

SR 97

Avfall, förvarsutformning och platser

Oktober 1999

Svensk Kärnbränslehantering AB
Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864
102 40 Stockholm
Tel 08-459 84 00
Fax 08-661 57 19



**Underlagsrapport
till SR 97**

SR 97

Avfall, förvarsutformning och platser

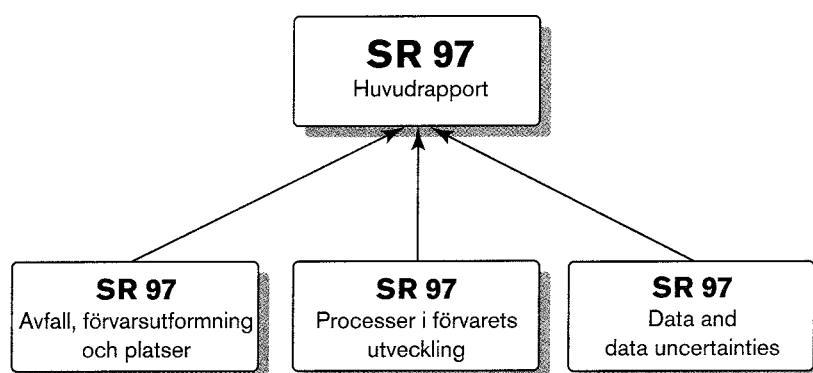
Svensk Kärnbränslehantering AB

Oktober 1999

Förord

Den föreliggande rapporten, SR 97 – Avfall, förvarsutformning och platser, utgör en huvudreferens till huvudrapporten: Djupförvar för använt kärnbränsle, SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Rapporten, nedan kallad SR 97, är en fullständig säkerhetsanalys av KBS-3-metoden för djupförvaring av använt kärnbränsle. En ytterligare förutsättning är att geosfärdata tas från tre verkliga platser i Sverige.

Figuren nedan visar sambandet mellan huvudrapporten och de viktigaste huvudreferenserna.



SR 97 – Huvudrapporten sammanfattar hela säkerhetsanalysen. Den kan läsas fristående från de övriga och innehåller alla väsentliga resultat. Rapporten finns även på engelska.

SR 97 – Avfall, förvarsutformning och platser beskriver avfallet, förvarsutformningen med kapslar och buffert/återfyllningsmaterial, de tre platserna och de platsspecifika anpassningar som gjorts av förvarens utformningar. Rapporten finns även på engelska.

SR 97 – Processer i förvarets utveckling beskriver de termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer i bränsle, kapsel, buffert och geosfär som styr utvecklingen i förvarssystemet. Rapporten finns även på engelska.

SR 97 – Data and Data Uncertainties (endast på engelska) innehåller en sammanställning av indata för beräkningar av radionuklidtransport. Här finns också en utvärdering av osäkerheter i indata.

Denna huvudreferens till SR 97 baseras på underlagsmaterial som har lämnats av Patrik Sellin, Anders Ström, Christer Svemar, Kaj Ahlbom och Bengt Leijon, Svensk Kärnbränslehantering AB, Jan Hermanson, Golder Grundteknik, samt Raymond Munier, Scandiaconsult. Materialet har redigerats av Karin Pers, Kemakta Konsult.

Innehåll

	Sida
1 Inledning	7
2 Använt kärnbränsle	9
2.1 Mängder och utbränningsgrader	9
2.2 Val av referensbränsle	9
2.3 Radionuklidinnehåll och resteffekt	10
2.4 Avfallens toxicitet	12
3 Förvarsutformning	13
3.1 Förvarssystemets uppbyggnad	13
3.1.1 Allmänt	13
3.1.2 Dimensionering av deponeringstunnlar	15
3.1.3 Dimensionering av deponeringshål	15
3.1.4 Avstånd mellan kapslar och mellan deponeringstunnlar	16
3.1.5 Deponeringspositioner	17
3.2 Inverkan på närbergets egenskaper	17
3.2.1 Allmänt	17
3.2.2 Fullprofilborrning av deponeringshål	18
3.2.3 Sprängning av deponeringstunnlar	19
3.2.4 Injekttering	19
3.2.5 Uppvärmning	19
3.3 Kapseln	19
3.3.1 Allmänt	19
3.3.2 Utformning	20
3.3.3 Kvalitetskontroll	21
3.4 Buffert och återfyllning	21
3.4.1 Allmänt	21
3.4.2 Krav vid val av buffert och återfyllnadsmaterial	21
3.4.3 Materialval	23
3.4.4 Teknik för tillförsel av buffert och återfyllnadsmaterial	24
3.5 Pluggning och slutlig försegling	24
3.5.1 Temporära pluggar	24
3.5.2 Permanenta pluggar	24
3.5.3 Pluggning av borrhål	25
3.6 Återtag av deponerade kapslar	25
4 Förvarsplatsernas egenskaper	27
4.1 Allmänt	27
4.2 Geovetenskapligt undersökningsmaterial	29
4.3 Geologisk beskrivning	31
4.3.1 Aberg	31
4.3.2 Beberg	36
4.3.3 Ceberg	41
4.3.4 Osäkerheter i de geologiska beskrivningarna	45

	Sida	
4.4	Bergmekanisk beskrivning	47
	4.4.1 Aberg	47
	4.4.2 Beberg	50
	4.4.3 Ceberg	51
	4.4.4 Osäkerheter i de bergmekaniska beskrivningarna	53
4.5	Hydrogeologisk beskrivning	54
	4.5.1 Aberg	54
	4.5.2 Beberg	57
	4.5.3 Ceberg	60
	4.5.4 Osäkerheter i de hydrogeologiska beskrivningarna	63
4.6	Grundvattenkemisk beskrivning	64
	4.6.1 Aberg	65
	4.6.2 Beberg	65
	4.6.3 Ceberg	65
	4.6.4 Osäkerheter i de grundvattenkemiska beskrivningarna	65
4.7	Geotermiska egenskaper	68
	4.7.1 Aberg	69
	4.7.2 Beberg	70
	4.7.3 Ceberg	71
	4.7.4 Osäkerheter i de termiska beskrivningarna	71
5	Platsspecifik anpassning av förvaret	73
5.1	Utformning av förvaret	73
	5.1.1 Allmänt	73
	5.1.2 Detaljerad anpassning av förvarets utformning	73
5.2	Faktorer som påverkar utformningen	74
	5.2.1 Allmänt	74
	5.2.2 Funktionsklassificering av diskontinuiteter	74
	5.2.3 Respektavstånd	75
	5.2.4 Bergblockens geometri	76
	5.2.5 Bergspänningar	76
	5.2.6 Temperatur	76
	5.2.7 Strömningsmönster	76
5.3	Anpassning av förvar för Aberg, Beberg och Ceberg	76
	5.3.1 Förutsättningar för SR 97	76
	5.3.2 Aberg	78
	5.3.3 Beberg	78
	5.3.4 Ceberg	79
6	Referenser	81

1 Inledning

SKB genomför en säkerhetsanalys, SR 97, för ett förvar för använt kärnbränsle i svenskt urberg. Syftet med analysen är att visa på möjligheten att finna en plats i svensk berggrund som uppfyller de krav på långsiktig säkerhet och strålskydd som anges i SSI:s och SKI:s föreskrifter.

SR 97 avser en omfattande analys av den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar för använt kärnbränsle. Förvaret antas utformat enligt den så kallade KBS-3-metoden. I SR 97 genomförs analyser för tre fiktiva platser: Aberg, Beberg och Ceberg. En förutsättning är att data, som används för analyser av de fiktiva platserna, ska hämtas från platser som har undersökts i samband med tidigare studier. För Aberg används data från Äspö i Småland, för Beberg data från Finnsjön i Uppland och för Ceberg data från Gideå i Ångermanland. Beteckningarna på platserna används för att tydligt markera att det inte rör sig om analyser av föreslagna platser för ett djupförvar.

Med denna utgångspunkt ska analyserna i SR 97 dels visa att ett djupförvar med acceptabel säkerhet kan utformas i berggrund som förekommer i Sverige, dels visa hur förvaret kan anpassas till de data och förhållanden som gäller på en viss plats och dels visa hur säkerheten kan utvärderas för verkliga platser.

De tre platserna som data har hämtats ifrån har undersökts av olika geologer vid olika tillfällen under en tjugofemårsperiod och med delvis olika syften och omfattning på undersökningarna. Det finns därför skillnader mellan vilka termer som har använts för de olika platserna (exempelvis för att beskriva sprickzoner), vad som har undersökts och hur resultaten har analyserats och presenterats. I SR 97 har vi valt att till stor del behålla den ursprungliga nomenklaturen och presentationssättet, vilket innebär att termer och utformning av kartor delvis skiljer sig mellan de tre platserna.

Sveriges Geologiska Undersökning har nyligen presenterat geologiska översikter över de län där data har erhållits för SR 97. Av tidsskäl har resultat från dessa översikter inte kunnat inarbetas i SR 97.

Förvarssystemets uppbyggnad baseras på KBS-3-metoden för djupförvaring i svensk kristallin berggrund. Inplacering av deponeringstunnlar och olika tillfartstunnlar, tunnlar för ventilation mm beror på de lokala förhållandena och blir därför olika för de tre områdena.

Det använda kärnbränslet innesluts i kopparkapslar med en insats av gjutjärn. Kapslarna deponeras i uppborrade hål i botten på deponeringstunnlar. Runt varje kapsel staplas bentonitblock, som efter vattenupptag och svällning ska isolera kapseln från grundvatten, hålla kapseln på plats samt fördröja transport av radionuklider från kapseln till det omgivande berget. Det använda kärnbränslet avger värme under lång tid beroende på resteffekten. Den maximalt tillåtna temperaturen på kapselns yta har valts till 100°C. Avståndet mellan deponeringshålen och mellan deponeringstunnlarna anpassas platsspecifikt så att detta krav uppfylls. Bergets och buffertmaterialets termiska egenskaper har betydelse för hur tätt inplaceringen kan göras. Efter deponeringen återfylls deponeringstunnlarna med en blandning av bentonit och bergkross.

SR 97 är en heltäckande säkerhetsanalys som framför allt belyser konsekvenser av olika scenarier och hantering av olika typer av osäkerheter. De olika förläggningsplatserna ska illustrera de egenskaper som är normala för svensk berggrund och som är av betydelse för säkerheten. För att underlätta arbetet utformas förvaren på de tre platserna så lika som möjligt. Detta innebär t ex att förvaren förläggs på ungefär samma djup och att de inpassas i berggrunden på relativt likartat sätt.

Förutom den anläggning som utgör förvaret för använt kärnbränsle kan förläggningsplatsen även behöva härbärgera ett separat förvar för annat långlivat avfall. Hänsyn till denna möjlighet har tagits i den platsspecifika utformningen av förvaren i Aberg, Beberg och Ceberg. För förvaret för annat långlivat avfall kan emellertid även andra förläggningsplatser bli aktuella. Annat långlivat avfall består bland annat av avfall från forskningsverksamheten vid Studsvik. Till kategorin annat långlivat avfall räknas också hårdkomponenter och interna reaktordelar som suttit nära bränslehärden i de kraftproducerande reaktorerna. Förutom avfallet från Studsvik och reaktorerna kommer förvaret för annat långlivat avfall även att ta emot sådant kortlivat låg- och medelaktivt drift- och rivningsavfall från CLAB och från inkapslingsanläggningen som produceras efter förslutningen av SFR 1 i Forsmark. SKB utreder den långsiktiga säkerheten för förvaret för annat långlivat avfall i en separat säkerhetsredovisning.

En kort beskrivning av det avfall som är aktuellt för deponering i ett djupförvar ges i kapitel 2. Uppgifterna baseras på uppgifter och antaganden i PLAN 98. Vid drift av kärnreaktorerna i 40 år genereras använt bränsle motsvarande ungefär 4 500 avfallskapslar. BWR-bränslet SVEA 96 har valts som referensbränsle. Aktiviteten i referensbränslet har beräknats för tiden 40 år efter uttag ur reaktorn. Beräkningarna omfattar såväl fissionsprodukter som aktinider och aktiveringsprodukter.

Därefter följer i kapitel 3 en beskrivning av förvarssystemets uppbyggnad baserad på KBS-3-metoden för djupförvaring i svensk kristallin berggrund. De tekniska barriärerna utgörs huvudsakligen av kopparkapslar med en insats av gjutjärn, buffert och tunnel återfyllning samt pluggar.

En redogörelse över de olika förvarsplatsernas geovetenskapliga egenskaper ges i kapitel 4. Redogörelsen omfattar genomförda geovetenskapliga undersökningar, geologiska/strukturella beskrivningar i regional och lokal skala, beskrivningar av bergmekanik, hydrogeologi och grundvattenkemi samt de olika platsernas termiska egenskaper.

I det sista kapitlet behandlas den platsspecifika anpassningen av förvaren. De faktorer som främst påverkar förvarens utformning är bergspänningar och riktning och egenskaper hos enskilda sprickor och vattenförande zoner.

Utgående bland annat från den information som redovisas i denna rapport har data som utgör initialförhållanden till beräkningar och värderingar i SR 97-analysen sammanfattats i huvudrapporten. I huvudrapporten redovisas även de enskilda parametrarnas osäkerhet.

2 Använt kärnbränsle

2.1 Mängder och utbränningsgrader

SKB lämnar årligen en redovisning av produktionen av energi och kärnavfall inom det svenska kärnkraftprogrammet i de sk PLAN-rapporterna. Uppgifterna om bränslemängder och bränslets utbränning i denna rapport är hämtade ur PLAN 98 /1998/.

Enligt PLAN 98 beräknas den totala energiproduktionen bli ca 1650 TWh vid drift av samtliga tolv reaktorer i 25 år, dock minst till och med år 1999. Den totala mängden använt kärnbränsle som ska slutförvaras uppgår då till ca 6 500 ton. Vid 40 års drift blir den totala elproduktionen 2 700 TWh och mängden använt kärnbränsle ca 9 500 ton. I båda alternativen ingår 20 ton använt bränsle från den avställda tungvattenreaktorn i Ägesta och från forskningsreaktorn R1 samt 23 ton använt MOX-bränsle.

Om reaktorerna drivs i 40 år krävs 4 500 kapslar för den producerade mängden använt bränsle.

2.2 Val av referensbränsle

Ett BWR-element av typ SVEA 96 med en utbränning av 38 MWd/kg U har valts som referensbränsle i SR 97. Elementet består av totalt 96 stavar indelade i 4 delknippen omslutet av en bränslebox. Den aktiva bränsledelen i ett BWR-bränsleelement är ungefär 3,7 m.

BWR-element kommer att vara den dominerade bränsletypen i förvaret och 38 MWd/kgU motsvarar en förväntad genomsnittsutbränning för allt bränsle i förvaret. Bränsle med högre utbränning har högre radionuklidinnehåll, men också högre resteffekt. Resteffekten är den styrande parametern för hur mycket bränsle som kan deponeras i en kapsel. Detta innebär att högutbränt kommer att "blandas" med lågutbränt bränsle för att få rätt resteffekt i kapseln och det totala radionuklid innehåll kommer därför inte att variera särskilt mycket mellan olika kapslar.

PWR-bränsle skiljer sig endast marginellt från BWR-bränsle när det gäller radionuklidinnehåll och andra skillnader, t ex geometri, behandlas så förenklat i säkerhetsanalysen att skillnaden inte har någon betydelse.

Bränsleelement med MOX-bränsle (Mixed-Oxide, dvs blandat plutonium- och urandioxid) består av en blandning av MOX-stavar och uranstavar. I /Forsström,1982/ finns en utredning om skillnaderna mellan MOX- och uranbränsle. En MOX-stav innehåller ca 5 gånger så mycket plutonium och ca 14 gånger mer americium och curium än en uranstav, beräknat på en utbränning av 33 MWd/kgHM. 40 år efter uttag är resteffekten i en MOX-stav 3 gånger högre än i en uranstav. Den högre halten Cm-244 i en MOX-stav gör att neutron dosen är ca 20 gånger högre än i en uranstav.

Skillnaden mellan en kapsel med "vanligt" uranbränsle och MOX-bränsle beror helt på hur många stavar med MOX-bränsle som finns i kapseln. Den tillåtna resteffekten sätter en övre gräns för hur många MOX-stavar som kan deponeras i en kapsel. Resteffekten i en kapsel med MOX avklingar dock något långsammare än i en kapsel med endast referensbränsle. Detta inverkar lokalt på temperaturen i tidsperspektivet några hundra år



Figur 2-1. Bränsleelement av typen SVEA 96.

nära MOX-kapslar. Högsta tillåten temperatur på en kapsel kommer dock aldrig att överskridas. De lokala effekterna på bergtemperatur och bergspänningar är försumbara, eftersom den totala mängden MOX-bränsle i förvaret är mindre än 0,5 %. Mängden aktinider kommer alltid att vara högre i en kapsel med MOX-bränsle, men detta har endast begränsad betydelse för förvarets säkerhet, eftersom frigörelse av aktinider från en defekt kapsel styrs av lösligheten och är oberoende av inventariet. Den högre neutron dosen från MOX-bränsle påverkar endast marginellt radiolysen av porvatten utanför kapseln och har ingen nämnvärd betydelse för kapselns livslängd.

I figur 2-1 visas en bild av ett Svea 96 bränsleelement. Referensbränslet har använts vid beräkning av radionuklidinventarium och resteffekt i säkerhetsanalysen.

2.3 Radionuklidinnehåll och resteffekt

Resteffekt, radionuklidinnehåll (sönderfallshastighet, Bq/ton uran) samt alfa-, beta-, gamma- och neutronkällstyrkor i det använda kärnbränslet har beräknats med hjälp av datorprogrammen SCALE och ORIGEN-S /Håkansson, 1998/. Beräkningarna har omfattat tider från en vecka till 300 000 år efter bestrålningen i reaktorn. Aktiviteten i referensbränslet 40 år efter uttaget ur reaktorn finns redovisad i tabell 2-1.

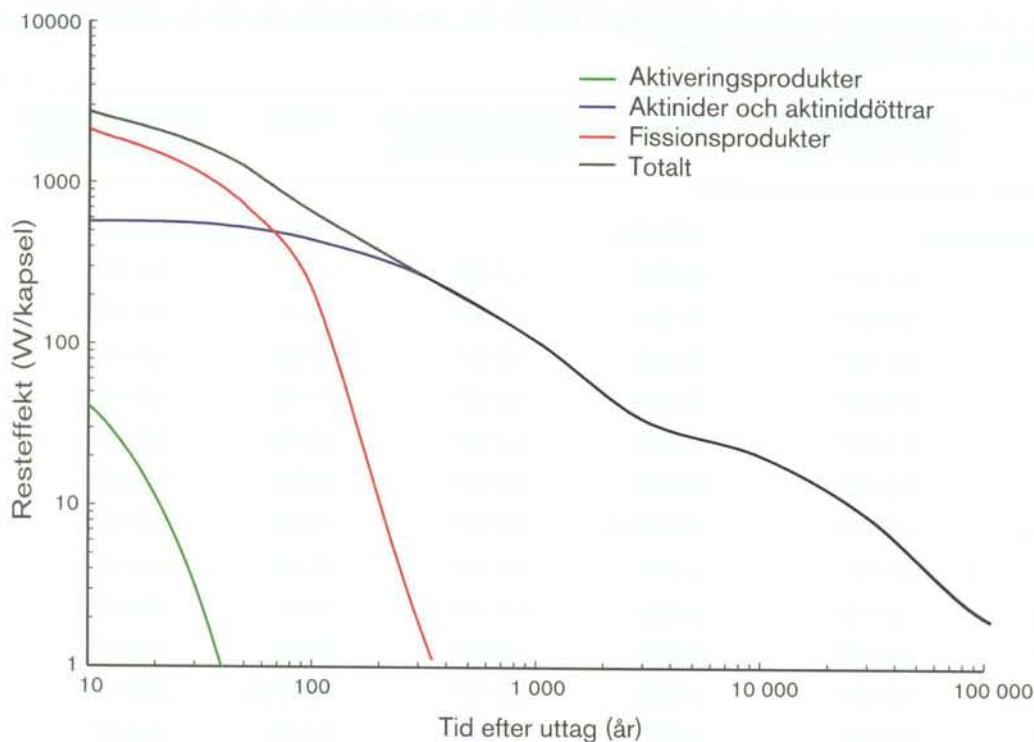
Huvuddelen av radionukliderna i bränsleelementen finns i eller utanpå urandioxiden; mindre mängder finns på insidan av kapslingsrören samt i gapet mellan kapslingsrör och bränsle. Därtill kommer aktiveringsprodukter som ingår i de övriga metalldelar som bränslet innehåller, t ex bränslekanaler och griphandtag. En del av inventariet av vissa radionuklider (t ex jod och cesium) kan vandra till bränslets yta under reaktordriften. Typiska värden för hur stor del av inventariet som finns på ytan ligger på 3–6 %.

Tabell 2-1. Aktivitet i referensbränslet (SVEA 96, 38 MWd/kg U) 40 år efter uttag ur reaktorn /efter Håkansson, 1998/.

Nuklid	Aktivitet (Bq/t U) 40 år efter uttag	Nuklid	Aktivitet (Bq/t U) 40 år efter uttag	Nuklid	Aktivitet (Bq/t U) 40 år efter uttag
<i>Fissionsprodukter</i>		<i>Aktinider</i>		<i>Aktiveringsprodukter</i>	
H-3	2,1·10 ¹²	Ra-226	1,4·10 ⁵	H-3	1,1·10 ¹²
Se-79	2,8·10 ⁹	Th-229	1,0·10 ⁴	C-14	5,0·10 ¹⁰
Kr-85	2,7·10 ¹³	Th-230	1,6·10 ⁷	Cl-36	5,5·10 ⁸
Sr-90	1,2·10 ¹⁵	Th-234	1,2·10 ¹⁰	Fe-55	9,3·10 ⁹
Y-90	1,2·10 ¹⁵	Pa-231	1,8·10 ⁶	Co-60	8,9·10 ¹¹
Zr-93	5,0·10 ¹⁰	Pa-233	1,5·10 ¹⁰	Ni-59	8,8·10 ¹⁰
Nb-93 m	4,2·10 ¹⁰	Pa-234 m	1,2·10 ¹⁰	Ni-63	9,3·10 ¹²
Tc-99	5,7·10 ¹¹	U-233	3,1·10 ⁶	Sr-90	2,6·10 ⁷
Ru-106	2,7·10 ⁴	U-234	4,6·10 ¹⁰	Y-90	2,6·10 ⁷
Pd-107	4,9·10 ⁹	U-235	4,5·10 ⁸	Zr-93	5,6·10 ⁹
Cd-113 m	1,7·10 ¹¹	U-236	1,0·10 ¹⁰	Nb-93m	2,3·10 ¹⁰
Sn-121	4,4·10 ¹⁰	U-237	1,9·10 ¹⁰	Nb-94	2,9·10 ⁹
Sn-121 m	5,7·10 ¹⁰	U-238	1,2·10 ¹⁰	Mo-93	4,4·10 ⁷
Sb-125	1,1·10 ¹⁰	Np-237	1,5·10 ¹⁰	Ag-108	4,3·10 ⁷
Te-125 m	2,7·10 ⁹	Np-239	1,2·10 ¹²	Ag-108m	5,0·10 ⁸
Sn-126	2,3·10 ¹⁰	Pu-238	9,5·10 ¹³	Cd-113m	3,4·10 ¹⁰
Sb-126 m	2,3·10 ¹⁰	Pu-239	9,5·10 ¹²	Sn-121	1,4·10 ¹⁰
I-129	1,3·10 ⁹	Pu-240	1,2·10 ¹³	Sn-121m	1,7·10 ¹⁰
Cs-134	9,1·10 ⁹	Pu-241	7,7·10 ¹⁴	Sb-125	1,2·10 ⁹
Cs-135	2,1·10 ¹⁰	Pu-242	1,0·10 ¹¹	Te-125m	3,0·10 ⁸
Cs-137	1,8·10 ¹⁵	Am-241	1,5·10 ¹⁴	Eu-154	3,2·10 ¹¹
Ba-137m	1,7·10 ¹⁵	Am-242 m	4,5·10 ¹¹	Eu-155	1,3·10 ¹⁰
Pm-146	9,8·10 ⁸	Am-242	4,5·10 ¹¹	Ho-166m	7,5·10 ⁷
Pm-147	1,5·10 ¹¹	Am-243	1,2·10 ¹²	Totalt	1,2·10 ¹³
Sm-151	9,4·10 ¹²	Cm-242	3,7·10 ¹¹		
Eu-152	3,3·10 ¹⁰	Cm-243	4,4·10 ¹¹		
Eu-154	1,8·10 ¹³	Cm-244	2,8·10 ¹³		
Eu-155	7,6·10 ¹¹	Cm-245	9,4·10 ⁹		
Totalt	6,0·10 ¹⁵	Cm-246	2,9·10 ⁹		
		Totalt	1,1·10 ¹⁵		

Resteffekten i bränslet härrör från det radioaktiva sönderfall som sker i fissionsprodukterna och varierar i stort sett proportionellt med bränslets utbränningsgrad. Resteffektens avklingning visas i figur 2-2. Resteffekten hänför sig till en kapsel innehållande 12 BWR element med vardera 170 kg använt kärnbränsle räknat som uran.

Eftersom utbränningsgraden påverkar bränslets sammansättning och struktur och framtida utbränningar kan komma att skilja sig från dem, som antagits för referensbränslet, har för BWR-element beräkningar även genomförts för en högre utbränning av 55 MWd/kg U /Håkansson, 1998/.



Figur 2-2. Resteffektens avklingning som funktion av tiden i referensbränslet.

2.4 Avfallets toxicitet

Förutom potentiella hälsoeffekter från avfallets innehåll av radionuklider måste man vid beskrivning av ett förvars säkerhet också beakta dess innehåll av giftiga ämnen. Ofta kan ett ämne både vara potentiellt skadligt på grund av sin radioaktivitet och samtidigt vara giftigt som kemisk substans.

Översiktliga inventeringar av kemiskt giftiga ämnen i kapslar med använt bränsle har gjorts av Wiborgh och Markström /1991/. I använt bränsle finns framför allt uran men dessutom mindre mängder av andra grundämnen som kärnreaktionerna producerat. Flera av de bildade kemiska elementen i bränslet kan vara giftiga eller skadliga för miljön, förutom skadlig inverkan från radioaktiviteten. Exempel på sådana ämnen är silver, barium, kadmium, antimon och selen. Skadliga metaller som krom och nickel finns i metalldelarna i bränsleelementen och även kapselmaterialet koppar kan ha en viss giftighet. Uran är emellertid den dominerande komponenten, beroende på de stora mängderna uran i förvaret och på urans relativt stora giftighet.

3 Förforsutformning

Uppbyggnaden av djupförvaret är baserad på KBS-3 metoden (se figur 3-1). Det använda bränslet innesluts i kapslar bestående av en insats av gjutjärn för mekanisk stabilitet och ett hölje av koppar för korrosionsskydd. Kapslarna deponeras i uppborrade hål i botten av ett system med deponeringstunnlar. Varje hål rymmer en kapsel. Kapslarna omges av en buffert av bentonitlera, som håller dem på plats och isolerar dem från cirkulerande grundvatten och skyddar dem från mindre bergrörelser i det omgivande berget. Leran fördröjer också transporten av olika ämnen till och från kapseln.

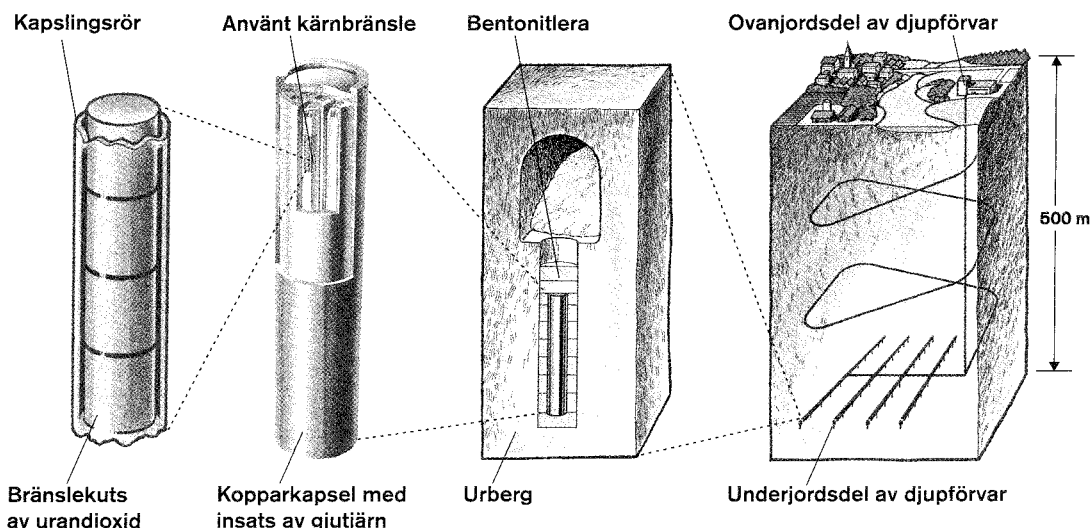
Utgående från de krav man ställer på olika delar i systemet beskrivs förvarssystemets utformning med tonvikt på de underjordiska delarna för använt kärnbränsle. Därefter behandlas kapsel, bentonitbuffert och återfyllnadsmaterial.

3.1 Förvarssystemets uppbyggnad

3.1.1 Allmänt

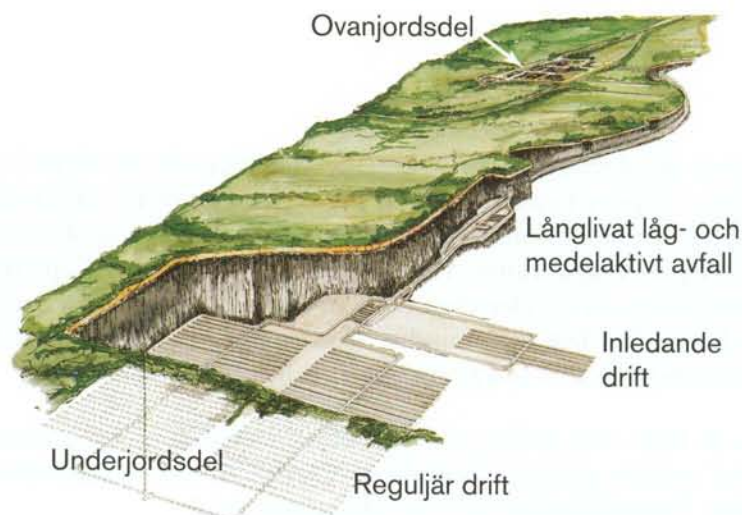
Utformning och konstruktion av bergrum, tunnlar, deponeringspositioner för använt kärnbränsle m m i förvarssystemet bygger på principer som har presenterats i KBS-3-studien /KBS-3, 1983/.

Flera alternativa lösningar har tidigare studerats för förvarssystem placerade på gruvdjup, dvs mellan 400 och 700 m under markytan /PASS, 1992; Skagius och Svemar, 1989/. Vid jämförelser med KBS-3 metoden har vissa av dessa alternativ visat fördelar i ekonomiskt hänseende. Genom det fortlöpande utvecklingsarbetet förändras detaljer i förvarets utformning och val av arbetsmetoder. De modifierade lösningarna i den föreliggande



Figur 3-1. Illustration av KBS-3-metoden för förvaring av använt kärnbränsle.

Djupförvaret



Figur 3-2. Skiss av djupförvaret med rampnedfart.

studien uppfyller dock alltid lägst samma funktionskrav som i tidigare konstruktioner. Beskrivningen av förvarssystemet nedan utgår från nu aktuell utformning /PLAN 98, 1998/.

Djupförvarets olika delar består av:

- ovanjordsdel,
- nedfart (schakt eller ramp),
- centralområde under jord,
- område för deponering av använt kärnbränsle.

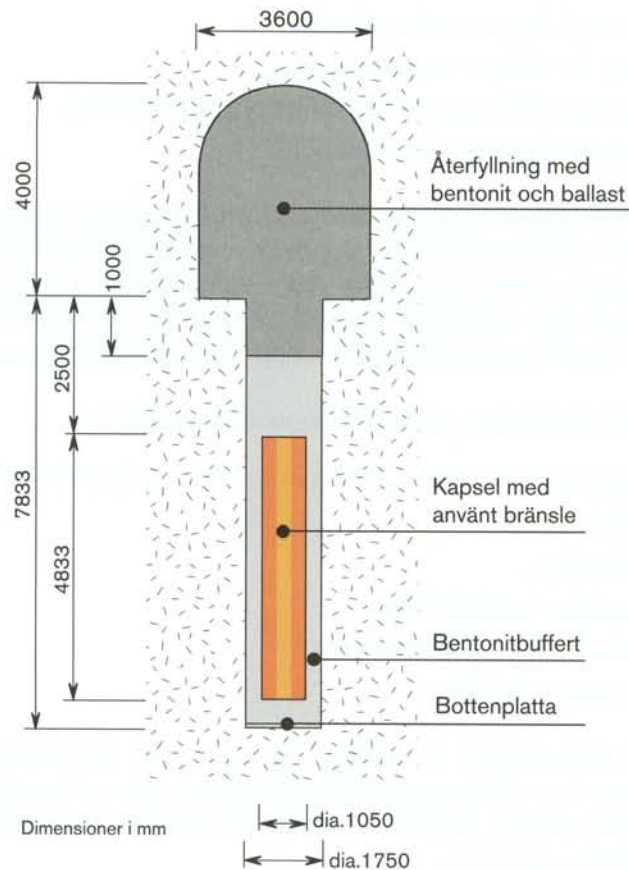
Utformningen anpassas till vald plats. Exempel på utformning framgår av figur 3-2.

Förvaret för använt kärnbränsle består av ett stort antal parallella deponeringstunnlar med deponeringshål borrarade i botten. Kapslar med använt kärnbränsle placeras i deponeringshålen tillsammans med en omslutande lerbuffert.

En sektion genom en kapselposition återfinns i figur 3-3. Måtten bestäms av kapselns storlek, erforderligt utrymme för bergarbeten, drift och deponering samt av önskad funktion och säkerhet efter förslutning /Svemar, 1995/. I praktiken kommer man att få vissa avvikelser från de angivna måtten. De påverkas bland annat av valet av metod för bergbrytning och teknik för nedsänkning av kapslar och bentonit i deponeringshålen.

Deponeringstunnlarna binds samman av tunnlar för transporter av bränslekapslar, material och personal samt tunnlar för ventilation och ledningsdragnings. Transporttunnlarna har förbindelse med ett centralområde under jord och med tunnlar och schakt till markytan.

Resteffekten i det deponerade använda kärnbränslet leder till en uppvärmning av förvaret. Detta innebär att placeringen av deponeringstunnlarna samt det inbördes avståndet mellan positionerna för de deponerade kapslarna bestäms med hänsyn till kravet på en begränsning av temperaturen på kapselytan till högst 100°C. Hur tätt kapslarna kan placeras är även beroende av det lokala bergets termiska egenskaper /Ageskog och Jans-



Figur 3-3. Sektion av deponeringshål.

son, 1999/. Lokala berg- och grundvattenförhållanden kommer slutgiltigt att avgöra hur stor del av det teoretiskt tänkbara antalet kapselpositioner som kan utnyttjas.

Utformningen bygger på att alla tunnlar borrar och sprängs med konventionell teknik (försiktig sprängning) samt att deponeringshålen fullprofilböras.

3.1.2 Dimensionering av deponeringstunnlar

Eftersom kapslarna fraktas ner till deponeringspositionerna omgivna av ett strålskydd, måste höjden i deponeringstunnlarna anpassas efter den deponeringsutrustning som används. Vidare förutsätts enbart friblåsande ventilation i tunneln och således inga platskrävande ventilationsledningar.

3.1.3 Dimensionering av deponeringshål

Dimensionerande för avståndet mellan tunnelns botten och kapselns överdel är:

- kravet att kapseln placeras utanför sprängstörd zon under tunnelgolvet,
- inverkan av den spänningsomlagrade zonen,
- inverkan av bentonitens svällning, vilken bland annat beror på återfyllnadsmaterialet i tunneln,
- påverkan på bentoniten från eventuell förekomst av betong på tunnelns botten,

- eventuell injektering i berget under tunneln,
- eventuell bultning för räls på tunnelns botten,
- motstånd mot radionuklidtransport i buffert och återfyllning,
- strålskärning som tillåter vistelse i tunneln.

Kravet att kapseln ska placeras utanför den sprängstörda zonen innebär ett avstånd mellan kapselns överyta och tunnelns botten av 2,5 m. För att uppnå låg hydraulisk konduktivitet i bufferten runt kapseln och en inte alltför stor täthetsminskning i den del av bufferten som finns över kapseln har buffertens tjocklek valts till 1,5 m. Över bufferten fylls 1,0 m av deponeringshållet med bentonit/bergkross upp till deponeringstunnelns botten.

Dimensionerande för tjockleken på bufferten under kapseln är:

- bottenutjämnings påverkan på bentoniten om betong kommer till användning,
- buffertens bärighet,
- buffertens svällförmåga,
- buffertens hydrauliska konduktivitet,
- buffertens motstånd mot nuklidtransport,
- värmetransport genom bufferten.

Med hänsyn till att avjämningen av botten ska kunna ske med betong, som negativt kan påverka egenskaperna hos närliggande bentonitbuffert, och att barriären mot nuklidtransport ska ha minst samma kapacitet som övriga delar av bufferten, väljs tjockleken på bufferten under kapseln till 0,5 m.

Hålets diameter är summan av kapselns diameter, bentonitblockens ursprungliga tjocklek och toleranser mellan kapsel och block samt mellan block och berg. Bentonitbuffertens tjocklek bestäms i sin tur av den önskade mekaniska, kemiska, hydrauliska och termiska funktionen hos bufferten. Dessutom tas hänsyn till önskad gastransportkapacitet.

Den tillåtna värmeutvecklingen i kapseln begränsas av den temperatur som kan tolereras på kapselytan. En mäktigare buffert kommer alltså att leda till att mindre använt bränsle kan lastas i varje kapsel, eftersom buffertmaterialet har lägre värmeledningsförmåga än det omgivande berget. Med hänsyn till detta samt till kravet på bibehållen diffusionsbarriär runt kapseln för hela förvarets livslängd görs bufferten 0,35 m tjock, vilket leder till en håldiameter på 1,75 m för den aktuella kapselkonstruktionen.

3.1.4 Avstånd mellan kapslar och mellan deponeringstunnlar

Dimensionerande för avståndet mellan deponeringshål är främst:

- mängd bränsle per kapsel,
- buffertens tjocklek,
- tillåten temperatur på kapselytan och i bufferten,
- bergets ursprungliga temperatur,
- buffertens termiska ledningsförmåga,
- bergets termiska ledningsförmåga,
- avstånd mellan deponeringstunnlar,
- tillåten termisk last per horisontell ytenhet,

- bergets hållfasthet mot termiskt inducerade spänningar,
- krav på begränsad hydraulisk förbindelse mellan deponeringshål.

Den dimensionerande faktorn är den tillåtna temperaturstegringen på kapselytan. För den valda kapseln med användning av termiska data för vanlig granit, under antagande av en ursprunglig temperatur av 15°C i ostört berg och en högsta tillåten temperatur av 100°C på kapselytan samt med en ekonomisk optimering mellan kapselavstånd och tunnelavstånd blir kapselavståndet 6,0 m och tunnelavståndet 40 m. Exempel på faktorer, som skulle kunna medge kortare avstånd mellan kapslar och tunnlar, är låg ursprunglig temperatur i berget, högre värmeledningsförmåga hos bufferten samt högre kvartshalt hos berget och därmed bättre termisk ledningsförmåga än i normal granit.

3.1.5 Deponeringspositioner

Det är inte sannolikt att alla deponeringshål i det ovan givna deponeringsmönstret kan utnyttjas. Lokala egenskaper i berggrunden kan exempelvis göra att förhållandena för säker isolering av avfallet på lång sikt kan bli sämre i vissa positioner. De faktorer som identifierats ha betydelse för om en kapselposition kan utnyttjas eller inte är /Rosén och Gustafson, 1995/:

- litologi (bergmassans sammansättning),
- inflöde av vatten till deponeringshålet,
- stabilitet ur konstruktionssynpunkt,
- långtidsstabilitet,
- tektonisk påverkan,
- bergets termiska egenskaper.

För respektive faktor kan ett spann på godtagbara värden bestämmas. Genom att bedöma och gränssätta dessa faktorer och sedan tillämpa dem på den specifika förvarsplatsen kan man beräkna en utnyttjandegrad av bergvolymen.

3.2 Inverkan på närbergets egenskaper

3.2.1 Allmänt

I vilken grad det omgivande berget påverkas av inplaceringen av förvaret för använt kärnbränsle är beroende bland annat av de geologiska förhållandena inom området, använda bergbrytningsmetoder och den värmebelastning som berget utsätts för. Sprängning, borrning och uttag av bergmassor kommer att påverka bergets egenskaper i väggar, tak och golv runt schakt, tunnlar och bergrum. Fullprofilborrning av deponeringshål förväntas påverka berget i mindre utsträckning än sprängning. Även uppvärmning och senare avkylning av berget i närheten av deponerade kapslar med använt kärnbränsle inverkar på bergets egenskaper.

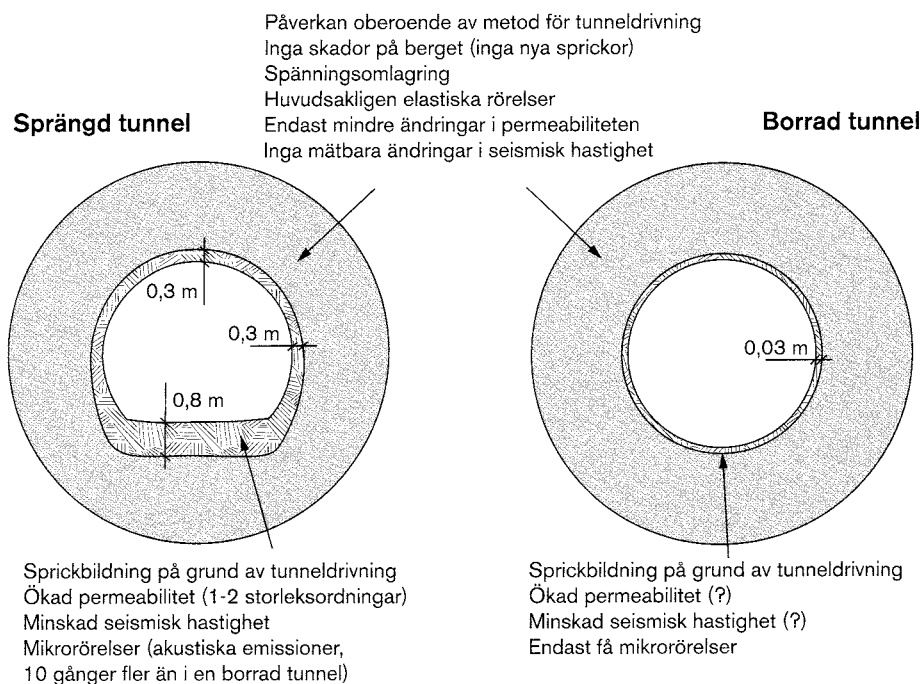
I det följande beskrivs de egenskaper närfältberget bedöms få under förutsättning att deponeringshålen fullprofilborras och att deponeringstunnlarna borras och sprängs på konventionellt sätt (försiktig sprängning). Effekten av värmeutvecklingen i de deponerade kapslarna beskrivs kortfattat.

3.2.2 Fullprofilborrning av deponeringshål

Fullprofilborrning av 1,75 m vida deponeringshål har mycket liten inverkan på det omgivande berget. De nya sprickor som utbildas vid borrningen torde på sin höjd sträcka sig 100 mm in i sidoberget /Lindqvist et al, 1994/. Därtill kommer den elasto-plastiska förändring som närberget undergår till följd av spänningsomlagringen i samband med borrningen. Experimentborrning av 1,52 m vida hål i Olkiluoto /Autio, 1997/ har visat, att en förändring i form av förhöjd porositet i berget kan skönjas in till ett djup av ca 20 mm från hålväggen.

I Äspö har berget runt en TBM-tunnel (TBM = tunnel boring machine, fullprofilborrning) med en diameter på ca 5 m undersökts. Den skadade zonen med förhöjd porositet begränsas till ca 30 mm. Längre ut från tunneln leder spänningsomlagringar till förändringar av mindre allvarlig art (se figur 3-4). I Grimsel, Schweiz, har borrkärnor tagits ut i väggen i en TBM-tunnel på ca 450 m djup. Även i dessa prover kunde förändringar noteras in till ett djup av 30 mm från tunnelväggen /Winberg, 1995/.

De slutsatser som hittills dragits är att det vid fullprofilborrning bildas en mindre zon närmast bergväggen, som kan ha en förhöjd vattenledningsförmåga i deponeringshålets axiella riktning. Detta är till fördel för vattenmättnaden av bufferten, då man därvid uppnår en jämn fördelning av vatten längs hela deponeringshålet, vilket underlättar en jämn vattenmättnad av bentonitbufferten.



Figur 3-4. Utsträckningen av den störda zonen runt en sprängd tunnel respektive runt en TBM-tunnel. Sammanställning av resultat från ZEDEX-experimenten i Äspölaboratoriet.

3.2.3 Sprängning av deponeringstunnlar

Kring deponerings- och andra tunnlar kommer det att finnas en så kallad störda zon som ger en delvis annorlunda sprickgeometri och genomsläpplighet i tunnarnas närområde. Storleken på den störda zonen är större i en sprängd jämfört med en borrarad tunnel. Sprängskadeförsök i Äspörampen /Pusch och Stanfors, 1992/ och i ZEDEX-tunneln /Emsley et al, 1997/ bekräftar de preliminära uppskattningar av skadornas omfattning, som gjordes i Stripaprojektet /Börgesson et al, 1992/, samt de skadeverkningar som beräknats på teoretisk grund /Andersson, 1994/. Försöken i Äspörampen och ZEDEX-tunneln indikerar en 0,3 m zon utanför väggar och tak och en 0,8–1,5 m zon under golvet, som är betydligt påverkade. Resultat från hydrauliska mätningar i ZEDEX-tunneln visar på en ökning av permeabiliteten i den sprängskadade zonen. Det gick dock inte utifrån resultaten att kvantifiera ökningen. Längre ut från tunneln leder spänningsomlagring till förändringar av mindre allvarlig art (se figur 3-4).

Pusch och Börgesson /1992/ bedömer att den axiella, hydrauliska konduktiviteten ökar med en faktor 100 till 1 000 i den sprängstörda zonen (i genomsnitt 100 i en 1 m mäktig zon) och en faktor 10 i den spänningsomlagrade zonen utanför (en tunneldiameter ut). Få mätningar finns emellertid som bekräftar denna bedömning. Vissa resultat pekar i stället på att hydrauliskt sammanbundna strukturer endast har en utsträckning av någon eller några meter i axiell led /Read, 1996/.

3.2.4 Injektering

Djupförvarets säkerhet förutsätter inte några åtgärder för att tätta berget eller påverka dess egenskaper i övrigt. Under bygge och drift av djupförvaret är det däremot viktigt att ha god kontroll på inflödet av grundvatten. En möjlig metod att minska inflödet av grundvatten är injektering av t ex cement i vattenförande sprickor.

3.2.5 Uppvärmning

Vid uppvärmning av berget ökar spänningarna. Eftersom bentoniten i deponeringshålet utövar ett tryck på bergväggen, är möjligheten liten till rörelser längs sprickplan. Efter avsvälning på grund av radioaktivitetens avklingning har de termoinducerade spänningarna upphört och berget runt deponeringshålen förutsätts återfå närbergets ursprungliga egenskaper.

3.3 Kapseln

3.3.1 Allmänt

Kapseln utgör en grundläggande teknisk barriär i förvarssystemet. En detaljerad diskussion av konstruktionsförutsättningar och funktionskrav för kapseln finns i Werme /1998/. Kapseln har två primära funktioner för att ge erforderlig isolering i djupförvaret:

1. Kapseln ska vara tät under lång tid. Detta ställer krav på:
 - initial täthet,
 - kemisk beständighet i den miljö som finns eller kommer att finnas i djupförvaret,
 - mekanisk hållfasthet under de betingelser som förväntas råda i förvaret under lång tid.

2. Kapseln ska inte utöva någon skadlig inverkan på de andra barriärerna i djupförvaret. Detta ställer krav på:
 - val av material, som inte negativt påverkar funktionerna hos buffert och berg,
 - begränsning av värme och stråldos i närområdet,
 - en sådan utformning att konfigurationen av klyvbart material i bränslet förblir underkritisk även om vatten kommer in i kapseln,
 - begränsning av kapselns bottentryck mot bentoniten.

3.3.2 Utformning

Kapseln består av två komponenter, dels en gjuten insats, dels ett kopparhölje (Werme och Eriksson, 1995). Den gjutna insatsen med individuella kanaler för varje bränsleelement ger kapseln den nödvändiga mekaniska hållfastheten att kunna motstå yttre övertryck i djupförvaret och uppkommande laster vid hanteringen. Det ca 50 mm tjocka kopparhöljet ger kapseln korrosionsbeständighet. Förutom att ge erforderligt skydd mot korrosion under lång tid efter det att förvaret har vattenmättats, ska kopparhöljet också klara atmosfärisk korrosion innan kapseln deponeras och under förvarets uppmättnadsfas efter deponering.

Utformningen av kapseln är ännu inte fastställd i detalj utan kan komma att modifieras efter de krav som tillverkning och inkapslingsprocess ställer. En möjlig konstruktion visas i figur 3-5. Denna utformning med ett yttre kopparhölje och en insats av gjutjärn och plats för 12 BWR-element ligger till grund för SR 97. Kopparhöljet kan tillverkas antingen som ett sömlöst rör, exempelvis genom extrusion, eller från två plåtar som formas till rörhalvor och svetsas samman med två längsgående svetsar. Lock och botten kan tillverkas genom bearbetning från tjock plåt eller smidas och bearbetas till slutlig form.



Figur 3-5. Utformning av kapselns hölje och insats.

Den totala vikten för en kapsel fylld med 12 BWR-element blir med detta utförande cirka 24,5 ton. Insatsen väger cirka 13,5 ton, kopparhöljet 7,5 ton och bränsleelementen 3,6 ton.

Bortsett från insatsen är en kapsel för PWR-element lika en kapsel för BWR-element. Kopparhöljet har alltså samma höjd och diameter. Motsvarande totala vikt för en kapsel fylld med 4 PWR-element är 27,6 ton. Insatsen väger i detta fall 16,5 ton, kopparhöljet 7,5 ton och bränsleelementen 3,6 ton.

3.3.3 Kvalitetskontroll

Tillverkning och förslutning av kapseln kommer att kontrolleras och verifieras med oförstörande provning. Detaljutformningen av provningsprogrammet är ännu inte fastställt. Utgångsmaterialet förutsätts provas med ultraljud och svetsarna med en kombination av radiografi och ultraljud. Svetsarna kontrolleras även med lämplig metod för att fastställa att kopparhöljet inte har mindre ytbrytande defekter. Sådana skulle sakna betydelse för kapselns mekaniska integritet, men skulle kunna tjäna som anvisningar för spaltkorrosion. På samma sätt förutsätts förslutningssvetsen på locket kontrolleras med radiografi, ultraljud och lämplig metod för att detektera ytbrytande sprickor.

3.4 Buffert och återfyllning

3.4.1 Allmänt

De deponerade kapslarna kommer att omges av en buffert som ska skydda kapseln från det rörliga grundvattnet, hålla kapseln på plats samt kraftigt fördröja transport av radionuklider. Efter slutförd deponering ska tunnlar, bergrum och schakt återfyllas på ett sådant sätt, att förhöjda flöden av grundvatten förhindras och kemiska förändringar av förvarets barriärer försvåras och fördröjs. Dessa delvis likartade funktionskrav på buffert och återfyllnad har betydelse vid materialvalet.

3.4.2 Krav vid val av buffert och återfyllnadsmaterial

Buffert

Bufferten ska skapa sådana förhållanden runt kapseln att den åstadkommer en långsiktig isolering av det använda bränslet. Av denna orsak väljs ett buffertmaterial i vilket diffusion är den dominerade transportmekanismen för i vattnet lösta ämnen till och från kapseln. Buffertmaterialet ska:

- helt omsluta och skydda kapseln under lång tid samt hålla den centrerad i deponeringshålet,
- hindra strömning av grundvatten genom deponeringshålet runt kapseln och därmed hindra att korrosiva ämnen transporteras till kapseln på annat sätt än genom diffusion.

Detta ställer i sin tur krav på att bufferten ska stanna kvar i deponeringshålet och att den är kemiskt stabil under lång tid.

Det är också betydelsefullt att bufferten inte har några egenskaper som skulle kunna orsaka skada på andra barriärer. Detta ställer krav på att bufferten ska:

- ha tillräcklig termisk ledningsförmåga, så att temperaturen på kapselytan inte överstiger 100°C,
- ha tillräckligt hög densitet för att ge erforderlig bärighet,
- ha tillräckligt låg densitet för att undvika alltför höga belastningar på omgivande berg och kapsel från svällning,
- vara tillräckligt mjuk för att tillåta bergförskjutningar utan att kapseln utsätts för alltför höga spänningar,
- kunna transportera ut gas som kan bildas i en skadad kapsel.

Vidare finns ett ekonomiskt krav att tillgången ska vara god på det material, som ska användas som buffert.

Olika typer av svällande leror med hög smektithalt har goda förutsättningar att uppfylla nämnda tekniska och ekonomiska krav. Med ett val av sådana material uppnår man samtidigt flera andra lämpliga egenskaper, såsom:

- begränsning av transport av radionuklider genom sorption på lermineralets ytor,
- förmåga att filtrera och begränsa tillväxt av mikroorganismer,
- förmåga att filtrera kolloider,
- kemisk buffringsförmåga för orenheter i materialet.

Sorptionsprocessen har stor säkerhetsmässig betydelse vilken kan påverkas genom ändring av buffertjockleken. Vissa långlivade radionuklider såsom kol-14, klor-36 och jod-129 bildar negativa joner och sorberar inte på mineralen. Lermineralets buffrande egenskaper påverkas bland annat av dess innehåll av kalcit, som buffrar pH, och pyrit som "buffrar" redoxförhållandena.

Viktiga mätbara och delvis påverkbara egenskaper hos bufferten är således bland andra:

- vattenhalt,
- hydraulisk konduktivitet,
- svälltryck,
- svällförmåga,
- skjuvhållfasthet,
- porvolym,
- mineralsammansättning,
- diffusions- och sorptionsegenskaper,
- termisk ledningsförmåga.

Återfyllning

Olika blandningar av bentonit och bergkross är tänkt att användas vid återfyllnad av tunnlar och bergtrum i områdena för deponering av använt kärnbränsle samt i övriga utsprängda bergutrymmen under jord.

Det återfyllnadsmaterial som används ska bidra till att tunnarna förblir stabila och hålla bufferten runt kapslarna på plats. Återfyllningen ska också förhindra eller begränsa vattenflödet kring kapselpositionerna. Vidare ska materialet i återfyllningen väljas så att grundvattnets kvalitet inte försämras samt vara kemiskt stabilt under lång tid.

Kompressibiliteten är en viktig egenskap hos återfyllningsmaterialet. Den bestämmer hur utsvällningen av bufferten från deponeringshålen kan begränsas.

3.4.3 Materialval

Buffert

Ett lämpligt buffertmaterial utgörs av en smektithaltig lera. Den svällande funktionen hos denna typ av lera skulle dock på sikt kunna äventyras genom en omvandling av smektit till illit. En studie av olika buffertmaterial /Pusch, 1995/, som bygger på en modell för degradering av leran /Karnland et al, 1995; Hökmark, 1995/, har visat att ursprungshalten av smektit bör vara minst 50 procent för att buffertens funktion ska kunna garanteras. Studien visar att endast smektittyperna montmorillonit och saponit med natrium som huvudsaklig adsorberad jon bör komma ifråga som buffertmaterial. Sådana leror, bentoniter, finns tillgängliga i riklig mängd i ett stort antal länder. Ännu högre smektithalter än 50 procent är mycket värdefullt för effektiv självläkning och homogenisering av leran. Oavsett smektithalt bör halten av svavelmineral och organiska ämnen i buffertmaterialet vara liten.

Bentoniter med en halt av montmorillonit av 70–90 procent och med natrium som dominerande adsorberad katjon, finns kommersiellt tillgängliga. I SR 97 används MX-80 som referensmaterial för bufferten i deponeringshålen /Bäckblom, 1996/. MX-80 användes även i KBS-3-projektet och är en kommersiellt tillgänglig bentonitkvalitet.

Återfyllning

Kravet på återfyllningen är att tunneln inte ska vara en dominerande vattenledare och att svälltrycket ska stabilisera tunnelväggen.

Det preliminära valet av material för återfyllning är blandningar av 10–30 procent bentonit och resten bergkross som läggs ut och kompakteras på platsen. Efter vattenmättnad bedöms återfyllningen få en hydraulisk konduktivitet som inte överskrider 10^{-10} m/s /Bäckblom, 1996/, vilket är i nivå med konduktiviteten hos mycket tätt berg. Av miljömässiga och ekonomiska skäl förordas återanvändning av det berg som bryts i djupförvaret. Den hydrauliska konduktiviteten, kompressibiliteten och expanderbarheten hos sådant material har visat sig vara jämförlig med motsvarande egenskaper hos kvarts-sand som ballast /Pusch, 1995b/.

Alternativa återfyllningsmaterial är bergkross och morän utan bentonit. Även efter kompaktering kommer emellertid den hydrauliska konduktiviteten hos dessa material att vara högre än konduktiviteten i hydrauliskt täta berg.

Salthalten i grundvattnet påverkar bentonitens konduktivitet och svällförmåga, vilket innebär att en högre inblandning av bentonit kan behövas på en förvarsplats med ett saltare grundvatten för att uppnå rätt konduktivitet.

I SR 97 antas användning av en blandning av 15 viktsprocent bentonit och 85 viktsprocent bergkross för återfyllnad av tunnlar i förvaret för använt kärnbränsle på samtliga förvarsplatser. I ett verkligt förvar kommer återfyllnadens sammansättning att anpassas efter platsens egenskaper. För Aberg krävs 25–30 procent bentonitinblandning på grund av grundvattnets höga salthalt.

3.4.4 Teknik för tillförel av buffert och återfyllnadsmaterial

Buffert

I deponeringshålen placeras först förkompakterade stora bentoniteblock pressade till hög vattenmättnadsgrad som hela ringar eller skivor med full diameter. Därefter deponeras kapseln och spalterna mellan berget och blocken fylls med vatten med låg elektrolythalt, så att ett högt porvattentryck i bentoniten snabbt uppnås. Alternativt kan spalterna först även fyllas med pellets av bentonit, för att den totala mängden bentonit ska bli så stor som möjligt.

Återfyllning

Återfyllningsmaterialet läggs ut i lutande skikt och kompakteras med vibrerande platta monterad på en rörlig arm eller med liknande utrustning. Bentonitblock kan eventuellt användas för återfyllning av övre delen av tunneln mot taket. Pressning av sådana block med en vikt på ca 15 kg har gjorts med gott resultat /Johannesson et al, 1995/.

3.5 Pluggning och slutlig försegling

3.5.1 Temporära pluggar

När bränsleelementkapslar har förts ner i alla deponeringspositioner i en deponeringstunnel och denna har återfyllts, förseglas tunneln med en plugg. Dess funktion är att:

- motverka utsvällning av återfyllnadsmaterialet,
- möjliggöra en snabb uppbyggnad av ett högt vattentryck i deponeringspositionerna.

Det senare kravet kan uppnås om tunneln tätats av effektivt mot vattenströmning, såväl i själva tunneln som i den omgivande störda zonen. Pluggens funktion är viktig fram till dess transporttunneln återfylls. Pluggen kan då antingen tas bort eller lämnas kvar.

3.5.2 Permanenta pluggar

Den förändring av bergets ursprungliga mekaniska och hydrauliska egenskaper, som utsprängning av tunnlar och bergrum leder till, kan i vissa fall behöva åtgärdas på ett mera bestående sätt genom avtätning och återfyllning på strategiska ställen. Sådana åtgärder syftar till att begränsa hydrauliska transportvägar genom att:

- täta tunnlar,
- begränsa flödesmöjligheterna i den störda zonen runt omkring tunneln,
- separera förvarsområden hydrauliskt från sprickzoner och andra vattenledande strukturer, som står i nära eller direkt kontakt med biosfären,
- begränsa flödesmöjligheter längs schakt och ramp som står i förbindelse med marknivån.

Dessutom bidrar dessa åtgärder till att försvåra mänskligt intrång.

I SR 97 analyseras inte effekten av permanenta pluggar.

Vid återfyllning av schakt måste man ta hänsyn till att återfyllnadsmaterialet med tiden sätter sig, vilket kan leda till håligheter i återfyllnaden under stela pluggar. Därför behöver återfyllnadsmaterialet i schakt bestå av ett svällande material som balanserar sättningen. Exempel på ett sådant material är en blandning av bentonit och bergkross.

Översta delen av ramp och schakt mot marknivån försluts så att mänskligt intrång försvåras. Exempelvis kan en lämpligt lång sträcka förses med en plugg av betong.

3.5.3 Pluggning av borrhål

Borrhål som står i förbindelse med marknivån försluts innan förvarsplatsen lämnas. En teknik för förslutning av borrhål, som har provats i Stripa, är att förse borrhålen med perforerade kopparrör fyllda med kompakterad bentonit. I de delar av borrhålen som genomtvärrar diskontinuiteter eller dåligt berg kan en förbehandling av hålen behöva göras. Härvid gjuts hålen igen med cement och borras upp innan bentonitfyllningen matas ner.

En annan metod för pluggning av borrhål har studerats av Nagra, Schweiz, där borrhålet med hjälp av tryckluft fylls med bentonitpellets genom ett rör.

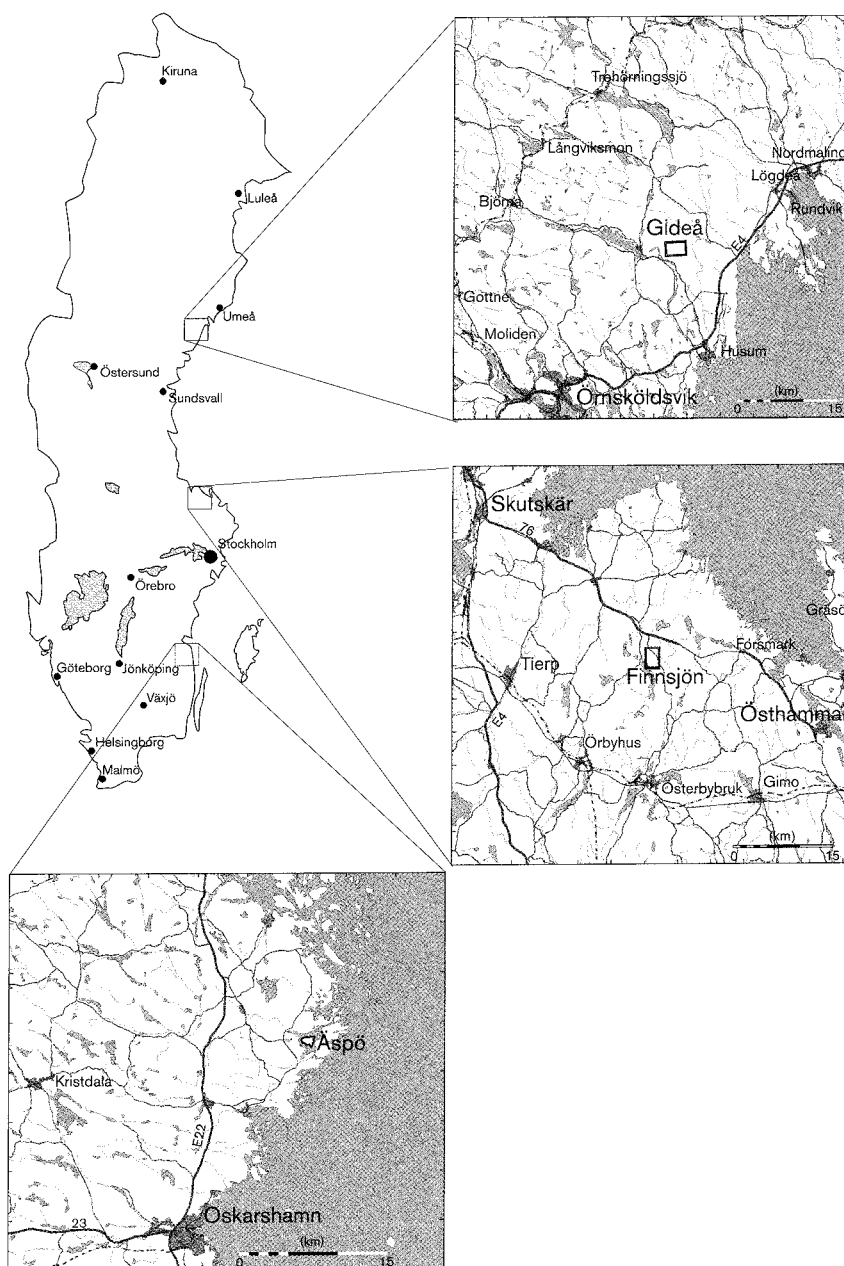
3.6 Återtag av deponerade kapslar

Som djupförvaret är utformat i SR 97 finns det i alla stadier möjlighet till återtag av deponerade kapslar. Denna möjlighet medför inte att förvarets långsiktiga funktion försämras.

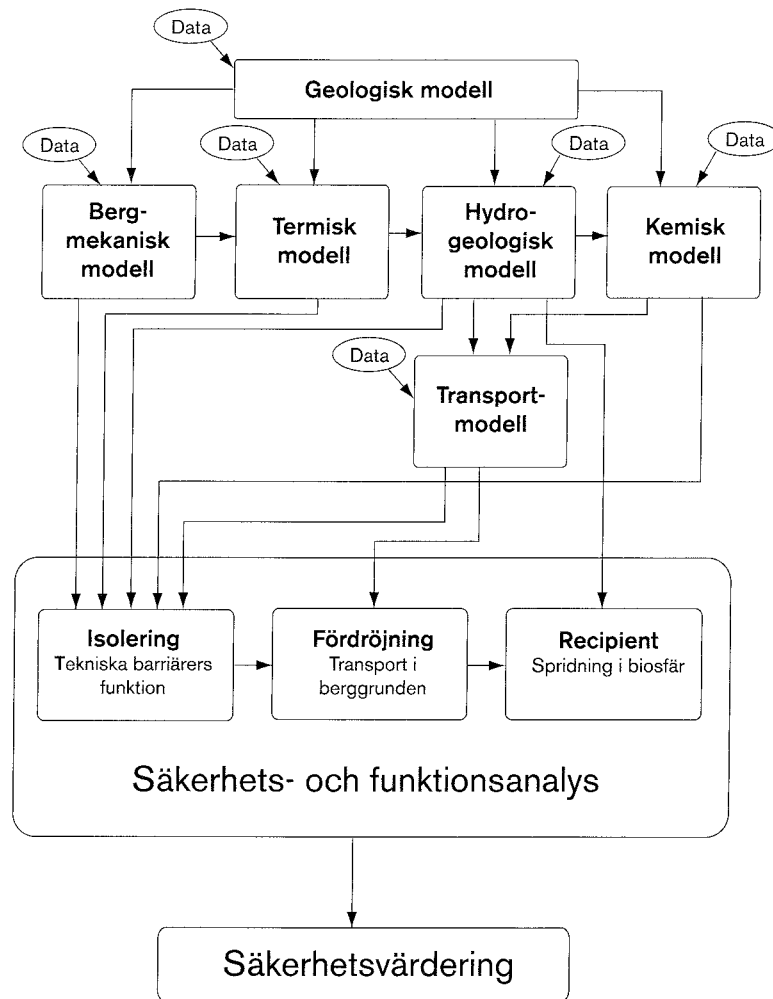
4 Försvarsplatsernas egenskaper

4.1 Allmänt

Detta kapitel beskriver de tre försvarsplatsernas egenskaper. Data har valts från verkliga platser, där SKB genomfört undersökningar nämligen Äspö (Aberg), Finnsjön (Beberg) och Gideå (Ceberg). Samtliga platser är relativt kustnära och Äspö ligger i skärgårdsmiljö, se figur 4-1.



Figur 4-1. Data för de fiktiva försvarsplatserna Aberg, Beberg och Ceberg är hämtade från Äspö, Finnsjön och Gideå.



Figur 4-2. Schematisk illustration om hur informationen överförs mellan olika geovetenskapliga modeller och hur dessa modeller utnyttjas vid värdering av säkerheten och lämpligheten hos en förvarsplats.

Den geologiska modellen är att betrakta som grunden för den geovetenskapliga beskrivningen och utgör det underlag, som de övriga modellerna bygger på (se figur 4-2). Den beskriver jordtäcket och bergets uppbyggnad med avseende på bergarter, sprickzoner och andra strukturer. Den geologiska modellen bildar bland annat det geometriska underlag, från vilket förvarets utformning kan bestämmas. Den geologiska beskrivningen utnyttjas som regel inte direkt i en säkerhetsanalys utan används i första hand som underlag vid bergmekanisk, hydrologisk, termisk och geokemisk modellering av platsen /Andersson et al, 1996/.

Nedan följer geologiska beskrivningar för de tre platserna Aberg, Beberg och Ceberg. Då dessa platser har undersökts vid olika tillfällen och av olika geologer finns det skillnader i terminologin i beskrivningen mellan de olika platserna, särskilt vad beträffar olika typer av strukturer i berggrunden. Observera att i denna rapport görs ibland ingen skillnad på tolkade och verifierade sprickzoner i den geologiska modellen. Detta gäller även till viss del för de vattenförande egenskaper som har ansatts dem. För uppgifter om vad som ligger till grund för bedömningar om enskilda sprickzoners existens och egenskaper hänvisas till underlagsrapporter från respektive undersökningsområde.

Generellt finns det osäkerheter i insamlandet av data och tolkning av resultat som är en naturlig del av alla geovetenskapliga undersökningar. Osäkerheterna kan hänföras, dels till de begränsningar som finns vid insamlandet av data från undersökningsområdet, dels till de fel och osäkerheter som finns i den samlade databasen och tolkningen av insamlade data samt dels vid konceptualiseringen av berget till en lämplig modell. Beroende på att undersökningsmaterialet varierar från plats till plats samt även på att syftet med utförda platsundersökningar kan vara olika, tillkommer ytterligare osäkerheter vid jämförelse av geografiskt skilda platser.

De beskrivningar av osäkerheter som ges nedan är sammanfattande och hänvisar huvudsakligen till andra rapporter.

4.2 Geovetenskapligt undersökningsmaterial

Undersökningarna på de tre platserna Äspö, Finnsjön och Gideå, som tjänar som underlag för de fiktiva platserna Aberg, Beberg och Ceberg, har utförts i olika etapper från början av 1970-talet. Omfattningen av undersökningarna varierar, till viss del beroende på att de är utförda med olika syften. Undersökningsmaterialet, som är mest omfattande för Äspö (Aberg) och minst för Gideå (Ceberg), sammanfattas i tabell 4-1 och i tabell 4-2.

På Äspö har SKB under tidsperioden 1986–1995 byggt ett berglaboratorium på 500 m djup med avsikt att studera, forska och utföra demonstrationsförsök på förvarsdjup i ett tidigare ostört område. En stor mängd data har samlats in före och under byggandet av underjordsanläggningen. Äspölaboratoriet används idag i forskningssyfte och data om

Tabell 4-1. Omfattning av undersökningar i regional skala utförda vid Äspö, Finnsjön och Gideå/ efter Saksa och Nummela, 1998/.

Undersökningsmetod	Äspö	Finnsjön	Gideå
Topografi	5 m konturkarta	12,5 m konturkarta	5 m konturkarta
Lineamentsanalys	Satellitbildsanalys och flygbildsanalys inklusive reliefkartor (upplösning 5–50 m)	Satellitbildsanalys och flygbildsanalys inklusive reliefkartor	Flygbildsanalys och topografikartor
Litologi–tektonik	1:50 000 baskarta med bergarter och större sprickzoner, detaljkartering ovan jord 1:10 000, under jord 1:500	1:50 000 baskarta med bergarter och större sprickzoner	1:50 000 baskarta med bergarter och större sprickzoner
Sprickkartor	20×30 km sprickkartor samt över Simpevarps-halvön (ca 2×2 km)	Saknas	5 lokalområdeskartor samt undersökningar i Gissjötunneln
Provboringar utanför detaljundersökningsområdet	2 kärnborrhål och 7 hammarborrhål	Borrhål i SFR i Forsmark och i regionala lineament (Singö-förkastningen)	Saknas
Flyggeofysik	Flygmagnetisk karta	Saknas	Saknas
Markgeofysik	Magnetisk och gravimetrisk kartläggning, VLF-undersökning, refraktionsseismik-undersökning	Saknas	Magnetisk kartläggning, slingram- och VLF-undersökningar

Tabell 4-2. Omfattning av undersökningar i lokal skala utförda vid Äspö, Finnsjön och Gideå /efter Saksa och Nummela, 1998/.

Undersökningsmetod	Äspö	Finnsjön	Gideå
Topografi	1–2 m konturkarta	2 m konturkarta	2 m konturkarta
Lineamentsanalys	1:10 000 och 1:4000 karta från satellit-, DTM- och konturkartor	1:20 000 flygfoto samt som IR-foto	Finns över undersökningsområdet samtolkat med strukturgeologi
Berggrundskartor	Finns över områdena Äspö, Ävrö, Bussvik, L. Laxemar och Glostad i skala 1:10 000. Detaljundersökningar i skala 1:10 000.	Finns över ett ca 6–30 km ² område, undersökningsområdet är redovisat i detalj	Finns över ett ca 6 km ² område
Sprickkartor	Tre profiler samt i hållkartor över Äspö	Två profiler samt i hållkartor	Två profiler genom undersökningsområdet
Kärnborrhål (antal, maxdjup)	18 st, 993 m	11 st, 691 m	13 st, 701 m
Hammarborrhål (antal, maxdjup)	37 st, 175 m	20 st, 459 m	24 st, 153 m
Markgeofysik, undersökningsområde	5 km ²	1,6–2,4 km ²	5 km ²
Markgeofysiska undersökningar	Slingram, VLF, markradar, resistivitets- och magnetundersökningar samt seismiska undersökningar	Slingram, VLF, resistivitets- och magnetundersökningar samt seismiska undersökningar	Slingram, VLF, resistivitets- och magnetundersökningar samt seismiska undersökningar
Borrhålsgeofysiska undersökningar	Radar, flödesloggning, naturlig gammastrålning och seismiska undersökningar	Radar, naturlig gammastrålning, flödesloggning och resistansmätning i sprickzoner	Radar, naturlig gammastrålning, flödesloggning, resistansmätningar i sprickzoner och seismisk tomografi

bergmassan samlas kontinuerligt in i olika forskningsprojekt i laboratoriet. I SR 97 används dock endast data från förundersökningarna samt från byggskedet.

Finnsjön undersöktes under åren 1977–1978 inom ramen för KBS-projektet i syfte att visa på ur geologisk synpunkt tänkbara platser för slutförvaring av högaktivt avfall /KBS, 1977; KBS, 1978/. Under 1985–1991 gjordes studier av en flackt liggande sprickzon för att erhålla detaljkunskap om flacka zoners betydelse för transport av grundvatten och i grundvattnet lösta ämnen. Dessutom har området bland annat utnyttjats för flera forskningsprojekt, tester av nya borrhålsinstrument samt en studie av nedfall från Tjernobyl /Ittner, 1989/.

I Gideå utfördes motsvarande KBS-studier under åren 1981–1983. Undersökningarna har kompletterats med några nya undersökningar under 1990-talet samt en noggrann genom-

gång av ursprungsdata, där nya strukturgeologiska och geohydrologiska beskrivningar har tagits fram /Hermanson et al, 1997/.

4.3 Geologisk beskrivning

4.3.1 Aberg

Regionalskala

Det regionala undersökningsområdet omfattar ca 170 km², se figur 4-3.

Topografi

Det regionala området kring Äspö är en låglänt kustnära terräng med en höjdskillnad på omkring 30 m från havsnivån till områdets västra del. Området är skogtäckt med tunt eller inget jordtäckte på höjder samt mossar eller kärr i sänkor.

Bergarter

Berggrunden i regionen domineras av ca 1800–1770 miljoner år gamla graniter som gemensamt benämns Smålandsgranit. Underordnat finns större basiska intrusioner, som gabbro och diorit, liksom mindre brottstycken av äldre basiska bergarter. Yngre graniter, med en ålder av ca 1400 miljoner år, har trängt in i det äldre granitbältet och förekommer som större massiv både norr om och söder om Äspö. I regionen förekommer även ofta gångar och massiv av finkornig granit.

Regionala sprickzoner

Regionen domineras av nordvästliga, nordostliga och nord-sydliga brant stående regionala sprickzoner (benämns här strukturer) med en horisontell utbredning av mer än 10 km (figur 4-3) /Rhén et al, 1997b/. Dessa sprickzoner tolkas ofta ha en bredd på hundratal meter med en central uppsprucken del som kan vara upp till ett tiotal meter bred. De nord-sydliga regionala sprickzonerna är förmodligen bland de senast bildade och tolkas vara de mest vattenförande enligt resultat från geofysiska mätningar.

Det kan noteras att SGU genomför regional tolkning av deformationszoner i pågående förstudier för Oskarshamns kommun. Resultaten från denna tolkning har inte kunnat tas med i den föreliggande rapporten.

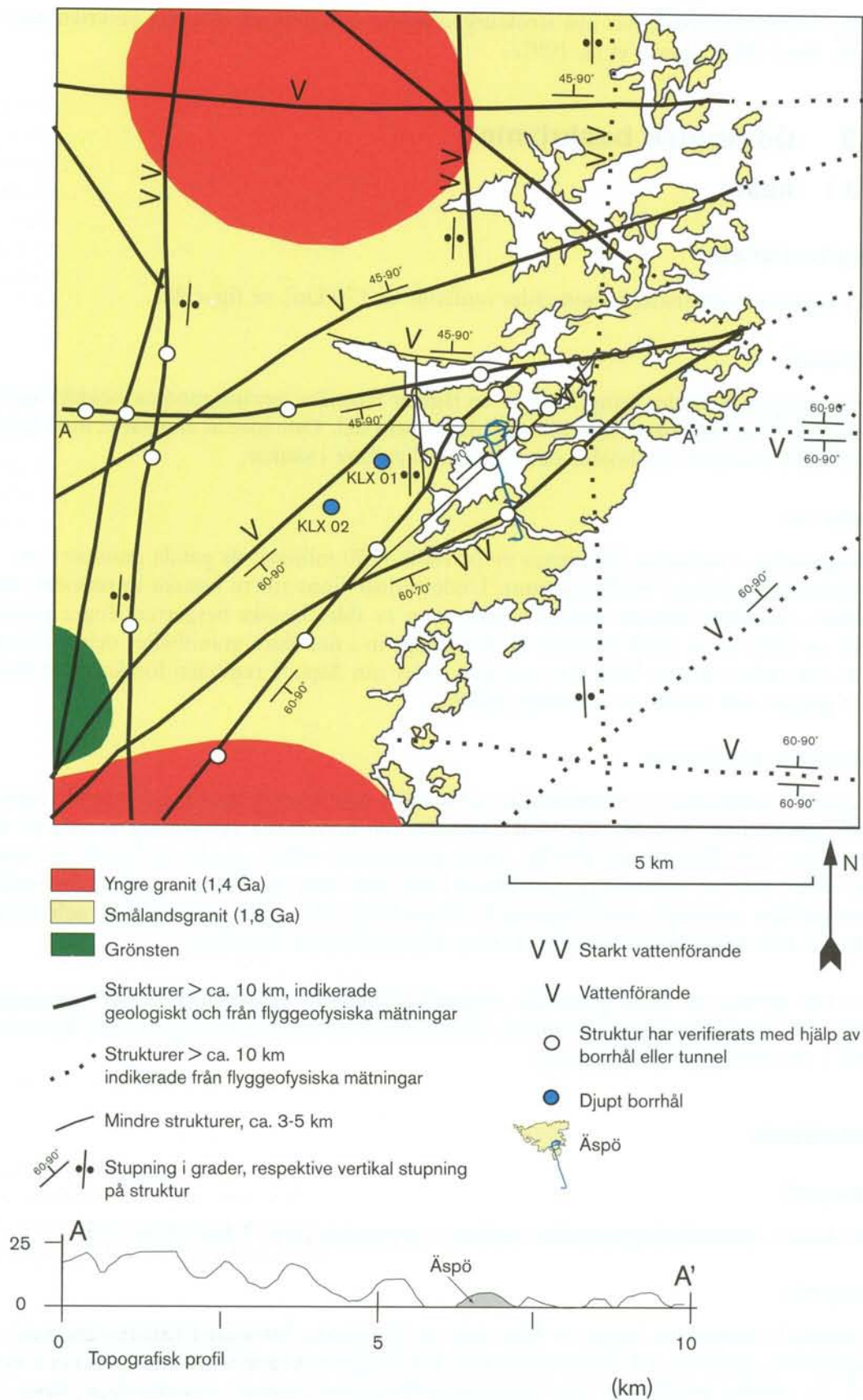
Lokalskala

Topografi

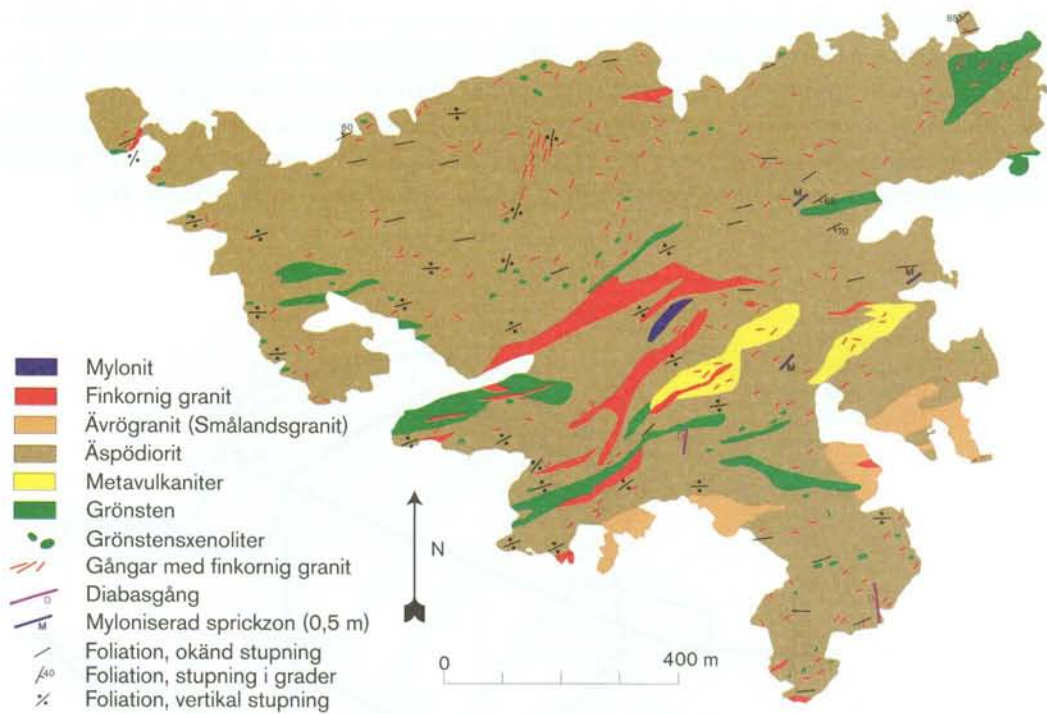
Det lokala undersökningsområdet omfattar ett område på ca 1 km² (figur 4-4).

Bergarter

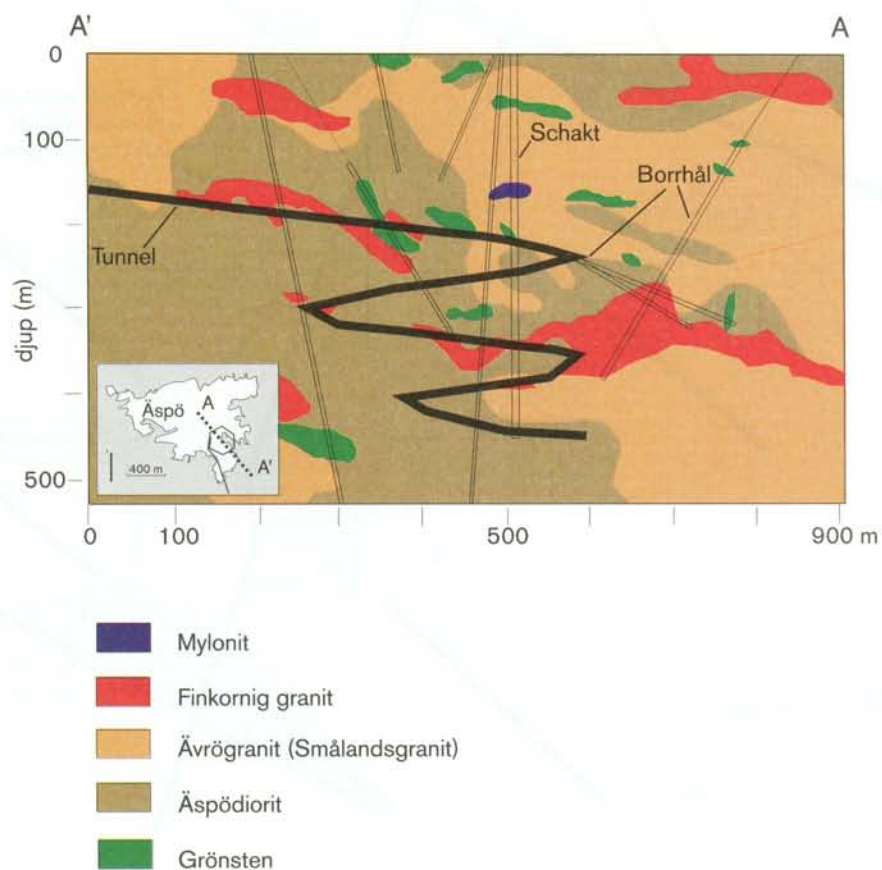
I lokalskala domineras berget av fyra typer av bergarter, Ävrögranit (Smålandsgranit), Äspödiorit, grönsten och finkornig granit. En berggrundskarta över Äspö återges i figur 4-4. En vertikal profil som visar bergartsfördelningen i delar av sydöstra Äspö, finns i figur 4-5.



Figur 4-3. Regional geologisk beskrivning över Äspö /efter Rhén et al, 1997b). Topografisk profil i östvästlig riktning /efter Walker et al, 1997/.

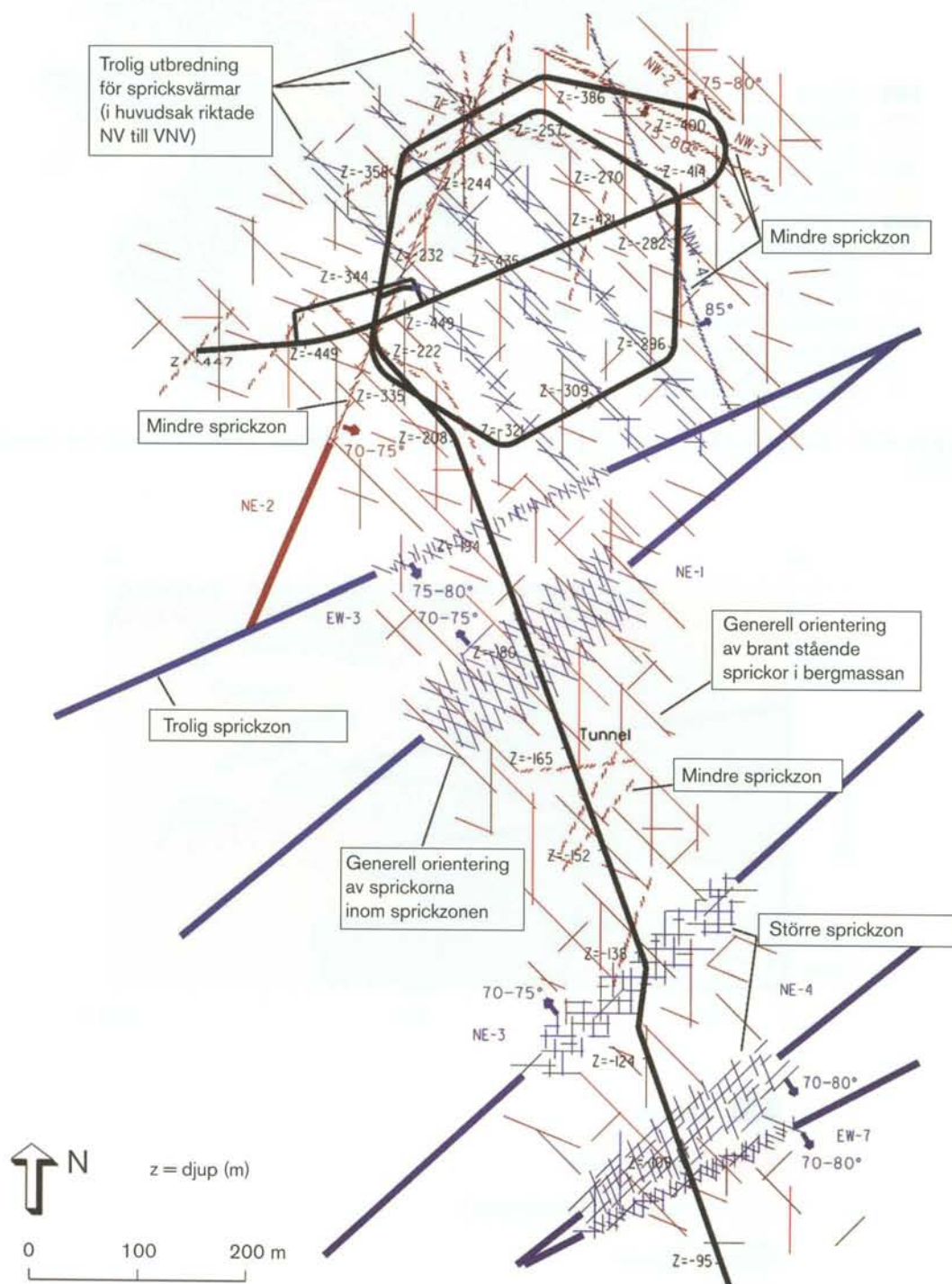


Figur 4-4. Berggrundskarta över Äspö /efter Kornfält och Wikman, 1988; Wikman och Kornfält, 1995/.



Figur 4-5. Vertikal profil av bergarter i sydöstra Äspö baserad på borrhåls- och tunneldata /efter Rhen et al, 1997b/.

Både Äspödiorit och Ävrögranit kan ses som varianter av Smålandsgranit /Kornfält och Wikman, 1988; Wikman och Kornfält, 1995/. Äspödioriten är åldersbestämd till ca 1 800 miljoner år och dominerar bergartsfördelningen jämfört med den något yngre Ävrögraniten. Äspödioriten har en något mera basisk karaktär (varierar mellan granodiorit, kvartsmonzonit och kvartsdiorit) än Ävrögraniten och är en vanligtvis grå till gråröd. Ävrögraniten skiljer sig från Äspödioriten genom sin relativt ljusa, rödare färg.



Figur 4-6. Strukturgeologisk modell över undersökningsområdet /efter Rhén et al, 1997a/.

Grönstenar finns som utdragna brottstycken i Ävrögranit och Äspödiorit, vanligen utsträckta i foliationens riktning. De större förekomsterna av grönsten är ofta genomträngda av finkornig granit.

Gångar eller oregelbundna kroppar av finkornig granit är vanligt förekommande, särskilt i Äspödioriten. Gångarna har vanligtvis en nordostlig orientering. Sprickfrekvensen är betydligt högre i den finkorniga graniten än i de andra bergarterna. Kontakten mellan finkorniga graniten och Äspödiorit är vanligen diffus och väl sammansmält.

Foliationen på Äspö har en nordostlig till ostnordostlig riktning och är brantstående.

Sprickzoner och sprickor

Sprickzonkartor baserade på lineamentsstudier och geofysiska mätningar visar en förtätning av sprickzoner i och kring Äspö.

Sprickzonerna i lokal skala har av Stanfors och Stille /1997/ indelats i större och mindre zoner. Med större sprickzoner menas de som har en vidd av mer än 5 m, mindre zoner har en mindre vidd än 5 m. Totalt har 16 sprickzoner definierats inom undersökningsområdet (figur 4-6). En förteckning över dessa finns i tabell 4-3. Sprickzonerna domineras av större zoner med öst-västlig och nordöstlig riktning och mindre zoner med nordvästlig till nordostlig riktning, se figur 4-6.

Den största enskilda zonen är en regional nordostlig plastisk deformationszon som skär tvärs över ön. I den geologiska modellen benämns denna zon EW-1. Zonen är mer än 100 m bred och är tydligt indikerad av geofysiska mätningar och i borrhål. Den känne-

Tabell 4-3. Större sprickzoner i Äspö /efter Rhén et al, 1997b/. Sprickzonsvidd inom parentes anger uppskattad, ej observerad medelvidd. T = transmissivitet, S = storativitet.

Sprickzon	Stupning	Vidd (m)	T geometriskt medelvärde (m ² /s)	S (log T) (-)
EW-1N	88 SO	(30)	5,2·10 ⁻⁷	1,6
EW-1S	78 SE	(30)	1,2·10 ⁻⁵	1,2
EW-3	79 S	15	1,7·10 ⁻⁵	0,5
EW-7	81 SO	(10-15)	1,5·10 ⁻⁵	1,3
NE-1	70-75 NV	30	2,2·10 ⁻⁴	0,5
NE-2	77 SO	5	1,2·10 ⁻⁷	2,1
NE-3	70-80 NV	50	3,2·10 ⁻⁴	0,5
NE-4	71-78 SO	40	3,1·10 ⁻⁵	0,8
NW-1	30 NO	(10)	4,1·10 ⁻⁷	1,1
NNW-1	(vertikal)	(20)	8,6·10 ⁻⁶	0,8
NNW-2	(vertikal)	(20)	2,4·10 ⁻⁵	1,1
NNW-3	(vertikal)	(20)	2,0·10 ⁻⁵	-
NNW-4	85 NO	10	6,5·10 ⁻⁵	1,5
NNW-5	(vertikal)	(20)	4,0·10 ⁻⁶	0,8
NNW-6	(vertikal)	(20)	1,4·10 ⁻⁵	-
NNW-7	85 NO	(20)	7,5·10 ⁻⁶	0,9
NNW-8	(vertikal)	(20)	8,4·10 ⁻⁶	0,1

tecknas av stark förskiffring och meterbredda myloniter. Äspölaboratoriet med tillfartstunnel är beläget söder om zonen.

Sprickzonerna NE-1, NE-3, EW-3 och NE-4 är alla tydligt identifierade genom geofysiska mätningar på markytan, i borrhål och i tunnlar. Zonerna karakteriseras av kraftigt uppspräckta, 10–40 m breda centrala partier, mer eller mindre vattenförande i samband med förekomst av finkornig granit, grönsten och diorit. NE-2 är en brant stående mindre zon som följer en tidigare mylonit/plastisk deformationszon och varierar i vidd mellan 1 och 5 m.

De mindre nordvästliga-nordostliga sprickzonerna är brantstående och med en vidd som vanligen är mindre än 5 m. De har även en mindre utbredning än de ovannämnda zoner- na. De är lokalt mycket vattenförande och består vanligen av en eller flera zoner i grupp.

Förutom ytliga avlastningssprickor har endast två mindre flackt liggande sprickzoner dokumenterats från undersökningarna /Rhén et al, 1997a/. De har båda en vidd på ca 0,5 m och är synliga ett hundratal meter längs med tunneln.

Antalet uppmätta sprickor uppgår till över 25 000. Av dessa har ca 10 000 karterats på hållar och i diken. Resten har karterats i samband med underjordslaboratoriet. Spricksys- temet är uppdelat i fyra sprickgrupper med brantstående sprickor i nord-syd, nordnord- väst och västnordväst samt ett flackt liggande spricksystem. Vattenförande sprickor är företrädesvis branta och stryker västnordväst. Mineralfyllningar i dessa sprickor består företrädesvis av epidot, kvarts och järnoxider. Längden på sprickor uppmätta i berghäll och tunnelvägg är oberoende av bergart.

4.3.2 Beberg

Regionalskala

Topografi

Finnsjön ligger strax norr om Österbybruk, i en relativt låglänt terräng med flacka berg- hållar, myrar och mindre insjöar (figur 4-7). I den omgivande regionen varierar höjden över havet mellan 0 och 60 m. Medelhöjden i regionen är ca 30 m.

Bergarter

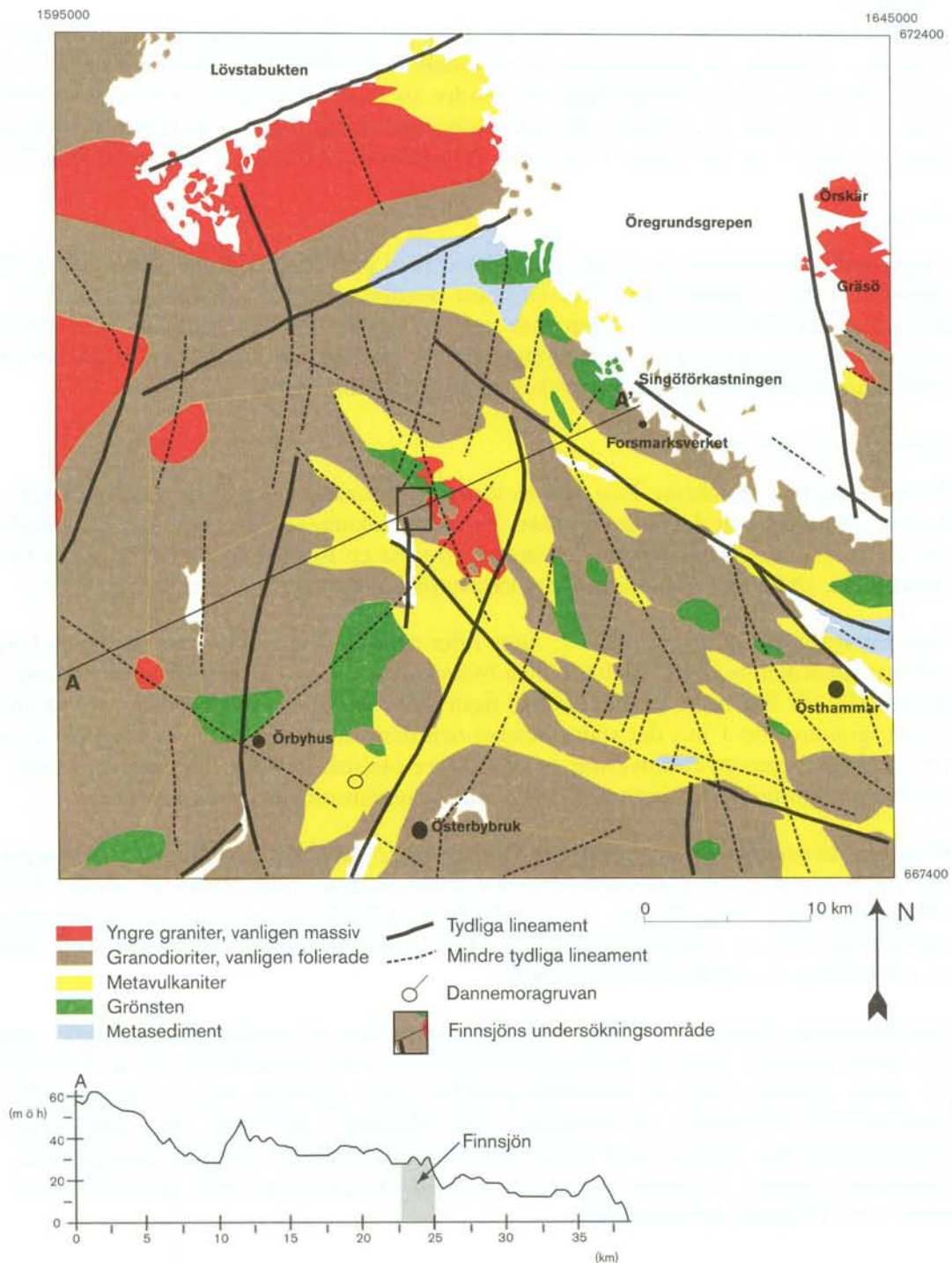
De äldsta bergarterna i regionen består av ca 1900–1880 miljoner år omvandlade sedimentära och vulkaniska ytbergarter. I de vulkaniska bergarterna är det vanligt med mineraliseringar av främst järnmineral. Grubvrytning var tidigare vanligt (t ex Danne- mora gruva) men idag har denna verksamhet upphört. De sedimentära och vulkaniska bergarterna intruderades under samma tidsperiod av gabbro, diorit och granitoider (tona- lit, granodiorit och granit). Alla dessa bergarter har även intruderats av basiska gångar. Under tiden ca 1850–1780 miljoner år sedan skedde huvuddelen av den plastiska deformationen, dvs bildning av mer eller mindre stark foliation, lineation och veckning av berggrunden. Under denna deformation skedde omvandling av bergarterna och vissa började smälta. Dessa smältor stelnade i form av yngre granit, aplit och pegmatit.

Sprickzoner och sprickor

Denna redogörelse baseras främst på en studie av Ahlbom och Tirén, 1991. Som tidigare nämnts har Sveriges geologiska undersökning nyligen presenterat en tolkning av plastiska

och spröda deformationszoner i regionen (Översiktsstudie av Uppsala län). Av tidsskal har dessa tolkningar inte kunnat inkluderas i SR 97.

Regionala sprickzoner bildar ett blockliknande nätverk (figur 4-7). Markeytan i de block som begränsas av nordnordostliga sprickzoner lutar mot ostsydost medan markeytan lutar åt nordost och i de block som begränsas av nordvästliga sprickzoner. Denna blocklutning tolkas vara ett resultat av ett system av regionala förkastningar med brant lutning nära markeytan /Ahlbom och Tirén, 1991/.



Figur 4-7. Regional geologisk beskrivning över Finnsjön /efter Ahlbom och Tirén, 1991/. Topografisk profil i nordöstlig riktning /efter Walker et al, 1997/.

Endast en av de regionala sprickzonerna, den s k Singö-förkastningen, har studerats i detalj i samband med undersökningarna för kylvattentunnlar till Forsmark kärnkraftverk och inför byggandet av slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR) i Forsmark. Singö-förkastningen är en brantstående ca 100–200 m bred zon med en komplex inre struktur bestående av i huvudsak myloniter och en ca 15 m bred, kraftigt uppspräckt kärna.

Lokalskala

Topografi

Undersökningsområdet definieras som en 6 km² rektangulär region omedelbart norr om Finnsjön. Området är genomkorsat av regionala västnordvästliga lineament och har en jämn topografi med en höjdskillnad på mindre än 15 m. Berghällar är relativt vanliga, men ca 85 procent av markytan är täckt av kvartära avlagringar av morän och torvmossar. Sand påträffas i en del sänkor i Gåvastbo /Gustafsson et al, 1987; Ahlbom et al, 1991/.

Bergarter

Berggrunden domineras av en grå granodiorit med ett djupgående på minst 700 m (djupaste borrhålet). Granodioriten har en brant stående nordvästlig foliation, figur 4-8. Gångar av basiska bergarter, pegmatiter och apliter skär igenom granodioriten. Äldre omvandlade sura vulkaniter förekommer väster och söder om området. Basiska bergarter förekommer som utdragna brottstycken längs med foliationen.

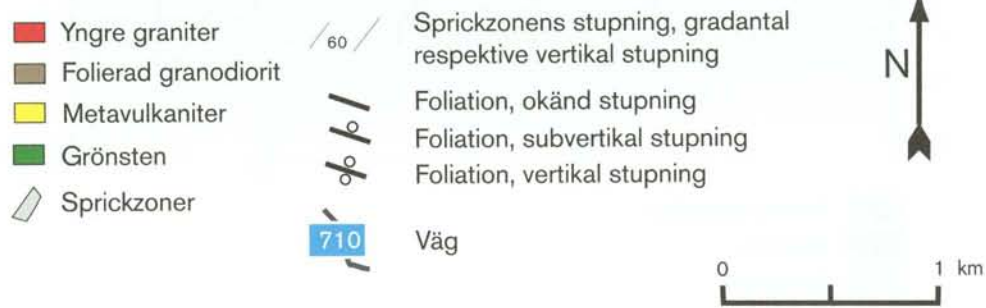
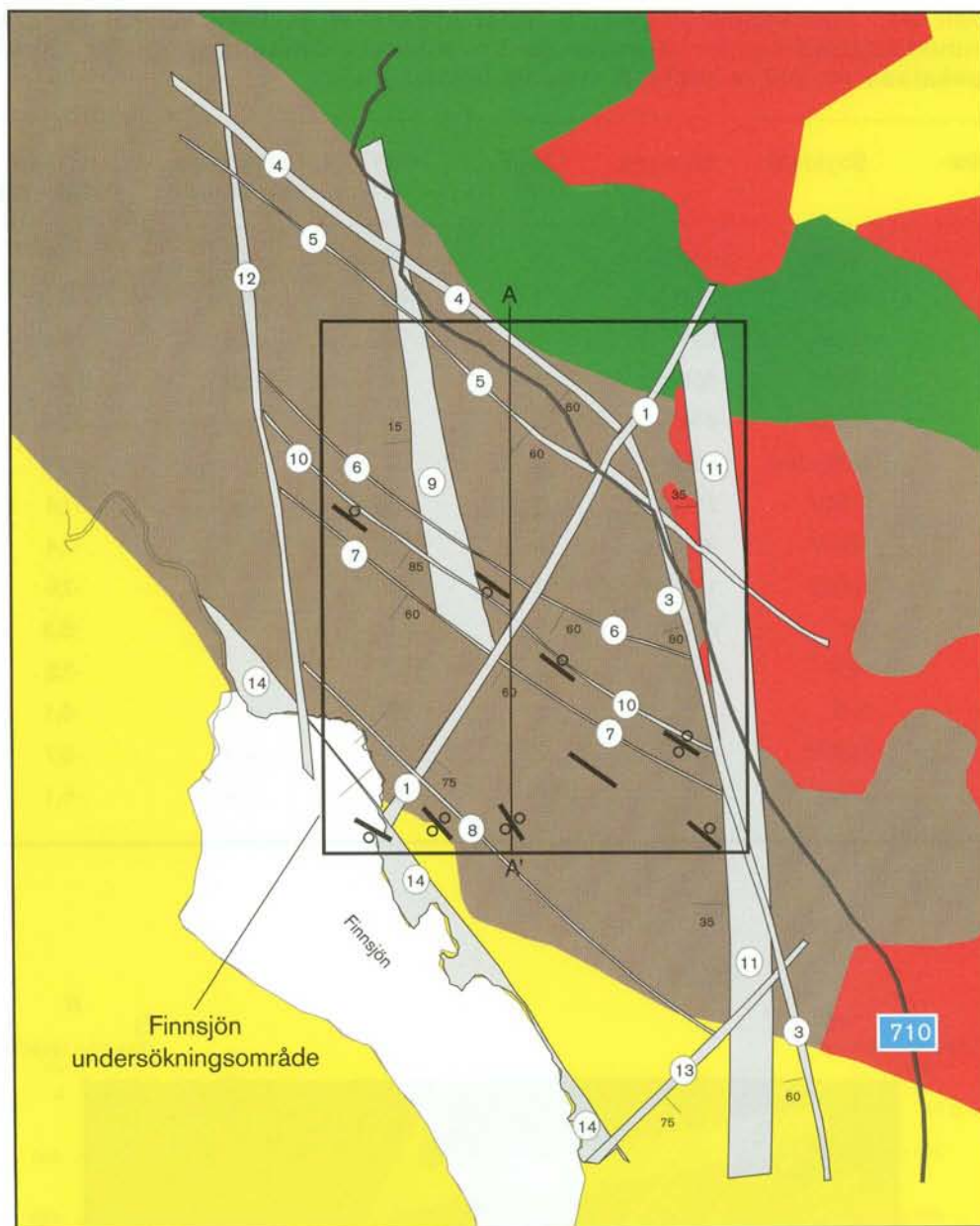
Sprickzoner och sprickor

En brantstående sprickzon, Zon 1, som löper från nordost till sydväst delar Finnsjön i två halvor, det norra och det södra blocket. Zon 1 är dokumenterad till ca 5–6 km längd och har en vidd av ca 20 m. Borrhål genom zonen visar en förhöjd sprickfrekvens och en omvandlad, rödfärgad granodiorit. Ett karaktäristiskt mineral i zonen är bergbeck.

En subhorisontell sprickzon, Zon 2, finns i det norra blocket. Zonen är ca 100 m bred och har identifierats i nio borrhål i vilka överytan på zonen har påträffats på ett djup av mellan 100 till 295 m (se vertikalprofil i figur 4-9). Det finns inga indikationer på att Zon 2 skär igenom Zon 1 in i det södra blocket och den har inte påträffats i berghäll. Zon 2 tros ha bildats genom reaktivering av en tidigare plastisk struktur. De mest intensivt spruckna sektionerna förekommer längs zonen avgränsningar uppåt och nedåt.

Förutom de ovannämnda zonerna har ytterligare 12 sprickzoner definierats i Finnsjön. De sammanfattas i tabell 4-4 och figur 4-8. Flera av dessa sprickzoner är mindre kända, särskilt inom det södra blocket. I det norra blocket förekommer även mindre skjuzoner regelbundet med en nordvästlig riktning. Dessa zoner är vanligen ca 1–5 m breda och har en utbredning av något hundratal meter.

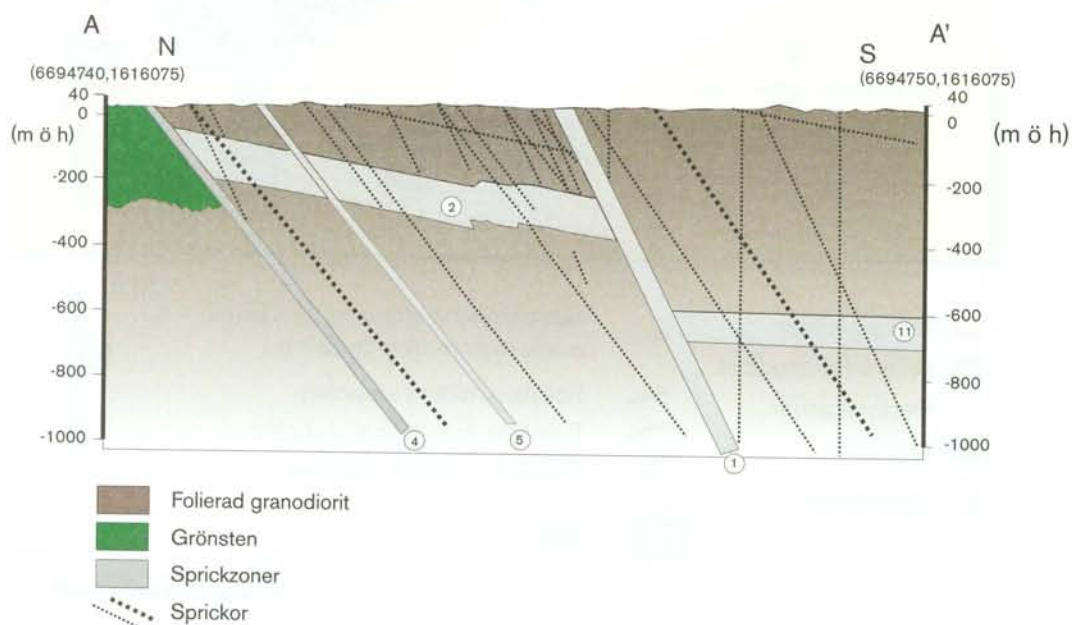
Spricksystemet domineras av brant stående nordostliga och nordvästliga sprickor respektive flackt liggande sprickor. Medelsprickfrekvensen i det södra blocket är ca 3 sprickor per meter uppmätt längs två vinkelräta profiler utmed markytan och i de översta 100 m i kärnborrhålen /Olkiewicz och Arnefors, 1981; Ahlbom et al, 1992/. Ingen minskning av sprickfrekvens har noterats mot djupet. I det norra blocket är däremot den uppmätta frekvensen endast 1,5 sprickor per meter baserad på mätningar i håll. Borrhål i detta block visar liknande sprickfrekvens.



Figur 4-8. Berggrundskarta och generaliserad bild av sprickzoner över Finnsjön /efter Ahlbom och Tirén, 1991 och Ahlbom et al, 1992/.

Tabell 4-4. Sprickzoner i Finnsjön /efter Ahlbom et al, 1992; Walker et al, 1997/. Konduktivitetens värden är baserade på 3 m manschettmätningar, dock i vissa fall uppskalade till 100 m skala. K = konduktivitet (m/s).

Sprickzon	Strykning	Stupning	Längd (km)	Vidd (m)	100 m skala median log K	3 m skala median log K
1	N30O	75SO	5	20	-4,3	-5,7
2	N28V	16SV	1,5	100	-5,2	-6,3
3	N15V	80V	5	50	-5,6	-6,8
4	N50V	65SV	1	10	-5,2	-6,4
5	N50V	60SV	5	5		-6,4
6	N55-65V	60SV	2	5		-8,4
7	N55V	60SV	2	5		-7,4
8	N50V	90	3	5		-7,4
9	N10V	15V	2	50		-7,9
10	NV	85SV	2,5	5		-8,3
11	N5V	35V	2	100		-7,2
12	N-S	90	6	25	-4,9	-6,1
13	N30O	75SO	7	20	-4,3	-5,7
14	NV	90	>50	100	-4,9	-6,1



Figur 4-9. Nord-sydlig vertikalprofil genom undersökningsområdet /efter Ahlbom och Tirén, 1991/. För profilens sträckning se profilen A-A' i Figur 4-8.

Nordostliga sprickor är mest frekvent förekommande. Sprickväggarna, som ofta är rödfärgade av tidigare hydrotermala lösningar, är fyllda med järnrik, 1,2 miljarder år gammal prehnit /Wickman et al, 1983/. Den nordvästliga sprickgruppen är äldre än den nordostliga. Dessa sprickor har troligen bildats genom reaktivering av tidiga plastiska strukturer och uppvisar de längsta sprickorna i området. De flacka sprickorna lutar företrädesvis åt sydväst. I borrhåren förekommer ofta sprickmineralen klorit, kalcit och laumontit.

4.3.3 Ceberg

Regionalskala

Topografi

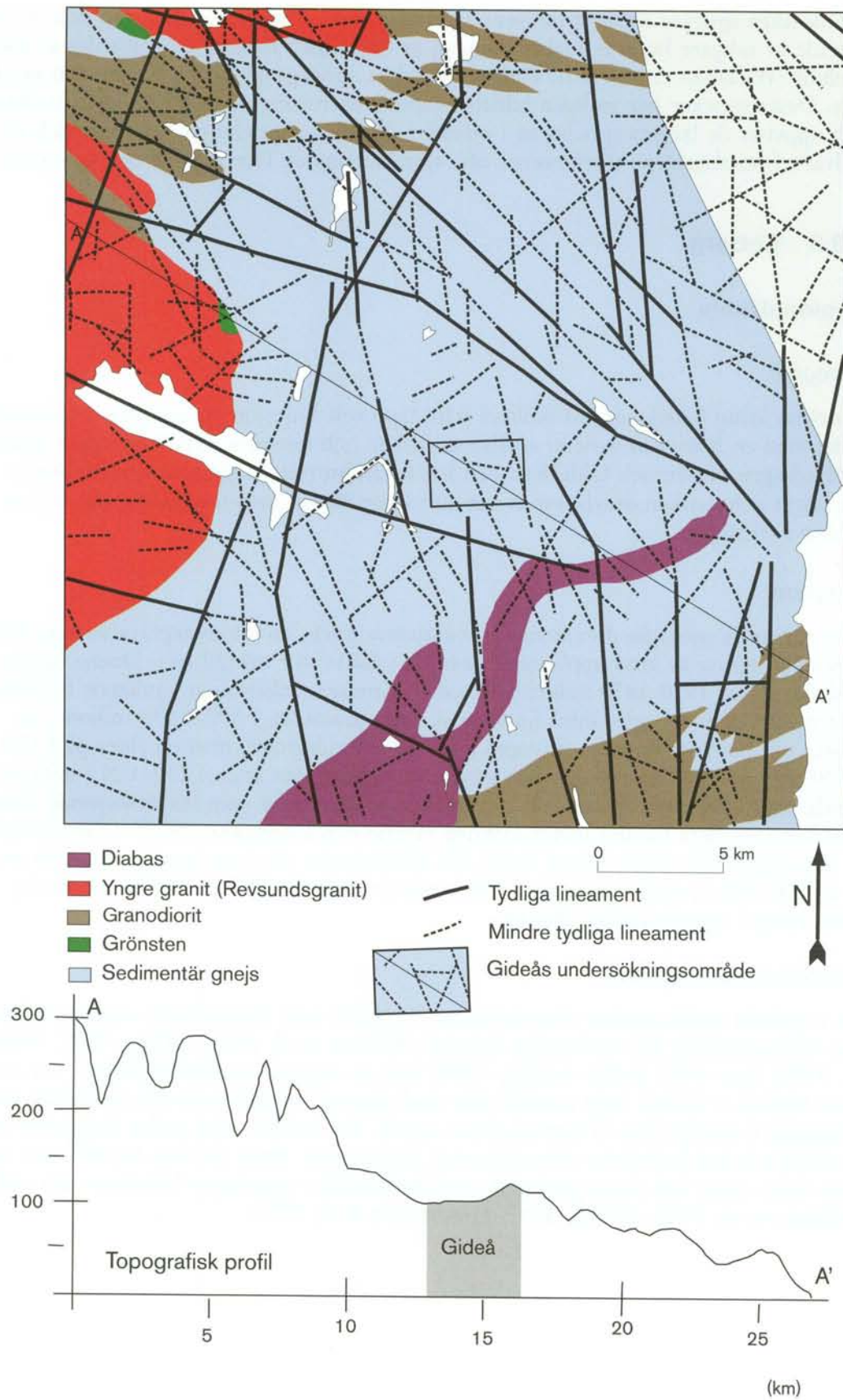
Området kring Gideå har, till skillnad från Äspö och Finnsjön en signifikant topografisk relief med en höjd som varierar mellan ca 300 m och havsnivå. Området ligger mellan vattendragen Husån och Gideälven och har lokalt en relativt jämn topografi. Det är skogtäckt och marken överlagras av ett tunt lager morän med torvmossar och myrar i sänkor i terrängen.

Bergarter

Den regionala geologin domineras av sedimentär gnejs, en sk metagråvacka som bildats genom avlagring av sand uppblandad med en relativt stor mängd lera. Denna bergart bildades för ca 1950–1870 miljoner år sedan. Gnejsens foliation är vanligtvis brantstående mot nordväst. Söder om Gideå finns en sk äldre granit, ca 1 890–1 850 miljoner år. Väster om området finns en sk yngre granit (Revsundsgranit) med en ålder på 1 800–1 770 miljoner år. Lagergångar och gångar av diabas, som är ca 1 270–1 215 miljoner år gamla, skär igenom berggrunden. Lagergångarna uppträder som flackt stupande skivor som kan vara flera hundra meter mäktiga /Welin och Lundquist, 1975/. Diabasgångarna är ofta någon eller några meter breda. De förekommer ofta som grupper med ett avstånd av ca 200–300 m mellan gångarna. Gångarna är brantstående och har en ost-västlig orientering i regionen kring platsen.

Sprickzoner och sprickor

De regionala sprickzonerna (lineamenten) är tolkade som brantstående med huvudsakligen västnordvästlig till nordvästlig riktning /Ahlbom et al, 1983, Askling, 1997, Walker et al, 1997/, figur 4-10. Enligt Askling /1997/ kan en regional sprickzon finnas i det nordöstra hörnet av Gideå. Inga borrhål skär dock igenom sprickzonen och geofysiska undersökningar i området har ej kunnat påvisa zonen. Ett mindre antal andra lineament korsar området och kan korreleras till existerande sprickzoner. Trots att flera borrhål skär igenom dessa zoner bör deras geologiska och hydrauliska egenskaper betraktas som osäkra /Ahlbom et al, 1983; Askling, 1997, Hermanson et al, 1997/.



Figur 4-10. Regional geologisk beskrivning av Gideå /efter Ahlbom et al, 1983; SGU, 1981; Walker et al, 1997/. Topografisk profil i nordvästlig riktning /efter Walker et al, 1997/.

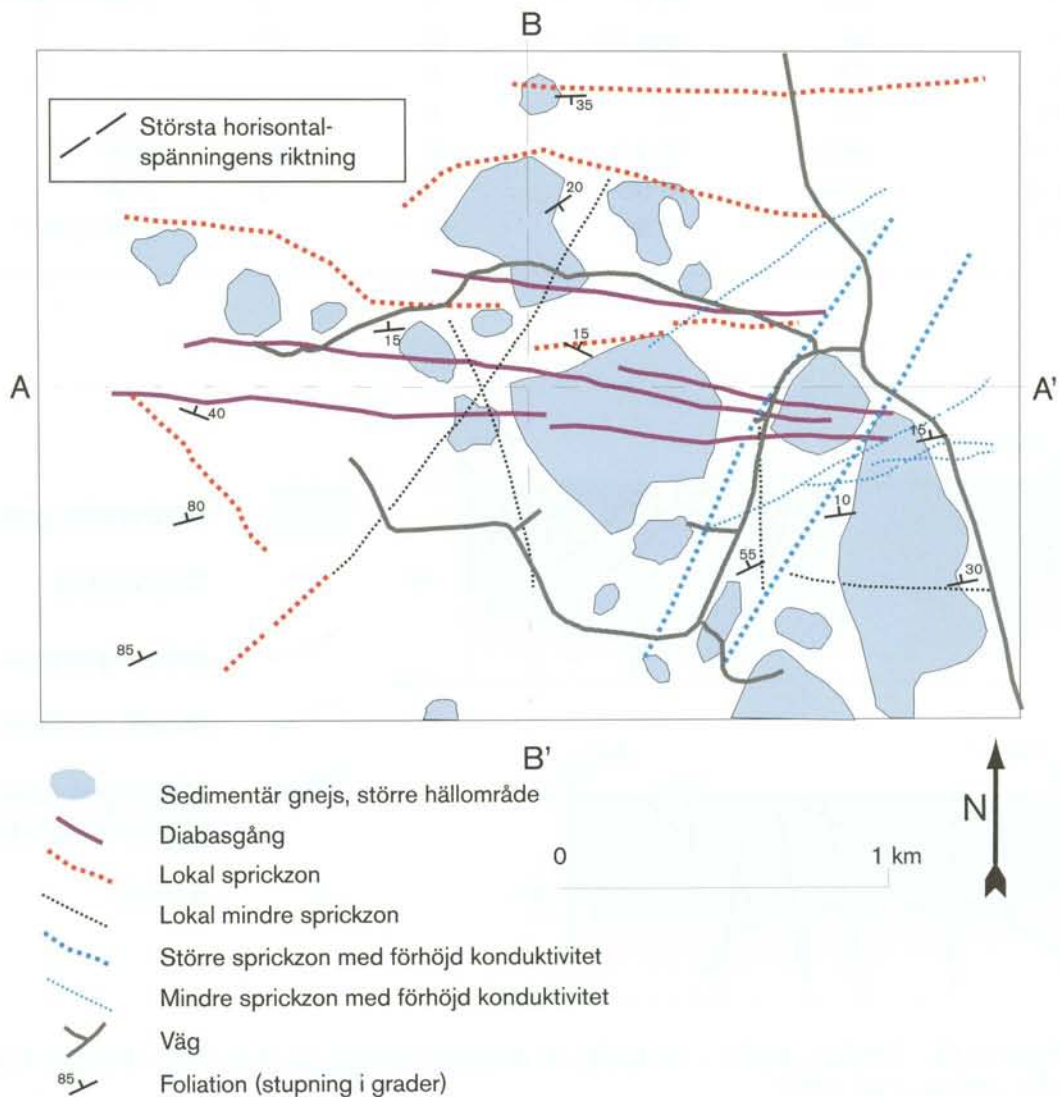
Lokalskala

Topografi

Undersökningsområdet är ett 3×2 km stort område med relativt jämn topografi (ca 150 m över havet). Platsen ligger mellan två vattendrag, Gideälven och Husån. Markytan är till ca 40 procent täckt av glaciala moränavlagringar. I sänkor är moränen överlagrad av sand till ca 30 procent av undersökningsområdet. Berghällar täcker ca 25 procent av markytan. I övrigt täcks området av torvmossar.

Bergarter

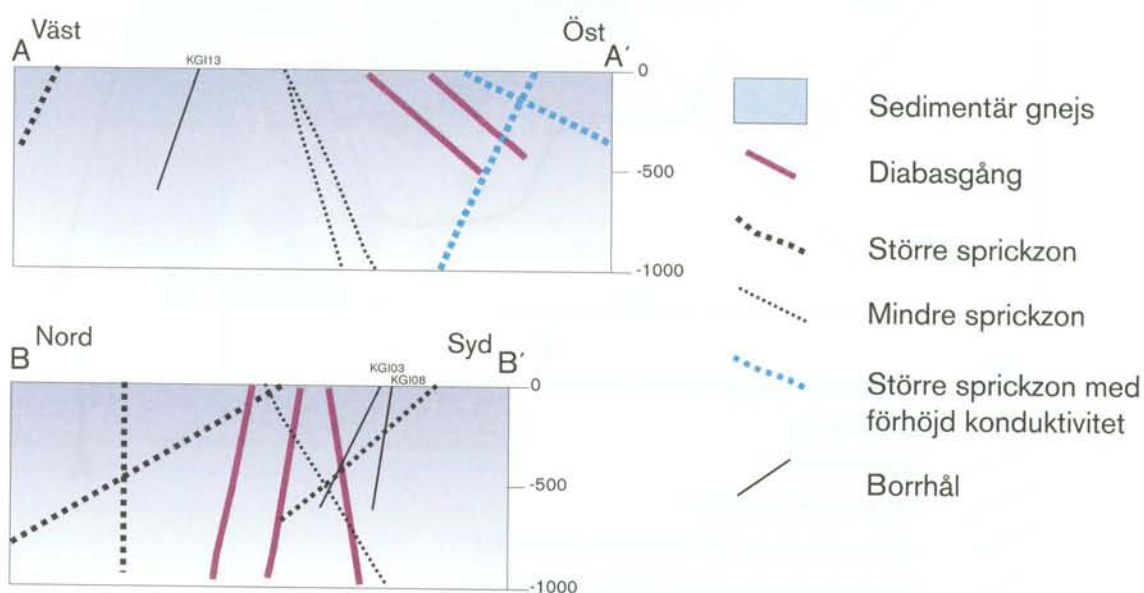
Gideå domineras av sedimentär gnejs (metagråvacka) samt partier av äldre granit. Genom denna berggrund skär vertikala öst-västliga diabasgångar som kan vara upp till 15 m breda, se figur 4-11. Tjockare lagergångar av diabas har troligen tidigare överlagrat platsen. Även om inga lagergångar har påträffats ner till 700 m djup utesluter Saksa och Nummela /1998/ inte att sådana kan finnas på större djup.



Figur 4-11. Strukturgeologisk modell över Gideå /efter Ahlbom et al, 1991, modifierad av Hermanson et al, 1997/.

Tabell 4-5. Sprickzoner i Gideå /efter Hermanson et al, 1997/. Konduktivitetsvärdet är baserade på 25 m manschettmätningar, uppskalade till 100 m skala /efter Walker et al, 1997/. K = hydraulisk konduktivitet (m/s).

Sprickzon	Strykning	Stupning	Vidd (m)	Sprickfrekvens (sprickor/m)	K (m/s)
1	NNO	brant O	41	12	$<5 \cdot 10^{-12}$
2A	NNO	80 O	7-16	6-18	$1 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-6}$
2B	NNO	60 O	35	6	$1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6}$
3A	O-V	30 N	11-30	10-19	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-10}$
3B	O-V	brant N	4-12	3-10	$7 \cdot 10^{-11} - 7 \cdot 10^{-12}$
4	O-V	brant N	9	11	$7 \cdot 10^{-12}$
5	O-V	brant N	50		
6	NNO	70 SO	3-10	11-17	$5 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-12}$
7	NNV	75 O	8	9	$7 \cdot 10^{-10} - 7 \cdot 10^{-11}$
8	NV	brant SO	10	23	
9	O-V	N	5		
10	N-S	90	5		
11A	ONO	75 SO	25	9	$5 \cdot 10^{-7}$
11B	ONO	75 SO	13	8	$2 \cdot 10^{-6}$
12	ONO	75 SO	10		$5 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-10}$



Figur 4-12. Vertikala profiler i nordsydlig och östvästlig riktning (se A-A', B-B' i Figur 4-11) /efter Ahlbom et al, 1991/.

Sprickzoner och sprickor

I undersökningsområdet har totalt 15 sprickzoner identifierats med en bredd på 5 till 50 m, se tabell 4-5 /Hermanson et al, 1997/. De flesta zonerna har lokaliserats med hjälp av geofysiska mätningar och verifierats i hammarborrhål och senare även i kärnborrhål. Flera av dessa sprickzoner är vattenförande, figur 4-11. Sprickzonerna skär igenom alla bergarter i området och följer inte några bergartsgränser men kan ha påverkats av den genomträngande förskiffringen. Flackt liggande zoner har inte observerats i intervallet 0 till 700 m. Saksa och Nummela /1998/ påpekar emellertid, att flackt liggande sprickzoner kan förekomma i samband med möjliga flacka diabasgångar på större djup än 700 m. Vertikala profiler i figur 4-12 visar både diabasgångar och sprickzoner.

Sprickzoner har generellt identifierats genom en förhöjd sprickfrekvens, sektioner av kärnkross och vattenförluster. Vanligast förekommande sprickmineral är kalcit, klorit, laumontit, pyrit samt lermineralen smektit och illit. Både sprickzoner och diabasgångar innehåller vanligen leromvandlade sektioner. Enligt Ahlbom et al /1991/ är detta den främsta orsaken till att vissa sprickzoner har låg konduktivitet.

4.3.4 Osäkerheter i de geologiska beskrivningarna

De tre platserna ligger i olika geologiska miljöer som alla är representativa för svensk berggrund utanför fjällkedjan.

Andersson /1999/ sammanfattar de osäkerheter som påverkar den geologiska beskrivningen. Författaren konstaterar att många geofysiska undersökningsmetoder är indirekta och få analysmetoder ger entydiga resultat. Detta kan leda till att osäkerheter uppstår vid databehandlingen samt åstadkomma att fel koncept används.

Den dominerande osäkerheten beror dock på begränsad tillgång på data som används för att beskriva en stor volym. Begränsning av datamängden kan ha många orsaker, t ex otillgänglig terräng med få blottningar, tidsbegränsningar, som inte tillåter en fullständig geologisk kartering, eller undersökningar, som endast täcker en del av området.

Tabell 4-6 visar en översikt av de parametrar för vilka indata existerar och någon form av analys och tolkning genomförts på de olika platserna. Saksa och Nummela /1998/ och Hermanson et al /1997/ redovisar de typer av analyser och tolkningar som genomförts.

Platsspecifika osäkerheter belyses av Saksa och Nummela /1998/:

- De geologiska modeller av bergmassa och sprickzoner som används för platserna i SR 97 är i stort sett gjorda med samma metodik. Den största osäkerheten utgörs av den begränsade beskrivningen av sprickzoner i skalan från 10 till 300–1000 meters längd.
- Äspö saknar ett avgränsat undersökningsområde. Används ön Äspö som områdesavgränsning, finns indikationer på att bergvolymen inom området utgör en kraftigt tektoniserad del av regionen. Detta innebär att borrhålsdata från södra Äspö inte med säkerhet är typiska för hela området.
- För Finnsjön och Gideå finns relativt stora osäkerheter i den geologiska beskrivningen.

Tabell 4-6. Använda och analyserade parametrar för den strukturella och geologiska beskrivningen i SR 97.

Ämnesområde	Aberg	Beberg	Ceberg
Topografi			
Topografi	•	•	•
Litologi			
<i>Bergmassans litologi</i>			
Distribution	•	•	•
Xenoliter	•	•	
Gångbergarter	•	•	•
Kontaktytor	•		•
Ålder	•	•	
Potentiellt malmförande mineralisationer			
<i>Bergartens beskrivning</i>			
Mineralogi		•	
Susceptibilitet/gammastrålning etc.	•	•	•
Vittring och omvandling	•	•	•
Strukturgeologi			
<i>Plastisk deformation</i>			
Veck	•		•
Foliationer	•	•	•
Förskiffring			•
Myloniter	•		•
Bandning			•
Ålder	•	•	•
<i>Regionala och lokala diskontinuiteter</i>			
Lokalisering	•	•	•
Orientering	•	•	•
Längd	•	•	•
Bredd	•	•	•
Rörelse (storlek, riktning, ålder)			•
Antal sprickgrupper	•	•	
Sprickfrekvens	•	•	
Blockstorlek	•	•	
Mineralutfyllnader			•
Omvandling			
<i>Mindre, lokala, diskontinuiteter</i>			
Lokalisering	•	•	
Orientering	•	•	
Längd	•	•	
Bredd	•	•	
Antal sprickgrupper	•		
Sprickfrekvens	•		
Blockstorlek	•		
<i>Enstaka sprickor</i>			
Frekvens (olika grupper)	•	•	
Orientering	•	•	
Längd	•		•
Mineralutfyllnad	•	•	
Omvandling och vittring	•	•	

Fem osäkerhetsindex har tagits fram av Saksa och Nummela /1998/ baserade på osäkerheter i regional- och lokalskala, borrhålsdata, rumslig utbredning och variation av undersökningar och uppskattningar av den strukturella intensiteten i området. Osäkerheten rörande det lokala undersökningsområdets strukturer är stor på samtliga platser men störst för Äspö, troligen delvis beroende på att stora delar av det lokala området är täckt av vatten, vilket förhindrar en detaljerad tolkning. Saksa och Nummela /1998/ anser också, att den noggrant undersökta bergmassan i Äspö är förhållandevis liten och kan utgöras av en ovanligt kraftigt tektoniserad del av berget, som inte är representativ för hela området. För att hantera osäkerheterna föreslår Saksa och Nummela /1998/ alternativa tolkningar av strukturerna i Finnsjön och Gideå. För Aberg föreslås ingen alternativ tolkning eftersom det område som valts för modellering är naturligt avgränsat och väl undersökt.

4.4 Bergmekanisk beskrivning

Det platsanknutna bergmekaniska dataunderlaget utgörs huvudsakligen av resultat från bergspänningsmätningar samt laboratoriebestämningar av deformations- och hållfasthetsegenskaper för borrhänsprover. I varierande utsträckning finns också resultat från bergteknisk klassificering att tillgå. Klassificeringen innebär att mätbara parametrar (t ex bergarters hållfasthet, sprickfrekvens och sprickegenskaper) på empirisk väg kombineras till indexvärden. Huvudsyftet är att kvalitetsbedöma bergmassan ur byggtknisk synpunkt, men klassificeringen ger indirekt möjligheter att även skatta bergmassans deformationsegenskaper.

Bergmekaniska bedömningar i en säkerhetsanalys måste, förutom på data om belastningar och bergets mekaniska egenskaper också baseras på geologisk information, data om termiska egenskaper samt en rad förvarsrelaterade parametrar (geometri, värmeproduktion). För exempelvis analyser av bergväxlingar vid jordskalv och möjliga konsekvenser av dessa för ett djupförvar har den strukturegeologiska situationen, i synnerhet deformationszonernas lägen och karaktär, avgörande betydelse. Beskrivningen som följer nedan begränsar sig dock till gängse bergmekaniska data, dvs belastningar (bergspänningar) och bergarters mekaniska egenskaper.

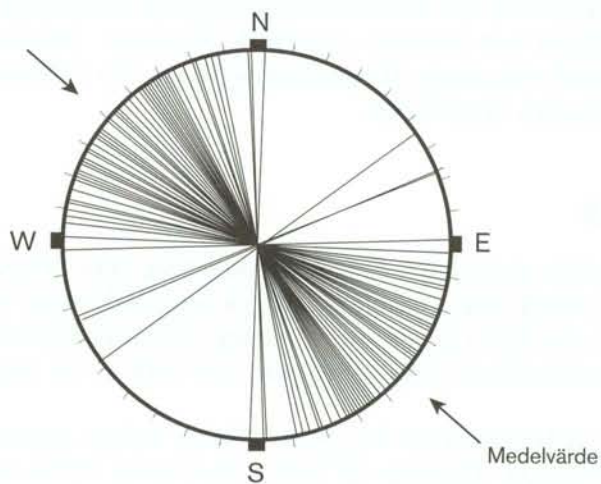
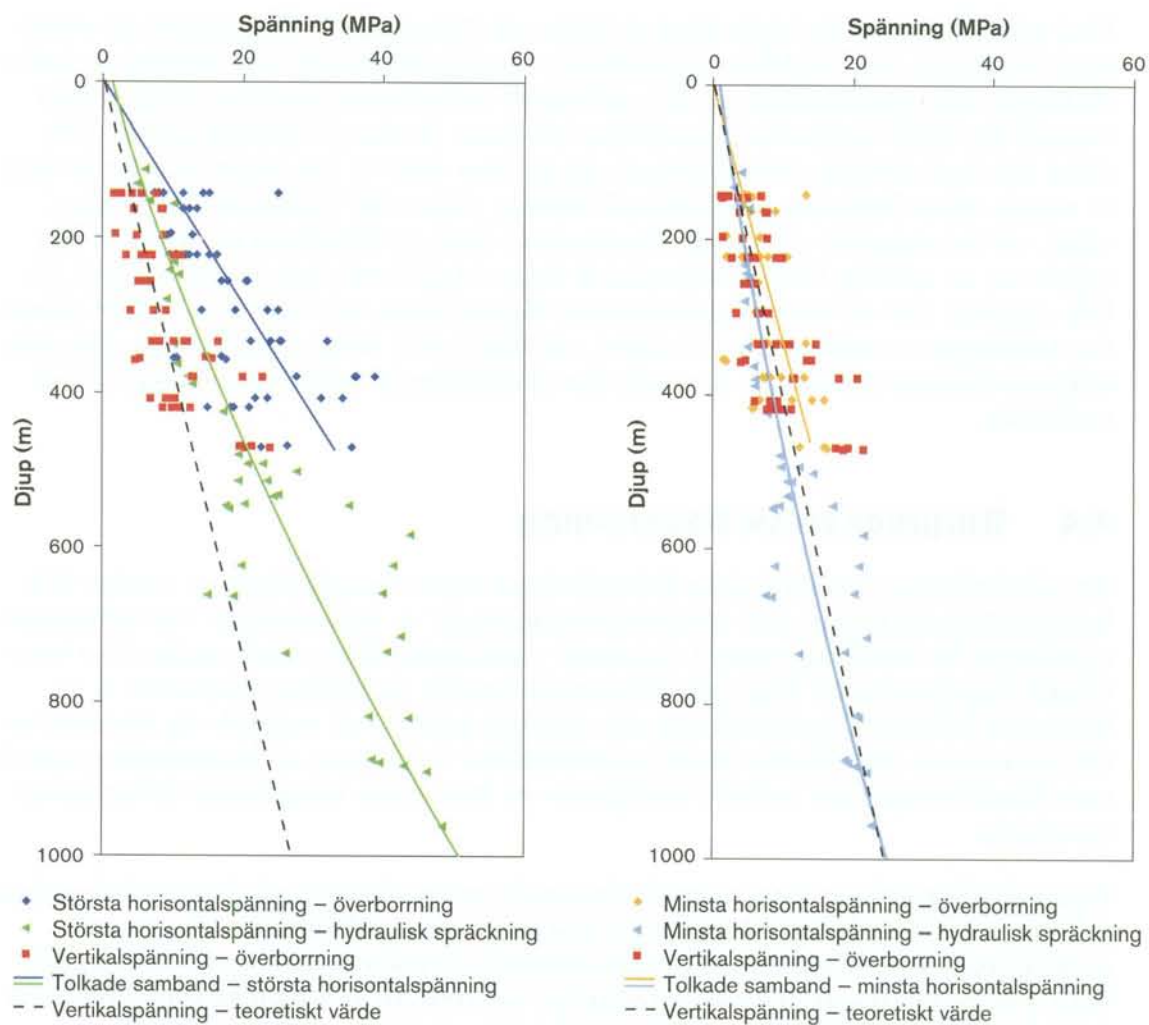
4.4.1 Aberg

Det bergmekaniska underlaget från Äspö skiljer sig från övriga platser i två avseenden. Det ena är den långt större omfattningen på undersökningar och data. Det andra, och viktigare, är att det från platsen finns tillgång till såväl data från borrhålsundersökningar som praktiska erfarenheter från utbyggnad och drift av en berganläggning.

Bergmekaniska data från Äspö har presenterats i många sammanhang. För mera heltäckande redovisningar hänvisas till Stille och Olsson /1996 och Rhén et al /1997b/.

Bergspänningar

Innan Äspölaboratoriet byggdes gjordes bergspänningsmätningar till som mest ca 900 meters djup i tre nära vertikala borrhål /Bjarnason et al, 1989/. Metoderna som användes var hydraulisk spräckning och överborrning. Mätningarna kompletterades med bergmekaniska laborietester av borrhänsprover. I samband med utbyggnad och drift av anläggningen har sedan ytterligare mätningar gjorts, uteslutande med överborrning, i ett flertal korta (upp till ca 20 m) borrhål på olika nivåer ner till som mest ca 450 meters djup.



Figur 4-13. Bergspänningsituationen i Äspö. Övre: Belopp som funktion av djup för uppmätta, horisontella och vertikala spänningskomponenter. Undre: Största horisontalspänningens riktning.

Sammantaget finns det alltså en stor mängd bergspänningsdata från Äspö. Figur 4-13 sammanfattar tillgängliga data. Av figuren framgår att spänningstillståndet i horisontalplanet genomgående är utpräglat anisotropt, dvs den största horisontalspänningen är avsevärt större än den minsta ($\sigma_H \gg \sigma_v$). Värdena på σ_H är, liksom ökningstakten med djupet, något högre än genomsnittet för svenskt urberg, men kan inte sägas vara onormalt höga. Riktningen på största horisontalspänningen är med viss variation nordväst-sydostlig, oavsett djup. Detta stämmer väl överens med såväl mätningar i det näraliggande Laxemarområdet /Ljunggren och Klasson, 1997/ som trender i nationell skala /Stephansson et al, 1991; Ljunggren och Persson, 1995/. Vertikalspänningen är avsevärt lägre än största horisontalspänningen och överensstämmer åtminstone genomsnittligt någorlunda väl med den litostatiska belastningen.

Bergspänningsdata från Äspö uppvisar allmänt betydande spridning /Ljunggren et al, 1998/. Det finns också mer eller mindre systematiska skillnader mellan data från olika mätningar. Exempelvis uppvisar en del av överborrningsmätningarna i anläggningen högre värden för den största horisontalspänningen än motsvarande mätningar med hydraulisk spräckning i borrhål från ytan. Spridningar och skillnader kan tillskrivas en kombination av lokala variationer i spänningsfältet och rena mätfel kopplade till de mätmetoder som använts /Ljunggren et al, 1998/.

Figur 4-13 visar spänningstillståndet i horisontalplanet samt i vertikalled. Bilden ändras inte nämnvärt om man betraktar det fullständiga, tredimensionella spänningstillståndet. Det beror på att huvudspänningsriktningarna relativt väl ansluter till horisontal- respektive vertikalriktningarna. Det gäller särskilt för den största huvudspänningen (dvs $\sigma_1 \gg \sigma_H$).

Mekaniska egenskaper

De undersökningar som gjorts av de mekaniska egenskaperna hos förekommande bergarter, enskilda sprickor och bergmassan som helhet har väsentligen varit avsedda att ge underlag för anläggningstekniska prognoser och bedömningar /Stille och Olsson, 1990/. I undersökningsskedet gjordes exempelvis prognoser för tunnelstabilitet, förstärknings- och injekteringsbehov som sedan kunde jämföras med verkligt utfall i byggskedet. Därutöver har vissa tester gjorts i anslutning till experimentverksamheten vid anläggningen.

Laboratoriebestämningar av deformations- och hållfasthetsegenskaper har gjorts för de fyra dominerande bergarterna, Äspödiorit, Ävrögranit, finkornig granit och grönsten. Kärnprover utsattes för gängse enaxiella trycktester och last-deformationssamband registrerades. Ur dessa bestämdes sedan bl a parametrarna enaxiell tryckhållfasthet (σ_c) elasticitetsmodul (E) och Poisson's tal (ν). Bestämningar av sprickors mekaniska egenskaper har gjorts i mindre omfattning, dels med skjuvförsök i laboratorium, dels med mätningar av sprickytors egenskaper i fält.

Mätresultaten visar inte på några överraskningar vad gäller mekaniska egenskaper. De högsta, genomsnittliga tryckhållfastheterna uppmättes för finkornig granit och Ävrögranit (ca 250 MPa) och de lägsta för Äspödiorit (ca 170 MPa). Både medelvärden och spridningar är normala för aktuella bergarter.

Utbyggnad och hittillsvarande drift av anläggningen har gett en god bild av de bergmekaniska förhållandena i en praktisk, byggtknisk bemärkelse. Stabilitetsförhållandena i tunnlar och andra bergutrymmen har generellt varit goda. Det visade sig exempelvis att av en 1 200 m lång tunnelsträcka uppfyllde 96 % kraven för att berget skulle klassas som "medelgott eller bättre" enligt gängse bergtekniska bedömningsnormer. Med undantag av

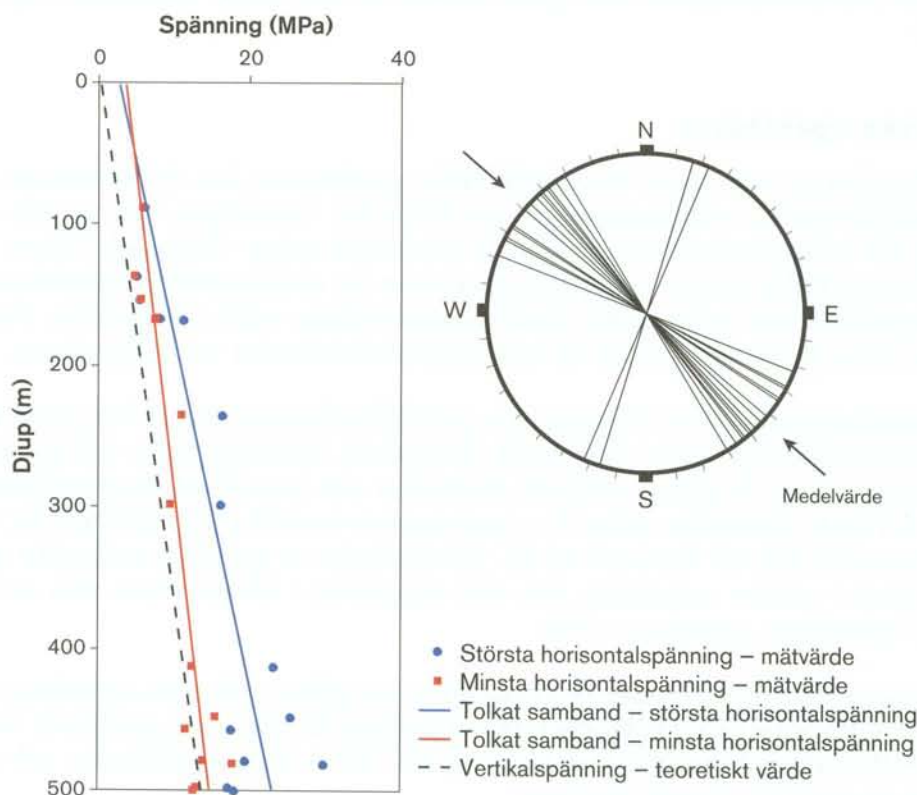
tunnelpassager genom sprickzoner har behoven av bergförstärkning varit begränsade. Stabilitetsproblem som innefattar smällberg eller överbelastning i övrigt har inte förekommit, trots relativt höga spänningar och delvis sprött berg.

4.4.2 Beberg

De bergmekaniska mätningar som gjorts vid Finnsjön är bergspänningsmätningar samt ett fåtal laborietester av kärnprover. Vidare har bergmekaniska analyser gjorts i samband med att platsen valdes som undersökningsobjekt för forskning avseende sprickzoners egenskaper. Data från bergspänningsmätningar och laborietester har sammanfattats av Ahlbom et al /1992/. Bergmekaniska analyser med inriktning mot sprickzoner har redovisats av Leijon och Ljunggren /1992/, Rosengren och Stephansson /1990/ samt Israelsson et al /1992/.

Bergspänningar

Bjarnason och Stephansson /1988/ har redovisat bergspänningsmätningar i ett vertikalt borrhål. Metoden var hydraulisk spräckning, vilket innebär att resultaten är begränsade till spänningskomponenter i horisontalplanet. Resultaten redovisas i figur 4-14, och visar genomgående på en spänningssituation som är mycket typisk för svenskt urberg. Det innebär horisontalspänningar som är något högre än den teoretiska vertikalspänningen



Figur 4-14. Bergspänningssituationen i Finnsjön. Till vänster belopp som funktion av djup för uppmätta, horisontella spänningskomponenter (teoretisk vertikalspänning visas som jämförelse). Till höger största horisontalspänningens riktning, i genomsnitt och för enskilda mätpunkter. Samtliga data från mätning med hydraulisk spräckning i ett vertikalt borrhål.

(litostatiska belastningen) och som ökar gradvis med djupet till belopp på 15–25 MPa på 500 meters djup. Största horisontalspänningen är med få undantag orienterad i nordväst-sydöstlig riktning.

Mekaniska egenskaper

Laboratorietester har utförts för att bestämma deformations- och hållfasthetsegenskaper hos den granodiorit som är den dominerande bergarten /Ahlbom et al, 1992/. Som genomsnittsvärden erhöles tryckhållfastheten 240 MPa och draghållfastheten 14 MPa, vilket är normala värden för aktuell bergart. Elasticitetsmodulen bestämdes till 82 GPa, vilket är relativt högt men inom variationsbredden för granitiska bergarter.

Översiktlig bergteknisk klassificering av bergmassan i Finnsjön, baserad på bergmekaniska parametervärden och data från kärnkartering, visade på medelgod bergkvalitet, givetvis med lokala variationer. Egenskaperna hos den dominerande flacka sprickzon (Zon 2) som finns i Finnsjön har specialstuderats i många avseenden /Ahlbom et al, 1989/. Uppskattningar av zonen deformationsegenskaper har presenterats av Leijon och Ljunggren /1992/. Deformationsmodulen för sprickzonen i sin helhet uppskattades till 20–50 % av deformationsmodulen för det intakta berget. Bergspänningsmätningarna gjordes i ett borrhål som genomkorsar den aktuella sprickzonen. Resultaten, figur 4-14, tyder inte på att zonen har någon storskalig påverkan på spänningsfältet. Slutligen kan nämnas att data från Finnsjön nyttjats vid bergmekaniska modellanalyser av storskaliga stabilitetsförhållanden i samband med glaciation /Rosengren och Stephansson 1990; Israelsson et al, 1992/.

Sammanfattningsvis finns det inget som tyder på att de bergmekaniska förhållandena i Finnsjön i något avseende skulle avvika från vad som är normalt för svenskt urberg. Bergspänningarna är måttliga och de begränsade data som finns om bergets mekaniska egenskaper tyder på goda förhållanden ur bergbyggnadsteknisk synpunkt.

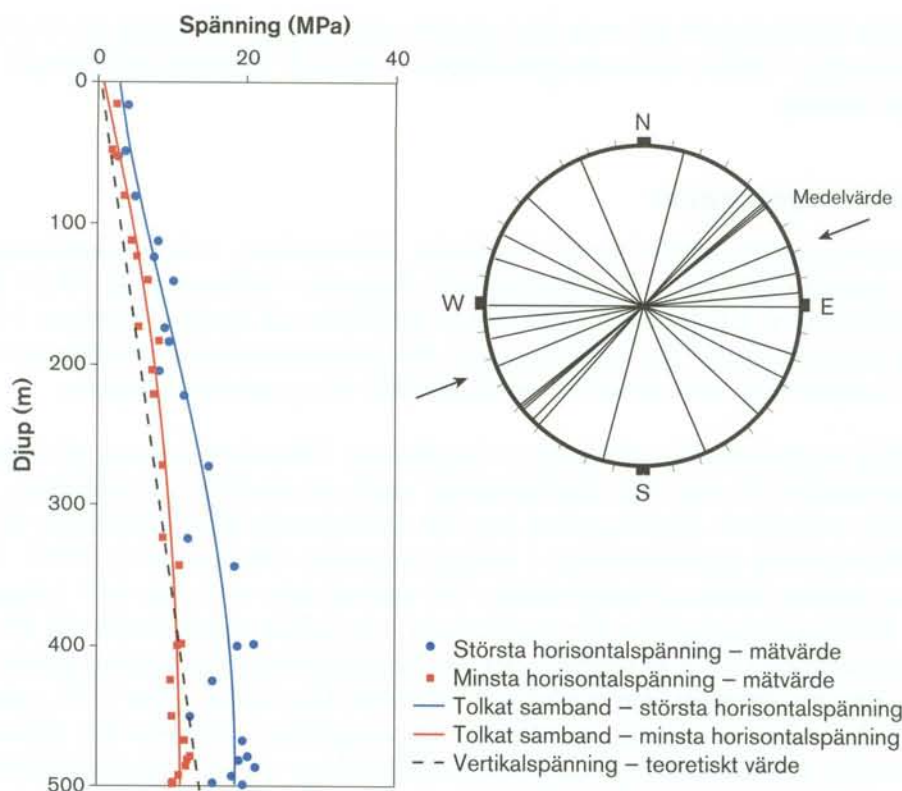
4.4.3 Ceberg

Bergmekaniska data från Gideå är av ungefär samma art och omfattning som från Finnsjön. Bergspänningsmätningar har gjorts i ett borrhål och laboratoriebestämningar av mekaniska egenskaper har gjorts på kärnprover från samma borrhål. Data har sammanställts och redovisats av Ahlbom et al /1991/.

Bergspänningar

Bergspänningsmätningar har gjorts med hydraulisk spräckning, från ytan och ner till ca 500 meters djup, i ett nära vertikalt borrhål. Resultaten visas i figur 4-15. De uppmätta spänningsbeloppen är genomgående normala för svenskt urberg. Den minsta horisontalspänningen är till belopp och gradient jämförbar med den teoretiska vertikalspänningen. Data indikerar också att bergspänningarnas ökningstakt med djupet avtar under 300 meters djup, vilket är skälet till de tolkade, icke-linjära sambanden i figur 4-15. Denna tolkning är emellertid osäker och finner inget uppenbart stöd i den geologiska informationen.

Riktningen på den största huvudspänningen kan enligt figur 4-15 tolkas vara öst-västlig till nordost-sydvästlig, dock med stora variationer och utan tendenser till rotation med djupet. Detta avviker från den allmänna trenden med en dominerande nordväst-sydöstlig spänningsriktning. Sådana lokala avvikelser har noterats på många platser och är alltså inte ovanliga. Vidare kan det inte uteslutas att riktningbestämningarna i fallet Ceberg



Figur 4-15. Bergspänningssituationen i Gideå. Till vänster belopp som funktion av djup för uppmätta, horisontella spänningskomponenter (teoretisk vertikalspänning visas som jämförelse). Till höger största horisontalspänningens riktning, i genomsnitt och för enskilda mätpunkter. Samtliga data från mätning med hydraulisk spräckning i ett vertikalt borrhål.

innehåller betydande mätfel. Denna misstanke grundar sig på att bergarten uppvisar en brantstående foliation som kan ha påverkat sprickgenereringen vid hydraulisk spräckning, och därmed mätvärdena för spänningsriktningar.

Mekaniska egenskaper

Laborrietester av ett fåtal kärnprover från Gideå har gjorts på två bergarter, den dominerande gnejsen samt granit. Förutom gängse enaxiella belastningsförsök gjordes också tester under inspända förhållanden (triaxiell belastning) samt bestämningar av vågutbredningshastigheter (P- och S-vågor), varur dynamiska elasticitetsegenskaper kan beräknas.

För graniten visade testerna genomgående värden som är normala för denna bergart. För gnejsen erhöles relativt låga värden för den enaxiella tryckhållfastheten, i medeltal 128 MPa. Förklaringen kan vara bergartens foliation och/eller en relativt hög halt av lermineral. Tester under inspända förhållanden visar att hållfasthetsvärdena ökar snabbt med omgivande belastning, upp till ca 300 MPa vid ett omgivande tryck på 25 MPa. Detta är normalt för kristallint berg och tyder på att de låga värdena vid enaxiell belastning är en effekt av foliation eller sprickor, ogynnsamt orienterade i förhållande till belastningsriktningen. Vad gäller deformationsegenskaper visar testerna på normala värden (genomsnittlig elasticitetsmodul 56 GPa). Även de dynamiska testerna visar på normala värden.

Sammanfattningsvis finns det inte heller från Gideå några data som tyder på avvikande bergmekaniska förhållandena, relativt svenskt urberg generellt sett. Bergspänningarna är måttliga och de begränsade data som finns om bergets mekaniska egenskaper tyder på goda förhållanden ur bergbyggnadsteknisk synpunkt. Av de egenskaper som framgår i den aktuella testskalan (kärnprover) kan man möjligen peka på den mekaniska anisotropi som följer gnejsens foliation som en faktor som kan ha betydelse. Det är dock inte troligt att denna anisotropi i den lilla skalan har några negativa konsekvenser för stabiliteten i större skala. Erfarenhetsmässigt innebär foliation och förgnejsning att berget är mindre sprött än exempelvis graniter, vilket kan ge fördelar med avseende på tunnelstabilitet.

4.4.4 Osäkerheter i de bergmekaniska beskrivningarna

Laboratoriebestämningar av bergarters mekaniska egenskaper är i sig inte behäftade med några stora experimentella osäkerheter, men de utgör punktmätningar. Rumsliga variationer och framförallt skalberoende tillför betydande osäkerheter vid praktiska tillämpningar. Av dessa skäl kan bestämningar av bergarternas mekaniska egenskaper i många fall ersättas med erfarenhetsmässiga skattningar, utan att analysresultatets tillförlitlighet försämras påtagligt. Så är exempelvis ofta fallet vid stabilitetsanalyser av bergutrymmen i bra berg och vid låga belastningar.

Även bergspänningsmätningar ger punktvärden. Mätmetoderna för bergspänningar är mindre exakta än vad som är fallet för mekaniska egenskaper, samtidigt som den rumsliga variationen är större och svårare att koppla till geologin. Vid mätningar i bra berg och belastningsnivåer som är typiska för djup kring 500 m brukar osäkerheten i enskilda mätningar som tumregel skattas till några tiotals procent. Osäkerheterna i kunskapen om bergspänningarna är ändå sällan den svagaste länken i bergmekaniska analyser i praktisk tillämpning, men det finns viktiga undantag. Det gäller framförallt fall där höga belastningar i kombination med sprickfattigt och sprött berg kan ge smållbergsproblem eller andra former instabilitet kring bergutrymmen. Då kan även små fel i ingångsvärden för spänningstillstånd och/eller mekaniska egenskaper resultera i allvarliga felbedömningar.

Som en allmän slutsats kan man säga att de avgörande osäkerheterna sällan ligger i kunskapen om bergarternas mekaniska egenskaper eller i bergspänningarna, som enskilda komponenter. Den ligger istället i förståelsen för hur det mekaniska systemet bergmassahållrum kommer att uppföra sig under aktuella belastningar och i aktuell skala. Osäkerheterna brukar framförallt gälla bärförmågan hos bergmassan (inklusive sprickor och sprickzoner), deformationsmönster och eventuella brottmekanismer. Erfarenhetsåterföring från praktikfall är den huvudsakliga metoden för att reducera dessa osäkerheter. Osäkerheterna ökar därför markant i fall där det saknas tidigare ingenjörstillämpningar mot vilka prognoser och bedömningar kan avstämmas. Så är delvis fallet för de bergmekaniska bedömningar som blir aktuella i samband med funktions- och säkerhetsanalyser av djupförvaret, huvudsakligen därför att dessa involverar tidsrymder som vida överstiger erfarenhetsbasens.

4.5 Hydrogeologisk beskrivning

Den hydrogeologiska modellen innefattar de hydrauliska egenskaperna för bergets sprickzoner och för bergmassan samt beskriver grundvattenförhållandena på platsen och de processer som är styrande för grundvattnets naturliga strömning.

De hydrogeologiska beskrivningarna av Aberg, Beberg och Ceberg har sammanställts av Walker et al /1997/. Sammanställningen bygger på ett stort underlagsmaterial från undersökningar inom de tre områdena samt utvärderingar av bergets hydrauliska konduktivitet i regional- och lokalskala.

4.5.1 Aberg

Regionalskala

Ythydrologi och grundvattenhydrologi

I terrängen kring Äspö finns ett stort antal mindre avrinningsområden. Dessa beskrivs närmare i /Walker, 1997/. Medelnederbörden har uppmätts till 675 mm/år varav ca 18 % faller som snö. Medelavrinningen i området har beräknats till mellan 150 och 200 mm/år.

Den regionala grundvattenytan följer topografin och det regionala flödet är på grund av de topografiska nivåskillnaderna riktat från de högre områdena i väster mot kusten i öster. Grundvattenytan når sitt årliga maximum på våren och minimum i augusti. I kustområdet finns bräckt vatten under det söta ytvattnet.

Hydraulisk konduktivitet

Rhén et al /1997b/ har analyserat brunndata från Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) inom en 25 km radie kring Äspö för att uppskatta den hydrauliska konduktiviteten i regionalskala.

Walker et al /1997/ har beräknat konduktiviteten och dess djupberoende i bergmassa och sprickzoner. I tabell 4-7 visas konduktiviteten i bergmassan oberoende av bergartstyp. Alternativa fall, där konduktiviteten varierar med bergarten, presenteras av Rhén et al /1997b/ och diskuteras av Walker et al /1997/.

Tabell 4-7. Hydraulisk konduktivitet K, m/s, för bergmassa i regionalskala för Äspö, uppskalad till 100 m skala ned till 600 m djup, 300 m skala under 600 m djup /efter Walker et al, 1997/.

Höjd (m ö h)	Aritmetiskt medelvärde log K	Varians log K	Antal mätningar
0 till -200	-6,9	0,92	264
-200 till -400	-6,7	0,42	30
-400 till -600	-6,6	0,62	9
-600 till -2000	-7,3	0,51	11
0 till -2000	-6,9	0,86	314

Endast ett fåtal hydrauliska mätningar har utförts i de regionala sprickzonerna. Rhén et al /1997b/ har delat in zonerna i vattenförande respektive mindre vattenförande (se tabell 4-8). De vattenförande zonerna i regionalskala antas ha liknande hydrauliska egenskaper som de mera konduktiva zonerna i Äspö och de mindre vattenförande zonerna i regionalskala antas vara något mindre transmissiva än medelvärdet för de mindre konduktiva zonerna i Äspö.

Tabell 4-8. Transmissivitet för de regionala sprickzonerna i Äspö /efter Rhén et al, 1997b/. Se även figur 4-3.

Regionala sprickzoner	Transmissivitet Medelvärde (T) (m ² /s)
V (vattenförande)	0,3·10 ⁵
VV (starkt vattenförande)	10·10 ⁵

Lokalskala

Ythydrologi och grundvattenhydrologi

Äspös lokala undersökningsområde omfattar ett område på ca 1 km² och inbegriper förutom själva ön även omgivande havsvikar. Den maximala höjdskillnaden är 14 m. Ytvatten dräneras direkt ut i havet eller genom myrmark och sediment.

Figur 4-16 visar grundvattenytan vid ostörda förhållanden (innan tunneln byggdes). Såväl före som efter tunnelbyggnationen var den maximala höjden på grundvattenytan ca 4 m ö h. I samband med byggnationen på södra Äspö var den maximala grundvattensänkningen -85 m. Norr om sprickzon EW-1 var dock tryckfallet betydligt mindre, varför man kan sluta sig till att den hydrauliska konnektiviteten mellan södra och norra Äspö är begränsad på djupet /Rhén et al, 1997b; Svensson, 1995/.

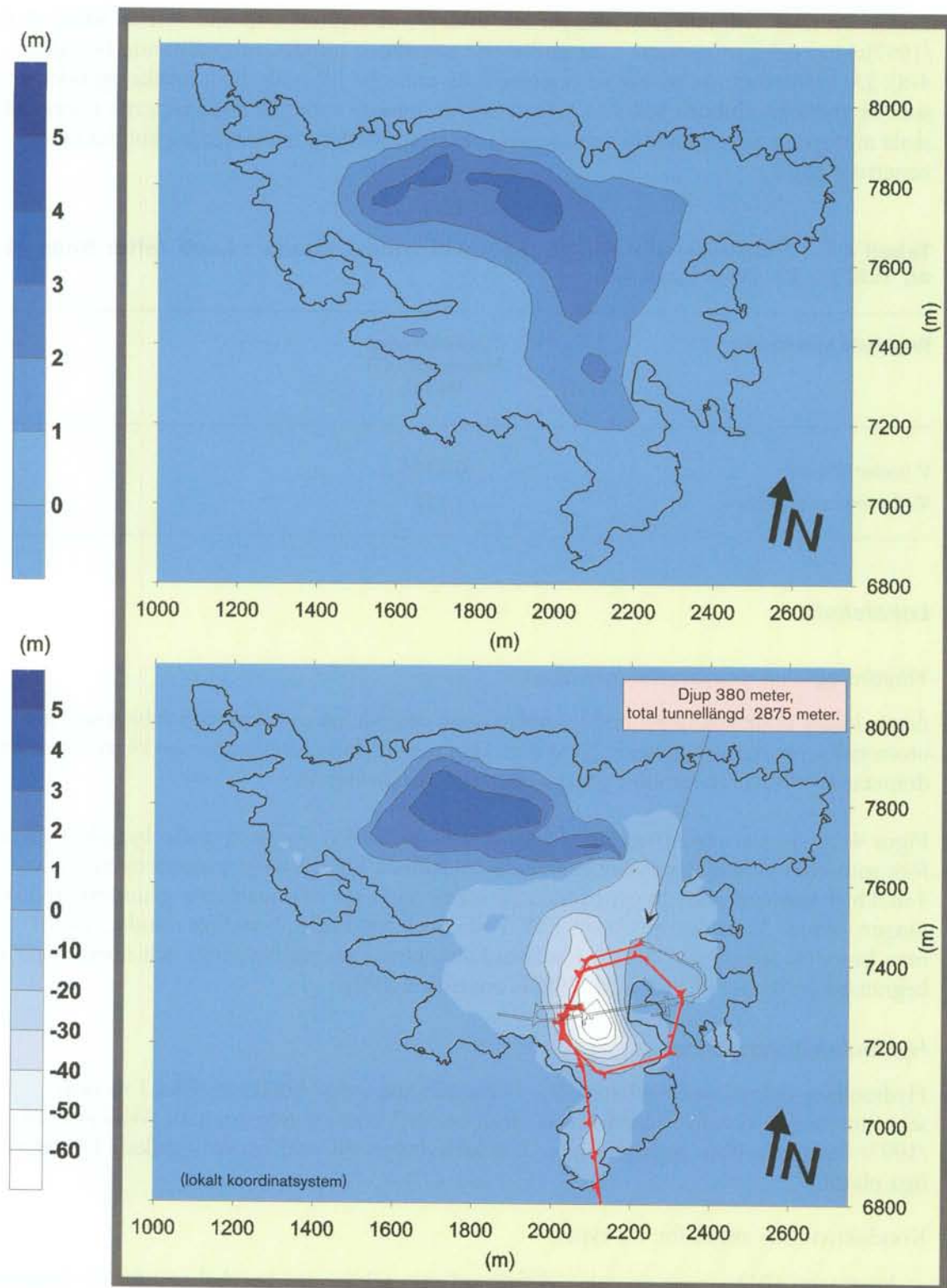
Hydraulisk konduktivitet

Hydrauliska egenskaper för bergmassa och sprickzoner har beräknats från 3 m man-schettmätningar och hydrauliska tester från borrhål borrade från tunneln. Walker et al /1997/ har genomfört uppskalning av konduktiviteten till vald beräkningsskala för samtliga platser.

Konduktiviteten anges för två typer:

- bergmassa (RD = rock domain), definierad som sektioner i borrhål utanför de deterministiskt bestämda sprickzonerna,
- sprickzoner (CD = conductor domain), deterministiskt bestämda.

I lokalskala har bergmassan delats in i fem olika domäner med olika konduktivitet enligt tabell 4-9. Bergmassan har en dominerande sprickriktning åt västnordväst, varför konduktiviteten kan vara större parallellt med denna riktning. Baserat på undersökningar



Figur 4-16. Observerade grundvattennivåer vid Äspö före och efter tillkomsten av Äspötunneln. Nivåerna baseras på uppmätta värden /efter Walker et al, 1997/.

i hammarborrhål utmed tunneln har Rhén et al /1997b/ visat att transmissiviteten är störst i den dominerande sprickriktningen. Alternativa beskrivningar av bergmassans anisotropi anges av Walker et al /1997/.

Tabell 4-9. Hydraulisk konduktivitet, m/s, för bergmassa i lokalskala i Äspö. Bergmassan är indelad i fem olika domäner som representerar delar av berggrunden med olika konduktivitet. Värdena baseras på 3 m manschettmätningar men är uppskalade till 24 m skala /efter Rhén et al, 1997b och Walker m fl, 1997/. Uppskalningen är utförd inför kommande numerisk modellering.

Domän	Aritmetiskt medelvärde log K
RD1	-8,0
RD2	-7,1
RD3	-8,8
RD4	-7,5
RD5	-7,6
Övriga	-8,5

De flesta av de konduktiva sprickzonerna finns indikerade i den strukturgeologiska modellen. Ytterligare konduktiva strukturer återfinns hydrauliskt men uppvisar endast svag förhöjning av sprickfrekvensen och kan betraktas som sprickgrupper. De nordnordvästliga strukturerna, som skär genom den centrala delen av laboratoriet, kan också betraktas som sprickgrupper /Walker et al, 1997/. De flesta strukturer har testats minst en gång och i flera fall har det utförts ett större antal hydrauliska tester. En mer komplett redogörelse för de hydrauliska egenskaperna för de konduktiva sprickzonerna står att finna i Rhén et al /1997b/ och Walker et al /1997/.

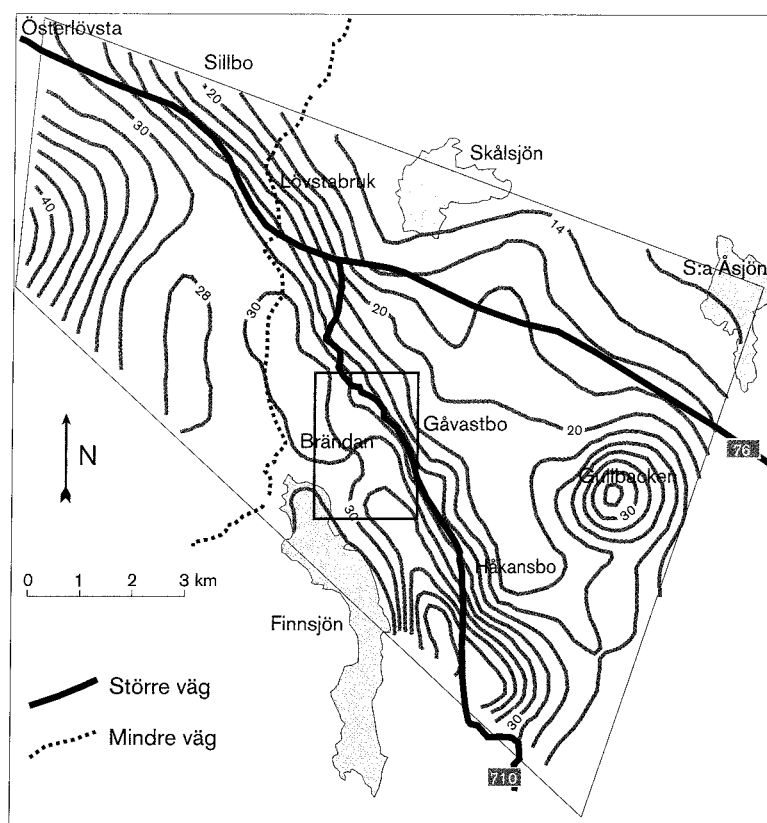
4.5.2 Beberg

Regionalskala

Ythydrologi och grundvattenhydrologi

Den norra delen av regionen kring Finnsjön dräneras av Dalälven, Tämnarån, Forsmarksån och Olandsån. Den södra delen dräneras av Mälaren via Örsundaån och Fyrisån. Medelnederbörden för norduppland är 670 mm/år. Avrinningen i området kan skattas till 240 mm/år.

Grundvattenytan i regionen är relativt jämn på grund av flack topografi. Det regionala grundvattenflödet är riktat från sydväst mot nordöst /Andersson et al, 1991/. Den regionala gradienten beräknas vara ca 0,2–0,3 %. Figur 4-17 visar en regional karta över grundvattenytan i Beberg.



Figur 4-17. Regional karta över grundvattenytan i och kring Finnsjön /efter Andersson et al, 1991/.

Hydraulisk konduktivitet

Walker et al /1997/ har använt data från SGU:s brunnarkiv för brunnar inom en 25 km radie kring Finnsjön för att uppskatta den hydrauliska konduktiviteten i regionalskala. Då brunnarna i regel ej är djupare än ca 200 m, används data från manschettmätningar från det lokala undersökningsområdet för att uppskatta konduktivitetens djupberoende samt för att kvantifiera skillnaden mellan konduktiviteten i bergmassa och sprickzoner, se tabell 4-10. Det finns emellertid flera möjliga tolkningsfall, där den hydrauliska konduktiviteten varierar beroende på antaganden om regional heterogenitet i bergmassan /Walker et al, 1997/.

Tabell 4-10. Hydraulisk konduktivitet K, m/s, för bergmassa i regionalskala för Finnsjön baserad på SGU data och 3 m manschettmätningar. Värdena är uppskalade till 100 m skala /efter Walker et al, 1997/.

Höjd (m ö h)	Aritmetiskt medelvärde log K	Varians log K	Antal mätningar
Över -100	-6,8	0,21	142
-100 till -200	-7,7	0,15	119
-200 till -400	-8,1	0,097	325
Djupare än -400	-7,8	0,042	265

Porositetsbestämningar är gjorda i övre delen av sprickzon 2. Flödesporositeten varierar mellan $8 \cdot 10^{-4}$ och $1 \cdot 10^{-2}$ /Andersson et al, 1991/.

Flera regionala lineament som skär igenom undersökningsområdet har undersökts med borrhål. Ytterligare information om regionala sprickzoner finns tillgängliga genom undersökningarna kring SFR. Den hydrauliska konduktiviteten i sprickzonerna är baserad på 3 m manschettmätningar i undersökningsområdet och i SFR /Anderson et al, 1991; Lindbom och Boghammar, 1992/, se tabell 4-4 samt figur 4-7.

Lokalskala

Ythydrologi och grundvattenhydrologi

Markytan inom undersökningsområdet är relativt jämn och varierar kring 25 m ö h. Det södra blocket innehåller en vattendelare med avrinningsområden åt nordöst och sydväst. I det norra blocket sker avrinningen åt nordöst.

Det ytliga grundvattensystemet är komplext med flöde både åt nordöst och sydväst. Det är inte känt hur djupt detta system penetrerar. Maximalt vattenstånd inträffar under november och december och lågvatten under augusti och september.

Det djupare grundvattensystemet är relativt komplext med flackt liggande sprickzoner och abrupta växlingar i salthalt. Detaljerade undersökningar i sprickzon 2 i det norra blocket (se figur 4-9), visar att det finns relict salt grundvatten under den flackt liggande strukturen. I det södra blocket finns inget saltvatten ned till ca 600 m djup (maximalt borrhål) vilket visar att denna del av undersökningsområdet har god kontakt med ytligt grundvatten /Walker et al, 1997/. Strax öster om Finnsjöområdet påträffas dock saltvatten i strukturer som även finns i det södra blocket. Detta kan förklaras av att tät glaciärra lokalt här överlagrar bergytan, varför genomströmning av ytligt grundvatten förhindras.

Hydraulisk konduktivitet

Den hydrogeologiska modellen, som baseras på en strukturgeologisk modell av Andersson et al /1991/, skiljer mellan bergmassa och sprickzoner. Bergmassan är i sin tur uppdelad i ett sydligt och ett nordligt block. Tabell 4-11 anger hydraulisk konduktivitet på olika djup i bergmassan. Konduktiviteten beräknas från 3 m manschettmätningar och skalas upp till 24 m block /Walker et al, 1997/ inför den kommande modelleringen.

Utöver detta basfall föreslår Walker et al /1997/ alternativa modellhypoteser, i vilka bergmassan betraktas som anisotrop betingat av den dominerande sprickriktningen och spänningsfältet i området.

Sprickzonernas läge och hydrauliska konduktivitet ges i figur 4-8 och i tabell 4-4. De hydrauliska egenskaperna baseras sig på 3 m manschettmätningar samt spårämnesförsök. I basfallet antas konduktiviteten vara densamma på alla djup. Flera alternativa fall diskuteras emellertid av Walker et al /1997/ bland annat med varierande konduktivitet mot djupet med samma relativa förändring som i bergmassan.

Tabell 4-11. Hydraulisk konduktivitet K, m/s, för bergmassa i lokalskala för Finn-sjön, baserad på 3 m manschettmätningar. Värdena är uppskalade till 24 m /efter Walker et al, 1997/.

Höjd (m ö h)	Aritmetiskt medelvärde log K
<i>Norra blocket</i>	
Över -100	-6,6
-100 till -200	-7,2
-200 till -400	-7,8
Djupare än -400	-7,6
<i>Södra blocket</i>	
Över -100	-6,8
-100 till -200	-7,8
-200 till -400	-8,1
Djupare än -400	-7,9

4.5.3 Ceberg

Regionalskala

Ythydrologi och grundvattenhydrologi

Medelnederbörden för området är 765 mm/år. Timje /1983/ har uppskattat avrinningen till 345 mm/år med maximal avrinning i maj månad. Den årliga medeltillförseln av ytvatten till grundvattensystemet är 10 mm, men kan variera lokalt beroende på topografin /Walker et al, 1997/.

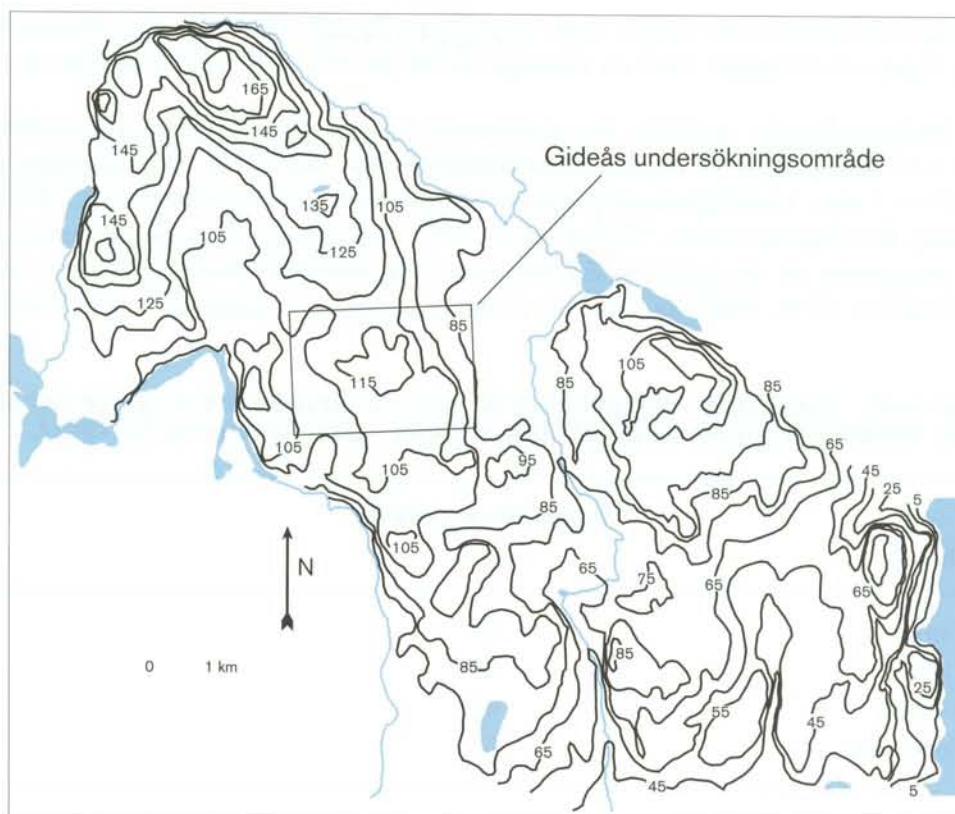
SGU:s brunn-data samt data från 24 hammarborrhål har använts för att uppskatta den regionala grundvattenytan /Timje, 1983/. Kartan i figur 4-18 representerar uppskattad medelnivå på grundvattnet och förutsätter att grundvattenytan följer markytan. Säsongsvariationen på grundvattenytan är 0,2 till 3,9 m, med lågvattennivå från januari till mars och högsta nivå i april och oktober /Ahlbom et al, 1983/. Både brunnarnas geografiska läge och grundvattenkartans konturer talar för att grundvattensystemet på den centrala plattan i regionen domineras av ett inströmningsområde och att utströmning sker till vattendrag i sprickzonsdalarna /Walker et al, 1997/.

Det är rimligt att anta att det regionala grundvattensystemet drivs av topografin och grundvattnet rinner från de högre regionerna i norr och väst genom undersökningsområdet mot Bottenhavet.

Hydraulisk konduktivitet

Walker et al /1997/ har använt sig av SGU:s brunn-data i en 25 km radie kring Gideå för att uppskatta den hydrauliska konduktiviteten för bergmassan och för sprickzoner. Bergartstyp eller bergartskontakter har ingen eller liten påverkan på den hydrauliska konduktiviteten enligt Hermanson et al /1997/.

Tabell 4-12 visar konduktiviteten för bergmassan uppskalad från 25 m till 100 m skala. Konduktivitetens variation med djupet beskrivs av djupindelningen av domänen /Walker



Figur 4-18. Regional grundvattenkarta över Gideå /från Timje, 1983/.

et al, 1997/. Det existerar flera möjliga konduktivetsdomäner för bergmassan beroende på ett antal alternativa fall, som exempel har Ericsson och Ronge /1986/ föreslagit ett anisotropt konduktivetsfält i regionen parallellt med huvudspänningsriktningen. Ahlbom et al /1983/ har föreslagit att diabasgångarna kan ha högre konduktivitet jämfört med omgivande berg. Hermanson et al /1997/ anser dock att det motsatta förhållandet gäller, dvs att diabaserna är tätare än det omgivande berget. Enligt Saksa och Nummela /1998/ kan emellertid en förhöjd konduktivitet inte uteslutas hos diabasgångarna eller längs deras kontakter. Av denna anledning har flera varianter med alternativa antaganden genomförts inom ramen för SR 97.

Tabell 4-12. Hydraulisk konduktivitet K , m/s, för bergmassa i regionalskala för Gideå. Värdena är uppskalade till 100 m skala /efter Walker et al, 1997/.

Höjd (m ö h)	Aritmetiskt medelvärde log K	Varians log K
+110 till 0	-7,2	0,38
0 till -100	-8,6	0,70
-100 till -300	-9,6	0,71
Djupare än -300	-9,8	0,99

Flödesporositetsdata mot djupet finns inte tillgängliga för Gideå. Data från lokalskala inom Aspö och Finnsjön visar en flödesporositet på $2 \cdot 10^{-4}$ till $1 \cdot 10^{-3}$ /Ahlbom et al, 1983/.

Den hydrogeologiska modellen för sprickzoner baserar sig dels på lineamentskartan i figur 4-10 och dels på 25 m manschettmätningar från det lokala undersökningsområdet. Tabell 4-13 visar konduktivitetvärden för sprickzoner efter uppskalning till 100 m med zoner för djupberoendet /Walker et al, 1997/. Egenskaper för sprickzonerna anges med antagandet att de regionala lineamenten är hydrauliskt jämförbara och att de har en medelvidd av 20 m. Flödesporositeten i zonerna antas vara densamma som i bergmassan.

Tabell 4-13. Hydraulisk konduktivitet K, m/s, för sprickzoner i regionalskala för Gideå. Värdena är uppskalade till 100 m skala /efter Walker et al, 1997/.

Höjd (m ö h)	Aritmetiskt medelvärde log K
+110 till 0	-6,4
0 till -100	-7,9
-100 till -300	-8,9
Djupare än -300	-9,1

Lokalskala

Ythydrologi och grundvattenhydrologi

Landytan inom området varierar mellan 80 och 120 m ö h med det lägsta området i det nordvästra hörnet. En större myr, Stormyran, ligger i det nordöstra hörnet av området /Ahlbom et al, 1983/. Det finns tre vattendelare inom området, en som dränerar söder och väster om Gideälven, en som dränerar norr och väster om Gideälven och en tredje som dränerar norr och öster om Stormyran och Husån.

Grundvattenytan varierar från 0 till 10 m under markytan i låglänt respektive höglänt terräng. Timje /1983/ har kartlagt grundvattenhydrologin i förvarsskala utifrån antagandet att grundvattenytan följer topografin. Figur 4-18 visar att det finns ett inströmningsområde till grundvattensystemet i de centrala delarna och utströmning till älvar och åar i förkastningsdalarna.

Grundvattenpotentialens variation med djupet, som undersökts i 13 kärnborrhål med ett maximalt djup av 700 m, visar att det lokala undersökningsområdet befinner sig i ett inströmningsområde.

Hydraulisk konduktivitet

Liksom i regionalskala har området delats in i två olika konduktivitetsdomäner, nämligen bergmassa och sprickzoner. Indelningen baseras på den strukturella modellen framtagen av Hermanson et al /1997/. Domänerna skiljer sig åt genom relativt låga konduktiviteter i bergmassan jämfört med zonerna /Walker et al, 1997/. Hydrauliska egenskaper för strukturer och domäner baserar sig på 25 m manschettmätningar. Spårämnesförsök har inte gjorts förutom en mindre nedfallsstudie efter Tjernobyl /Gustafsson et al, 1987/.

Den hydrauliska konduktiviteten för bergmassan, angiven i tabell 4-14, baseras på 25 m manschettmätningar. Det finns ingen korrelation mellan bergmassans konduktivitet och bergartstypen /Hermanson et al, 1997/.

Tabell 4-14. Hydraulisk konduktivitet K, m/s, för bergmassa i lokalskala för Gideå i 25 m skala /efter Walker et al, 1997/.

Höjd (m ö h)	Aritmetiskt medelvärde log K
+110 till 0	-7,6
0 till -100	-9,0
-100 till -300	-10,0
Djupare än -300	-10,2

Konduktiviteten i sprickzonerna baseras på de 25 m manschettmätningar, som ligger inom de borrhålssektioner där zonerna är identifierade. Detta leder till relativt få representativa mätningar, varför den hydrauliska konduktiviteten antas vara lika i alla zonerna. Liksom för bergmassan varierar konduktiviteten med djupet enligt tabell 4-15.

Tabell 4-15. Hydraulisk konduktivitet K, m/s, för sprickzoner i lokalskala för Gideå i 25 m skala /efter Walker et al, 1997/.

Höjd (m ö h)	Aritmetiskt medelvärde log K
+110 till 0	-7,0
0 till -100	-8,5
-100 till -300	-9,5
Djupare än -300	-9,7

Utöver det ovan givna basfallet presenterar Walker et al /1997/ även ett antal olika variationer av konduktivitetssfältet i sprickzonerna, vilka tar hänsyn till olika konfigurationer av regionala lineament som tolkas skära genom undersökningsområdet samt domäner för bergmassan med avvikande konduktivitetsegenskaper beroende på dominerande riktningar för bergmassans uppsprickning.

4.5.4 Osäkerheter i de hydrogeologiska beskrivningarna

Den hydrogeologiska modellen i SR 97 beskrivs såsom en bergmassa med varierande hydraulisk konduktivitet, ett s k stokastiskt kontinuum, genomskuret av konduktiva zoner. Bergets hydrauliska ledningsförmåga kan även beskrivas med hjälp av alternativa konceptualiseringar, med s k diskreta spricknätverk eller genom kanalnätverk. Dessa alternativa modeller analyseras också inom ramen för SR 97.

Andersson /1999/ identifierar flera möjliga osäkerheter i den hydrauliska beskrivningen, där kopplade fenomen mellan flöde och bergmekanik, termiska drivkrafter och densitets-effekter beroende av salthalt utgör huvudpunkterna. Även igenslamning eller erosion av flödesvägar kan väsentligen påverka vattenflödet.

I regional skala baseras den hydrauliska konduktiviteten i bergmassan på brunn-data och i sprickzoner på tolkning av regionala lineament och resultat från manschettmätningar. I lokalskala baseras konduktiviteten i bergmassan på manschettmätningar. Motsvarande data för sprickzoner bestäms genom manschettmätningar och tolkningar grundade på den valda strukturgeologiska modellen. Den hydrogeologiska modellens övre randvillkor bestäms av utvärdering av ythydrologin i området.

Trots olikheter i undersökningsmetodik har Walker et al /1997/ vid jämförelse av de hydrogeologiska beskrivningarna av platserna dragit flera kvalitativa slutsatser:

- Skillnader mellan platsernas hydrogeologiska karaktär kan beskrivas utgående från deras generella hydrologiska drag, dvs inströmnings- och utströmningsområden, topografisk relief, andelen saltvatten och sötvatten.
- Den hydrauliska konduktiviteten i Äspö och Finnsjön ligger på samma nivå. Gideå har allmänt sett lägre konduktivitet.
- Kontrasten i hydraulisk konduktivitet mellan sprickzoner och bergmassa är lägre i Gideå än på övriga platser.

Andersson /1999/ diskuterar osäkerheter kopplade till den hydrogeologiska beskrivningen av Walker et al /1997/. Där belyses följande källor till osäkerheter:

- Fördelningen av inströmnings- och utströmningsområden i regionen samt grundvattenbildningen innebär osäkerheter i topprandvillkoret i den hydrogeologiska modellen.
- Indelning av konduktivitetsdomäner i bergmassa och hydrauliskt aktiva sprickzoner ger alternativa tolkningar i både regional och lokal skala.
- Tolkning av vatteninjektionstester innebär förenklingar och antaganden. Då testlängderna varierar leder detta till påverkan från olika stora bergvolymmer. Man har endast begränsad tillgång till testdata över den undre mätgränsen. Det sistnämnda gäller särskilt för Gideå där 36 procent av alla injektionstester ligger under mätgränsen.
- Skalning av vatteninjektionstester till andra skalor än dem som gäller för ursprungsdata inför kommande modellering ger upphov till osäkerheter.
- Den hydrauliska konduktiviteten kan vara riktningberoende.

För osäkerheter, som inte direkt kan hanteras, formuleras ett antal varianter till bas-tolkningen av data. Dessutom analyseras fall med tolkning av bergets hydrauliska ledningsförmåga genom att använda diskreta nätverk och kanalnätverk.

4.6 Grundvattenkemisk beskrivning

Den grundvattenkemiska modellen beskriver grundvattnets kemiska sammansättning och fördelning i berget. Grundvattenkemin påverkar många av de analyser som ger indata till SR 97.

Den grundvattenkemiska beskrivningen för användning i SR 97 sammanfattas av Laaksoharju et al /1998/. Grundvattnets geokemiska sammansättning representeras av prover tagna ur fyra borrhål från platserna Äspö (KAS02), Finnsjön (KFI07 och BFI01) och Gideå (KGI04). Med hjälp av principalkomponentanalys och isotopkvotanalys av dessa vatten har Laaksoharju et al /1998/ beskrivit vattnet som glacialt, meteoriskt, biogent (Östersjövatten påverkat av en bakteriell sulfatreduktionsprocess), marint eller saltlake (relikt saltvatten med en salthalt över 10 procent) (se figur 4-20). Proverna från platserna i SR 97 täcker väl in de olika typer av grundvattenkemisk sammansättning som uppmätts på andra platser i Sverige. Referensvattenprovernas kemiska sammansättning framgår av tabell 4-16.

4.6.1 Aberg

För Äspö representeras grundvattnets geokemiska sammansättning av prover tagna ur borrhålet KAS02. Referensvattenprovet visar på ett salt, kalkfattigt och sulfatrikt vatten (se tabell 4-16). Kloridfördelningen kan förklaras av en komplex blandning av vatten med olika ursprung. Referensvattenprovet innehåller en blandning av meteoriskt vatten (31 %), glacialt vatten (29 %), biogent vatten (15 %), relikt saltvatten (14 %) och marint vatten (12 %).

4.6.2 Beberg

Referensvattenproven visar dels ett salt, kalkfattigt och sulfatrikt vatten (BFI01), dels ett kalkrikt, klorid- och sulfatfattigt sötvatten (KFI07), se tabell 4-16. Kloridfördelningen i vattenprov ur borrhål BFI01 kan förklaras av att grundvattnet är en blandning av meteoriskt vatten (30 %), glacialt vatten (26 %), biogent vatten (19 %), relikt saltvatten (16 %) och marint vatten (10 %). Vattenprov ur borrhål KFI07 visar på en blandning av meteoriskt vatten (50 %), glacialt vatten (15 %), biogent vatten (22 %), relikt saltvatten (3 %) och marint vatten (10 %).

4.6.3 Ceberg

För Gideå representeras grundvattnets geokemiska sammansättning av prover tagna ur borrhålet KGI04. Referensvattenproven visar på ett kalk- och sulfatfattigt sötvatten. Baserat på kloridfördelningen har vattnet tolkats som en blandning av meteoriskt vatten (43 %) glacialt vatten (28 %), biogent vatten (17 %), marint vatten (7 %), och relikt saltvatten (5 %). Referensvattnets kemiska sammansättning ges i tabell 4-16.

4.6.4 Osäkerheter i de grundvattenkemiska beskrivningarna

Osäkerheterna i den grundvattenkemiska beskrivningen innefattar, dels mätosäkerheter och provtagningsfel, dels representativitet hos vattenproven och variabilitet över rummet.

Enligt Laaksoharju et al /1998/ representerar referensvattenproverna ett typiskt vatten från varje plats på förvarsnivå (500 ±100 m djup). Resultatet av den huvudkomponentanalys som finns i figur 4-19 visar att de fyra referensvattenproverna har en sammansättning som är jämförbar med relevanta vattenprov från olika platser i Sverige.

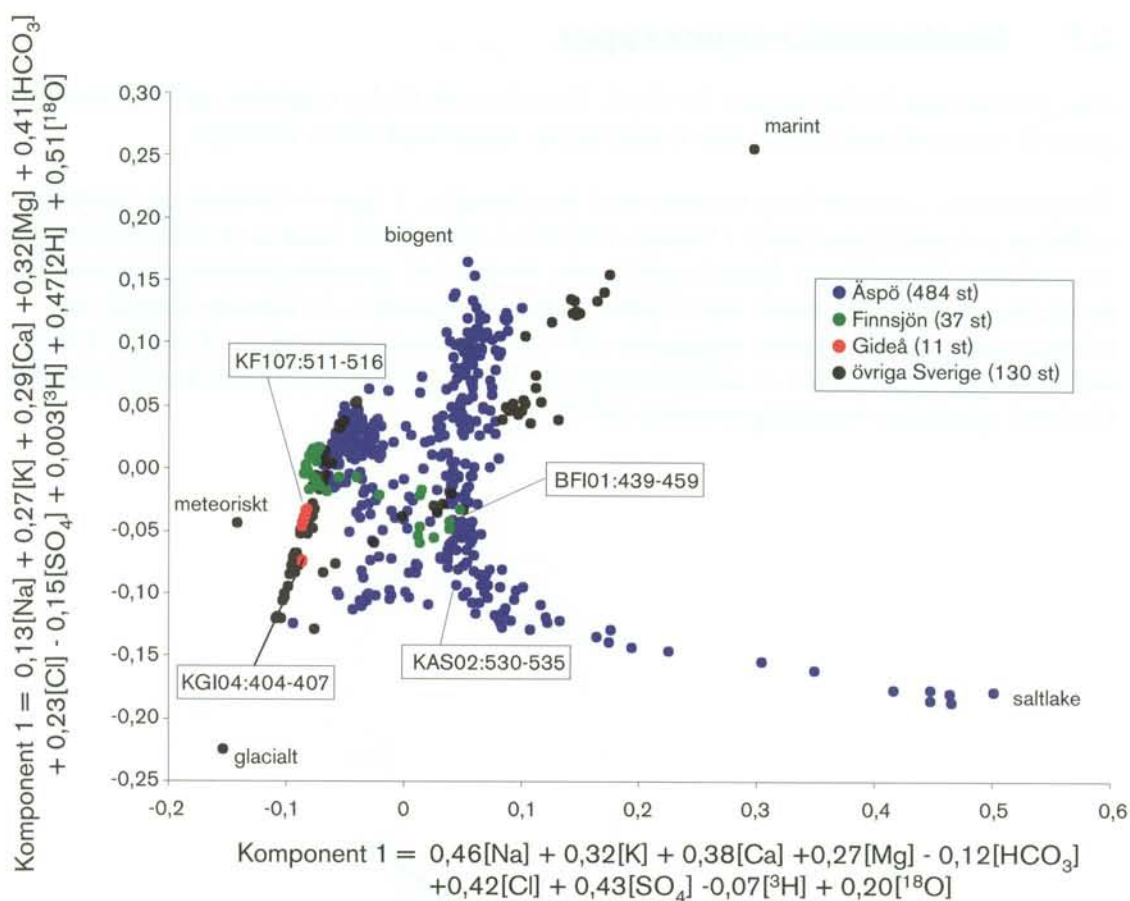
Tabell 4-16. Kemisk sammansättning på referensvatten /efter Laaksoharju et al, 1998/.

Grundvattenkomponenter	Enhet	Aberg	Beberg		Ceberg
		KAS02	BFI01	KFI07	KG104
Provtagningsdatum		88-05-04	86-10-27	80-11-19	82-07-04
Djup	m	528	436	508	384
Spolvatteninblandning	%	0,19	0,02	–	11,03
Na ⁺	mg/l	2100	1700	275	105
K ⁺	mg/l	8,1	13,0	2,0	1,9
Li ⁺	mg/l	1,0	0,007	–	–
Ca ²⁺	mg/l	1890	1650	142	21
Mg ²⁺	mg/l	42	110	17	1,1
Sr ²⁺	mg/l	35	21	–	–
Fe ²⁺	mg/l	0,24	–	1,80	0,05
Mn ²⁺	mg/l	0,29	0,82	0,13	0,01
HCO ₃ ⁻	mg/l	10	47	278	18
SO ₄ ²⁻	mg/l	560	370	49	0,1
Cl ⁻	mg/l	6410	5500	555	178
I ⁻	mg/l	–	0,12	–	0,14
Br ⁻	mg/l	40	32	–	–
F ⁻	mg/l	1,5	1,2	1,5	3,2
HS ⁻	mg/l	0,15	0,01 ¹⁾	–	0,01 ¹⁾
NH ₄ ⁺ angiven som N	mg/l	0,03	0,35	0,09	0,012
NO ₃ ⁻ angiven som N	mg/l	0,010 ¹⁾	0,005 ¹⁾	0,002 ¹⁾	0,009
NO ₂ ⁻ angiven som N	mg/l	0,001 ¹⁾	0,005	0,010	0,001 ¹⁾
PO _{4,tot} angiven som P	mg/l	0,005	0,005	0,040	0,008
SiO ₂ angiven som Si	mg/l	4,1	5,4	5,6	4,7
DOC (upplöst organiskt kol)	mg/l	1,0	–	5,7	2,0
TDS (totalt upplöst material)	mg/l	11107	9457	1339	338
U	µg/l	3,86	19,3 ³⁾	0,35	0,17
Th	µg/l	0,022 ²⁾	0,120 ³⁾	–	0,028
¹⁴ C-ålder korrigerad med ¹³ C	år	–	8640	4610	–
D	SMOW	-97,2 ²⁾	-88,7	-89,0	-99,4
T	TU	8 ²⁾	3 ¹⁾	8	8
¹⁸ O	SMOW	-12,30 ²⁾	-11,81	-11,90	-13,63
Representativt Eh	mV	-308	–	-250	-202
Representativt pH		7,73	7,04	7,90	9,30
Representativ ledningsförmåga	mS/m	1890	1610	190	65,5
Jonstyrka		0,240	0,210	0,0252	0,00619

¹⁾ under detektionsgränsen

²⁾ uppmätt 95-05-05

³⁾ oxidation vid borring



Figur 4-19. Analys av huvudkomponenterna i alla vattenprover tagna i Äspö, Finnsjön och Gideå samt på andra platser i Sverige. Referensvattenproverna är markerade i figuren /efter Laaksobarju et al, 1998/.

Osäkerheter i den geokemiska modellen har analyserats av Andersson /1999/ och innefattar:

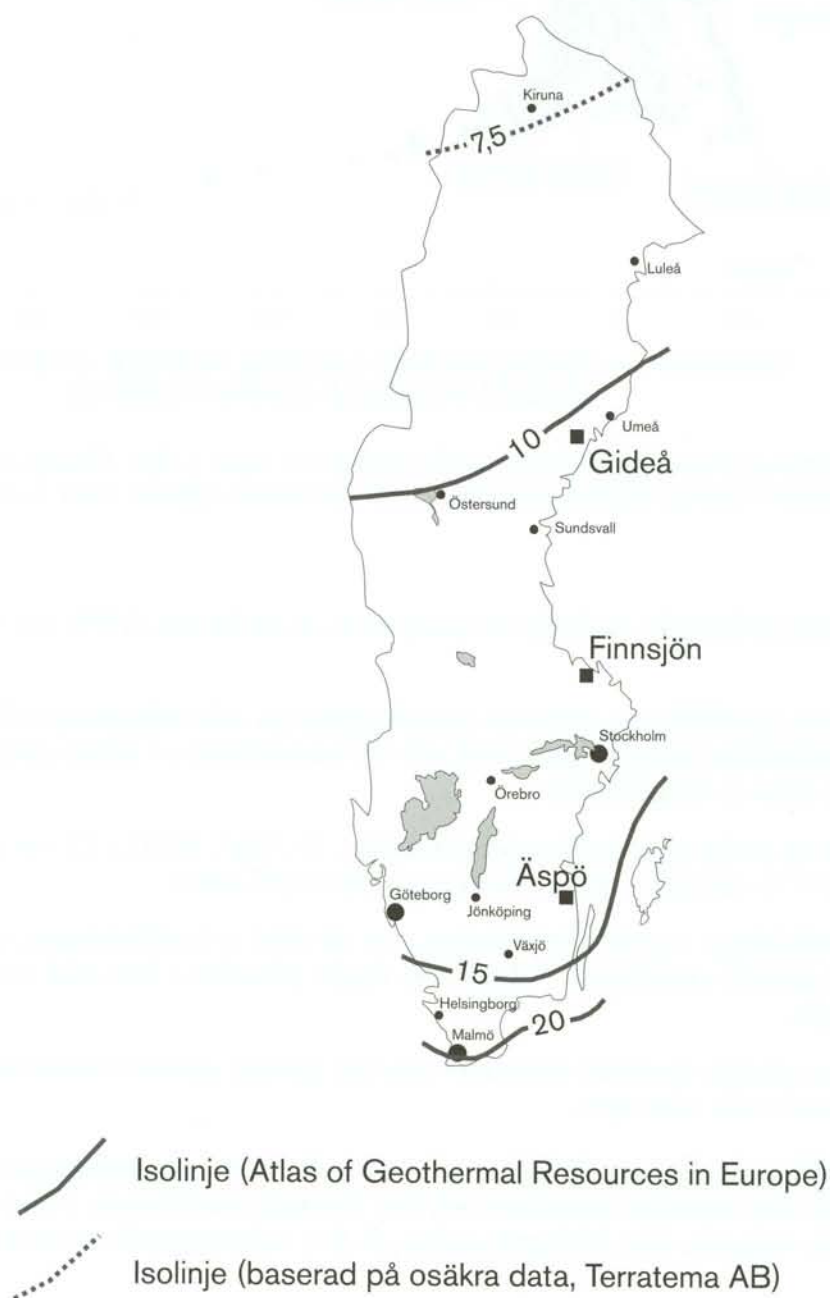
- Störningar vid mättillfället på grund av tunnelbyggnation och anläggningsdrift som förändrar flödesbilden kring förvaret med risk för introduktion av saltare grundvatten från djupare delar av berggrunden.
- Mättningsfel vid analys av huvudkomponenter (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^-) av storleksordningen 1–5 % och pH som kan variera upp till en pH-enhet.
- Framtida förändringar i grundvattenrörelser, t ex till följd av landhöjningen, som kommer att påverka vattenkemin. Salthalterna väntas förändras i takt med strandförskjutningen.
- Insättande av tekniska barriärer (bentonit) som kan påverka grundvattensammansättningen i förvaret och närberget.

Andersson /1999/ anser det vara rimligt att anta att osäkerheten i grundvattenkemin, både beträffande dess rumsliga variationer och den framtida utvecklingen, i stort sett begränsas av den variation som föreligger mellan de fyra referensgrundvattensammansättningarna.

4.7 Geotermiska egenskaper

Den geotermiska beskrivningen för Äspö, Finnsjön och Gideå omfattar medeltemperatur, generell temperaturgradient samt bergarternas värmekonduktiva förmåga.

Temperaturen i svenskt berg varierar med breddgraden. I figur 4-20 finns en sammanställning av bergtemperaturer i Sverige vid 500 m djup. Den baseras på information från ett sextiotal, företrädesvis djupa borrhål, som borrats vid gruvprospektering, geotermisk prospektering och i samband med SKB:s lokaliseringsstudier. Av figuren framgår att temperaturen på 500 m djup uppskattas till 7,5–10°C i norra Sverige och till 10–15°C i mellersta och större delen av södra Sverige. För de sydligaste delarna av landet samt för Gotland uppskattas bergtemperaturen till 15–20°C.



Figur 4-20. Temperatur vid 500 m djup i Sverige /efter Sundberg, 1995/.

Resteffekt hos kärnbränsle medför att de kapslar med bränsle som deponeras kommer att generera värme. I förvarets närområde uppnås maximitemperaturer inom några tiotals år efter deponering. Resteffekten avtar med tiden och 1 000 år efter deponering har värmeproduktionen upphört nästan helt. Värmeutbredningen sker till en början lokalt kring varje kapsel.

Uppvärmningsförloppet i berget styrs av ett antal berg- och konstruktionsparametrar. De viktigaste bergparametrarna är den ursprungliga temperaturfördelningen och bergets värmeledningsförmåga.

Den inducerade uppvärmningen överlagrar den ursprungliga temperaturfördelningen. Högre initialtemperatur ger därför ungefär motsvarande höjning av de absoluta temperaturerna efter deponering. Vidare, ju bättre bergets värmeledningsförmåga är, desto lägre blir de maximala temperaturer som uppnås för en given utformning av förvaret.

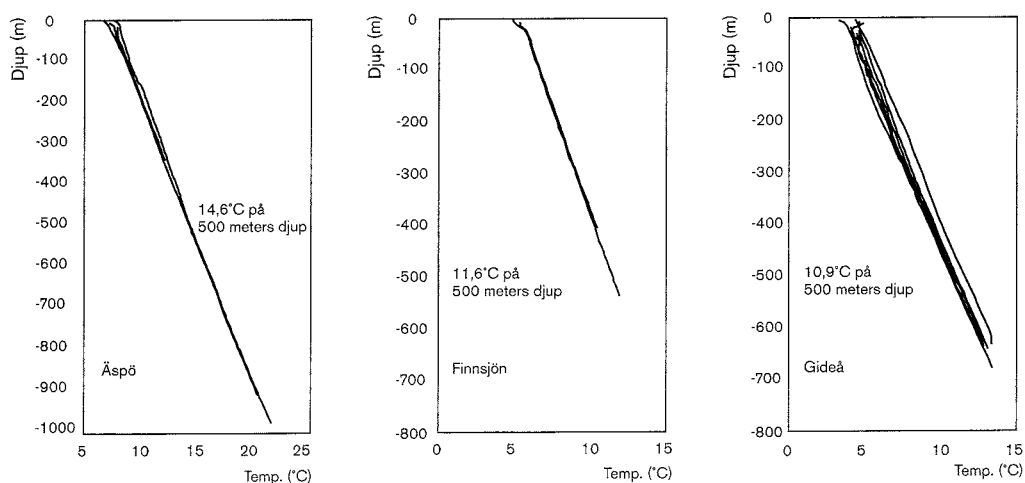
Omfattande parameterstudier har gjorts för att kartlägga hur temperaturutbredningen varierar med aktuella berg- och konstruktionsparametrar. En ökning av initialtemperaturen med 7°C, vilket ungefär motsvarar skillnaden i bergtemperatur mellan platser i norra och södra Sverige, skulle svara mot en ökning av deponeringsområdets storlek med 15–20 %.

Temperatur och dess fördelning är fundamentala tillståndsparametrar i ett djupförvar och påverkar såväl den mekaniska, kemiska och biologiska miljön som grundvattenströmningen genom förvaret.

Värmekonduktiviteten styrs av mineralsammansättningen hos bergarten, främst av dess kvartsinnehåll. Under antagande om isotropa och homogena förhållanden kan värmekonduktiviteten beräknas direkt från mineralsammansättningen. Tabell 4-17 visar beräknade medelvärden för värmekonduktiviteten för några av de vanligast förekommande kristallina bergarterna i Sverige.

4.7.1 Aberg

I Äspö har man uppmätt en medeltemperatur på 14,6°C vid 500 m djup och en genomsnittlig temperaturgradient på 15,0°C/km, se figur 4-21. Insamlade data har dock rapporterats vara något påverkade av grundvattenflödet i borrhålen /Ahlbom et al, 1995/.



Figur 4-21. Geotermisk gradient i Äspö, Finnsjön och Gideå /efter Ahlbom et al, 1995/.

Medelvärden för värmekonduktiviteten för ca 100 olika bergartsprov från platsen redovisas i tabell 4-18. Angivna värden är baserade på beräkningar ur mineralsammansättning och inte uppmätta på bergartsprov. Avvikelserna från de medelvärden för bergarter i Sverige som redovisas i tabell 4-17 kan förklaras av de lokala variationer som förekommer.

Tabell 4-17. Medelvärde på värmekonduktivitet för de vanligast förekommande kristallina bergarterna i Sverige /Sundberg, 1995/.

Bergart	Antal observationer	Värmekonduktivitet (W/m°C)
Granit, gnejsgranit	848	3,47
Granodiorit	255	3,34
Tonalit	171	3,16
Aplit, pegmatit	44	3,31
Kvartsdiorit	122	2,87
Syenit, diorit, gabbro	188	2,67
Porfyr	95	3,55
Ryolit, dacit	119	3,37
Trakyt, andesit, basalt	70	2,83
Kvartsit	32	6,62
Omvandlade sediment: gråvackor, glimmerskiffer	122	3,58
Leptit	726	3,58

Tabell 4-18. Medelvärde på värmekonduktiviteten för bergartsprov från Äspö /Sundberg, 1991/.

Bergart	Värmekonduktivitet (W/m°C)
Grönstenar	2,58
Dioriter	2,55
Kvartsmonzonit-granodiorit	2,63
Granodiorit-granit	3,03
Granit	3,48
Alla bergartsprover från Äspö	2,96

4.7.2 Beberg

Temperaturen har uppmätts i tre djupa borrhål i Finnsjön. Mätningarna ger en medeltemperatur av 11,6°C vid 500 m djup. Den genomsnittliga temperaturgradienten beräknas till 12,7°C/km, se figur 4-21 /Ahlbom et al, 1995/.

Lokala data för granodioritens värmekonduktivitet finns ej redovisade för Finnsjön. Ur tabellerna 4-17 och 4-18 kan konduktivitetens värden för granodiorit i Sverige uppskattas till 3–3,3 W/m°C. Avvikelser från medelvärdet kan bero på oregelbundna egenskaper i berg-

massan, såsom förskiffring, dominerande sprickriktningar och större hydrauliskt konduktiva zoner.

4.7.3 Ceberg

Medeltemperaturen på 500 m djup i Gideå rapporteras av Ahlbom et al /1995/ till 10,9°C med en genomsnittlig temperaturgradient på 15,5°C/km, figur 4-21.

I Gideå har termiska egenskaper hos bergmassan redovisats av Ahlbom et al /1991/. Gnejsgranit, som är den dominerande bergarten, kännetecknas av oregelbundna termiska egenskaper och har en värmekonduktivitet som varierar mellan 3,14 och 5,51 W/m°C. Detta intervall är något högt i jämförelse med de värden som Sundberg /1991/ redovisar i tabell 4-17.

4.7.4 Osäkerheter i de termiska beskrivningarna

Värmekonduktiviteten för en bergart beror på dess mineralsammansättning. Olika mineral skiljer i värmekonduktivitet. Kvarts, det vanligaste mineralet i graniter, har tre till fyra gånger högre förmåga att transportera värme än det näst vanligaste mineralet fältspat. En osäkerhetsfaktor är således hur bergmassans sammansättning varierar inom ett förvar. Värmekonduktiviteten påverkas också av anisotropier i bergmassan i form av förskiffringar och parallellt utsträckta bergartskroppar samt av diskontinuiteter i form av sprickzoner och spricksystem. Dessa är alltid ofullständigt kända. Sprickor orienterade vertikalt mot värmeflödet minskar värmetransporten något, eftersom de fungerar som barriärer för värmeflödet /Sundberg, 1995/. Är sprickorna vattenförande transporterar de också energi.

Sundberg /1995/ betonar att bergarternas anisotropi leder till en riktning beroende värmekonduktivitet. Det aritmetiska och harmoniska medelvärdet kan användas för att ange en högsta och lägsta gräns för värmekonduktiviteten, parallellt respektive vinkelrätt mot förskiffringen.

5 Platsspecifik anpassning av förvaret

Den förvarsutformning som gavs i kapitel 3 är principiell till sin natur, dvs oberoende av detaljerad kunskap om förvarsplatsen. I praktiken behöver utformningen av ett förvar alltid anpassas till den specifika platsens egenskaper.

I kapitel 5 beskrivs vilka platsanpassningar som har genomförts för Aberg, Beberg och Ceberg. Anpassningen gäller hur de olika förvarsdelarna förläggs i förhållande till varandra, hur tunnlar, schakt och deponeringsområden lokaliseras och hur djupt ner i berget olika anläggningsdelar placeras. Anpassning behöver bland annat genomföras med beaktande av sprick- eller svaghetszoner, bergkvalitet, grundvattnets strömningsvägar och biosfärens recipienter för djupt grundvatten. Hänsyn måste också tas till förutsättningarna ovan jord, såsom planförhållanden, annan verksamhet i området och infrastruktur.

Möjligheten att förlägga förvaret för annat långlivat avfall i anslutning till förvaret för använt kärnbränsle har inkluderats vid utformningen av förvaren i Aberg, Beberg och Ceberg.

5.1 Utformning av förvaret

5.1.1 Allmänt

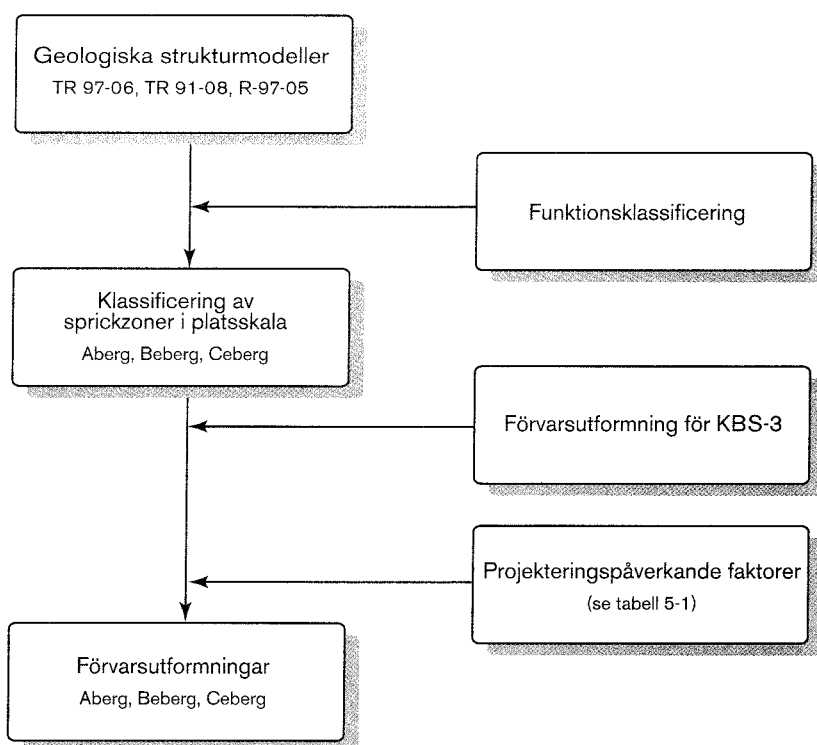
Projekteringen är den sammanhållna process, där det tekniska planerings- och utvecklingsarbetet koordineras för att ge ett konkret underlag för byggande och drift. Processen omfattar anläggningar och utrustningar ovan och under jord samt planering av själva verksamheterna under bygg- och driftsskedena. Projekteringen måste drivas väl samordnad med forskning, säkerhetsanalys och lokaliseringsarbete.

Anläggningsbeskrivningen är det första samordnade förslaget till utformning av djupförvaret och utgör grunden för den fortsatta projekteringen. Den ger viktiga förutsättningar för framtagande av systemlösningar för viktiga funktioner under jord, exempelvis ventilation, dränering och elförsörjning samt för utformning av maskiner och fordon.

5.1.2 Detaljerad anpassning av förvarets utformning

När platsundersökningar inletts börjar arbetet med att anpassa djupförvarets utformning i stort (layout) och konstruktion (design) till förhållanden på den plats som undersöks (se figur 5-1). Bygganalyser görs för att utvärdera lösningarna för byggtekniskt viktiga faktorer, möjliga byggmetoder, resursbehov m m.

Projekteringen görs mer och mer detaljerad i den takt data blir tillgängliga från platsundersökningarna. I en första fas anpassas lägen och utformning av ovan- och underjordsdelarna i grova drag till platsens förutsättningar. Vidare bestäms hur delarna ska förbindas med varandra (schakt eller ramp). Situationsplaner över anläggningarna och layoutritningar för tunnelsystem och nedfarter tas fram. I en andra fas utarbetas ritningar och annat underlag, som beskriver såväl utformning och funktion av enskilda anläggningsdelar som hur delarna knyts ihop till en helhet. En preliminär utformning av djupförvaret kommer att ingå i underlaget för ansökan om detaljundersökning och bygge.



Figur 5-1. Schematisk bild av kopplingarna mellan data från platsundersökningar, projektering och säkerhetsanalyser. (Visar inte på någon återkoppling utan hur det gjordes i SR 97, se vidare i avsnitt 5.3).

5.2 Faktorer som påverkar utformningen

5.2.1 Allmänt

Ett flertal platsspecifika faktorer påverkar utformningen av djupförvaret och dess olika delar. De faktorer som bedöms ha störst betydelse för förvarsutformning under jord är bergspänningar och riktning och egenskaper hos enskilda sprickor och vattenförande zoner. Vissa av dessa faktorer samverkar, medan andra faktorer är oberoende.

5.2.2 Funktionsklassificering av diskontinuiteter

Grundad på den geovetenskapliga karakteriseringen analyseras och utvärderas alternativa utformningar av förvaret med hänsyn till byggaspekter och drift samt långsiktig funktion och säkerhet. En funktionsbeskrivning av berget och förvaret upprättas, varvid berget och dess strukturer beskrivs och klassas. Klassningen av strukturer revideras allt eftersom den geovetenskapliga informationen om den ändras.

Med diskontinuitet avses en mekaniskt avvikande struktur i bergmassan, t ex spricka eller skiffrihetsplan eller zon – oftast med huvudsaklig utsträckning i två dimensioner – med lägre hållfasthet än omgivningen. Denna term används genomgående för att särskilja funktionsklassade strukturer från strukturer som beskrivits utifrån hur de har identifierats eller deras geologiska särart.

Diskontinuiteterna klassas ur funktionssynpunkt /Almén et al, 1996/ enligt följande:

- D1: Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de inte får förekomma inom förvarsvolymen och endast i undantagsfall får passeras av tillfartstunnel. Diskontinuiteter av funktionsklass D1 utgör storskaliga mekaniska och/eller hydrauliska ränder för djupförvaret. Diskontinuiteter av funktionsklass D1 framträder ofta som lineament med milslång utbredning.
- D2: Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de ej får passeras av deponeringstunnlar. Diskontinuiteter av funktionsklass D2 får dock vara avgränsande mellan förvarets olika huvuddelar eller deponeringsområden. Diskontinuiteter av typ D2 har liknande egenskaper som D1 men är i allmänhet mer lokala och mindre intensiva till sin karaktär.
- D3: Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de tillåts förekomma inom förvarsdelar och passeras av såväl transporttunnlar som deponeringstunnlar. Diskontinuiteter av typ D3 utgörs oftast av mindre sprickzoner men även enstaka sprickor, exempelvis kraftigt vattenförande sprickor med stor utbredning, kan uppvisa egenskaper som motiverar att de kan hänföras till denna klass.
- D4: Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de tillåts korsa deponeringsposition och således inte påverkar förvarets utnyttjandegrad. Diskontinuiteter av funktionsklass D4 består vanligen av enskilda sprickor eller förskiffringsplan, vars huvudorienteringar dock kan påverka förvarets tunnelriktningar. Diskontinuiteter av funktionsklass D4 kan även ha betydelse för närområdets funktion med avseende på grundvattenströmning och nuklidtransport; de kan även ha betydelse för kapselhålets bergmekaniska stabilitet.

Sprickor varierar i ålder, storlek, riktning, densitet, utbredning och vattenförande samt mekaniska egenskaper. En bergmassa innehåller oftast flera sprickgrupper.

Vattenförande sprickor av funktionsklass D3 påverkar hur man kan utnyttja berget genom att kapselpositioner som skärs av dessa inte kan användas. Sådana diskontinuiteter är platsberoende och deras inverkan på förvarsutformningen kan därför variera både mellan olika förvarsplatser och mellan olika block inom ett och samma område.

Deponeringstunnlarna bör orienteras på ett sådant sätt att skärningsytan med vattenförande sprickor minimeras, genom att dessa skärs med så trubbig vinkel som bergblockens form tillåter.

5.2.3 Respektavstånd

Ett influensområde kring en diskontinuitet kan definieras som den volym av den aktuella bergmassan för en given skala bortom vilken en viss påverkan anses osannolik. Ett respektavstånd kan därför definieras som det avstånd från en tolkad diskontinuitet som krävs, för att ställda krav på långsiktig säkerhet för en kapselposition ska uppnås.

En koppling av respektavstånden till definierade funktionsklasser ger möjlighet att tidigt i projekteringen avgränsa och bedöma storlek på blocken i ett givet område för lokalisering av förvarets olika delar.

5.2.4 Bergblockens geometri

Sprickzoner i strukturmodellerna styr bergblockens form och storlek. Block som rymmer tunnlar med längder inom spannet 250 till 500 m anses byggt tekniskt fördelaktiga.

5.2.5 Bergspänningar

Bergspänningarna påverkar främst den mekaniska stabiliteten av bergrum, tunnlar och deponeringshål. Spänningstillståndet är platsspecifikt och kan variera inom ett förvarsområde i såväl riktning som magnitud. Bergspänningarna är dock i normalfallet måttliga på förvarsdjup. En av grunderna för förläggning av förvaret till djupintervallet 400–700 m är att bergspänningarna ska hålla sig inom rimliga nivåer.

Bergspänningarna påverkar transporttunnlar, deponeringstunnlar och kapselhål olika beroende på orientering, tvärsnitt och drivningsmetoder. Ur stabilitetssynpunkt bör i normalfallet deponeringstunnlar orienteras parallellt med den största horisontal-spänningen eller med så spetsig vinkel som möjligt mot denna.

5.2.6 Temperatur

Det använda kärnbränslet i kapslarna avger värme, vilket leder till en förhöjd temperatur i förhållande till omgivande bergmassor. Detta kan ge upphov till ändringar i spänningsfältet i berget och påverka bergets grundvattenrörelser och bentonitbuffertens egenskaper. Vid utformningen av förvaret tas hänsyn till bergets termiska egenskaper. En utbredning av förvaret i en större bergvolym genom ökat avstånd mellan kapselpositionerna begränsar den maximala temperaturen i förvaret och omgivande berg.

5.2.7 Strömningsmönster

Vid placering av deponeringstunnlar, ramper och schakt beaktas de hydrogeologiska förutsättningarna. Förvarets olika komponenter placeras så att den naturliga grundvattenströmningen från förvaret för annat långlivat avfall, vilken skulle kunna påverka grundvattenkemin, inte tillåts påverka deponeringsområdet för använt kärnbränsle. Förvarsutformningen kommer därför att anpassas baserat på de analyser av grundvattenrörelser som genomförs.

5.3 Anpassning av förvar för Aberg, Beberg och Ceberg

5.3.1 Förutsättningar för SR 97

Huvudsyftet med SR 97 är att genomföra en i de flesta avseenden fullständig säkerhetsanalys, där resultaten illustreras med verkliga, platsspecifika förhållanden från tre områden i Sverige. Förvaren har anpassats realistiskt för varje plats även om utformningen inte har optimerats men hänsyn till varje plats. Det centrala har i stället varit att skapa likvärdiga förutsättningar för att platsspecifika konsekvensanalyser ska kunna genomföras.

De förutsättningar som gäller förvarsutformningarna enligt KBS-3 för Aberg, Beberg och Ceberg sammanfattas i /Munier et al, 1997/. Speciellt kan följande noteras:

- Ett förvarsdjup av omkring 500 m har eftersträvat om inte de geologiska förutsättningarna på platsen motiverat ett annat val. Förvaren har utformats i ett våningsplan om inte annat motiveras av de geologiska förutsättningarna.
- Ingen hänsyn tas till eventuell positionsbortfall, dvs ingen extra yta tas i anspråk för att kunna förkasta deponeringshål. Avståndet mellan deponeringstunnlarna har antagits vara 40 m och mellan kapslarna minst 6 m /Pettersson et al, 1993/. Inga försök har gjorts att anpassa avstånden för respektive plats genom att genomföra termiska eller bergmekaniska beräkningar som en del av förvarsutformningen. Sådana beräkningar utförs senare med given förvarsutformning.
- Utgångspunkten för förvarsutformningen är de geologiska strukturmodellerna för respektive plats.
- Sprickzonerna har klassificerats. Som underlag för modellering av bergvolymerna har respektavstånden till strukturer av funktionsklasserna D1 och D2 satts till 100 respektive 50 meter. Inget respektavstånd har antagits för strukturer av funktionsklass D3.
- Förvaret för annat långlivat avfall placeras på ca 1 km avstånd från närmaste kapselposition i förvaret för använt kärnbränsle och i en sådan riktning att grundvattenflödet inte är riktat mot deponeringsområdet för kapslar.

De platsspecifika faktorer som påverkar utformningen av djupförvaret och dess olika delar i SR 97 sammanfattas i tabell 5-1.

Tabell 5-1. Faktorer som påverkat förvarsutformningarna för Aberg, Beberg och Ceberg /efter Munier et al, 1997/.

Faktor	Betydelse för förvarsutformning i SR 97
1. Respektavstånd	Strukturer som bedömts tillhöra funktionsklasserna D1 och D2 har givits 100 respektive 50 meters respektavstånd på ömse sidor om den tolkade zonens centrum. För strukturer av funktionsklass D3 har inget respektavstånd ansatts.
2. Det lokala spänningsfältet	Ett spänningsfält med avseende på riktning har ansatts för varje plats, magnituderna har inte beaktats.
3. Vattenförande strukturer, lokal skala	För Aberg finns belägg för att vattenförande sprickor stryker parallellt med den horisontella maximalspänningen. För Beberg och Ceberg har detta endast antagits. Deponeringstunnlar har för samtliga platsers huvudalternativ orienterats vinkelrätt (eller i trubbig vinkel) mot den maximala horisontalspänningen.
4. Blockens form	Zonerna i strukturmodellen styr blockens form och riktning. Block som kan rymma långa tunnlar (200–500 m) har prioriterats framför block i vilka endast kortare tunnlar ryms.
5. Hydrauliska barriärer	Större vattenförande diskontinuiteter inom förvarsvolymerna har i görligaste mån använts för att avgränsa förvaret för annat långlivat avfall från övriga förvarskomponenter. Grundantagandet har varit att de kan fungera som hydrauliska barriärer.
6. Avstånd till förvaret för annat långlivat avfall	Förvaret för annat långlivat avfall har placerats minst 1 km från närmaste kapselposition så att grundvattenflödet från detta förvar inte bedöms nå någon deponeringstunnel.

För varje plats har ett antal ingenjörsmässiga utformningar tagits fram, varav huvudalternativet för respektive plats redovisas i de följande avsnitten. För en fullständig redovisning hänvisas till /Munier et al, 1997/. Deponeringstunnlarna har orienterats vinkelrätt mot största horisontalspänningen. Denna orientering har valts för att undvika långa skärningar med vattenförande sprickor, vilka har samma riktning som horisontalspänningen.

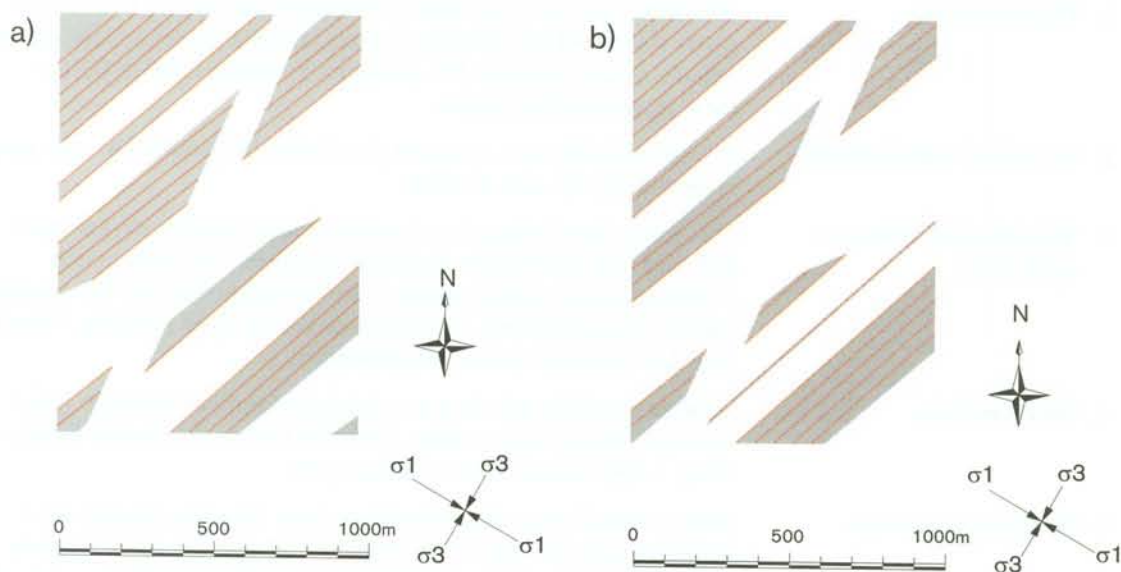
5.3.2 Aberg

Omfattande undersökningar har genomförts i Aberg. Den geologiska modellen baseras förutom på information från ytundersökningarna också på information från den ramp som drivits från markytan ner till ca 450 m nivå. I Aberg är den föreslagna layouten uppdelad på två nivåer belägna på 500 m och 600 m djup på grund av begränsade bergvolymen på en nivå (figur 5-2). Anslutning sker med ramp och förvaret för annat långlivat avfall skulle, om det samlokaliseras med djupförvaret, kunna ansluta till rampen vid 300 m. Deponeringstunnlarna är placerade vinkelrätt mot största horisontalspänningen.

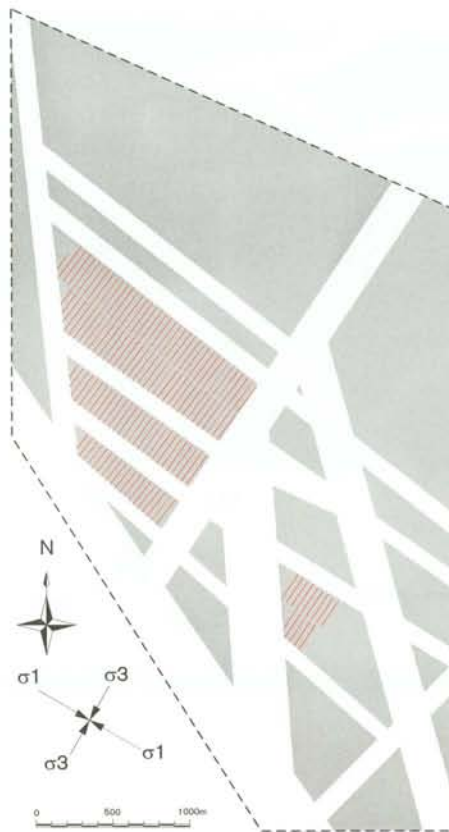
Termiska beräkningar som gjorts för den föreslagna förvarsutformningen i Aberg visar att minsta avståndet mellan kapslarna måste ökas från 6 m till ca 7,5 m om tunnelavståndet är 40 m för att den maximalt tillåtna temperatur på kapselytan inte ska överskridas /Ageskog och Jansson, 1999/.

5.3.3 Beberg

Undersökningen av Beberg har främst utförts för att undersöka området som en del av SKB:s typområdesundersökningar och för att undersöka den mäktiga flacka strukturen (Zon 2) som identifierats i området mellan -100 och -295 m. Således finns det relativt god kunskap om områdets regionala geologi samt bergmassan över Zon 2. Avsevärt



Figur 5-2. Anpassning av layout för deponeringstunnlar i blocken i Aberg. Figuren visar förvarets två nivåer a) -500 m och b) -600 m.

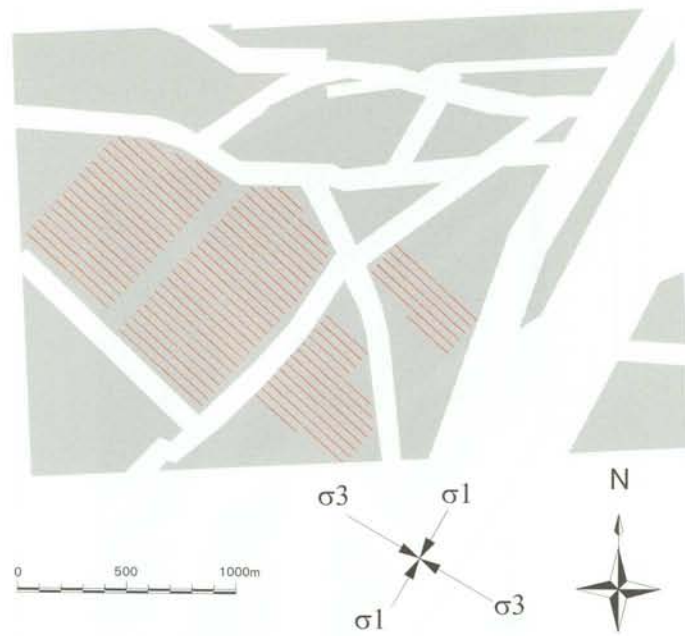


Figur 5-3. Anpassning av layout för deponeringstunnlar i blocken i Beberg på nivån -600 m.

mindre kunskap föreligger om bergmassan under Zon 2. I Beberg är föreslagen layout placerad på nivån -600 m (figur 5-3) för att med god marginal undvika den horisontella strukturen. Anslutning sker med ramp och förvaret för annat långlivat avfall skulle, om det samlokaliseras med djupförvaret, kunna ansluta till rampen vid nivån -360 m. Deponeringstunnlarna är placerade vinkelrätt mot största horisontalspänningen. Utformningen överensstämmer väl med den som togs fram i samband med SKB 91 /SKB 91, 1992/.

5.3.4 Ceberg

Ceberg är den plats där informationsmängden är minst; bland annat är borrhålen färre än i Aberg och Beberg. I Ceberg föreslås förvaret placeras på -500 m (figur 5-4), dvs omkring 600 m under markytan. Anslutning sker med ramp och förvaret för annat långlivat avfall skulle, om det samlokaliseras med djupförvaret, kunna ansluta till rampen vid nivån -375 m. Deponeringstunnlarna är placerade vinkelrätt mot största horisontalspänningen.



Figur 5-4. Anpassning av layout för deponeringstunnlar i blocken i Ceberg på nivån -500 m.

6 Referenser

Ageskog L, Jansson P, 1999. Heat propagation in and around the deep repository. Thermal calculations applied to three hypothetical sites: Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR-99-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ahlbom K, Albino B, Carlsson L, Nilsson G, Olsson O, Stenberg L, Timje H, 1983. Evaluation of the geological, geophysical and hydrogeological conditions at Gideå, SKBF/KBS TR 83-53. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.

Ahlbom K och Smellie JAT, (eds.) 1989. Characterization of fracture zone 2, Finnsjön study site. SKB TR 89-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ahlbom K, Andersson J E, Nordquist R, Ljunggren C, Tiren S, Voss C, 1991. Gideå study site. Scope of activities and main results. SKB TR 91-51. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ahlbom K, Tirén S, 1991. Overview of geological and geohydrologic conditions at the Finnsjön site and its surroundings. SKB TR 91-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ahlbom K, Andersson J E, Nordquist R, Ittner T, Ljunggren C, Tirén S, 1992. Finnsjön study site. Scope of activities and main results. SKB TR 92-33. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ahlbom K, Olsson O, Sehlstedt S, 1995. Temperature conditions in the SKB study sites. SKB TR 95-16. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Almén K E, Stanfors R, Svemar C, 1996. Nomenklatur och klassificering av geologiska strukturer vid platsundersökningar för SKB's djupförvar. SKB PR D-96-029. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson J, Almén K-E, Ericsson L O, Fredriksson A, Karlsson F, Stanfors R, Ström A, 1996. Parametrar att bestämma vid geovetenskaplig platsundersökning. SKB R-97-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson J, 1999. SR 97 – Data and data uncertainties compilation of data and evaluation of data uncertainties for radionuclide transport calculations. SKB TR-99-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson J-E, Nordquist R, Nyberg G, Smellie J, Tirén S, 1991. Hydrogeological conditions at the Finnsjön site. Compilation of data and conceptual model. SKB TR 91-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson P, 1994. Skadezon vid tunnelldrivning. SveBeFo Rapport 8, Stockholm.

Askling P, 1997. Gideå lineament map. An interpretation based on elevation data models. SKB PR U-97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Autio J, 1997. Characterisation of the excavation disturbed zone caused by boring of the experimental full scale deposition holes in the research tunnel at Olkiluoto. SKB TR 97-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bjarnason B, Stephansson O, 1988. Hydraulic fracturing stress measurements in borehole F1-6, Finnsjön study site, central Sweden. SKB AR 88-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bjarnason B, Leijon B, Strindell L och Öhman T, 1989. Rock stress measurements in boreholes KAS02, KAS03 and KAS05 on Äspö. SKB PR 25-89-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bäckblom G, 1996. Preliminär utformning av djupförvarets närområde. SKB AR D-96-011. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Börgesson L, Pusch R, Fredriksson A, Hökmark H, Karnland O, Sandén T, 1992. Final report of the rock sealing project – Identification of zones disturbed by blasting and stress release. Stripa Project TR 92-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Emsley S, Olsson O, Stenberg L, Alheid H-J, Falls S, 1997. ZEDEX – A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring. SKB TR 97-30. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ericsson L O, Ronge B, 1986. Correlation between tectonic lineaments and permeability values of crystalline bedrock in the Gideå area. SKB TR 86-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Forsström H, 1982. Hantering och slutförvaring av använt plutoniumberikat bränsle (MOX-bränsle). SKBF/KBS AR 82-33, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.

Gustafsson E, Skålberg M, Sundblad B, Karlberg O, Tullborg E-L, Ittner T, Carbol P, Eriksson N, Lampe S, 1987. Radionuclide deposition and migration within the Gideå and Finnsjön study sites, Sweden: A study of the fallout after the Chernobyl accident. Phase 1, initial study. SKB TR 87-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hermanson J, Hansen L, Follin S, 1997. Update of the geological models of the Gideå study site. SKB R-97-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Håkansson R, 1998. Beräkningar av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle. SKB (under utarbetande). Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hökmark H, 1995. Smectite-to-illite conversion in bentonite buffers. Application of a technique for modelling degradation processes. SKB AR 95-07. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Israelsson J, Rosengren L och Stephansson O, 1992. Sensitivity study of rock mass response to glaciation at Finnsjön, central Sweden. SKB TR 92-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ittner T, 1989. Long term sampling and measuring program. Joint report for 1987, 1988 and 1989, Within the project: Fallout studies in the Gideå and Finnsjön areas after the Chernobyl accident in 1986. SKB TR 91-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Johannesson L-E, Börgesson L, Sandén T, 1995. Compaction of bentonite blocks. Development of technique for industrial production of blocks which are manageable by man. SKB TR 95-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Karnland O, Warfvinge P, Pusch R, 1995.** Smectite-to-illite conversation models. SKB AR 95-27. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- KBS, 1977.** Projekt Kärnbränslesäkerhet. Kärnbränslecykelns slutsteg, förglasat avfall från upparbetning. SKBF/KBS. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- KBS, 1978.** Projekt Kärnbränslesäkerhet. Kärnbränslecykelns slutsteg. Slutförvaring av använt kärnbränsle. SKBF/KBS. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- KBS-3, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3, Del I-IV. SKBF/SKB. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- Kornfält K-A, Wikman H, 1988.** The rocks of the Äspö Island. Description to the detailed maps of solid rocks including maps of 3 uncovered trenches. SKB PR 25-88-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Gurban I, Skärman C, 1998.** Summary of hydrochemical conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR-98-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Leijon B, Ljunggren C, 1992.** A rock mechanics study of fracture zone 2 at Finnsjön. SKB TR 92-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Leijon B, 1993.** Mechanical properties of fracture zones. SKB TR 93-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindbom B, Boghammar A, 1992.** Numerical groundwater flow calculations at the Finnsjön site. SKB TR 92-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindqvist P-A, Soares del Rio L M, Mantoto M, Tan X C, Kou S Q, 1994.** Rock indentation database – Testing procedures, results and main conclusions. SKB Djupförvar PR 44-94-023. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ljunggren C, Persson M, 1995.** Beskrivning av databas – Bergspänningsmätningar i Sverige. SKB PR D-95-017. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ljunggren C och Klasson H, 1997.** Deep hydraulic fracturing stress measurements in borehole KLX02, Laxemar. SKB Project Report U-97-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ljunggren C, Chang Y och Andersson J, 1998.** Bergspänningsmätningars representativitet – mätnoggrannhet och naturliga variationer vid hydraulisk spräckning och överborrning. SveBeFo Rapport 37.
- Munier R, Sandstedt H, Niland L, 1997.** Förslag till principiella utformningar av förvar enligt KBS-3 för Aberg, Beberg och Ceberg, SKB R-97-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olkiewicz A, Arnefors J, 1981.** Berggrundsbeskrivning av undersökningsområdet vid Finnsjön i norra Uppland. SKBF/KBS AR 81-35. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- PASS, 1992.** Project on Alternative System Study, Final Report (PASS). SKB Report TR 93-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Pettersson S, Svemar C, Vattenfall Energisystem AB, LangeArt AB, 1993. Anläggningsbeskrivning – Nedfart via rak ramp. SKB AR 44-93-005. Svensk Kärnbränslehantering AB.

PLAN 98, 1998. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Pusch R, Börgesson L, 1992. PASS – Project on alternative systems study. Performance assessment of bentonite clay barrier in three repository concepts: VDH, KBS-3 and VLH. SKB TR 92-40. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Pusch R, Stanfors R, 1992. Disturbance of rock around blasted tunnels. Int J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. 29(1992):5, 447–456.

Pusch R, 1995. Selection of buffer materials with special respect to their performance in a long-term perspective. SKB AR 95-21. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Pusch R, 1995b. Consequences of using crushed crystalline rock as ballast in KBS-3 tunnels instead of rounded quartz particles. SKB TR 95-14. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Read R S, 1996. Characterizing excavation damage in highly stressed granite at AECL's Underground Research Laboratory. In: Proc. of the Excavation Disturbed Zone Workshop, held in Winnipeg Sep. 20, 1996. Canadian Nuclear Society, Toronto, Canada.

Rhén I (ed.), Bäckblom G (ed.), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997a. Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/2. Results from pre-investigations and detailed site characterisation. Summary report. SKB TR 97-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rhén I (ed.), Bäckblom G (ed.), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997b. Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterisation 1986–1995. SKB TR 97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rosén L, Gustafson G, 1995. Suitable nearfield design. Stage 2. Provisional positioning index (PPI) predictions with respect to lithology, hydraulic conductivity and rock designation index along the TBM-tunnel. SKB PR HRL-25-95-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rosengren L och Stephansson O, 1990. Distinct element modelling of the rock mass response to glaciation at Finnsjön, central Sweden. SKB TR 90-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Saksa P, Nummela J, 1998. Geological-structural models used in SR-97. Uncertainty analysis. SKB TR-98-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SGU, Sveriges Geologiska Undersökning, 1981. Berggrundskarta i skala 1:250000 – Kartblad LN8, Ah1, Rapporter och meddelanden nr 65.

Skagius K, Svemar C, 1989. Performance and safety of WP-cave concept. SKB TR 89-26. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB 91, 1992. Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock safety. SKB TR 92-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Stanfors R, Stille H, 1997.** Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/3. Results from pre-investigations and detailed site characterisation. Comparison of predictions and observations. Geology and Mechanical stability. SKB TR 97-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephansson O, Ljunggren C and Jing L, 1991.** Stress measurements and tectonic implications for Scandinavia. *Tectonophysics*, Vol. 189, No. 1/4 pp 317-322.
- Stille H och Olsson P, 1990.** Evaluation of rock mechanics. SKB PR 25-90-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stille H och Olsson P, 1996.** Summary of rock mechanical results from the construction of Äspö Hard Rock Laboratory. SKB PR HRL-96-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sundberg J, 1991.** Thermal properties of the rocks on Äspö Island. Thermal conductivity, heat capacity, geothermal gradient and heat flow. SKB PR 25-91-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sundberg J, 1995.** Termiska egenskaper för kristallint berg i Sverige. Kartor över värmekonduktivitet, värmeflöde och temperatur på 500 m djup. SKB PR D-95-018. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svemar C, 1995.** Major design and Layout determining factors for Swedish KBS-3 type repository for final disposal and spent nuclear fuel. Fifth International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Proceedings, Berlin, September 4-7, 1995.
- Svensson U, 1995.** Modelling the unsaturated zone at Äspö under natural conditions and with the tunnel front 2874 metres. SKB PR 25-95-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Timje H, 1983.** Hydrogeological investigations at study site Gideå. SKBF/KBS AR 83-26. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- Walker D, Rhén I, Gurban I, 1997.** Summary of hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR 97-23. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Welin E, Lundquist T, 1975.** K-Ar ages of Jotnian dolerites in Västernorrland County, central Sweden. *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, Vol. 97.
- Wen X-H, 1994.** Estimation of statistical parameters for censored lognormal hydraulic conductivity measurements. *Mathematical Geology*, Vol 26:6.
- Werme L, Eriksson J, 1995.** Copper canister with cast inner component. Amendment to Project on Alternative Systems Study (PASS). SKB TR 95-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle. SKB R-98-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wiborgh M, Markström A, 1991.** Compilation of potential chemical toxic elements in a copper canister containing HLW. SKB AR 91-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Wickman F E, Aberg G, Levi B, 1983. Rb-Sr dating of alteration events in granitoids. Contrib. Mineral. Petrol. Vol 83, pp 358-362.

Wikman H, Kornfält K-A, 1995. Updating of a lithological model of the bedrock of the Äspö area. SKB PR 25-95-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Winberg A, 1995. Overview and review of experiments in the excavation disturbed zone. SKB PR HRL-25-95-17. Svensk Kärnbränslehantering AB.