar i Sverige. Undersökningen har baserats på en omfattande genomgång av geologiska och geofysiska

kartor och bilder vid sidan av geofysiska mätningar och karteringar i fält. Förkastningen i Pasmajärvi har även genomborrats (Kuivamäki & Vuorela, 1985; Kukkonen & Kuivamäki, 1985; Kuivamäki, 1986; Paananen, 1987; Vuorela et al., 1987).

Markgeofysikundersökningarna i Finland har fortsatt 1989 och de geodetiska mätningarna kommer i fortsättningen att övervakas av Geodetiska Institutet i Finland.

Diken över förkastningar: Undersökningdiken som korsar förkastningar har grävts i fem lokaler inom Lansjärvområdet. Enligt Lagerbäck (1988) syns en postglacial förkastning vanligen i de lokala sedimentavlagringarna. Grävningarna tyder på att förkastningarna stupar 40° eller mera. Detta överensstämmer även med grävningresultatet från Pasmajärviförkastningen i Finland (muntligt meddelande, Kujansuu & Nenonen, 1985).

Enligt Lagerbäck's observationer finns det inga tecken på störningar eller berggrundsrörelser i de efter istiden ovanför vattenytan avlagrade sedimenten. Man kan dra slutsatsen att förkastningarna uppkommit inom ett kort tidsintervall genast efter inlandsisens avsmältningsskede. För denna slutsats talar även uppkomsten av sk. seismit, störda mellanlager i sedimentavlagringar. I flera grävningar, både i samband med Lansjärv- och med Pasmajärviförkastningen, framgår karaktären av "reverse" förkastning.

Borrhålsundersökningar: I samband med förkastningarna i Lansjärv och Pasmajärvi förekommer en avsevärd sönderbrytning av berggrunden vilket försvårade provtagningen med bergborrning i förkastningsbranterna. Med hjälp av seismiska sonderingar upptäcktes ovanför Pasmajärviförkastningen en flera hundra meter bred "lågastighetszon" som antyder uppsprickning av berggrunden.

Genom Lansjärvförkastningen borrhades ett 500 m djupt provtagningshål på en dryg kilometers avstånd från förkastningens utgående vid markytan. Hålet genomtränger förkastningszonen enligt Fig.2. I borrhålet förekommer ställvis tätt med sprickor, generellt mer än 30 sprickor/m och enligt bilden genomskär borrhålet förutom Lansjärvförkastningen också två andra flackt liggande förkastningszoner. Bergarten är i huvudsak granit vars kvalitet varierar beroende på hur starkt bergarten har deformerats under berggrundsrörelserna. Förutom ytterligare några partier med högre spricktäthet förekommer kataklaster samt bl.a. en omkristalliserad tektonisk breccia på ca 200 m djup. Den kraftigast uppspruckna zonen förekommer på ca 185 m djup. I borrhålet genom Lansjärvförkastningen gjordes även en fullständig serie av geofysiska mätningar och hydrauliska tester, vilka är rapporterade av Bjarnason och Larsson (1989).

Den övre delen av borrhållarna, intervallet 30-300 m, är kraftigt uppsprucken medan den nedre delen (300-500 m) är mera sprickfri. Spänningsmätningarna baserade på uppspräckning med hydrauliskt tryck gav pålitliga resultat för den nedre delen på grund av att denna är relativt sprickfri. Tabell I är från slutrapporten till SKB:s projekt. Ett intressant fenomen är att den maximala horisontella huvudspänningskomponenten vrider sig med ökat djup nedåt från förkastningen.

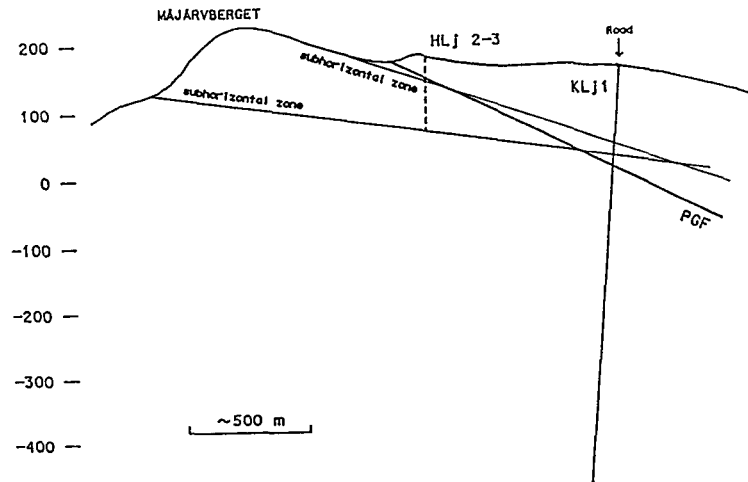


Fig.2. En schematisk bild över de genomborrade förkastningarna i Lansjärv (Henkel, 1988).

Två borrhål, 40 m resp. 80 m djupa, borrades i Pasmajärvförkastningen. Borrhålen är placerade på ca 30 m och 90 m avstånd från branten. På basen av geofysiska mätningar, i första hand jordmotståndssondering (Schlumberger-elektrodsystem), har Paananen (1989) framställt en modell över förkastningszonens uppbyggnad (Fig.3). Förkastningens stupning är ca 40° , men den kan enligt strukturen i Fig. 3 även

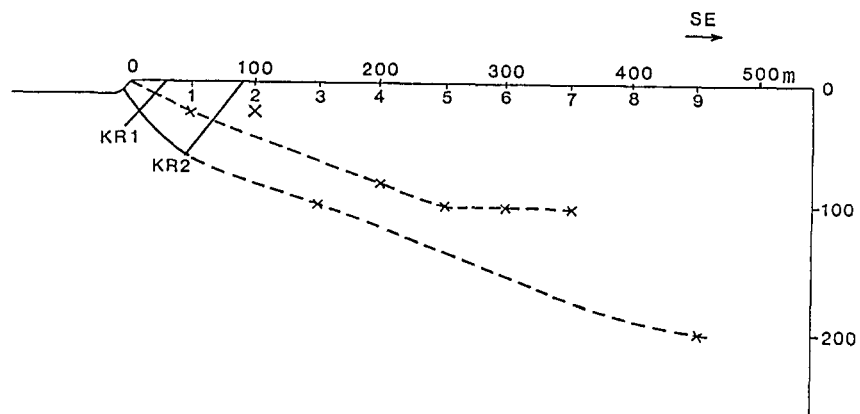


Fig.3. Stupningen hos pasmajärvförkastningen enligt den geofysiska tolkningen (Paananen, 1989).

konstrueras flackare. Den i samband med borrhningar fastställda lerfyllda förkastningsytans övre del är tämligen kraftigt uppsprucken. Den genomsnittliga sprickfrekvensen är 30-50 sprickor/m men även större frekvenser med över 100 sprickor/m förekommer. Bergarterna i brottzonen är granit och migmatitisk glimmergnejs. Förkastningens hängsida är granitdominerad och liggsidan, som är framgrävd en bit under förkastningsbranten, är sprickfri migmatitisk glimmergnejs.

Lansjärv- och Pasmajärvförkastningarna liknar varandra beträffande vattenförande egenskaper. De högsta värdena för vattenledningsförmågan är ca $K = 10^{-5} - 10^{-6}$. Tryckmätningarna och "steady state-injection"-testerna från Lansjärvborrhålet visar att den stora vattenledningsförmågan är knuten till förkastningszonen och till den mest intensiva uppsprickningen. I övrigt beror vattenledningsförmågan på vittring, uppsprickning, pegmatiter eller, djupare ned, på enstaka prickor. Ett intressant faktum är det på djupare nivåer (310-500 m) förekommande undertrycket som leder till att grundvattnet strömmar neråt (Larsson, 1989). Grundvattnets sammansättning är tämligen saltfritt men ändå är dess pH-värde högt.

Värdena för Pasmajärvförkastningens vattenledningsförmåga grundar sig på vattenförlustmätning i samband med borrhningarna. Vid dessa identifierades förkastningszonen tämligen tydligt ty vattenåtgången ökade med ca en dekad i den uppsruckna zonen.

Sprickmineralogin är fullständigt undersökt i borrhkärnorna från Lansjärvförkastningen. I närheten av enstaka förkastningsytor förekommer granitrester endast i form av primär kvarts. Fältspaterna har vittrat till en finfördelad matrix som innehåller sekundära glimmermineral (sericit och klorit). Kvarts, epidot och titanit är omkristalliserade. I dessa vattenledande krosszoner förekommer också utfällda järnhydroxider. I borrhkärnorna förekommer allmänt myloniter vilket tyder på stark deformation. Myloniterna innehåller lermineral som montmorillonit, sericit och klorit. Riklig förekomst av järnhydroxider och klorit är vanlig både i Lansjärv- och Pasmajärvförkastningarna. Ett intressant särdrag i Lansjärvförkastningen är att kalcit förekommer allmänt i krosszonens liggsida medan karbonatmineral nästan helt saknas i den ovanför liggande delen av krosszonen och i själva krosszonen. Detta anses bero på det kraftigt strömmande grundvattnets förmåga att upplösa karbonatmineral. Enligt rapporten förekommer hydrotermala mineral som epidot, zeolit och även prehnit längs hela borrhkärnan.

Geofysik

Henkel (1988) har i sina undersökningar inom Lansjärvområdet behandlat och framgångsrikt kombinerat geologiskt och geofysiskt material med den regionala topografin och observationer av fornstränder. För att få en klar uppfattning om områdets struktur har följande delprojekt inom SKBs projekt "Bergets stabilitet" varit avgörande:

1. Sammanställning av geologiska och geofysiska data från:
 - a) **ett yttre område 150 x 200 km** gravitativ, magnetisk och geologisk information samt topografi och relief finns lagrade på dator. En kartserie bestående av två kartblad i skala 1:250 000 är gjord på basen av dessa data.
 - b) **ett inre området 20 x 45 km** runt Lansjärv PGF där befintliga detaljundersökningar är sammanställda på sex kartblad 1:20 000. Rapport av Henkel & Wahlberg (1987).
2. Flygbildstolkningar för att lokalisera blottningar längs större förkastningszoner.

Rapport av Sundh & Wahlroos (1987).

3. Ytterligare geofysiska markmättningsprofiler av magnetfält, VLF- och slingramanomalier över större förkastningszoner. Modellberäkningar av stupningen hos förkastningszoner. Rapport av Arkko & Lindh (1988) och Arkko (1988).
4. Tektonisk-geologisk rekognosering av det inre området. Rapport av Talbot (1986).
5. Fotogrammetrisk avvägning av de högsta strandlinjerna. Rapport av Sundh & Wahlroos (1988).
6. Sammanställd analys av basinformation från delprojektet 1a. Rapport samt en tektonisk tolkningskarta av Henkel (1988).

Henkel har sammanställt den aeromagnetiska och gravimetriska kartans relief varav en regional strukturanalys gjorts med hjälp av ett bildtolkningssystem (image analysing system).

De av Henkel (1988) använda geofysiska basdata är följande:

Typ	Upplösningssyta	Enhet	Data från
Aeromagnetisk totalfältanomali	200 x 200	20vT	Geologiska forskningscentralen i Finland, Sveriges Geologiska Undersökning
Tyngdkraft	400 x 400	0.2 mgal	Geologiska forskningscentralen i Finland, Sveriges Geologiska Undersökning, Lantmäteriverket
Nivå	100 x 100	2 m	Lantmäteriverket
Berggrundsgeologi			Sveriges Geologiska Undersökning

Den postglaciala förkastningen i Lansjärv korsas av nordväst-sydost gående lineament vilka kommer fram i den magnetiska kartan. I den västra delen av det vidsträckta området dominerar nord-syd riktade lineament. Dessa lineament indikerar forna proterozoiska rörelsezoner vars ursprung och deformationshistoria är utredda av Talbot (1989). Enligt honom är de i riktningen nord-syd löpande branta deformationszonerna yngre än den andra huvudriktningens nordväst-sydost löpande flackt liggande zoner. Aldern på bägge zonerna är ca 1700 Ma.

I den västra delen av finska Lappland utfördes en serie geofysiska mätningar vid förkastningarna i Pasmajärvi, Ruostejärvi, Suasselkä och Venejärvi. Förutom tolkningar av magnetiska lågflygningskartor och av elektromagnetiska högflygningskartor mättes profiler med protonmagnetometer, VLF-, VLFR- och högfrekvensslingrammetoder över varje förkastning. Förkastningen i Pasmajärvi undersöktes mera utförligt och

där gjordes även en seismisk refraktionsmätning och en markmotståndsmätning. Paananen (1987, 1989) har rapporterat de geofysiska undersökningarna och tolkningar av dessa. Slingramanomalin indikerade tydligast förkastningsytans läge. Den våta lerfyllningen längs undersidan av förkastningsplanet indikerade en 45° stupning. Enligt seismiska refraktionssonderingar fanns det en flera hundra meter bred krossad zon ovanpå förkastningen.

Seismik

Paleoseismik: Både i norra Sverige och i norra Finland (Kujansuu, 1972) har man observerat en tydlig korrelation mellan läget hos postglaciala förkastningsbranter och jordskred. Detta tyder antingen på aktivitet i postglaciala förkastningar eller på en seismisk episod i samband med uppkomsten av förkastningen. Lagerbäck (1989) granskar kausala samband mellan jordbävningar, förkastningar och jordskred och han värderar motsvarande fenomen i norra Sverige och i norra Finland. Han drar slutsatsen att de postglaciala jordbävningarna hade en styrka på M 6.5 -7 eller mera. Dessa händelser har inträffat strax efter att inlandsisen smält. Bedömningen grundar sig på observationer av kända jordbävningar (Keefar, 1984) samt på beräkningar om förkastningarnas längd och förskjutningens storlek.

Lagerbäck (1989) har upptäckt bevis på plötsliga händelser som har skett efter istiden även i de kvartära avlagringarna. I lager av en viss ålder förekommer kraftiga störningar medan de ovanpå- och underliggande lagren fortsätter totalt ostörda. Lagerbäck anser att störningen är förorsakad av en jordbävning och kallar materialet seismit.

Störningarna i lagren kan bero på flera orsaker. I Finland har man i samband med Suasselkä postglaciala förkastning funnit organiskt material under ett jordskred. Materialet är åldersbestämt till ca 8500 år vilket tyder på en seismiskt episod även efter istiden.

Seismiska stationsnät: I SKB:s projekt i Lansjärv spelade jordskalvsstudierna en avgörande roll; skalven indikerar direkt de nuvarande tektoniska rörelserna i områdets förkastningar. För detta ändamål satte man upp seismiska nätverk för monitorering av jordskalven. FOA satte upp ett permanent nätverk medan Uppsala Universitet har opererat med rörliga mätpunkter.

Vid bedömning av jordskalvens djupfördelning har Slunga (1989) delat jordskorpan i tre skikt; den övre jordskorpan (0-15 km) som har den högsta jordbävningsfrekvensen, den mellersta jordskorpan (15-35 km) med lägre aktivitet och den totalt aseismiska undre jordskorpan (35-45 km). Slunga har även kommit till den slutsatsen att i gränsen mellan den mera aktiva övre jordskorpan och den mellersta delen är belägen 5 km djupare i sydvästra Sverige än i norra Sverige (20 km i stället för 15 km). Minskningen av den seismiska aktiviteten vid 15 km indikerar en litologisk gräns eller en gräns i spricksystemet medan aktivitetsminskningen vid 35 km (observerad även i sydvästra Sverige) antagligen är temperaturberoende.

Resultaten från det permanenta seismiska stationsnätet (Fig.4) tyder på att berggrundens spänningar koncentreras runt hörnen i berggrundsblocken och till punkter på förkastningarna där dessa låst sig. Även spänningsfältet i berggrunden indikerat genom jordbävningar tycks enligt Slunga (1989) fördela sig tämligen regelbundet både

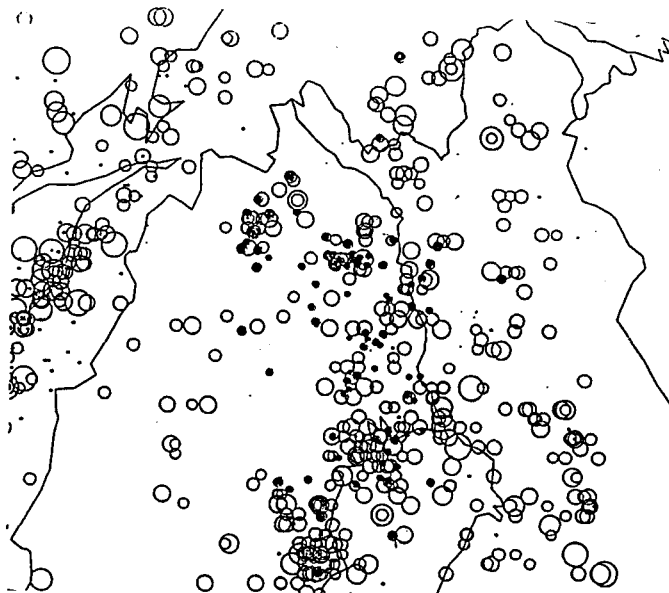


Fig.4. Jordbävningar uppfångade med det permanenta stationsnätet; svarta punkter. Övriga jordbävningar upptäckta av FENCAT (1986) (Slunga,1989); öppna cirklar.

i södra och norra Sverige. Nätverket som var i användning längs Lansjärvförkastningen bestod av fyra 3-komponent digitala stationer och två vertikal-komponent analoga stationer. Under mätkampanjen 1987 var dessutom en vertikal-komponent digital station med telemetrisk signalsändare i bruk. Den nuvarande seismiska aktiviteten uppföljes på SKB:s uppdrag under två fältsäsonger vardera omfattande fem månader under 1987 och 1989. Resultaten rapporteras av Wahlström et al. (1987, 1989) och av Kim et al. (1988).

Kulhanek (1989) konstaterade i sin sammanfattande rapport att seismiciteten var koncentrerad till Lansjärvområdets sydöstra delar. Av ett stort antal indikationer betraktades 20 som säkra jordskalv. Det konstaterades att jordbävningar sammanhänger med områdets äldsta krosszoner och om Lansjärvförkastningen fortsätter flackt lutande österut, är det möjligt att den seismiska aktiviteten även har ett samband med den postglaciala förkastningen i Lansjärv.

Geodetiska mätningar

Inom Lansjärv området i Sverige har man i samband med SKB:s treårsprojekt utfört omfattande uppföljningar av berggrundens rörelser med hjälp av seismiska nätverk. För Finlands del grundar sig uppföljningen på utförda geodetiska mätningar för vilka man har grundat ett antal avvägningspunkter bl.a. på uppdrag av den finska Lantmäteri-styrelsen. I samarbete med Geodetiska institutet har på vardera sidan av Pasmajärvförkastningen gjutits betongpelare vilka når ända till berggrunden. På dessa pelare har mätpunkter satts upp för mätning av både vertikala och horisontala rörelser. Mätningarna kommer att fortgå under flera år. På andra ställen i Finland har man gjort avvägningslinjer för att studera berggrundens rörelser (Veriö, 1985, 1987, 1988). Geodetiska institutet har även i samband med sina precisionsavvägningslinjer särskilda mätområden bl.a. väster om Ule träsk. Enligt de finska avvägningsresultaten tycks berggrundsrörelserna följa äldre, ofta nordväst-sydost riktade krosszoner och dessa

rörelser har sällan samband med seismisk aktivitet.

TEKTONISK TOLKNING

Karakteriskt både för Lansjärv-området i norra Sverige och för Pasmajärvi området i norra Finland är förekomsten av hundratals kilometer långa, gamla krosszoner i riktningen nordväst-sydost. I närheten av gränsen mellan Finland och Sverige förekommer en omfattande svärm av nord-syd riktade krosszoner. Denna svärm genomskärs av krosszoner i riktningen nordväst-sydost. Krosszonernas skärningsförhållanden är inte tydliga då alla krosszoner har genomgått flera berggrunds rörelser. Enligt Talbot (1989) är de i riktningen nordväst-sydost förekommande förkastningarna högerhandsförkastningar uppkomna i plastiskt tillstånd under högt tryck och temperatur. Dessa förkastningar har senare i flera skeden lokaliserat nya berggrunds rörelser varvid deformationen har varit spröd och krosszonen har utvidgats.

En liknande historia med samma episoder kan urskiljas i Ladoga Bottenviken-zonen i mellersta Finland där förkastningarnas högerhänta karaktär och den ursprungliga plastiska deformationen tydligt kan skönjas på den aeromagnetiska kartan.

Henkel (1988) har med hjälp av ett vidsträckt digiterat topografiskt och geofysiskt kartmaterial i norra Sverige konstruerat en deformation i riktningen nordväst-sydost. I samband med områdets "strike-slip"-förkastningar förekommer det deformationslinser i olika storlekar samt bassänger och upphöjningar (pull apart basins). Till Henkels deformationsmodell kan även anslutas områdets postglaciala sydväst-nordost riktade förkastningsbranter vilka eventuellt kunde utgöra till "strike-slip" förkastningar anknutna "reverse" förkastningar och i extrema fall överskjutningar. I detta fall ansluter sig även flackt liggande, subhorisontella förkastningszoner i riktningen sydväst-nordost till deformationsmodellen vilka enligt Talbot (1989) upprepas med några kilometers intervall. Rörelserna har utlösts av trycklätnaden efter inlandsisens avsmältning.

De postglaciala förkastningarnas orientering kan också förklaras med andra brottmodeller i jordskorpan. Det styvare deformationsmönstret som uppträder i berggrunden i form av en mera rätlinjig blockmosaik (Aarnisalo, 1978) reagerar också på förändringar i berggrundens belastning och då behöver förkastningsbranterna eller förkastningsytorna inte nödvändigtvis vara flackt liggande. Å andra sidan talar "strike-slip"-förkastningarna genom hela skölden, det horisontella tryckfältet samt de omfattande blockförkastningarna för en dynamiska modell som lättare förklarar förekomsten av "reverse" förkastningar och överskjutningar.

En sammanställning av rörelserna i berggrunden baserad på Stephanssons (1989) blockmodelltolkning och på de seismiska episoderna i området (Slunga & Wahlström, 1982) är av betydelse. En för länge sedan framförd idé (Teisseyre et al. 1969) rörande dynamiken i en berggrund som består av polygonala block i vilken jordbävningarna rundar blocken från det ena låsta hörnet till nästa, håller på att bevisas i praktiken. Seismiskt inaktiva men krypande (creep) förkastningar vilka låser sig och senare förorsakar jordbävningar är en modell som lämpar sig bra för rörelserna i den Fennoskandiska skölden.

SAMMANFATTNING

Beträffande undersökningarnas huvudtema, de postglaciala förkastningarnas uppkomst

och uppträdande samt deras betydelse för slutförvaring av kärnbränsle, har man nu en klarare och på observationer baserad uppfattning.

Förkastningarna i Lansjärv och Pasmajärvi har konstaterats sammanhänga med äldre större system av strukturer. Förkastningarna är i samband med istiden nyaktiverade äldre strukturer och man har inte lyckats finna entydiga bevis för nya förkastningar i de äldre koherenta berggrundsblocken. Då de äldre förkastningarna eller berggrundsblocken låser sig förorsakas säkerligen nya förkastningar vilka dock troligen är lokaliserade till äldre redan existerande strukturer i berggrunden. Postglaciala rörelser längs gamla förkastningszoner har enligt nyare observationer varit rätt allmänna och samtidigt understrykes betydelsen av horisontella blockrörelser.

REFERENSER

Aarnisalo, J., 1978. Use of satellite pictures for determining major shield fractures relevant for ore prospecting, northern Finland, Geological Survey of Finland, Report of Investigation No. 21.

Anundsen, K., 1985. Changes in shore-level and ice-front position in Late Weichel and Holocene, southern Norway. Norsk Geogr. Tidsskr. 39, 205-225

Arkko, V. & Lindh, L., 1988. Tektoniska Studier i Lansjärv. SKB, Arbetsrapport AR 88-03.

Bakkeliid, S. & Tåsåsen, O., 1988. Påvisning av mulige aktive förkastningar i Rogaland. University of Bergen, Dept. of Geology, Statens Kraftverk, Rapport 2/1988.

Bjarnason, B., 1989. Hydrofracturing stress measurements in borehole KL01, Lansjärv. SKB, Arbetsrapport AR 89-10.

Blomqvist, R., 1989. Deep groundwaters in the Precambrian crystalline basement of Finland - implications for nuclear waste disposal studies. Paper presented at "Radioactive Waste Disposal - The Geologists' Responsibility, and submitted for Geol. Fören. Stockholm Förh.

Blomqvist, R., Ahonen, L. & Hakkarainen, V., 1989a. Preliminary hydrogeological interpretation of the Sukkulansalo area at Outokumpu, Finland. Geological Survey of Finland, Nuclear Waste Disposal Research, Rep. YST-67 (in Finnish).

Blomqvist, R., Lahermo, P.W., Lahtinen, R. & Halonen, S., 1989b. Geochemical Profiles of Deep Groundwater in Precambrian Bedrock in Finland. In: Proceedings of Exploration '87. Third Decennial International Conference on Geophysical and Geochemical Exploration for Minerals and Groundwater, ed. by G.D. Garland. Ontario Geological Survey, Special Volume 3, 746 - 757.

Blomqvist, R. et al., in prep. Water-rock interaction and geochemistry of saline groundwaters in the Precambrian crystalline basement of Finland.

Bäckblom, G. et al., 1989. Interdisciplinary study of post-glacial faulting in the Landsjärv area, northern Sweden 1986 - 1989. SKB, Technical Report TR 89-31.

Coveney, Jr., R.A., Goebel, E.D., Zeller, E.J., Dreachhoff, G.A.M. & Angino, E.E., 1987. Serpentinization and the origin of hydrogen gas in Kansas. Am. Assoc. Petr. Geol. Bull. 71, 39 - 48.

Donner, J., 1980. The determination and dating of synchronous late Quaternary Shorelines in Fennoscandia. Pp. 285 - 296 in Earth Rheology, Isostasy and Eustasy, ed. by N.A. Mörner. John Wiley & Sons.

Edelman, N., 1949. Some morphological details of the roches moutonnees in the archipelago of SW Finland. Bull. Comm. géol. Finlande 144.

- Elo, S., 1981. A gravity study of the Wyborg rapakivi massif. Paper presented at 43rd EAEG meeting, Venice.
- Frape, S.K. & Fritz, P., 1982. The chemistry and isotopic composition of saline groundwaters from the Sudbury Basin, Ontario. *Can. J. Earth Sci.* 19, 645 - 661.
- Frape, S.K. & Fritz, P., 1987. Geochemical trends from groundwaters from the Canadian Shield. In: *Saline Water and Gases in Crystalline Rocks*, ed. by P. Fritz and S.K. Frape. *Geol. Assoc. Canada Spec. Paper* 33, 19 - 38.
- Frape, S.K., Fritz, P. & McNutt, R.H., 1984. Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48, 1617 - 1627.
- Fritz, P. & Frape, S.K., 1982. Saline groundwaters in the Canadian Shield - A first overview. *Chemical Geology* 36, 179 - 190.
- Hansen, K., 1986. Datering af bjergarternes afköling - ved tälling af spor efter atomspaltinger. *Naturens Verden* 1986, 331-337.
- Henkel, H., 1988. Tectonic studies in the Lansjärv region. SKB, Technical Report TR 88-07, 66 p.
- IAEA (International Atomic Energy Agency, Vienna), 1983. *Isotope Techniques in the Hydrological Assessment of Potential Sites for the Disposal of High-Level Radioactive Wastes*. Technical Reports Series No. 228, 151 p.
- Kakkuri, J., 1985. Die Landhebung in Fennoskandien im Lichte der heutigen Wissenschaft. *Zeitschrift für Vermessungswesen, Deutscher Vereinigung für Vermessungswesen e.V.* Jahrgang 110, Heft 2.
- Kankainen, T., 1986. On the age and origin of groundwater from the rapakivi granite on the island of Hästholmen. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Report YJT 86-29.
- Keefe, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geol. Soc. of America, Bull.* 95, 406 - 421.
- Kim, W.Y., Skordes, E., Zhon, Y.P. & Kulhaneck, O., 1988. Source parameters of major earthquakes near Kiruna, Northern Sweden, deduced from synthetic seismogram computation. SKB Technical Report TR 88-23, 45 p.
- Kukkonen, I. & Kuivamäki, A., 1985. Geologisia ja geofysikaalisia havaintoja Pasmajärven ja Suasseljän postglasiaalisista siirroksista. Abstract in English: Geological and geophysical observations of Pasmajärvi and Suasselkä postglacial faults. Geological Survey of Finland, Nuclear Waste Disposal Research, Report YST-46.
- Kuivamäki, A., 1986. Havaintoja Venejärven ja Ruostejärven postglasiaalisista siirroksista. Abstract in English: Observations of the Venejärvi and Ruostejärvi postglacial faults. Geological Survey of Finland, Nuclear Waste Disposal Research, Report YST-52.
- Kujansuu, R., 1964. Nuorista siirroksista Lapissa. *Geologi* No 3 (in Finnish).

- Kujansuu, R., 1972. On landslides in Finnish Lapland, Geological Survey of Finland, Bull. 256, 22 p.
- Kuivamäki, A. & Vuorela, P., 1985. The significance of geological processes to the final disposal of spent nuclear fuel in Finland. Geological Survey of Finland, Nuclear Waste Disposal Research, Report YST-47.
- Laaksoharju, M., Ahonen, L. & Blomqvist, R., in prep. A portable double packer water sampler and hydraulic equipment for slim drillholes.
- Lagerbäck, R., 1979. Neotectonic structures in northern Sweden. Geol. Fören. Stockholm, Förh. 100, 263 - 269.
- Lahermo, P., 1971. On the hydrogeology of the coastal region of southeastern Finland. Geol. Surv. Finland, Bull. 252, 44 p.
- Lahermo, P.W., Halonen, S., Ahonen, L., Pirttialo, K. & Mitrega J., 1989. Deep groundwater conditions at Miihkali, eastern Finland. Proceedings of the Sixth International Symposium on Water-Rock Interaction, Malvern (UK), pp. 405 - 408.
- Lahermo, P.W. & Lampén, P., 1987. Brackish and Saline Groundwaters in Finland. In Saline Water and Gases in Crystalline Rocks, ed. by P. Fritz and S.K. Frapè. Geol. Assoc. Canada Spec. Paper 33, 103 - 109.
- Lahtinen, R. & Laaksoharju, M., 1985. Förekomsten av salta grundvatten i kristallin berggrund - en litteraturstudie. KAV-330(85)1. Nordiska Kontaktorganet för Atomenergifrågor; intern rapport.
- Lampén, P., 1988a. Analytical results of groundwater samples from Romuvaara in Kuhmo in 1987. Industrial Power Company Ltd, Technical Report 88-15. 17 p. and 24 appendices (in Finnish).
- Lampén, P., 1988b. Analytical results of groundwater samples from Veitsivaara in Hyrynsalmi in 1987. Industrial Power Company Ltd, Technical Report 88-15. 19 p. and 32 appendices (in Finnish).
- Landström, O., Smellie, J. & Tullborg, E-L., 1989. Mineralogical and geochemical studies of fracture-infillings in drillcore KLJ 01. In G. Bäckblom ed. SKB TR 89-??.
- Lehtovaara, J., 1976. Apatite fission track dating of Finnish Precambrian intrusives. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae Ser. A III* 117, 94 sid.
- Lindevald, H., 1985. Salt grundvatten i Sverige. *Sveriges Geol. Unders., Rapp. och Medd.*, 39.
- Lundqvist, J. & Lagerback, R., 1976. The Pärvie fault: A Late-glacial fault in the Precambrian of Swedish Lapland. *Geol. Fören. Stockholm, Förh.* 98, 45 - 51.
- Mörner, N-A., 1988 Neotectonics and paleoseismicity. The deciphering of paleoseismotectonic events within the Fennoscandian Shield. In: N-A. Mörner (ed.) *Present Processes and Properties in the Lithosphere*. Stockholms Universitet, s. 53-55

- Mörner, N.A., 1980. The Fennoscandian uplift; geological data and their geodynamical implication. Pp. 251 - 283 in *Earth Rheology, Isostasy and Eustasy*, ed. by N.A. Mörner. John Wiley & Sons.
- Nurmi, P. & Kukkonen, I., 1986. A new technique for sampling water and gas from deep drill holes. *Can. J. Earth Sci.* 23, 1450 - 1454.
- Nurmi, P., Kukkonen, I. & Lahermo, P., 1988. Geochemistry and origin of saline groundwaters in the Fennoscandian Shield. *Applied Geochem.* 3, 185 - 303.
- Olesen, O., 1988. The Storrugarra Fault, evidence of neotectonics in the Precambrian of Finmark, northern Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 68, 107 - 118.
- Paananen, M., 1987. Venejärven, Ruostejärven, Suasseljän ja Pasmajärven postglaciaalisten siirrosten geofysikaalinen tutkimus. Abstract in English: Geophysical studies of the Venejärvi, Ruostejärvi, Suasselkä and Pasmajärvi postglacial faults in northern Finland. Geological Survey of Finland, Nuclear Waste Disposal Research, Report YST-59.
- Paananen, M., 1989. Sähköiset luotaukset, geofysikaaliset reikämittaukset ja hydrauliset testit Pasmajärven postglasiaalisella siirroksella. Summary: Resistivity soundings, geophysical borehole measurements and hydraulic tests at Pasmajärvi postglacial fault, Northern Finland. Geological Survey of Finland, Nuclear Waste Disposal
- Possnert, G. & Tullborg E-L (i manuskript). ^{14}C -analyses of calcite coatings in open fractures in the Klipperås study site, southern Sweden. SGAB IRAP 89432.
- Poutiainen, M., 1985. Fluidinklusionsundersökningar och deras betydelse samt inklusionernas eventuella inverkan på salthalten i grundvattnet - en utredning i anslutning till kärnavfallsförvar i berg. KAV-330(85)2. Nordiska Kontaktorganet för Atomenergifrågor; intern rapport.
- Rönkä, E., Uusinoka, R. & Vuorinen, A., 1980. Geochemistry of ground water in the Precambrian crystalline bedrock of Finland in relation to the chemical composition of the reservoir rocks. Publications of the Water Research Institute, National Board of Waters, Finland 38, 41 - 53.
- Sheppard, S.M.F., 1986. Characterization and Isotopic Variations in Natural Waters. In: *Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes*, ed. by J.W. Valley, H.P. Taylor, Jr. & J.R. O'Neil. *Reviews in Mineralogy* 16, 165 - 183.
- Sherwood Lollar, B., Frapre, S.K., Drimmie, R., Fritz, P., Weise, S.M., Macko, S.A., Welhan, J.A., Blomqvist, R. & Lahermo, P.W., 1989. Deep gases of the Canadian and Fennoscandian Shields - A testing ground for the theory of abiotic methane generation. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Water-Rock Interaction, Malvern (UK)*, pp. 617 - 620.
- Sherwood Lollar, B. et al., in prep. Deep gases of the Fennoscandian Shield.
- Simonen, A., 1980. The Precambrian in Finland. *Geol. Surv. Finland, Bull.* 304, 58 p.

- Sippel, R. F. & Glover, E. D., 1964. Fission damage in calcite and the dating of carbonates. *Science* 144, 409-411.
Research, Report YST-69.
- Slunga, R., 1987. Earthquake measurements in southern Sweden, Oct 1, 1986 - Mar 31, 1987. SKB, Technical Report TR 87-27.
- Smalley, P.C., Blomqvist, R. & Råheim, A., 1988. Sr isotopic evidence for discrete saline components in stratified groundwaters from crystalline bedrock, Outokumpu, Finland. *Geology* 16, 354 - 357.
- Smellie, J., Larsson, N-Å., Wikberg, P. & Carlsson, L., 1985. Hydrochemical investigations in crystalline bedrock in relation to existing hydraulic conditions: Experience from the SKB test-sites in Sweden. SKB, Technical Report TR 85-11, 361 p.
- Smellie, J., Larsson, N-Å., Wikberg, P., Puigdomènech, I. & Tullborg, E-L., 1987. Hydrochemical investigations in crystalline bedrock in relation to existing hydraulic conditions: Klipperås test site, Småland, Southern Sweden. SKB, Technical Report TR 87-21, 115 p.
- Stephansson, O., Dahlström, L-O., Bergström, K., Myrvang, A., Fjeld, O.K., Hanssen, T.H., Särkkä, P. & Väättäin, A., 1987. Fennoscandian Rock Stress Data Base - FRSD. Research Report, Luleå: 006.
- Sundh, M. & Wahlroos, J.E., 1988. Dokumentation av hålltolkning och fotogrammetrisk avvägning av högsta kustlinjen. SKB-project bergets stabilitet. SKB, Arbetsrapport AR 88-06.
- Talbot, C.J., 1986. A preliminary structural analysis of the Patterns of post-glacial faults in northern Sweden. SKB, Technical Report TR 86-20.
- Talvitie, J., 1979. Seismotectonics in Finland. *Geol. Fören. Stockholm Förh.* 100, 277 - 253.
- Teisseyre, R., Penttilä, E., Tuominen, H.V. & Vesanen, E., 1969. The horizontal spread of cratonic earthquakes and corresponding blockmovements. *Geophysica* 10, 55 - 68.
- Tullborg, E-L., 1986. ^{14}C measurements of fissure filling calcite using accelerator mass spectrometry. A pilot study.
SGAB IRAP-86407.
- Tullborg, E-L., 1989. $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in fracture calcite used for interpretation of recent meteoric water circulation. Extended abstract in Miles Ed. *Water-Rock Interaction WRI-6*.
- Tullborg, E-L., Lehtovaara, J. & Smellie, J., 1986. Åldersdatering av sprickor. KAV-330(86)1. Nordiska Kontaktorganet för Atomenergifrågor; intern rapport.
- Tuominen, H.V., Aarnisalo, J. & Söderholm, B., 1973. Tectonic Patterns in the Central Baltic Shield. *Geol. Soc. Finland, Bull.* 45, 205 - 217.
- Tynni, R., 1966. Über spät- und postglaziale Uferschiebung in der Gegend von Askola, Süd-Finland. *Bull. Comm. géol. Finlande* 223.

- Wahlström, R. & Kulhanek, O., 1984. The Landsjärv fault - seismically active or dead? *Geol. För. Stockholm Förh.* 105, 334.
- Wahlström, R., Linder, S-O. & Holmqvist, C., 1987. Near-distance seismological monitoring of the Lansjärv neotectonic fault region. SKB, Technical Report TR 88-12, 27 p.
- Veriö, A., 1988. Havaintoja kallioperän murroslinjojen vertikaaliliikunnoista vuosina 1987 - 1988. Summary: Observations of vertical movements in fracture zones, 1987-88. Geological Survey of Finland, Nuclear Waste Disposal Research, Report YST-66, 9 s.
- Wickström, P. & Lampén, P., 1986. Lavia test borehole - Summary of the hydrogeochemical investigations from 1984 to 1985. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Rep. YJT 86-11, 47 p. and 22 appendices (in Finnish).
- Wickström, P. & Nurmi, U-M., 1989a. Groundwater sampling and analytical results of groundwater samples from Romuvaara in Kuhmo in 1988. Industrial Power Company Ltd, Technical Report 89-07. 9 p. and 27 appendices (in Finnish).
- Wickström, P. & Nurmi, U-M., 1989b. Groundwater sampling and analytical results of groundwater samples from Veitsivaara in Hyrynsalmi in 1988. Industrial Power Company Ltd, Technical Report 89-08. 9 p. and 31 appendices (in Finnish).
- Wickström, P. & Nurmi, U-M., 1989c. Groundwater sampling and analytical results of groundwater samples from Kivetty in Konginkangas in 1988. Industrial Power Company Ltd, Technical Report 89-12. 13 p. and 25 appendices (in Finnish).
- Wikberg, P., 1987. The chemistry of deep groundwaters in crystalline rocks. Ph.D thesis. The Royal Institute of Technology, Department of Inorganic Chemistry, Stockholm, 58 p.
- Vuorela, P., Kuivamäki, A. & Paananen, M., 1987. Neotectonic bedrock movements. A preliminary survey of the Pasmajärvi fault. Geological Survey of Finland, Nuclear Waste Disposal Research, Report YST-57, 15 s.

APPENDIX I

DELTAGARE

Lars-Jørgen Andersen
Hydrogeological Division
Geological Survey of Denmark
Thoravej 31
2400 COPENHAGEN NV
Denmark

Karl Anundsen
Geologisk Inst., Avd.B
Universitetet i Bergen
5007 BERGEN
Norge

Alf Björklund
Institutionen för geologi
Åbo Akademi
20500 ÅBO
Finland

Runar Blomqvist
Geologiska forskningscentralen
Betongkarlavägen 4
02150 ESBO
Finland

Shaun Frappe
Department of Earth Sciences
University of Waterloo
WATERLOO, ONTARIO
Canada N2L 3G1

Peter Fritz
Institut für Hydrologie
Gesellschaft für Strahlen-
und Umweltforschung mbH
MÜNCHEN
Bundesrepublik Deutschland

Sirkku Halonen
Geologiska forskningscentralen
Betongkarlavägen 4
02150 ESBO
Finland

Herbert Henkel
Sveriges Geologiska Undersökn.
Box 670
751 28 UPPSALA
Sverige

Juhani Kakkuri
Geodetiska Institutet
Ilmalagatan 1 A
00240 HELSINGFORS
Finland

Fritz Kautsky
SKI
Box 27106
10252 STOCKHOLM
Sverige

Aimo Kuivamäki
Geologiska forskningscentralen
Betongkarlavägen 4
02150 ESBO
Finland

Marcus Laaksoharju
Oorganisk Kemi
Kungliga Tekniska Högskolan
10044 STOCKHOLM
Sverige

Robert Lagerbäck
Sveriges Geologiska Undersökn.
Box 670
751 28 UPPSALA
Sverige

Raimo Lahtinen
Geologiska forskningscentralen
Betongkarlavägen 4
02150 ESBO
Finland

Jyrki Lehtovaara
Geologiska Institutet
Åbo Universitet
20500 ÅBO
Finland

Barbara Sherwood Lollar
Department of Earth Sciences
University of Waterloo
WATERLOO, ONTARIO
Canada N2L 3G1

Markku Paananen
Geologiska forskningscentralen
Betongkarlavägen 4
02150 ESBO
Finland

Aarne Veriö
Lantmäteristyrelsen
Sematorbron 12
00520 HELSINGFORS
Finland

Ragnar Slunga
Försvarets forskningsanstalt
Box 27322
102 54 STOCKHOLM
Sverige

Peter Wikberg
Svensk Kärnbränslehantering Ab
Box 5864
10248 STOCKHOLM
Sverige

Craig Smalley
Institutt for Energiteknikk
Boks 40
2007 KJELLER
Norge

Paavo Vuorela
Geologiska forskningscentralen
Betongkarlavägen 4
02150 ESBO
Finland

nuvarande address:
Craig Smalley
BP Research Center
Sunbury-on-Thames
MIDDLESEX TW16 7LN
United Kingdom

John Smellie
SGAB
Box 1424
75144 UPPSALA
Sverige

Roy Stanfors
Roy Stanfors Cons. AB
IDEON
Ole Römers väg 12
223 70 LUND
Sverige

Christopher Talbot
Uppsala University
751 28 UPPSALA
Sverige

Eva-Lena Tullborg
SGAB
Pusterviksgatan 2
413 01 GÖTEBORG
Sverige