

# SKI Teknisk rapport 93:8

---

## Kemi och genes av djupa grundvatten i kristallint berg

Björn Lagerblad

November 1995

SKI Teknisk rapport 93:8

# **Kemi och genes av djupa grundvatten i kristallint berg**

Björn Lagerblad

Cement- och Betonginstitutet, 100 44 STOCKHOLM

November 1995

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Statens kärnkraftinspektion, SKI.  
Slutsatser och åsikter som framförs i rapporten är författarens egna  
och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med SKIs.

## Innehållsförteckning

	Sid
<b>1 Sammanfattning</b>	3
<b>2 Inledning</b>	4
<b>3 Bakgrund</b>	5
Vattens rörelse i berg	5
Vattens bildning i och interaktion med berg	6
Vatten-mineralreaktioner	9
Effekt av vattnets kemiska sammansättning	11
Olika bergarters förmåga att reglera vattenkemin	12
Samband mellan isotopuppsättningar, genes och ålder i grundvatten	12
Åldersdateringar av grundvatten	14
<b>4 Geokemiska mätresultat samt tolkning av grundvattendata</b>	14
Kemin hos vattnet i borrhål under Äspö	14
Internationella jämförelser	15
<b>5 Diskussion och slutsatser</b>	18
Äspö/Laxemar	18
Hypoteser	19
Tänkbara konsekvenser för slutförvaring enligt KBS-3	21
<b>6 Referenser</b>	22

## Kemi och genes av djupa grundvatten i kristallint berg

### 1 Sammanfattning

I den här rapporten behandlas hur vatten interagerar med kristallint berg och vilka konsekvenser detta har på vattnets kemiska sammansättning. Den behandlar också hur flöden av olika vattentyper modifieras av berget och vilken konsekvens detta kan få på grundvattnet i närmiljön till en förvaringsplats för utbränt kärnbränsle. Arbetet fokuseras framför allt på de förändringar i sin sammansättning som grundvatten får mot djupet i berg.

De vattendata som kommit fram från både Finnsjön och Äspö visar att grundvattnet blir allt saltare mot djupet. Detta kan och har tolkats som ett resultat av att marint vatten strömmat ner i berget under istiden.

Vattendata från andra och djupare borrhål i stabilt kristallint berg, i Finland, Kanada, Ryssland, England och Sverige, visar emellertid att den ökande salthalten är generell och att den på stora djup är mycket hög, högre än det som inträngande havsvatten kan ge. Det är därför troligt att djupvattnet under Äspö och vid Finnsjön är mycket gammalt och att salthalten är ett resultat av geologiska händelser och geokemiska processer i berget. Dessutom har det djupa grundvattnet en annan katjon- och isotopuppsättning än havsvatten vilket även det indikerar geologiskt vatten. Salthalten och den kemiska sammansättningen på åtminstone det djupast provtagna vattnet bör därför tolkas som ett resultat av geologiska skeenden äldre än den senaste istiden.

Olika tolkningar beträffande grundvattnets ursprung bör tas med i säkerhetsanalysen för deponering av utbränt kärnbränsle i kristallint berg. En förståelse av hur grundvattnet fått den sammansättning som det har kan utgöra ett underlag för förutsägelser om framtida vattenkemi och för utformning av scenarier i vilka frågor om vattenmiljön ingår. Om grundvattnet är mycket gammalt kan man förmoda att det kommer att ligga kvar på djupet även i framtiden.

## 2 Inledning

I Sverige pågår för närvarande ett intensivt forskningsarbete för att ta fram en metod för att på ett säkert sätt ta hand om det använda men fortfarande radioaktiva kärnbränslet. Ansvarig för detta är Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB.

SKBs program granskades och övervakades fram till den 30 juni 1992 av Statens Kärnbränslenämnd, SKN. Denna uppgift övertogs därefter av Statens kärnkraftinspektion, SKI. Denna rapport publiceras av SKI, men arbetet har utförts på uppdrag av SKN. De tolkningar och synpunkter som framförs i rapporten är emellertid författarens egna och sammanfaller inte nödvändigtvis med dem hos uppdragsgivaren.

Huvudlinjen i SKBs program är den så kallade KBS-3 metoden som finns beskriven i rapporten "Final Storage of Spent Nuclear Fuel" från 1983. Enligt konceptet skall det utbrända kärnbränslet slutförvaras i svenskt urberg på ett djup av ca 500 meter. Bränslet innesluts i kopparkapslar som deponeras i borrarade hål i golvet på tunnlar. Mellan kapslarna och berget placeras kompakterad bentonitlera. Efter förslutning av förvaret återställs grundvattennivån varvid bentoniten sväller och hindrar vattenflöde runt kapslarna. Förvarskonceptet syftar till att radionukliderna i det använda bränslet skall isoleras från biosfären under mycket lång tid, 100 000-tals år.

För utformningen av ett sådant förvar liksom för analyser av förvarets säkerhet spelar grundvattnets egenskaper och rörelser en viktig roll. Bland annat behöver man analysera huruvida grundvattnet har sådana egenskaper att bentonit och kopparkapsel kommer att kunna fungera på tillämpligt sätt under denna tid. Dessutom måste man vid ett eventuellt kapselbrott kunna utvärdera grundvattnets rörelse och transportkapacitet.

Man behöver i detta sammanhang beakta att stora yttre förändringar sannolikt kommer att inträffa under den aktuella perioden. Berget kommer att utsättas för nya istider, och tektoniska rörelser kommer att ändra de betingelser vi har idag. Man kan inte utan vidare förutsätta att grundvattnet under de närmaste 100 000 eller kanske inte ens 10 000 åren kommer att ha den sammansättning det har idag. För att kunna tolka kommande händelseförlopp måste man utgå från den kunskap som finns om tidigare skeenden i jordskorpan utveckling.

Syftet med denna rapport är att analysera varför och hur grundvattnet fått den sammansättning det har vid olika djup och vad detta innebär för säkerhetsanalysen. Dessutom ger den en allmän bakgrund beträffande de geologiska fenomen som är av betydelse för en förståelse av vattnets genes.

### 3 Bakgrund

#### Vattens rörelse i berg

Grundvattenflödet i ytan bestäms huvudsakligen av nederbörden och de lokala topografiska skillnaderna i terrängen. Vid kusten påverkas vattnet även av tidvatteneffekter och den densitetsskillnad som finns mellan salt marint och sött meteoriskt vatten (regnvatten).

Vattenflödet på större djup, till exempel på 500 meters, styrs inte nödvändigtvis av samma mekanismer. Kunskapen om vad som sker på djupet är emellertid begränsad då det är svårt att göra direkta observationer. Den information som finns om djupvattnet kommer huvudsakligen från djupa borrhål, gruvor och hydrotermala källor. Denna information kan kombineras med data om berggrundskemi, isotopuppsättningar och tolkningar av geologiska fenomen. På detta baseras modeller.

Här måste emellertid varje informationskälla tolkas för sig och sättas in i sitt geologiska sammanhang. Bristen på direktinformation och komplexiteten hos problemet gör att det finns många felkällor som ger missvisande resultat. Djupvattnet i exempelvis gruvor och malmförande områden kontamineras av malmen. De sulfidmineral som finns i eller åtföljer malmen ger vid oxidation upphov till surt vatten. De hydrotermala källorna är ofta ett resultat av hög relief och tektoniska zoner i seismiskt aktiva (geologiskt unga) områden med hög geotermal gradient vilket gör att informationen inte kan tolkas. Den mest liknande relevanta informationen ges därför av analys och mätningar på vattnet i djupa borrhål som ligger i berg med sådan sammansättning och sådana geologiska förhållanden som vi har i Sverige. Det mesta tyder emellertid på att vatten kan röra sig på stora djup även i relativt "lugn" geologisk miljö.

Den mest effektiva mekanismen för att driva större mängder vatten genom berg är hydrotermal konvektion. Motorn i denna process är värmskillnader i berget, både i djup och sidled. I vulkaniskt aktiva områden med hög geotermal gradient kan mycket stora vattenmängder omsättas. Stora vattenflöden kan observeras vid de sk. "black smokers" som finns vid de vulkaniska spridningsryggarna på oceanbotten. I vattenmängd är det floder som rör sig genom berget, dock fördelat över stora bergsvolymer. Effekten av vattnet märks i de hydrotermala kemiska omvandlingar de vulkaniska bergarterna utsätts för. Relikt mycket omfattande hydrotermal omvandling kan observeras även i mycket gammalt berg (Lagerblad & Gorbatshev 1985). Den hydrotermala konvektionen sjunker snabbt med avtagande geotermal gradient. Även i den gamla svenska urbergsskölden finns en geotermal gradient orsakad av värmetransport från jordens inre och naturligt radioaktivt sönderfall. Då det finns fritt vatten i berget på stora djup (se nedan) pågår det därför antagligen hydrotermal konvektion även i

urbergskölden. Den värme som genereras av det utbrända kärnbränslet kan också ge upphov till viss hydrotermal cirkulation. Även en relativt liten reliefskillnad i kombination med en moderat skillnad i geotermal gradient kan emellertid driva vatten på mycket stora djup (Gize 1992).

En annan mekanism för att omsätta djupvatten är tektonisk pumpning. Detta fenomen, som är vanligt i seismiskt aktiva områden, är en funktion av de lokala tryckförändringar som rörelserna i berget orsakar. Seismisk pumpning kan observeras genom stora variationer i grundvattenytan i samband med jordbävningar.

Mindre jordbävningar med magnituder upp till 5 (Richter-skalan) sker, och har tidigare skett, i det svenska urberget (Slunga 1990). Med utgångspunkt från vad man vet från de tidigare nedisningarna ökar jordbävningsaktiviteten drastiskt vid deglaciationen när trycket släpper och landet åter höjer sig. Djupet på dessa deglaciationsrörelser är dock antagligen mindre än de som har sitt upphov i kontinentalrörelser. De senare kan ge upphov, såsom under Kolahalvön (se bil. 1), till mycket stora och flackt djupgående sprickzoner i vilka vatten kan röra sig.

#### Vattens bildning i och interaktion med berg.

Vatten är inte inert utan det både frigörs från och binds i berg. För att förstå detta måste man se på interaktionen mellan berg och vatten i ett längre tidsperspektiv, ur geologisk synpunkt. Generellt sett finns det tre typer av bergarter: sedimentära (av sediment), magmatiska (ur smälta) och metamorfa (omvandlade). Dessa bergartstyper övergår cykliskt i varandra. I denna process spelar vatten en mycket stor roll (Fig 1).

De sedimentära bergarterna är bildade genom att nedbrutet/vittrat berg och dess komponenter transporterats och avsatts i en ny miljö som sediment. De är rika på vatten och vattenrika mineral såsom leror. Då sedimenten huvudsakligen avlagras på havsbottnar är salthalten ofta hög. En del sedimentära bergarter innehåller rena saltlager sk. evaporiter. Evaporiter finns i norra Tyskland och Danmark och djupt ner i de sedimentära bergarterna i sydvästsåne. Borrningar efter olja vid Höllviken under början på 1970-talet visade att djupvattnet är mycket salt. Med tiden blir sedimentpacken allt tjockare och trycket ökar vilket medför att det löst bundna vattnet frigörs. Typiska sedimentära bergarter är lerskiffer, sandsten och kalksten.

De metamorfa bergarterna bildas genom pålagring och kompaktion. Efterhand blir sedimentpacken allt tjockare. På de djupast liggande lagren blir trycket allt högre samtidigt som temperaturen stiger. De vattenrika mineralen reagerar och nya mineralparageneser (mineraluppsättningar) bildas. Generellt gäller att ju högre tryck och temperaturer som bergarten utsätts för desto mindre vatten innehåller mineralparageneserna (Winkler 1974). Det

är helt i överensstämmelse med termodynamiken, men förutsätter att vatten kan lämna systemet då reaktionerna annars skulle avstanna. Metamorfosen ökar genom olika globala tektoniska rörelser som trycker ihop bergartsenheterna. Med tiden, då berget genom olika rörelser i jordskorpan kommer upp över havsytan och börjar erodera, kommer allt djupare belägna delar av berget fram till ytan. Förekomsten av högmetamorfa mineralparagenser visar att vatten måste ha lämnat systemet då dessa annars inte skulle ha kunnat bildas. Förutom vatten lämnar även en del gaser bergarterna under metamorfosen. Halterna av koldioxid och olika kolväteföreningar är därför ofta höga i djupvatten. Med tanke på de metamorfa processerna är det också naturligt att gaser rör sig genom berget (Hermansson et al 1991). På riktigt stora djup sker det, även idag under Sverige, metamorfa omvandlingar. Typiska metamorfa bergarter är skiffer, kvartsit, marmor och olika typer av gnejser.

Magmatiska bergarter bildas ur smältor som stelnat. Smältorna kan ha kommit från jordens inre men vanligare är att det är sedimentära/metamorfa bergarter som upphettats till en sådan temperatur att de helt eller delvis smält upp. Mot djupet kommer därför de högmetamorfa bergarterna att övergå till smälta. Denna smälta kan pga sin lägre densitet som en diapir tränga upp i ovanliggande yngre metamorfa bergarter. Graniter är ofta anlagda på detta sätt. Vissa smältor kan tränga långt upp i den ovanliggande kristallina berggrunden där de stelnar som magmatiska kroppar eller i gångar. I vulkaniska områden tränger de ända upp till ytan. Typiska magmatiska bergarter är granit, gabbro, basalt och diabas. Även de magmatiska bergarterna kan metamorfiseras. Nya mineralparagenser bildas av de ursprungliga magmatiska. Ofta är detta ett resultat av att magmatiska bergarterna hydratiseras av de vattenlösningar som finns på djupet. Det är en sk retrograd (omvänd) metamorfos dvs bergarterna har omvandlats vid en lägre temperatur än den de bildades vid. I den övre delen av jordskorpan är det kemiska hydratationsprocesser liknande dem som sker vid vittring av bergarter i ytan (se Yatsu 1988). I tunnslip kan retrograderingen observeras som partiell epidotomvandling av plagioklas och glimmeromvandling av alkalifältspat (se sid 9).



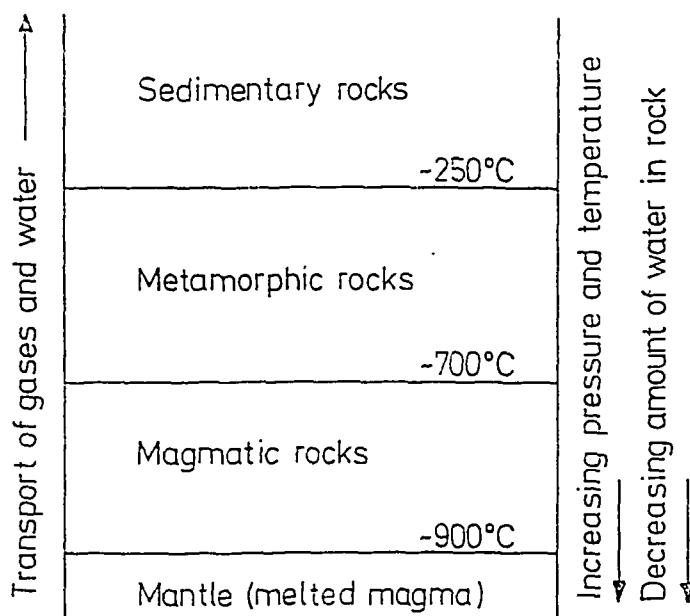


FIG 1. Schematisk skiss av profil genom jordens krusta. Temperaturen för omvandlingarna är approximativ och beroende av definition. Vid vilken temperatur omvandlingen sker beror på bergartssammansättning, tryck och vatteninnehåll. Då reaktionerna är tröga tar omvandlingarna lång tid.

Vid alla dessa typer av omvandlingar spelar vatten en stor roll, vilket i sin tur visar att det finns vatten och att vatten kan röra sig i berget även på stora djup. Vid de olika processerna anrikas kloridjonerna i vätskefasen eller faller ut som salter. Ingen av de vanliga silikaterna eller oxiderna kan assimilera några större mängder klorid. På grund av sin högre densitet kommer saltlösningar att stanna på djupet om de inte genom någon kraft tvingas upp till ytan. På mycket stort djup under Kolahalvön har man observerat saltutfällningar.

Bergarterna vid Äspö består av olika typer av omvandlade sediment: (vulkaniter) graniter, grönstenar och diabaser. De är i allmänhet förgnejsade och något metamorft retrograderade. Detta visas av att de innehåller nybildade glimrar. Spårelementdata och isotoptolkningar tyder på att smålandgraniterna vid Äspö har sitt ursprung i uppsmälta sediment (Johansson & Larsen 1989). De ursprungliga mineralen i vulkaniterna, grönstenarna och graniterna bildades för mer än 1,8 miljarder år sedan. Därefter har de utsatts för metamorfos i flera omgångar (Gaál & Gorbatshev 1989). Alla enheterna är förgnejsade. Detta innebär att bergarterna har en mycket

komplex mineralogi med olika generationer av mineralparageneser som överpräglar varandra. Generellt har de dock en högttemperatursparagenes präglad av mineral som plagioklas, alkalifältspat, biotit, muskovit, hornblände och klinopyroxen. Dessa överpräglas av mera vattenrika lågttemperatursmineral som epidot, klorit etc.

### Vatten-mineralreaktioner

Grundvattenkemin regleras dels av de mineral som finns i sprickor, dels av bergartsmineralen. Dessa är olika till sin natur. Sprickmineralen som är relativt unga har bildats som en konsekvens av jämviktsvillkor i vattenfyllda sprickor, medan bergartsmineralen har bildats genom de processer som beskrivs ovan. De kemiska förloppen kan modelleras med hjälp av jämviktsdata (se tex SKB FoU-program 89, Fritz et al 1988). Problemet är emellertid att många av reaktionerna, speciellt de i vilka bergartsmineral ingår är långsamma (kinetiskt styrda) vilket medför att modelleringarna kan ge delvis missvisande resultat.

För att förstå kinetiken behöver man analysera de termodynamiska villkoren för mineralernas stabilitet samt deras strukturella uppbyggnad. De flesta av sprickmineralen har bildats ur vattenlösningar och är termodynamiskt stabila i dessa. Om vattnets kemi ändras ställer de om sig eller löses relativt snabbt. På så sätt buffrar de vattenkemin.

Bergartsmineralen i det kristallina berget bildades emellertid i en helt annan miljö med betydligt högre temperatur och tryck än de befinner sig i idag. De flesta av dem är metastabila i kontakt med vatten och luft. Det är bland annat därför alla bergarter på jordytan i kontakt med vatten utsätts för kemisk vittring (cf. Yatsu 1988). Vid kontakt med atmosfären omvandlas de olika bergartsmineralen till olika typer av leror och oxidmineral. Vittringen är emellertid starkt avhängig vattnets surhetsgrad då nedbrytningen och hydratiseringen förbrukar protoner. Redoxreaktioner är också viktiga. I kontakt med syre oxideras många mineral och bildar nya reaktionsprodukter. Om oxiderande och/eller surt vatten rör sig i sprickor i berget kommer vittrings- och omvandlingsprocesser att ske i sprickorna vilket i sin tur ger ett reducerande (Pirhonen & Pitkänen 1991) och svagt basiskt vatten. Med svagt alkalint och reducerande vatten avstannar reaktionerna även om bergartsmineralen i princip fortfarande är metastabila. Detta gör att med tiden blir vatten i kristallint berg svagt basiskt och reducerande. Vattenreaktioner i bergartsmatrisen markeras genom partiel hydratisering (retrograd metamorfos) av de primära mineralen. Vid petrografisk analys av bergarterna i tunnslip ser man att kalifältspaterna är något seritiserade (finkornig muskovit), plagioklaserna är partiellt sasuritiserade (omvandlade till finkornig epidot) och biotiterna innehåller sekundär klorit. Detta har skett med bergarterna vid Äspö (se petrografisk analys i Pirhonen & Pitkänen (1991)). Dessa omvandlingar visar att det sedan bergarterna bildades för ca 1800 miljoner år sedan

måste ha skett vattenrörelser i berget. Alla dessa omvandlingar både i berg och sprickor har påverkat isotopuppsättningarna.

När vattnet blir neutralt eller basiskt avtar mineralnedbrytningen, men den upphör inte helt. Exempelvis ökar kvarts löslighet med stigande pH. Lösligheten av vissa metalljoner ökar också genom bildning av hydroxidkomplex. Vattenkemin kan emellertid regleras också på andra sätt än genom nedbrytning. En av de viktigaste mekanismerna är jonbyte (substitution). Detta reglerar speciellt proportionerna mellan joner med preferens för jonbindning dvs alkalimetallerna och de alkaliska jordartsmetallerna. I det svenska urberget, i gnejsgranitområdena där man planerar att deponera avfallet dominerar berggrunden av kvarts och olika aluminatsilikater. Kisel- och aluminiumatomerna binds ihop av syreatomer i nätverkskomplex med huvudsakligen starka kovalenta bindningar. Detta nätverk bildar grundstrukturen. I nätverket sitter andra joner som  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  och  $\text{K}^+$ . Dessa ämnen binds med jonbindningar vilka kan slutas och brytas betydligt lättare än de kovalenta bindningarna i nätverket. Enkelt uttryckt fyller de upp hålrum eller binder ihop nätverket. Detta gör att de lätt kan bytas ut mot varandra (substitueras) utan att den fundamentala kristall- (silikat)-strukturen med sina starka kovalenta bindningar behöver förändras. Substitutionen styrs av jonstyrkan samt storleken på hålrummet i det fundamentala kristallgittret. Exempelvis kan  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  och  $\text{Na}^+$  bytas ut mot varandra i en fältspat då de har liknande jonradie och karaktär (verkningsradie). Kalciumjonen födrar emellertid en kopplad substitution då den i motsats till de andra två är tvåvärd, vilket försvårar men inte hindrar substitution. Ett intressant exempel på substitution är  $\text{Sr}^{2+}$  (1.21 Å) som har en bättre anpassning till 1.18 Å (optimum) hålrummet i plagioklas ((Ca,Sr)(Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)) än  $\text{Ca}^{2+}$  (1.08 Å). I leror som bentonit sker alkal substitutioner lätt då dessa joner är svagt bundna mellan "lerflaken". Rent generellt är ler/glimmer mineralen "reaktiva" då de har en tvådimensionell silikatstruktur i vilken elementen mellan flaken är lätt åtkomliga för diffusion och jonbyte. Elementsubstitutionen innebär att mineralen, med en viss tröghet, kommer att reglera vattnets kemi. Detta gäller speciellt för katjonerna. När det gäller anjonerna är substitution svårare. Joner som  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  och  $\text{Br}^-$  får inte plats i silikatgittret. De måste därför i allmänhet bilda egna mineral eller förbli i lösning. I mindre mängder kan de dock bindas till mineral med lös struktur som exempelvis glimmer.

Olika atomer har skilda verkningsradier vilket medför att alkali metallerna och de alkaliska jordartsmetallerna (Na, K, Rb, Ca, Sr etc) med stor jonradie återfinns i vissa, medan de med mindre radie och/eller förutsättningar för ligandbildning som Mg och övergångselementen (Fe, Mn, Cr, etc) huvudsakligen finns i andra mineral. Kemin hos bergarten avgör vilka mineral den byggs upp av. De olika mineralen avgör nedbrytningshastigheten och substitutionspotentialen. Detta medför att olika bergarter med olika mineral har en avgörande betydelse för katjonfördelningen i grundvattnet. Detta är ett välkänt fenomen när det gäller ytvatten och det

finns data på att detta även gäller djupvatten (Nurmi et al 1988). Pirhonen och Pitkänen (1991) visar att bergartstypen även har en avgörande betydelse när det gäller redoxkapaciteten.

En annan mineralgrupp som kan ha en stark påverkan på grundvattnets kemi är sulfiderna, dvs metall-svavelföreningar. Sulfiderna kan ansamlas lokalt och bilda malmer. Svavelhalten är oftast högst i de kiselfattiga basiska bergarterna, grönstenarna. I reducerande miljö är de svårlösliga. Om de däremot utsätts för oxidation övergår en del sulfider lätt till sulfat som i sin tur lätt går i lösning. Dessutom innebär oxidationen av sulfid till sulfat ett nettotillskott av syra vilket leder till att pH-värdet sänks, vilket i sin tur kan påverka hela det kemiska systemet i berget.

#### Effekt av vattnets kemiska sammansättning.

Vatten med olika sammansättning reagerar på olika sätt med berg. Vanligt regn- eller sjövattnen (meteoriskt vatten) har låg salthalt. Det är emellertid oftast svagt surt och innehåller små mängder sulfat och koldioxid/kolsyra. Detta vatten buffras relativt snabbt av berget genom vittringsprocesser som gör det svagt alkalint.

Havsvatten har helt andra egenskaper. Det är normalt oxiderande och innehåller främst mycket klorider men även betydande mängder sulfater och hydroxider. Det har gjorts experiment där havsvatten vid olika temperaturer har fått reagera med olika bergarter. Syftet har varit att undersöka och förstå de mycket omfattande bergomvandlingsprocesser (sk spilitisering) som sker på havsbottenarna. En del försök är gjorda för att försöka få fram modeller för den malmlakning hydrotermala bergomvandlingar ger upphov till. Det är väl känt att hydrotermala omvandlingar kan resultera i mycket omfattande elementförflyttningar som ibland resulterar i malmbildning (Lagerblad & Gorbatshev 1985).

I ett nu klassiskt experiment upphettade Bishoff & Seyfried (1978) havsvatten från 25 till 350 °C (under tryck) och studerade den kemiska förändringen. Redan vid 70 °C började pH värdet att sjunka. Vid temperaturer över 150 °C fälldes  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  och  $\text{Ca}^{2+}$  jonerna ut samtidigt som pH värdet sjönk drastiskt. Hydrotermala experiment utförda av Hajash och Chandler (1981) visar att vid temperaturer över 200 °C så reagerar de flesta bergarter med havsvatten. Samtidigt som pH värdet kraftigt sjunker så minskar halterna av  $\text{Mg}^{2+}$  och  $\text{SO}_4^{2-}$  i havsvattnet. Metalljonkoncentrationen ökar samtidigt som proportionerna mellan  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  och  $\text{K}^+$  förändras. Vad som sker vid lägre temperaturer är osäkert men resultaten visar att varmt havsvatten interagerar kraftigt med berg både genom utfällning, mineralomvandling och jonsubstitution. Det är svårare för berget att buffra konsekvenserna av havs- än sötvatteninträngning. I verkligheten, i naturen, måste man beakta att havsvattnet har mycket längre tid på sig att reagera med berg än under experimenten där malda bergarter undersöktes.

### Olika bergarters förmåga att reglera vattenkemin.

Genom olika typer av mineralomvandlingar kommer vattnet i berget att regleras med avseende på sin kemi. I vilken riktning förändringen går beror på mineralogin, porositeten och flödet i berget.

De sedimentära bergarterna är oftast de mest reaktionsbenägna och de som har kraftigast inverkan på vattenkemin. Detta beror på att de ofta, men inte alltid, är mer porösa. De sedimentära bergarterna innehåller också ofta, i motsats till de kristallina, vattenlösliga salter.

Av de kristallina (metamorfa och magmatiska) bergarterna är de basiska (gabbro, grönsten, diabas etc) mera reaktionsbenägna än de mera kiselrika sura bergarterna (graniter etc). Detta beror på att de basiska bergarterna innehåller mera reaktiva mineral som olivin, klorit, pyroxen och hornblände medan de sura domineras av mindre reaktionsbenägna mineral som kvarts och fältspat (se Yatsu 1988). De basiska bergarterna innehåller ofta mera sulfider.

Som diskuterats ovan, så innebär den kemiska trögheten hos reaktioner mellan bergartsmineral och vatten att en kemisk modellering baserad på jämvikt villkor lätt kan bli grovt missvisande beträffande vad som sker i naturen djupt ner i berget. Reaktionerna sker i flera steg, i vilka ofta jämvikt inte uppnås, vilket gör det svårt att göra en fullständig kemisk modellering. En mera framkomlig väg vore att genom mineralogisk-petrologisk analys av de mineral som ingår i berget söka förutsäga och bedöma vilka element i vattnet mineralen kan reagera med och med utgångspunkt från detta göra en bedömning.

### Samband mellan isotopuppsättningar, genes och ålder i grundvattnen.

Ett redskap för att få fram ursprunget på vatten är isotopanalys. Det vanligaste är att kvoterna  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  och  $^1\text{H}/^2\text{H}$  jämförs. Som standard vid isotopanalys används den isotopuppsättning som havsvatten (Standard Mean Ocean Water, SMOW) har. Isotopuppsättningen av meteoriskt vatten i regn, glaciäris, floder och sjöar är mycket typisk och systematisk. Ju längre norrut med kallare klimat eller ju högre upp nederbörden har fallit desto rikare är vattnet på lätta isotoper. Detta beror på att de lätta isotoperna anrikas i ångfasen och de tunga har lättast att kondensera till regn. Detta gör att man kan konstruera en global meteorisk vattenblandningsserie (Craig 1961). Man vet också relativt väl vilken isotopuppsättning som primärt magmatiskt och metamorft vatten har. Det är rikare på tungt syre men har något mindre tungt väte än SMOW (se Fig 2)

När det gäller grundvatten försvåras emellertid analysen av att det sker ett isotoputbyte mellan mineral och vatten. Isotopuppsättningarna förändras både som ett resultat av mineralreaktioner och till följd av ett rent isotoputbyte. Jämviktskonstanterna är distinkt temperaturberoende. I jämvikt med vatten anrikas den tunga  $^{18}\text{O}$  isotopen i mineralet vid låga temperaturer medan motsatsen gäller för höga temperaturer (se Taylor 1979). Detta gäller för de flesta vanliga mineral med undantag för magnetit. Vid låga temperaturer går emellertid utbytet långsamt såvida det inte pågår nedbrytningsreaktioner i vilka vatten medverkar. Åtminstone teoretiskt kan det leda till att vattnet blir utarmat på  $^{18}\text{O}$ , dvs får en mera meteorisk karaktär. När det gäller väteisotopuppsättningarna följer dessa delvis andra mönster. Väte förekommer i berget i de mineral som innehåller en OH grupp (amfibol, glimmer etc). Det tunga vätet föredrar vatten framför att bindas i denna OH grupp, vilket får till följd att vattnet anrikas på deuterium vid vittring eller andra processer där bergartmineral hydratiseras.

En tolkning av syre- och väteisotoperna i vatten kan ge mycket information. För att få ut relevant kunskap måste man emellertid göra omfattande undersökningar där man även beaktar bergarternas och sprickmineraliseringarnas grunduppsättning av isotoper. Även klorisotoperna kan ge värdefull information. Det fodras emellertid mycket stora provmängder av berg att få fram tillräckligt med klorider, vilket gör en analys svår och dyr.

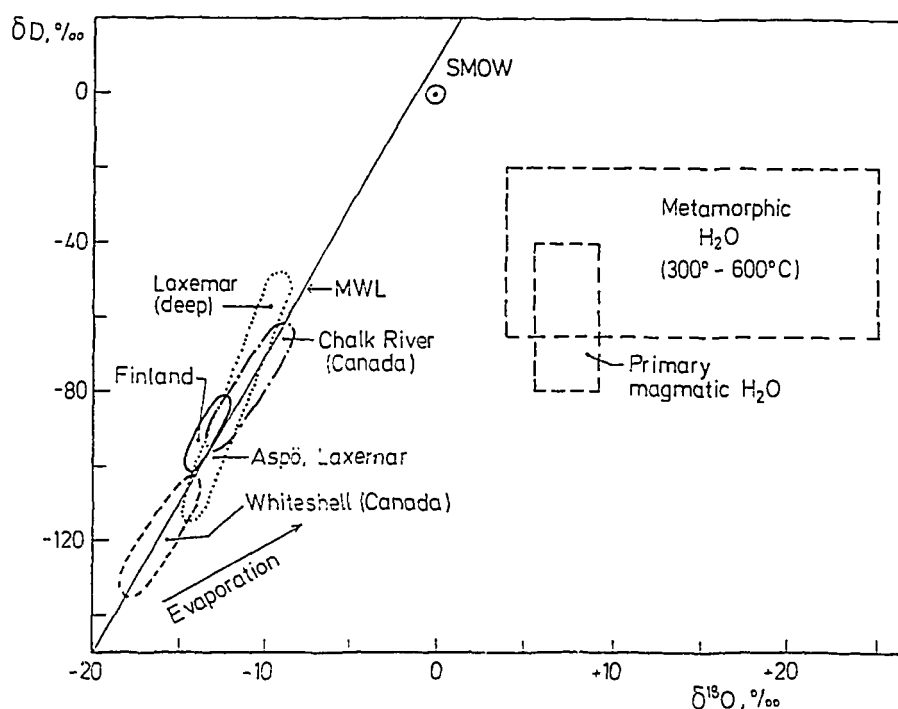


FIG 2. Isopdata för djupvatten från olika djupborrningar. SMOW markerar sammansättningen för oceaniskt havsvatten. Rutorna som markerar sammansättningen för magmatiskt och metamorft vatten är från Taylor 1979. Data är från samma artiklar som de angivna i tabell 1.

En nyligen publicerad (Elsevier) studie av hur man tolkar isotopdata finns i "Applied isotope hydrogeology - A case studie in northern Switzerland"

#### Ålderdateringar av grundvatten.

Det finns flera radioisotoper som ger kvantitativ och kvalitativ information om blandning och uppehållstid för vatten i berg. De kortlivade isotoperna  $^3\text{H}$  (halveringstid 12,3 år) och  $^{85}\text{Kr}$  (halveringstid = 10,8 år) indikerar om vattnet är ungt. Åldern på det något äldre vattnet ges av  $^{14}\text{C}$  (halveringstid = 5730 år). Tolkningen av resultaten försvaras av kolutbyte med karbonater. Även  $^{39}\text{Ar}$  (halveringstid = 269 år) och  $^{36}\text{Cl}$  (halveringstid = 300000 år) och de stabila heliumisotoperna kan användas för åldersdatering. Tolkningarna blir emellertid beroende på vissa osäkra antaganden. Data från argon och helium kan emellertid ge värdefull kompletterande information.

En genomgång av olika metoder att tolka isotopdata från gammalt djupvatten finns i volym 6 nr 4 av "Applied Geochemistry", "Dating very old groundwater, Milk River Aquifer, Alberta Canada" där ett antal författare går igenom olika metoder för att tolka isotopdata.

## **4 Geokemiska mätresultat samt tolkning av grundvattendata**

### Kemin hos vattnet i borrhålen under Äspö.

Den information som finns om grundvattnet under Äspö kommer huvudsakligen från brunnar och från provtagning i djupa borrhål. Resultatet tyder på en systematisk variation och eller skiktning (Laaksoharju & Nilsson 1989, Laaksoharju 1990, Nilsson 1989) där de översta 100 metrarna utmärks av meteoriskt vatten. Därunder blir vattnet något kloridhaltigt (Na-HCO<sub>3</sub>-Cl-typ) Ytterligare mot djupet ökar kloridhalten och den relativa halten Ca, (Na-Ca-Cl-typ). Vid större djup än 500 meter blir vattnet ibland mycket salt och mängden Ca stiger relativt Na (Ca-Na-Cl-typ). Med ytterligare ökande djup blir vattnet alltmer alkalint och reducerande. En liknande zonerings återfinns även vid Finnsjön. Det mest karaktäristiska är den successivt mot djupet ökande salthalten (klorider). På de djupaste ställena är vattnet nästan lika salt som oceaniskt havsvatten. Nya undersökningar från djupare nivåer under 1000 meter (Laaksoharju et al 1995) har visat på saltvatten (Ca-Na-Cl typ) med kloridhalter på upp till 46 000 mg Cl per liter.

Analys av de radioaktiva isotoperna tritium och C-14 indikerar att grundvattnet i de översta skikten vid Äspö är relativt ungt. Vattnet på djup från 200 till 400 meter är över 10 000 år

gammalt enligt C-14 metoden (Nilsson 1989). Dessa slutsatser är emellertid mycket osäkra. På större djup finns inga data då halterna av de relevanta isotoperna ligger under detekteringsgränserna. Tritiumvärdena för vattnet under 200 meters djup är mycket låga och indikerar därför endast att inget färskvatten tillförs. För det djupa grundvattnet finns inga objektiva åldersdata utom att det är mer än 10 000 år gammalt.

Vid en första jämförelse indikerar väte och syreuppsättningarna att det är meteoriskt ytvatten (se Fig. 2). Mot djupet ökar den relativa mängden tunga isotoper något, men värdena indikerar ändå klart meteoriskt vatten för även det djupast belägna salta vattnet. På större djup vid Laxemar (Laaksoharju et al 1995) ökar mängden tunga isotoper i grundvattnet ytterligare men det har fortfarande meteorisk karaktär trots att salthalten är distinkt högre än den hos havsvatten.

Även sprickmineralens isotopuppsättningar har undersökts (speciellt svavelisotoperna; Wallin preliminär SKB-rapport 1990). De ger emellertid inga klara indikationer om vattnets genes. I ett senare arbete (Wallin 1995) argumenteras för ett marint ursprung på vattnet. Svavelisotoperna i de djupa grundvattnet vid Laxemar indikerar ett sedimentärt ursprung för svavlet (Wallin 1995).

De data som finns från Finnsjön liknar dem från Äspö. Även här blir vattnet salt mot djupet.

### Internationella jämförelser.

Grundvattenkemin visar stora variationer beroende på vilken typ av berg vattnet härstammar ifrån och befinner sig i. Vattnet i de sedimentära bergarterna varierar mycket kraftigt både med avseende på typ av avsättningsmiljö och typ av sediment. Signifikativt är emellertid att vattnet på större djup alltid är salt (Hanor 1979). I tabell 1 finns en sammanställning av djupvattendata.

#### *England*

I Cornwall, England (Edmunds et. al 1984) fann man på 800 meters djup vatten med en salthalt av upp till 30 gram per liter. Vattnet har en isotopuppsättning som svarar mot den för meteoriskt vatten. Borrhålen ligger i sedimentära bergarter som intruderats av granitiska plutoner. Den geotermala gradienten är hög. Den höga kloridhalten har tolkats som ett resultat av hydrotermal konvektion samt med denna sammanhängande lakning från mineral och omvandling av glimmer. Tolkningar av isotopdata ( $^4\text{He}$  och  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) indikerar en ålder på ca en miljon år.



### *Kanada*

De borrhningar som "Atomic Energy of Canada Limited" (AECL) har gjort i Kanada, i liknande berggrund som den i Sverige, (Gascoyne et al 1987, 1989 m. fl.) visar liknande data som dem SKB tagit fram. Kloridhalten ökar mot djupet. Liksom i Sverige börjar kloridhalten stiga kraftigt vid 500 meters djup. De områden som undersöks har inte haft tillgång till havsvatten under istiderna. I vissa djupa gruvor är salthalten extremt hög. Liksom under Äspö är det djupa vattnet ofta men inte alltid rikt på Ca. Även syre och väteisotopuppsättningarna indikerar såsom under Äspö eller vid Finnsjön meteoriskt vatten (se Fig 2, tabell 1). Djupvattnet från grönstensmassiv (East Bull Lake, Bottomley et al 1989) har liknande sammansättning som det från granitoidiskt berg. Det är dock något mera alkalint. Djupvattnet antas vara mycket gammalt. Både salthalten och isotopuppsättningarna har tolkats som en konsekvens av infiltration från avlägsna sedimentära bergarter.

### *Finland*

Nurmi et al 1988, har undersökt grundvattnet i både borrhål, djupa gruvor och prospekteringsborrhål. Berggrunden är liknande den i mellersta Sverige (Svekofenniska Urbergsskölden). Analysvärdena på vattnet visar att det blir allt saltare mot djupet. Väte och syreisotopdata visar liksom vid Äspö på meteoriskt ursprung. Det är salt även i de områden som legat över havsnivån i slutet av istiden. Det är signifikant att djupvattnet från gruvområdena innehåller mer Mg. Detta beror antagligen på att bergarterna i sig är mycket rika på Mg (ultrabasitler och dolomiter).

### *Ryssland*

Det för närvarande djupaste borrhålet i världen finns på Kolahalvön. Det är borrarat i kristallinsk berggrund något äldre men liknande den i Sverige (se Gaál & Gorbatshev 1987). Under 1991 nådde man ner till 12066 meters djup. Svetlana Bogdanova, tidigare anställd vid ryska vetenskapsakademien i Moskva men nu verksam vid Universitetet i Lund, har sammanställt material från de ryska undersökningarna och resultatet (inklusive referenslista) återfinns i bilaga 1.

All de data som har kommit fram från olika borrhningar Ryssland tyder på att vattnet blir allt saltare ner mot djupet. Det är betydligt saltare än havsvatten. Mot stora djup förskjuts väte- och syreisotopuppsättningarna på Kolahalvön till följd av vatten-mineral utbyte. Vid 4 till 5 kilometers djup börjar temperaturen i berget bli så hög att det sker metamorfa omvandlingar som både åstadkommer volymsförändringar och reglerar vattenkemin.

	Äspö <sup>1</sup> KAS02	Laxemar <sup>2</sup> KLX02	Laxemar <sup>2</sup> KLX02	Outokumpu <sup>3</sup>	Kerimäki <sup>3</sup>	Limina <sup>3</sup>	Atikokan <sup>4</sup> ATK5	Manitoba <sup>4</sup> WN-4	Cornwall <sup>5</sup>	Seawater (oceanic)
m	860-924	1090-1096	1420-1705	1070	700	720	1050	800	690	
Ca	3830	5620	18600	5700	360	5500	7460	2470	2470	400
Mg	30	2	2,7	1100	26	760	1,4	73	73	1272
Sr	-	95	340	43	12	110	205	40	40	13
Na	3000	3800	8030	3200	1600	8200	779	4300	4300	10561
K	10,9	10,4	29	32	15	51	8,5	180	180	380
F <sub>ctot</sub>	0,05	0,002	0,43	<0,05	<0,05	42	-	-		
SO <sub>4</sub>	520	1010	832	2,0	<1,0	4100	186	1210	145	
Cl	11100	15800	45500	16800	3200	22100	12200	9570	11500	18980
F	1,7	1,4	1,6	<0,1	0,45	-	2,3	<0,2	2,7	1,4
Br	74	130	312	140	32	-	119	23	43	380
HCO <sub>3</sub>	11,0	8,5	9,0	34	7,3	98	21	42	68	
pH	8,5	8,0	7,9	8,5	8,67	7,05	5,5	6,5	6,5	7,9
Eh	-	-170	-300	-295	-94	-210	-	-		
δ <sup>18</sup> O	-13,1	11,7	-8,9	-13,7	-12,08	-5,2	0			
δ <sup>2</sup> H	-96,8	78,6	-47,4	-95,4	-81,0	-29	0			

Tabell 1. Grundvattensammansättning i olika djupa borrhål. Data från (1) Nilsson 1989, (2) Laaksoharju et al 1995, (3) Nurmit et al 1989, (4) Gascoyne et al 1987, (5) Edmunds et al 1984.

Borrhålen ligger i olika bergartstyper vilket förklarar skillnaderna. Outokumpo och Kerimäki hålen ligger i Finland. Liksom Äspö och Laxemar ligger de i högmetamorfa förgnejsade Svecofenniska bergarter (1700 - 1900 millioner år). Skillnaden är att de finska hålen ligger i sulfidmalmsområden och berget är mera basiskt med inslag av grafit, och omvandlingsbergarter som serpentin och skarn. Liminahålet ligger i en lågmetamorf jotnisk (ca 1200 millioner år) sedimentär lerig sandsten. Atikokan och Manitoba ligger båda i ca 2500 millioner år gamla förgnejsade granitoidiska plutoner i den kanadensiska urbergsskölden. Berggrunden är jämförbar med den vid Äspö/Laxemar. Hålet i Cornwall är borrarat i en hydrotermalt omvandlad granit som intruderade för ca 270 millioner år sedan.

### *Sverige.*

De olika mätvärdena tyder på att salthalten höjs alltmer mot djupet (se diskussioner ovan beträffande vattnet under Äspö). Att det även i Sverige handlar om höga salthalter på stora djup indikeras av att salthalten i borrhålet vid Gravberg i Dalarna på 4,5 kilometers djup håller 15 vikt% salt, dvs vattnet har en cirka fem gånger så hög salthalt som havsvatten.

## **5 Diskussion och slutsatser**

### Äspö/Laxemar

Vattnet i borrhålen under Äspö ändrar successivt sammansättning mot ökat djup. Överst består det av typiskt meteoriskt vatten som modifierats något genom penetrationen och kemiska reaktioner med morän och i sprickor.

Även vattnet i zonen under (Na-HCO<sub>3</sub>-Cl-typ) har en karaktär som liknar meteoriskt vatten. En infiltration av ytvatten till ca 500 meters djup indikeras av isotopdata. Enligt C-14 metoden skulle vattnet vara mellan 10 000 och något över 20 000 år gammalt (Data från Nilsson 1989). Isotoptolkningarna är emellertid osäkra på grund av isotoputbyte med framför allt kalcit i sprickor. Därunder (Ca-Na-Cl-typ) ger de radiaktiva isotoperna inga indikationer på åldern utom att det är så gammalt att det inte går att detektera radioaktivt kol (C-14).

Kemin hos djupvattnet under Äspö ger mer säkra indikationer på genesen. Salthalten i sig indikerar att det kan vara fråga om inflöde av havsvatten. De senare vattnanalyserna från större djup indikerar dock att det inte kan vara fråga om normalt havsvatten då salthalten är alldeles för hög. I SKB FoU-program 89 görs ett antagande om att det salta vattnet från Äspö härrör från penetration av havsvatten under slutet av den sista istiden då Östersjön stod i förbindelse med Nordsjön och därmed hade salt havsvatten (Yoldiahavet). Även när det gäller Finnsjön gör man detta antagande (Ahlbom 1991) om havsvattenpenetration. Detta motsägs emellertid av isotopdata som indikerar meteoriskt vatten. Halterna av och kvoterna mellan olika katjoner är också olika dem i havsvatten. Exempelvis är Ca-halten betydligt högre i det djupa grundvattnet än i havsvatten. Halterna av SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> och Mg<sup>2+</sup> är också betydligt lägre än för havsvatten. Halterna av och relationerna mellan de olika katjonerna kan dock tänkas förklaras av utfällning-upplösning av sprickmineral och interaktion med bergartsmineralen. Magnesium binds preferentiellt upp i leror och sulfaten fälls ut eller reduceras till sulfid som i sin tur fälls ut som pyrit. Kalium binds upp av fältspater och glimrar. Natrium/calcium förhållandena regleras av jonbyten i fältspater om reaktionerna får tillräckligt lång tid på sig. Redoxpotentialen och pH-värdet regleras av oxidering av järn och mineralnedbrytning. Vattnet har den sammansättning man kan förvänta sig efter långvarig kontakt med granitoidiskt berg. Det som är svårt att

förklara utifrån en modell med inträngande havsvatten är det av isotoperna indikerade meteoriska ursprunget hos vattnet.

### Hypoteser.

Salthalter och isotopdata är till synes motsägelsefyllda. Det är viktigt att notera att djupvattnet både i Finland och Kanada är salt, trots att det inte kan ha fått tillgång till havsvatten under istiden. Förhållandena både när det gäller berggrunden och klimatet är likartade. I båda länderna antar man ett annat ursprung än havsvatten. Både i Dalarna och i Ryssland, på riktigt stora djup, är vattnet mycket salthaltigt. I dessa undersökningar (bilaga 1) antas att vattnet är gravimetriskt anlagt, dvs nerträngt ytvatten. Både isotopförhållandena och salthalterna antas vara en funktion av kemiska processer i berget. De är delvis en funktion av vilken vattenmiljö bergarterna avsattes i. Detta motsäger också hypotesen om havsvattenpenetration under istiden. Den information som finns i litteraturen tyder på att vattnet i berg generellt blir alltmer anrikat på salt mot djupet.

För att förstå orsaken till de höga salthalterna måste man se på helhetsbilden och alla de processer som sker och har skett i berggrunden sedan den bildades. Klor har på grund av sin preferens för jonbindning inget naturligt mineral utom alkali-klorider att bindas i. De vanliga aluminiumsilikaten kan endast binda upp små mängder klorid och då som substitution på OH<sup>-</sup> positionen i vissa mineral. Under bildningen av både de magmatiska och metamorfa mineralen binds emellertid vatten upp i kristallerna i form av sk "fluid inclusions". Innehållet i dessa kan analyseras med speciella tekniker (Mullis 1987). De innehåller i allmänhet saltlösningar och saltkristaller vilket visar att vattenlösningarna som fanns på djupet när det fångades in av kristallerna var salt. Det är också möjligt att vattnet är kontaminerat av evaporiter (bergsalt).

Om inte ytvatten penetrerar berget kommer vattnet att förbli salt. Det salta vattnet måste tryckas bort med någon form av tvång då det har högre densitet. De ryska undersökningarna visar att detta är möjligt och att meteoriskt vatten kan röra sig i sprickzoner i berget på mycket stora djup. Vad som skulle behövas för att få fram sambanden bättre är isotopdata från riktigt salt vatten på stora djup. Några sådana data har litteraturgenomgången inte gett. De ryska undersökningarna indikerar emellertid en interaktion mellan mineral och vatten (se bilaga 1). Det meteoriska isotopförhållandena kan vara ett resultat av mineraljämvikt och tillfälligheter, men detta är osannolikt då både väte- och syreisotoperna visar på ett meteoriskt ursprung. Antagligen har vid något tillfälle meteoriskt vatten penetrerat berget vid Äspö.

Det har även hävdats att saltanrikningen skulle kunna vara ett resultat av någon typ av destillation. En sådan process skulle emellertid medföra att tunga väte och syreisotoper anrikades vilket inte är fallet. En annan möjlighet är utfrysning till följd av permafrost. Detta skulle kunna höja salthalten mot djupet. Vilken konsekvens utfrysningen har på isotoperna är inte känt, men det skulle enkelt kunna undersökas.

Vad beträffar förekomsten av det djupa saltvattnet i den granitoidiska Lac du Bonnet batoliten antar Gascogne et al. (1989) att salt vatten från de närliggande sedimentära bergarterna under har infiltrerat graniten. Detta skulle kunna förklara situationen vid Äspö som ligger i nära anslutning till de sedimentära bergarterna på Öland. Det skulle emellertid inte kunna förklara situationen vid Finnsjön eller den under Gravberg i Dalarna om man inte antar att det skedde för många miljoner år sedan när dessa platser var täckta av sedimentära bergarter eller hade sådana i sin närhet. I sedimentära bergarter finns ibland saltlager och upplösningen av dessa med meteoriskt vatten skulle kunna ge den sammansättning som finns under Äspö.

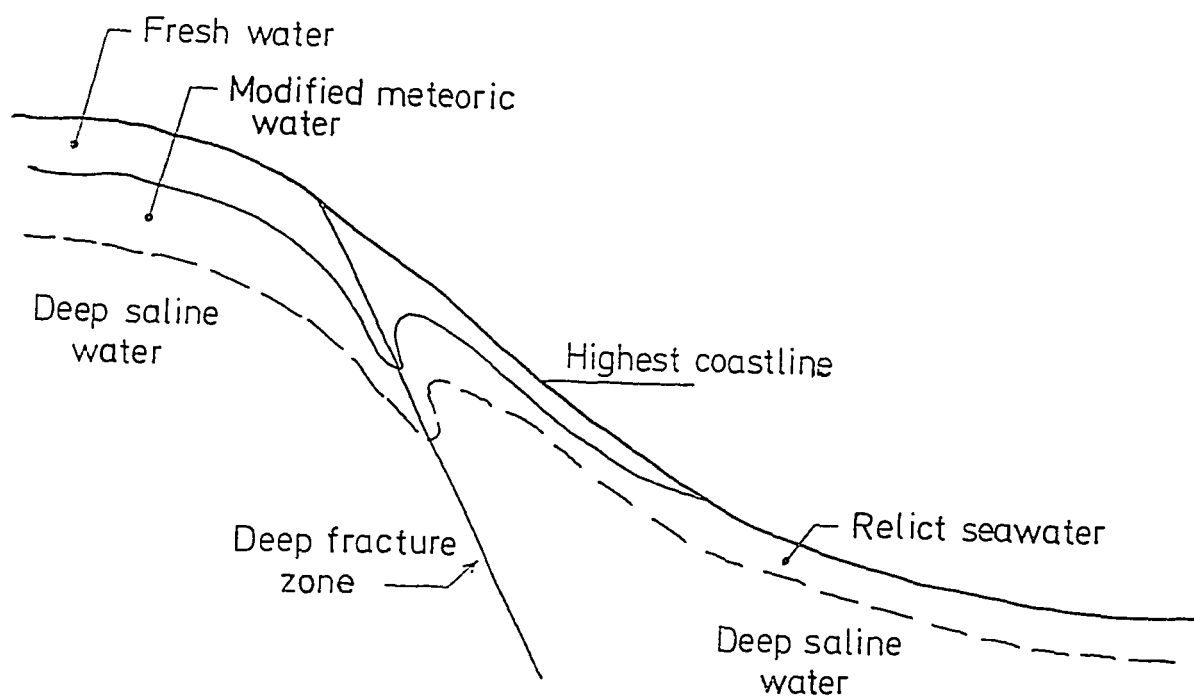


FIG 3. Modell över grundvattenzoneringen under den Baltiska skölden från inlandet mot Östersjön. Koncept efter Nurmi et al 1988.

Det återstår många frågor att lösa innan orsakerna till grundvattnets saltomsättning kan förklaras. En intressant väg vore att närmare undersöka förhållandena mellan de olika klorisotoperna. Det skulle även behövas en isotopundersökning av sprick- och bergartsmineralen så att isotopjämvikterna kan beräknas.

Det mesta tyder emellertid på att djupvattnet är mycket gammalt och att det inte har sitt ursprung i havsvatten. Salthalterna och isotopförhållandena beror sannolikt på någon typ av interaktion mellan meteoriskt vatten och berg eller mellan meteoriskt vatten och saltvatten från större djup. Saltet kan komma från "fluid inclusions" (se ovan) eller från de små mängder som alltid finns i berg (Gascogne et al. 1989). De (Gascogne et al. 1989) kan också verifiera en sänkning av kloridhalten i graniten ut mot befintliga sprickor.

Fig 3 visar en schematiskt framställd tolkning av vattenrörelser och zoner ut mot Östersjön.

#### Tänkbara konsekvenser för slutförvaring enligt KBS-3.

På ungefär 500 djup både under Äspö och vid Finnsjön börjar vattnet bli salt och rikare på Ca. Det är det djup som det använda kärnbränslet skall förvaras på. Om vattnet på detta djup och därunder är mycket gammalt, äldre än istiderna, kan detta underlätta säkerhets- och scenarieanalysen. Det är emellertid tänkbart att det tryck som istäcket åstadkommer ändrar läget på djupvattenytan och gör att förvaret kommer att omges av mycket salt vatten.

Om utbyte inte skett mellan djupvatten och meteoriskt vatten under tidigare istider så kan man förvänta sig att detta inte heller kommer att ske under en kommande istid. Dessutom är antagligen utbytet med ovanliggande vatten och biosfären mycket litet, vilket är positivt ur säkerhetssynpunkt. Om antagandet om mycket gammalt vatten är korrekt skulle en deponi på ännu större djup kunna vara en fördel ur kemisyndpunkt. Man måste emellertid beakta vilka konsekvenser mycket hög salthalt har på bentonitens och kopparens stabilitet.

Efter det att deponin är fylld kommer vattenivån att återställas med vatten från sidorna och nerifrån. Man skulle då i säkerhetsanalysen kunna utgå från den kemi vattnet har idag. Man behöver emellertid närmare analysera om bentoniten är tillräckligt stabil i kontakt med saltvatten, så att det exempelvis inte sker några jonbyten som äventyrar denna stabilitet. Dessutom kan man behöva bättre analysera om förhöjda kloridjonhalter påverkar kopparkapslarnas stabilitet (Amcoff & Holényi 1992). Kloridjoner kan även bilda komplex som kan tänkas medverka vid elementtransport (Euster 1986) vilket bör undersökas närmare.

Om djupvattnet fått sin sammansättning till följd av nedträngande havsvatten är det viktigt att kunna beräkna flödes hastigheten samt uppskatta reaktiviteten/bufferförmågan hos inte bara sprickmineralen utan även bergarterna. Havsvatten är oxiderande och kan vid omvandling ge upphov till oönskade reaktioner. I formationer med stora vattenflöden kan redoxfronten tänkas komma ner till nivåer som är desamma eller djupare än den som förutses för ett slutförvar. En viktig aspekt är mängden av sulfidmineral, eftersom dessa kan oxideras av havsvatten och därmed ge upphov till en kraftig sänkning av pH-värdet. Möjligheten av detta scenarium kan undersökas genom analys av gamla fyllda sprickor. Exempelvis är det möjligt att rödfärgningen av berget vid sprickorna under Äspö beror på oxidation.

## 6 Referenser

Ahlbom, K., 1991, The groundwater circulation in the Finnsjön area- The impact of density gradients, SKB TR 91-57.

Amcoff, Ö. & Holényi, K., 1992. Stability of metallic copper in the near surface environment. SKN report 57.

Andersson, J., 1989 (editor), The joint SKI/SKB Scenario Development Projekt, SKI. T. R., 89:14

Applied isotope hydrogeology-a case study in northern Switzerland. Studies in environmental science 43. Elsevier, 1991.

Bischoff, J., L. & Seyfried, W., E. 1978, Hydrothermal chemistry of seawater from 25 WC to 350 WC. American Journal of Science., 278.

Blomberg, R.G. Deep groundwaters in the crystalline basement of Finland, with implications for nuclear waste disposal studies., 1990, Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar , Vol. 112, del 4 sid 369-374.

Bottomley, D. J., Gascoyne, M. & Kamineni, D. C., 1990, Geochemica et Cosmochimica Acta Vol 54, sid 933-1008

Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters: Science v. 133, sid 1702-1703.

Edmunds, W. M., Andrews, J. N., Burgess, W. G., & Kay R. L. F. 1984, The evolution of saline and thermal groundwaters in the carmenellis granite., *Min. Mag.* vol 48, p 407-424.

Euster, H., P. (1986) Minerals in hot water., *The American mineralogist* vol 71, nr 5&6.

Fritz, B., Madé, B., & Tardy, Y., 1988., Geochemical modelling of the evolution of a granite-concrete-water system around a repository for spent nuclear fuel. SKB TR 88-18

Gaál, G. & Gorbatshev, R., 1987, An outline of the precambrian evolution of the Baltic Shield, *Precambrian Research*, 35, 15-52.

Gascogne, M., Davidson, C.C., Ross, J.D., & Pearson, 1987, Saline goundwaters and brines in plutons in the Canadian Shield. *Geological Association of Canada Special Paper 33*. sid. 53-68

Gascoyne, M., Ross, J.D., Purdy, A.,Frape, S.K.,Drimmie, R.J.,Fritz, P. & Betcher, R.N. Evidence for penetration of sedimentary basin brains into an Archean granite of the Canadian Shield, *Water-Rock Interactions*, 1989, Miles(ed), Balkema, Rotterdam.sid 243-245.

Gascoyne, M., Ross, J. D., Watson, R.L. & Kamineni, D.C., 1989, Soluble salts in a Canadian granite as contributors to groundwater salinity. *Water-Rock Interactions*, 1989, Miles(ed), Balkema, Rotterdam.sid 247-249.

Gascoyne, M., Ross, J. D. & Watson, R.L. 1988, Geochemical and isotopic characterization of flow in fractured plutonic rocks: Examples from Canada., in *Proceedings Fourth Canadian/American Conference on Hydrogeology*, Alberta, Canada. Published by National Water Well Association, Dublin, Ohio, U.S.A.

Gize, A. P., 1992, A little rain must fall, *Nature* vol. 358, 371-372.

Hanor, J.S., 1985, The sedimentary genesis of hydrothermal fluids, in *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (ed. Barnes), John Wiley & sons. sid 137-168



- Hajash, A. & Chandler, 1981, An experimental investigation of high-temperature interaction between seawater and rhyolite, andesite, basalt and peridotite, *Contribution to mineralogy and petrology*, 78, 240-254.
- Hermansson, H-P., Åkerblom, G., Chyssler, J., & Lindén, A., 1991, Geogas-a Carrier or tracer? SKN report 51.
- Johansson, Å. & Larsen, O., 1989, Radiometric age determinations of precambrian geochronology of Blekinge, southern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, Vol. 111, del 41 sid 35-50
- Kozlovsky, Ye., A., (Editor), *The superdeep Well of the Kola Peninsula*. Springer-Verlag 1985.
- Laaksoharju, M., & Nilsson, A-Ch., 1989, Models of groundwater composition and hydraulic conditions based on chemometrical and chemical analyses of deep groundwater at Äspö and Laxemar. SKB. PR 25-89-04
- Laaksoharju M., 1990, Measured and predicted groundwater chemistry at Äspö., SKB. PR 25-90-13
- Laaksoharju, M., Smellie, J., Nilsson, A-Ch. & Skårman, Ch, 1995, Groundwater sampling and chemical characterization of the Laxemar deep borehole KLX02, SKB, TR, 95-05.
- Lagerblad, B., & Gorbatshev, R. 1985, Hydrothermal alteration as a control of regional geochemistry and ore formation in the central baltic Shield, *Geologische Rundschau* vol 74 nr 1.
- Lanev, V. S., Zhatnuev, N. S. 1987. *The Kola Superdeep*. Murmansk Publish. House, 128 sid. (på ryska)
- Mullis, j., 1987, Fluid inclusion studies during very low grade metamorphism. In *low temperature metamorphism* (ed. Frey), Blackie & Son Ltd, Glasgow.
- Nilsson, A-Ch., 1989, Chemical characterization of deep groundwater on Äspö., SKB. PR 25-89-14
- 222

Nurmi, P., A., Kukkonen, I., T., & Lahermo, P., W., 1988, Geochemistry and origin of saline groundwaters, Fennoscandian Shield., Applied Geochemistry, vol 3 nr 2.

Pirhonen, V. & Pitkänen, P., 1991, Redox capacity of crystalline rocks. Laboratory studies under 100 bar oxygen gas pressure. SKB TR 91-55.

Slunga, R., 1990, Swedish earthquakes and fault movements, Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar , Vol. 112, del 4 sid 326.

Taylor, H., P., 1979, Oxygen and Hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. in Geochemistry of hydrothermal ore deposits (ed. Barnes), John Wiley & sons. sid 237-277

Wallin, B., 1990, Carbon, oxygen and sulfur isotope signatures for groundwater classification at Laxemar, southeastern Sweden. Preliminär rapport SKB.

Wallin, B., 1995, Paleohydrological implications in the Baltic area and its relation to the groundwater at Äspö, south-eastern Sweden-A literature study. SKB, TR, 95-06.

Winkler, G., F., 1974, Petrogenesis of metamorphic rocks, Springer-Verlag, 320 sid.

Stockholm december 1992, kompletterad med nya data oktober 1995

Cement och Betong Institutet

Björn Lagerblad

## **Problems of Origin and Composition of Deep-Seated Water and Brines in Crystalline Rocks : A Review of Russian Publications**

Beginning from the nineteen-seventies, the problem of deep-seated water and brines (DWB) in crystalline rocks has come to be discussed particularly intensively in Russian literature. The reason was the All-Union Program of Superdeep Drillings in the USSR (Kozlovskiy, 1982). Important new data were obtained from the Kola Superdeep Drilling in the Pechenga region on the Kola Peninsula and by intensified hydrogeological investigations in this region and in Karelia (Korotkov et al., 1978; Bezrodnov, 1979, Borevskiy et al., 1985, etc.). During that time, also two boreholes in the Russian Platform penetrated the crystalline basement for distances of 2 and 3 km respectively (Studies..., 1976). Some materials regarding the DWB:s problem were also collected from work in the mines of the Ukrainian Shield and the Voronezh Massif (Gavrilenko and Derpgol'ts, 1971).

All the data indicate that freely mobile (gravitational) water and brines are present in the crystalline rocks of Precambrian shields down to depths of at least 12 km. The unusually high salinity in the DWB:s, reaching c.300 g/l, and the chemical features of the DWB:s have put forward genetic problems. It has become clear that the previously advanced explanations of the existence and nature of DWB:s in Precambrian shields are invalid. These explanations included among other things hypotheses of the burial of meteoric and sea-water in fractures during Quaternary transgressions, infiltration or leakage of water from Paleozoic sedimentary basins, etc.

Apart from this, some of the geophysical results derived from seismic and electromagnetic surveys (Vp high-gradient subhorizontal boundaries and highly conductive layers) required new geological interpretations. The reason was that the findings regarding the crust penetrated by the Kola Superdeep Drilling differed very much from expectations and previously made geological-geophysical predictions.

In some Russian oil and gas prospecting surveys which are intended to find oil-gas traps in the crystalline basement and not only in the overlying

sediments, the DWB:s problem is in the focus of attention ( Studies..., 1976; Bogomolov et al., 1978).

This problem is also of great interest in connection with the evaluation of the possibilities to store nuclear waste in the crystalline basement, especially that of Precambrian shields ( Borevskiy, personal commun.). The DWB:s problem is being discussed by Russian hydrogeologists and geochemists from several points of view, using the experience gained by observations of natural hydrogeological systems in the crust and also employing experimental work, particularly in regard of the aspect of "water-rock" interaction.

### A. Occurrence of the DWB:s in crystalline rocks

The most complete information based on geophysical data is in the publications on the Kola Superdeep borehole (Bezrodnov, 1979; Kozlovskiy, 1984; Borevskiy et al., 1984, Borevskiy and Kremenetskiy , 1985; Kremenetskiy and Borevskiy , 1986; Kremenetskiy and Ovchinnikov, 1986; Lanev and Laneva, 1987, etc.).

The main observations are as follows:

Gravitational water and brines exist along the whole Kola Superdeep section to depths of about 12 km in the Archaean and Early Proterozoic crystalline rocks, but their occurrence mode varies as described in the following,

- An uppermost zone of subsurface water goes down to maximum depths of 2000 m, but on the average the lower limit of this water zone is at a depth of 800 m. The fractures housing this water are believed to be caused by the post-glacial uplift of the Baltic Shield. Apart of the Kola Superdeep, similar zones of subsurface water have also been traced in neighboring satellite boreholes in the Pechenga region ( Bezrodnov, 1979; Borevskiy et al., 1984),
- At depths below the uppermost zone of subsurface water, the rocks are rather inhomogeneous in the Kola Superdeep Borehole. Here we find zones of varying rock density, porosity, permeability and fracturing which follow each other. This is natural in a rock sequence made up of various sediments intercalated with mafic metavolcanics. Highly fractured rock zones have a very irregular distribution. Down to depths of about 4.5 km such zones have thicknesses between ca. 30 and 80 m each. They occur in groups with cumulate thicknesses of 500 to 800 m. The intervals between such groups vary from 500 to 1500 m. Such fractured zones are explained to represent faults reaching the surface of the Earth (Bezrodnov, 1979). The DWB:s move upwards within these fractured zones which are accompanied by thermal,

hydrochemical and gas- content (H, CH<sub>4</sub>, He) anomalies. Outside of these fractured zones, the Pechenga greenschist-facies low-grade metamorphic rocks are impermeable to water,

- The 4.5- km boundary is clearly a geophysical one and coincides with the greenschist- amphibolite facies boundary within the metasedimentary-metavolcanic rock pile. The occurrence mode of DWB changes substantially below this boundary. The frequency of fractures within the crystalline rocks increases sharply. This phenomenon is considered to have been caused by dehydration during the prograde metamorphism of the Pechenga volcanics (Borevskiy and Kremenetskiy, 1985). Dehydration results in higher fluid pressures and ruptures the rocks on the micro- and macroscales. As a result of dehydration, the mineral density of the rocks increases, of course. However, this is more than outweighed by the increasing frequency of fractures and the net result is creation of a ca. 4 km thick zone of decreased overall crustal density,

- Below depths of 9 km, the fractured zones become much thinner. Thicknesses of 10-20 m are characteristic. The DWB:s occur as lense-shaped water bodies separated from each other, but still remain gravitational, that is capable of free gravity-controlled flow.

Here it is important to note that also the Minnibaev deep borehole in the Volga-Urals region, which was drilled into the basement for a distance of ca. 3 km also penetrated thick zones of fracturing in the crystalline rocks. These zones were similarly filled with gravitational brines and gases down to depths of c.4.5 km from the surface (Studies...., 1976; Anisimov et al., 1980).

From these data we can conclude that the fracturing of the crystalline rocks and the DWB contents are related to tectonics, especially to flat-lying thrusts and faults, and also to metamorphic history of the rocks. Russian literature stresses the great importance of volcanic rock layers and tectonic slices of impermeable crystalline rocks for the localization of DWB:s in the crust (Bogomolov et al., 1978; Borevskiy and Kremenetskiy, 1985; Kremenetskiy and Ovchinnikov, 1986). In consequence, the presence and distribution of DWB:s in crystalline rocks depend greatly on the geodynamics of the crust-forming processes and the subsequent uplift history.

Some additional data on the DWB:s derive from other superdeep drillings in Phanerozoic regions only, that is regions where no Precambrian crust has ever been present ( for instance, the Saatly Superdeep in Azerbaydzhan, Kremenetskiy et al., 1987).

## B. The chemical and isotopic composition of the DWB:s in crystalline rocks

All investigators of the DWB:s emphasize that their chemical compositions are unusual for subsurface waters. The DWB:s have high mineral contents up to 300g/l ( Korotkov et al., 1978; Bezrodnov, 1979; Anisimov et al., 1980; Bogomolov et al., 1978; Borevskiy et al., 1984, etc.). The DWB:s are chloride waters with variable contents of Na, K, Ca and Mg. What makes them different from other subsurface waters are their high concentrations of I and Br, elevated contents of Pb, F, B, Rb and Sr, and, occasionally, increased radioactivity. The pH of the DWB:s varies between 5.6 and 9.5. The DWB:s contain high contents of a number of gases such as H<sub>2</sub>, He, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>.

Variations in the chemical composition of the DWB:s are considered to be due to many factors. Among these are: (1) primary water composition, (2) host rock composition, (3) the presence of rocks with exotic compositions such as alkaline intrusions in the crust (Kraynov, 1967; Bezrodnov, 1979), (4) the type and facies of regional metamorphism and its development by stages (e.g. Borevskiy et al., 1984; Kremenetskiy and Ovchinnikov, 1986; Kremenetskiy et al., 1987), (5) the mixing of DWB:s of different origins and compositions in highly fractured zones of the crystalline rocks such as, for instance, faults (Bezrodnov, 1979), (6) thermal anomalies which result in the zoning of waters according to the thermophysical properties of dissolved salts (Letnikov et al., 1985).

A combination of the different controlling factors can produce regional variation of the DWB:s compositions. The example of the Kola Superdeep section and the adjoining Pechenga area clearly demonstrates the multiple changes of DWB behaviour downwards in the crust. There exist also differences of DWB compositions between Early Proterozoic volcanites and Archaean gneisses .

"Water-rock" interaction can be studied most exactly by experimental work. Here it has been noted that the "secondary", "rejuvenated" DWB:s are very corrosive and undergo changes by interaction with their host rocks. Experiments have recently been made on the interaction between aqueous solutions and gneiss, amphibolite, andesine, and microcline, respectively.

The experimental temperatures were 150 and 250° C (Rafal'skiy et al., 1986a, b, 1990 ; Rafal'skiy and Prisyagina, 1990). Agapova et al.(1990) have demonstrated experimentally a great role of 200° C-hot alkaline sulfide-carbonate solutions in the leaching of U, Mo, Pb, Ti, K, and Si from granitoids.

The origin of the DWB:s and their interaction with host rocks have also investigated by isotopic methods. The results indicate that :

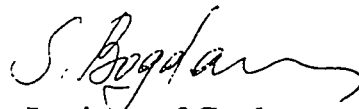
- there is a clear relationship between the metamorphic dehydration of sediments / metasediments and the isotopic composition of water (D and O<sup>18</sup>; Seletskiy and Polyakov, 1982),
- there is "radiolytic fractionating" of D and O<sup>18</sup> in water and fluid inclusions in minerals in areas of increased radioactivity (Vovk, 1982),
- the isotopic compositions of metamorphic rocks and hydrated minerals can be used to reconstruct the primary isotopic compositions of the DWB:s and their origin (Bugrov et al., 1975; Polyakov et al., 1982; Borevskiy et al., 1984; Borshchevskiy et al., 1986).

In the opinion of the named authors, the isotopic compositions of the DWB:s indicate that primary meteoric- and/or sea water could acquire new features under the influence of regional metamorphism . The conclusion is based on the study of some Archaean and Early Proterozoic ultramafic intrusions in Karelia and the Ukraine ( Bugrov et al., 1975; Polyakov et al., 1982) and on investigations of Archaean rocks from the Kola Superdeep( Borevskiy et al.,1984; Borshchevskiy et al., 1986).

In Russian literature the DWB:s have also been discussed in regard to their importance for ore-forming processes.

December 12, 1991

Dr. Sc. Svetlana Bogdanova



Institute of Geology  
Lund University

## REFERENCES

- Agapova, G.F., Modnikov, I.S., Shmariovich, Ye.M. and Konstantinov, A.K., 1990. Experimental hydrothermal leaching of uranium and associated elements from granitoids. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2, 78-84, (in Russian).
- Anisimov B.V., Doronkin, K.N., Plotnikov, N.A., Yudin B.M. and Amerkhanov, I.M., 1980. Results of hydrogeological studies. In: *Studies of the Precambrian at depth in the east of the Russian Platform*. Kazan', Tatar. Publish.House, 80-88. (in Russian).
- Bezrodnov, V.D. 1979. Chloride underground water in the Kola Peninsula. *Sovetskaya Geologiya*, 8, 67-75. (in Russian).
- Bogomolov, G.V., Atroshchenko, P.P., Bogomolov, Yu.G. and Tsalko, P.B., 1978. Nature of brines and gas and oil shows in blocks of crystalline rocks. *Doklady AN USSR*, 238, 5, 1192-1194. (in Russian).
- Borevskiy, L.V., Vartanyan, G.S. and Kulikov, T.V., 1984. A hydrogeological review. In: *The Kola Superdeep*. ed.: Kozlovsky, E.A., Nedra, Moscow, 240-254. (in Russian, the same book in English has been published in 1985).
- Borevskiy, L.V. and Kremenetskiy, A.A., 1985. Geological role of underground water for prograde metamorphism under conditions of open and closed systems. In: *Subsurface waters and the lithosphere evolution*. Contribs.to the All-Union conference, Nauka, Moscow, v.II, 8-13. (in Russian).
- Borshchevskiy, Yu.A., Nalivkina, E.B., Borisova, S.D., Medvedovskaya, N.I., Amosova, Kh.B., Bel'kov, E.I., Khrapovskaya, L.V. and Zakharchenko, O.V., 1986. Oxygen isotopic composition in the rocks of the Kola Superdeep. *Abstr. XI All-Union Symp. on Isotopic Geochemistry*, Moscow, Vernadsky Inst., 34-36. (in Russian).
- Bugrov, N.M., Bogachev, A.I., Kalinin, Yu.K., Slyusarev, V.D. and Yakubovskiy A.V., 1975. Isotope distribution in the waters of the Precambrian rocks of Karelia. *Doklady AN USSR*, 220, 3, 686-689. (in Russian).
- Drobnokhod N.I. and Tolkach, V.S., 1991. Geological and petrological factors of high content of waters in the crystalline Precambrian rocks of the Ukrainian Shield. *Geologicheskii Zhurnal*, 1, 18-26. (in Russian).
- Korotkov, A.I., Greyser, E.L. and Savanin, V.S., 1978. Salt water and brines in the Baltic Shield. *Doklady AN USSR*, 238, 4, 951-954. (in Russian).
- Kozlovskiy, E.A., 1982. The complex program on the study of the deep crust. *Sovetskaya Geologiya*, 9, 3-12. (in Russian).
- Kozlovskiy, E.A. (ed.), 1984. *The Kola Superdeep. "Nedra"*, Moscow, 490 pp. (in



Russian, the same book in English has been published in 1985).

**Kraynov, S.P., 1967.** A unique content of fluorine in subsurface waters of the Lovozero intrusion and the influence of fluorine on silica migration. Doklady AN USSR, 174, 2, 455-458. (in Russian).

**Kremenetskiy , A.A. and Borevskiy , L.V., 1986.** The nature of deep heterogeneities of the East-European platform basement. J.Geodynamics, Spec. vol.27th IGC, 1021-1045.

**Kremenetskiy , A.A, and Ovchinnikov, L.V., 1986.** Geochemistry of deep-seated rocks. Nauka, Moscow, 262 pp. (in Russian).

**Kremenetskiy, A.A., Ovchinnikov, L.V. and Borevskiy, L.V., 1987.** Geological-geochemical criteria of deep prognosis in the study of superdeep boreholes. In: Methods and Practice of Deep Crust Studies. Materials of a Session of the State Scient.-Tehnik. Committee, Leningrad, 97-114. (in Russian).

**Lanev, V.S. and Laneva, M.I., 1987.** The Kola Superdeep. Murmansk Publish.House, 128 p. (in Russian).

**Letnikov, F.A., Zhatnuev, N.S. and Lashkevich, V.V.,1985.** The fluid regime of thermogradient systems. Nauka, Novosibirsk, 178 pp. (in Russian).

**Polyakov, V.A., Yakubovskiy, A.V. and Seletskiy, Yu.B., 1982.** Investigation of the H and O isotopes of OH-groups in chlorites and serpentines. Extend.Abst.IX All-Union Symp. on stable isotopes and geochemistry, Moscow, Vernadsky Inst., 217-218. (in Russian).

**Rafal'skiy , R.P., Prisyagina, N.I., Alekseev, V.A., Krigman, L.V., Fedorov, P.L., Medvedeva, L.S., Bryzgalin, O.V. and Yudin, E.I., 1986 a.** An experimental study of interaction between an amphibolite and aqueous solutions at 250°C. Geokhimiya, 11, 1570-1587. (in Russian).

**Rafal'skiy , R.P., Prisyagina, N.I. and Krigman , L.B., 1986 b.** An experimental study of the interaction between a gneiss and aqueous solutions at 250°C. Geokhimiya, 12, 1743-1754. (in Russian).

**Rafal'skiy, R.P., Prisyagina, N.I. and Kondrushin I.B. , 1990.** Reaction of microcline-perthite with aqueous solutions at 150 and 250° C. Geokhimiya, 2, 225-236. (in Russian).

**Rafal'skiy, R.P. and Prisyagina, N.I., 1990.** Reaction of andesine with hot aqueous solutions. Geokhimiya, 9, 1298-1307. (in Russian).

**Seletskiy, Yu.B. and Polyakov, V.A., 1982.** The importance of isotopic exchange and the dehydration of rocks for the isotope composition of deep-seated water. Extend. Abst. IX All-Union Symp. on stable isotopes and geochemistry, Moscow, Vernadsky Inst., 477-479 . (in Russian).

**Studies of the Archaean basement in the east of the Russian Platform in the**

**Minnibaev** deep borehole 20 000., 1976. A volume of papers, Kazan', Tatar. Publish. House, 80-88. (in Russian).

**Vovk, I.F., 1982.** Approaches and features of radiolytic fractioning of H and O isotopes in the waters of the crust. Extend. Abst. IX All-Union Symp. on stable isotopes and geochemistry, Moscow, Vernadsky Inst., 214-216 . (in Russian).

There exist translations of the journals "Geokhimiya" and "Doklady AN USSR" into English. They are named "Geochemistry International" and "Transactions of the USSR Academy of Sciences", respectively.



STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION  
Swedish Nuclear Power Inspectorate

**Postadress/Postal address**

SKI  
S-106 58 STOCKHOLM

**Telefon/Telephone**

Nat 08-698 84 00  
Int +46 8 698 84 00

**Telefax**

Nat 08-661 90 86  
Int +46 8 661 90 86

**Telex**

11961 SWEATOM S