

Säkerhetsrelaterade platsegenskaper – en relativ jämförelse av Forsmark med referensområden

Anders Winberg, Conterra AB

December 2010

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



Säkerhetsrelaterade platsegenskaper – en relativ jämförelse av Forsmark med referensområden

Anders Winberg, Conterra AB

December 2010

Nyckelord: Forsmark, Jämförelse, Lokalisering, Långsiktig säkerhet, Platsegenskaper, Referensområde, Typområde, SKBdoc 1267861.

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarens egna. SKB kan dra andra slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

Förord

Denna rapport har som syfte att belysa Forsmark som plats för slutförvaret mot bakgrund av generell kunskap om viktiga säkerhetsrelaterade geovetenskapliga faktorer. Ett stort tack riktas till alla de kollegor som med material, skrivningar, diskussion och granskning bidragit till rapporten.

Sammanfattning

SKB har under åren 2002 till 2008 bedrivit platsundersökningar i Forsmark och Laxemar, med tillhörande platsmodellering, projektering och säkerhetsanalyser. I mitten av 2009 valdes mot bakgrund av utförda analyser Forsmark som plats för ett framtida slutförvar för använt kärnbränsle.

Med utgångspunkt från definierade säkerhetsrelaterade geovetenskapliga lokaliseringsfaktorer jämförs data från Forsmark i relativa termer med data från ett antal platser i Sverige som tidigare undersökts av SKB. De faktorer som jämförs inkluderar: bergets sammansättning och strukturer, framtida klimatutveckling, bergmekaniska förhållanden, jordskalv, grundvattenströmning, grundvattnets sammansättning, fördröjning av lösta ämnen, samt möjligheten att karakterisera och beskriva platsen.

Genomförda jämförelser av dessa egenskaper för de utvalda platserna visar att ingen av dessa platser sammantaget uppvisar någon signifikant fördel jämfört med Forsmark som plats för ett slutförvar. Detta utesluter dock inte att det kan finnas platser som utifrån en sammanvägd bedömning av geovetenskapliga lokaliseringsfaktorer skulle kunna vara likvärdiga med Forsmark.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	8
1.3	Referensområden	8
2	Bergets sammansättning och strukturer	13
2.1	Sveriges berggrund – en översikt	13
2.1.1	Indelning baserad på tektonik	13
2.1.2	Indelning baserad på textur och mineralogisk sammansättning	15
2.2	Jämförelse av områden	16
2.2.1	Grundläggande antaganden och avgränsningar	16
2.2.2	Bergets värmeledningsförmåga	16
2.2.3	Öppna sprickor	18
2.2.4	Layoutbestämmande strukturer	18
2.3	Slutsatser	22
3	Framtida klimatutveckling	23
3.1	Jämförelse av områden	23
3.1.1	Grundläggande antaganden och referensdata	23
3.1.2	Nuvarande klimatbestämmande faktorer	25
3.1.3	Generell framtida klimatutveckling	25
3.2	Slutsatser	28
4	Bergmekaniska förhållanden	29
4.1	Jämförelse av områden	30
4.1.1	Strukturkontrollerad instabilitet	30
4.1.2	Överbelastning och spjälkning	30
4.1.3	Hållfasthet	32
4.1.4	Bergspänningar	32
4.2	Slutsatser	35
5	Jordskalv	37
5.1	Jämförelse av områden	37
5.2	Slutsatser	37
6	Grundvattenströmning	39
6.1	Jämförelse av områden	39
6.1.1	Dataunderlag och normering av data	39
6.1.2	Metod	40
6.1.3	Resultat och diskussion	40
6.2	Slutsatser	42
7	Grundvattnets sammansättning	43
7.1	Dataunderlag	43
7.2	Jämförelse av områden	44
7.3	Slutsatser	44
8	Fördröjning av lösta ämnen	47
8.1	Jämförelse av områden	47
8.2	Slutsatser	47
9	Möjlighet att karakterisera och beskriva platsen	49
9.1	Jämförelse av områden	49
9.2	Slutsatser	49
10	Övergripande slutsats	51
11	Referenser	53
Appendix 1	Bestämning av hydraulisk konduktivitet – effekter av mätgränser	57

1 Inledning

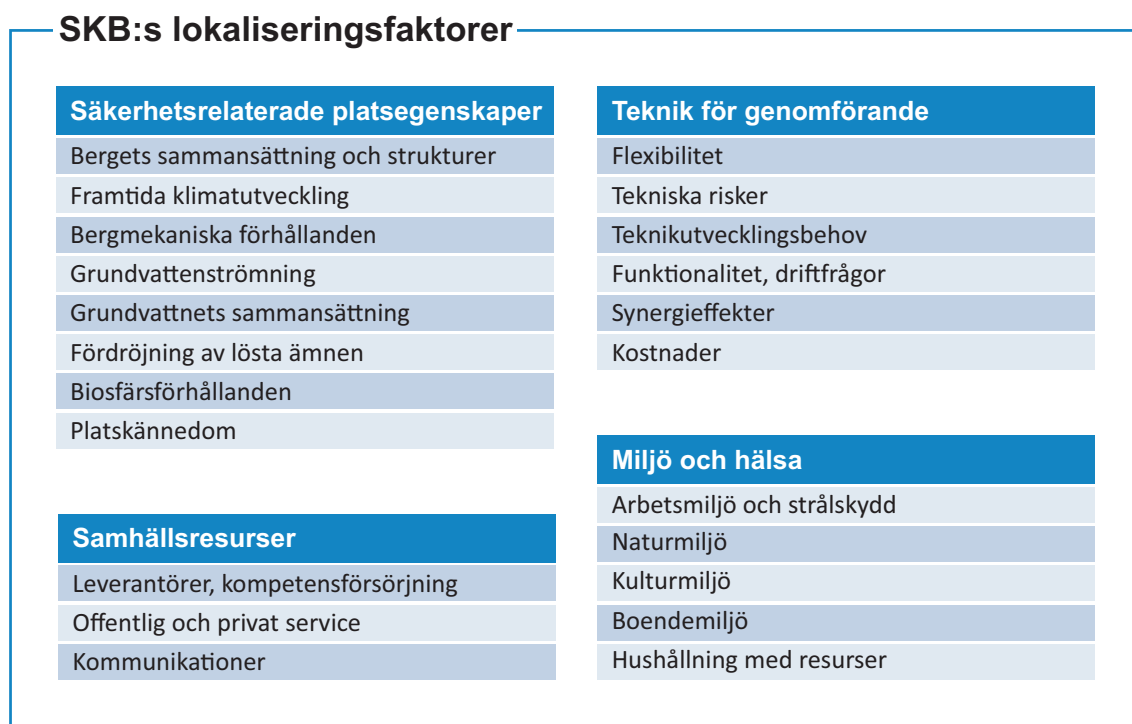
1.1 Bakgrund

Efter ett omfattande lokaliseringsarbete har SKB valt Forsmark som plats för slutförvaret för använt kärnbränsle. Valet är resultatet av ett lokaliseringsförfarande som tog sin början under tidigt 1990-tal. Strategin för och uppläggningsarbetet grundade sig i sin tur på erfarenheter från undersökningar och utvecklingsarbete under en femtonårsperiod dessförinnan.

Lokaliseringsförfarandet för slutförvaret kan förenklat beskrivas som en omfattande sällningsprocess, som involverade merparten av landet och där slutsteget bestod i att efter ingående jämförelser välja en av två slutliga kandidater. Som underlag för valet jämfördes alternativen med avseende på ett antal i förväg definierade lokaliseringsfaktorer, se figur 1-1. Faktorerna indelades i de fyra huvudgrupperna säkerhetsrelaterade platsegenskaper, teknik för genomförande, hälsa och miljö samt samhällsresurser.

Lokaliseringsförfarandet för slutförvaret redovisas i en bilaga till ansökan enligt kärntekniklagen och miljöbalken om att dels få uppföra och driva en inkapslingsanläggning i anslutning till det centrala mellanlagret för använt kärnbränsle i Oskarshamn, dels att få uppföra och driva en slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle i Forsmark i Östhammars kommun. Bilagan redovisar även huvudresultat från olika etapper av lokaliseringsarbetet, successiva vägval och prioriteringar, samt motiven för det slutliga valet av Forsmark.

Det åligger SKB att visa att både processen och resultatet – den valda platsen – uppfyller tillämpliga lagar och föreskrifter. Miljöbalken anger som grundprincip för lokalisering att den plats som väljs för en verksamhet ska vara lämplig med hänsyn till att ändamålet ska kunna uppnås med minsta intrång och olägenhet för människors hälsa och miljön. Hur den valda platsen i Forsmark möter dessa krav framgår i ansökan i första hand av säkerhetsanalysen SR-Site /SKB 2011a/, de dokument som redovisar genomförandeplanerna för bygge och drift av slutförvaret samt miljökonsekvensbeskrivningen /SKB 2011b/.



Figur 1-1. Faktorer som bildat grund för jämförelser av lokaliseringsalternativen Forsmark och Laxemar inför platsvalet.

Enligt miljöbalken ska det vid en lokalisering också framgå att det inte finns någon annan plats som är uppenbart mera lämplig än den valda, och som är tillgänglig med rimliga insatser. Av bland annat det skälet är det motiverat att värdera slutresultatet av platsvalsprocessen i relation till den kunskap som finns om olika lokaliseringfaktorer, generellt och på andra platser. Avsikten med föreliggande rapport är att bidra med underlag för en sådan värdering, vad avser geovetenskapliga förhållanden som har betydelse för den långsiktiga säkerheten.

1.2 Syfte

Syftet med föreliggande utredning är att värdera den valda platsen Forsmark, med avseende på ett antal geovetenskapliga faktorer av betydelse för förutsättningarna för långsiktig säkerhet och i relation till data om dessa faktorer från andra platser i Sverige. Studien avser alltså uteslutande relativa jämförelser.

Analysen görs med avseende på de geovetenskapliga faktorer som anges under rubriken ”säkerhetsrelaterade platsegenskaper” i figur 1-1. Dessa faktorer har valts därför att de har direkta implikationer på förutsättningarna för långsiktig säkerhet och de låg som nämnts till grund för jämförelsen av Forsmark och Laxemar inför platsvalet. Biosfärsförhållanden, se figur 1-1, diskuteras inte i denna rapport då dessa inte studerats i referensområdena. Denna aspekt har dock beaktats i jämförelsen mellan Forsmark och Laxemar /SKB 2010b/.

Valet av referensområden, tillgängliga data, och de möjligheter och begränsningar som detta ger för jämförelser presenteras närmare i nästföljande avsnitt. Kapitel 2–9 redovisar de analyser som gjorts av data, jämförelser med förhållandena i Forsmark och slutsatser för de faktorer som studerats. Kapitel 10 redovisar övergripande slutsatser av arbetet.

1.3 Referensområden

Jämförelsematerial har hämtats från ett urval av de platser som undersöktes inom ramen för det så kallade typområdesprogrammet under perioden 1975–1985. Typområdesundersökningarna omfattade platserna Sternö, Klipperås, Kråkemåla, Fjällveden, Finnsjön, Svartboberget, Gideå, Kamlunge och Tavinnunnanen, se figur 1-2.

Bakgrund och motiv för typområdesundersökningarna har redovisats i många sammanhang. Sammanfattningar ges i /Johansson 2006/. Sammanfattande beskrivningar av undersökningar och resultat ges av /Ahlbom et al. 1983, 1991a, b, 1992a, b, c, d/. En sammanställning av allt underlag från bland annat typområdena redovisas i /SKB 2010c/. Där redovisas också en analys, där geovetenskapliga förhållanden hos typområdena värderas mot den serie krav och önskemål som tidigare presenterats av SKB /Andersson et al. 2000/. Dessa krav och önskemål avsåg parametrar av betydelse för ett slutförvars långsiktiga säkerhet och var i första hand avsedda som vägledning under platsundersökningarna.

Föreliggande studie innefattar samtliga typområden utom Kråkemåla och Tavinnunnanen. Skälet till att utesluta de två sistnämnda är att undersökningarna på dessa platser var alltför begränsade för att jämförelser med Forsmark skulle vara relevanta. Förutom typområdena ingår även Åspö – platsen för SKB:s underjordiska forskningslaboratorium – i jämförelsematerialet.

Skälen för att välja just dessa platser som jämförelsematerial är sammanfattningsvis följande:

- De ingick inte i urvalsunderlaget vid valet av platser för platsundersökningar /SKB 2000/, och kan därmed bidra med fristående referensmaterial.
- De representerar flera och i sammanhanget relevanta urbergsmiljöer.
- De är undersökta med ett nöjaktigt antal kärnborrhål (fler än tre) och har varit föremål för borrhålsundersökningar till relevanta djup. Data från sådana undersökningar är en förutsättning för att kunna göra meningsfulla jämförelser med avseende på de angivna parametrarna.

Slutligen har även Laxemar inkluderats i jämförelsematerialet. Ingående jämförelser mellan Forsmark och Laxemar har redovisats i /SKB 2010b/, men det kan vara av intresse att belysa platsegenskaper i Laxemar även mot bakgrund av övrigt jämförelsematerial.

De utvalda typområdena samt Äspö och Laxemar utgör alltså de *referensområden* som utnyttjas för jämförelser med Forsmark i föreliggande rapport. Kartan i figur 1-2 visar referensområdenas geografiska lägen och benämningar.

Tabell 1-1 sammanfattar grunddata om referensområdena och de data som finns om geovetenskapliga faktorer som analyseras i denna rapport. Sammanställningen bygger huvudsakligen på information presenterad i /SKB 2010c/ och innefattar bl a tidpunkter för undersökningar, antal borrhål och andelen av dessa som når förvarsdjup. Vidare anges underlag för termiska, bergmekaniska, hydrogeologiska och hydrokemiska överväganden.

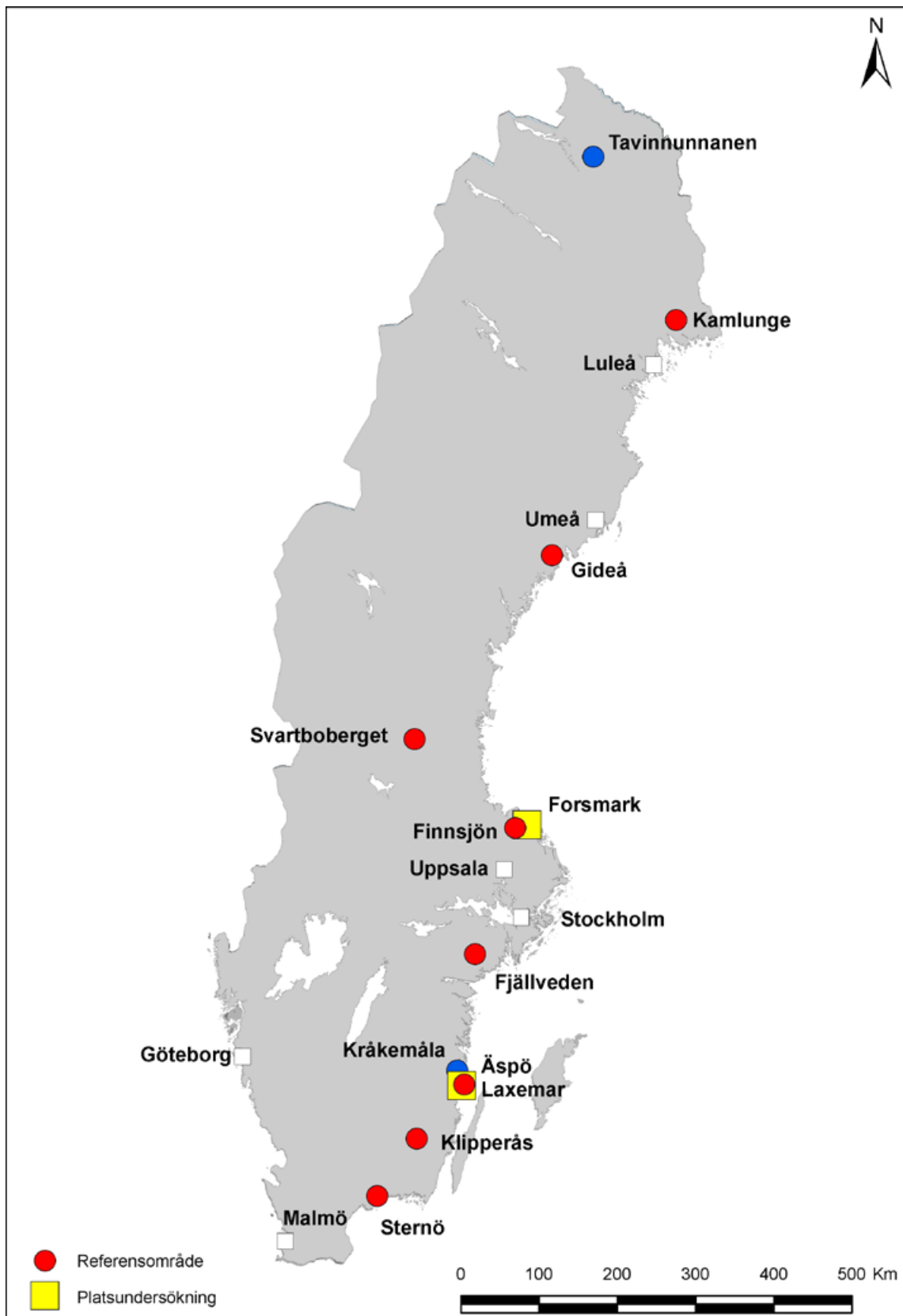
Tabellen redovisar även uppgifter om undersökningarna i Forsmark (platsundersökningen), men i delvis mera översiktliga termer än för referensområdena. För att ge heltäckande information har även uppgifter om platsundersökningen i Laxemar tagits med i tabellen. Notera dock att den formella jämförelsen mellan Forsmark och Laxemar gjordes i samband med platsvalet /SKB 2010b/.

Det finns skillnader mellan platsundersökningen i Forsmark och undersökningarna av referensområdena som har stor betydelse för möjligheterna att jämföra data. Platsundersökningen i Forsmark (och den i Laxemar) har vad gäller omfattning och detaljeringsgrad ingen motsvarighet bland referensområden. Det kan dock konstateras att antalet borrhål per ytenhet som når relevanta förvarsdjup är jämförbara mellan aktuella områden, se tabell 1-1. Vidare gjordes platsundersökningen över ett större område än flera av referensområdena. En tredje och viktig skillnad gäller tidpunkterna för undersökningarna. Platsundersökningen i Forsmark gjordes under perioden 2002–2008 medan undersökningarna av referensområdena (Äspö undantaget) utfördes 20–30 år tidigare. Under tiden däremellan har den allmänna geovetenskapliga kunskapsnivån, teknik och metodik för undersökningar, datahantering och inte minst tolkning och modellering utvecklats avsevärt. Betydelsen av dessa skillnader varierar mellan olika faktorer, och har beaktats i de jämförelser som redovisas i de kapitel som följer.

Vissa av referensområdena har varit föremål för säkerhetsanalyser vid olika tidpunkter /SKB 1983, 1999/. Sådana plats specifika analyser, där effekterna av en rad egenskaper beaktas integrerat, krävs för att avgöra om ett slutförvar på en plats kan uppfylla säkerhetskraven. Inga jämförelser har gjorts mellan de säkerhetsanalyser som gjorts av Forsmark på basis av platsundersökningen (SR-Can /SKB 2006/ och SR-Site /SKB 2011a/) och de säkerhetsanalyser som finns för vissa av referensområdena, eftersom sådana jämförelser med all sannolikhet skulle bli missvisande. Skälen är de nämnda skillnaderna i dataunderlag, allmän kunskapsutveckling samt utveckling av metodiken för säkerhetsanalys.

Tabell 1-1. Sammanställning av nyckeltal rörande tillgång på platsdata.

	Kamlunge	Gideå	Svartboberget	Finnsjön	Fjällveden	Äspö	Klipperås	Sternö	Laxemar	Forsmark
Undersökningsområde (km ²)	7,5	6	6,8	4,8	10	1	12	3	16	12
Undersökningar genomfördes under perioden	1981–1983	1981–1983	1979–1982	1977–2001	1981–1983	1986–1990	1983–1985	1977–1979	2002–2008	2002–2007
Huvudsakliga bergarter	Linagranit, biotitgnejs	Ådergnejs, Migmatit-granit	Migmatiserad gnejs	Folierad granodiorit	Ådergnejs	Smålandsgraniter	Smålandsgranit	Kustgnejs, gnejsgranit	Ävrögrani, kvartsmonzodiorit	Granodiorit till granit
Antal kärnborrhål	16	13	7	11	15	15	14	5	46	25
Antal kärnborrhål som passerar vertikaldjupet 400 m	8	11	4	7	8	7	7	4	19	19
Borrhålslängd (m) i djupintervallet 400–700 m.	c. 1 300	c. 2 500	c. 1 100	c. 1 200	c. 1 600	c. 1 100	c. 1 600	c. 800	c. 4 300	c. 4 000
Mineralogi	Saknas	Enstaka		Enstaka	Enstaka	Stor mängd	Enstaka	Saknas	Stor mängd	Stor mängd
Termiska data	15	15	16	Saknas	15	Stor mängd	Saknas	Saknas	Stor mängd	Stor mängd
Bergspänningsdata	Saknas	Enstaka	Saknas	Enstaka	Saknas	Stor mängd	Saknas	Saknas	Stor mängd	Stor mängd
Hållfasthet (UCS)	Saknas	12	Saknas	12	Saknas	Stor mängd	Saknas	6	Stor mängd	Stor mängd
Totala antalet 20 eller 21 m sektioner med mätt hydraulisk konduktivitet i djupintervallet 400–700 m	53	93	34	52	56	35	74	41	172	163
Hydrogeokemiprover (antal enskilda borrhålssektioner) i djupintervallet 400–700 m	3	6	5	9	9	Stor mängd	1	Saknas	Stor mängd	Stor mängd



Figur 1-2. Geografiska lägen av referensområden som nyttjats i denna studie (röd cirkel) samt typområden som inte nyttjats (blå cirkel).

2 Bergets sammansättning och strukturer

En beskrivning av bergets sammansättning och strukturer ger underlag bl a för analys av de bergmekaniska (kapitel 4) och hydrogeologiska förhållandena (kapitel 6) och kopplar även till grundvattnets sammansättning (kapitel 7) liksom bergets förmåga att transportera och fördröja lösta ämnen (kapitel 8). Bergets mineralogiska sammansättning styr även dess värmeledande förmåga, som har en avgörande betydelse för utformning och anpassning av deponeringsområdet (avstånd mellan deponeringstunnlar och mellan deponeringshål) för att uppfylla temperaturkrav för bufferten. Den termiska ledningsförmågan har därmed indirekt betydelse för den långsiktiga säkerheten. Graden av litologisk homogenitet (ensartad bergartsfördelning) i förvarsberget och i bergets mineralogiska sammansättning hos den enskilda bergarten (främst innehållet av kvarts) påverkar den småskaliga variationen i termisk ledningsförmåga.

Bergmassans egenskaper i större skala bestäms, bortsett från det intakta bergets egenskaper, även av förekomst, frekvens och egenskaper hos strukturer av olika storlek, från enskilda diskreta sprickor av begränsad utsträckning, via kluster och nätverk av sprickor, till deformationszoner av betydande rumslig utsträckning.

I detta kapitel diskuteras och jämförs i relativa termer lokaliseringsaspekter kopplade till uppmätt termisk ledningsförmåga med återkoppling till bergarternas mineralogi. Vidare jämförs frekvensen av öppna sprickor samt betydelsen av layoutbestämmande deformationszoner. För att placera in de analyserade referensområdena i en nationell geologisk kontext redovisas inledningsvis en kortfattad översikt av Sveriges berggrund.

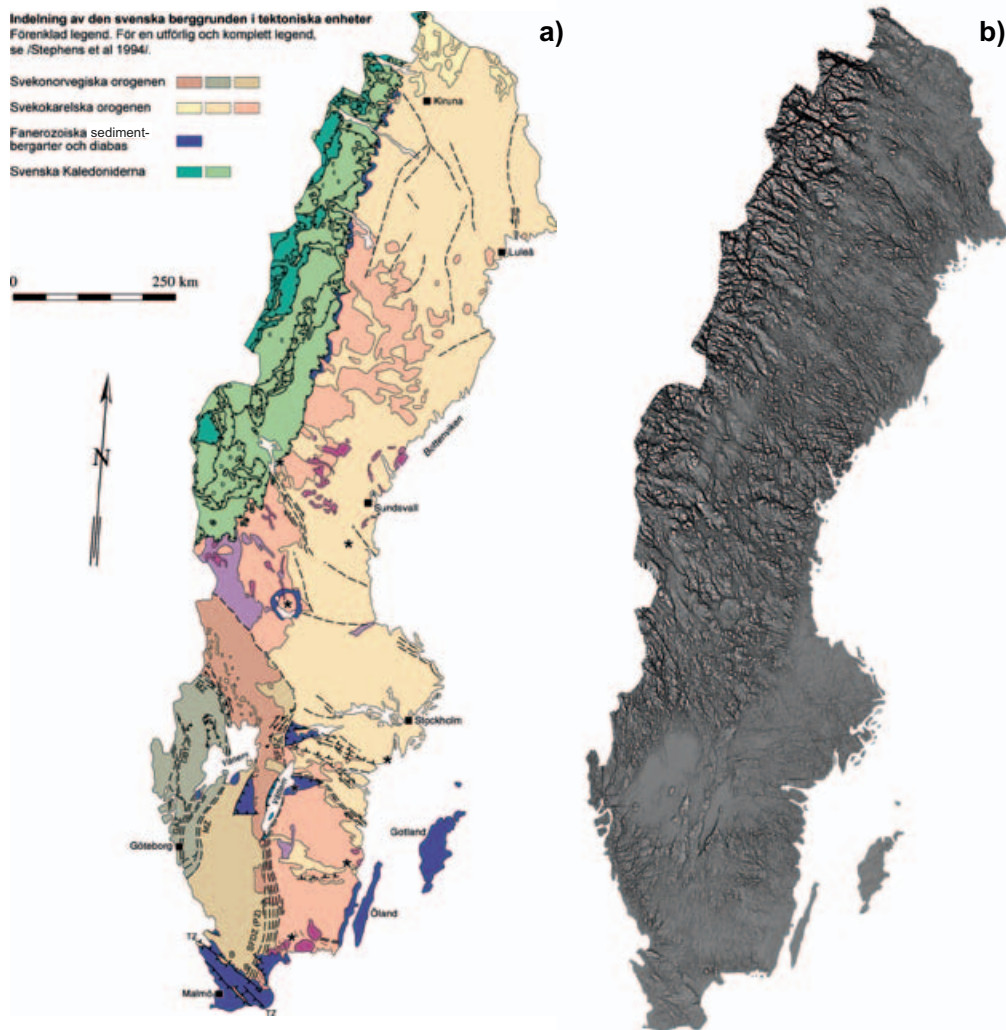
2.1 Sveriges berggrund – en översikt

2.1.1 Indelning baserad på tektonik

Sveriges berggrund består av tre huvudenheter, det kristallina urberget, rester av sedimentbergarter (blå områden i södra Sverige, inklusive Öland och Gotland, i figur 2-1a) och fjällberggrunden (grönt område längs gränsen mellan Sverige och Norge i figur 2-1a). Det är det kristallina urberget som är av intresse för slutförvaring av använt kärnbränsle.

Sveriges kristallina berggrund (urberget) kan indelas i tre huvudsakliga tektoniska provinser (som har påverkats av magmatisk aktivitet, deformation och omvandling), s k orogener eller geologiska provinser /Stephens et al. 1997/, se figur 2-1a. Bergarterna i den svekokarelska och svekonorvegiska orogenen utgör en del av ett gammalt sköldområde som benämns den fennoskandiska skölden. Sköldområdet överlagras lokalt av huvudsakligen sedimentära bergarter. Den till ytan största provinsen, som också dominerar den östra delen av landet från Kiruna i norr till Blekinge i söder, benämns den **svekokarelska orogenen** och domineras av mer eller mindre kraftigt omvandlade djupbergarter samt vulkaniska och sedimentära bergarter. De dominerande bergarterna bildades i tidsintervallet ca 1,90–1,75 miljarder år sedan. Lokalt är dessa bergarter intruderade eller överlagrade av välbevarade bergarter som bildades i tidsintervallet 1,7–0,9 miljarder år sedan.

I sydväst återfinns den **svekonorvegiska orogenen** som har en komplex geologisk utvecklingshistoria. Den domineras av mer eller mindre kraftigt omvandlade djupbergarter vilka bildades i tidsintervallet 1,8 till 0,9 miljarder år sedan. Tre större deformationszoner förekommer i orogenen; Mylonitzonen (MZ), Dalslandsförkastningen (DBT) och Götaälvszonen (GÄZ). Orogenen begränsas i öster av den s k svekonorvegiska frontzonen eller Protoginzonen (PZ), se figur 2-1a. Det s k transskandinaviska magmatiska bältet (TMB), utgörs av djupbergarter och vulkaniska bergarter som ställvis innesluter komplex av äldre berggrund. TMB bildades i tidsintervallet 1,86–1,65 miljarder år sedan och dominerar berggrunden från norra Blekinge, norrut över Småland, Värmland och Dalarna, se figur 2-1. Bergarterna i det transskandinaviska magmatiska bältet förekommer både i den svekokarelska och svekonorvegiska orogenen, se figur 2-1a.



Figur 2-1. a) Översiktlig berggrundskarta över Sverige med huvudsakliga tektoniska enheter med storregionala svaghetszoner i berggrunden (modifierad efter /Stephens et al. 1994/). b) Digital terrängmodell (DEM) baserad på Lantmäteriets (LMV) höjddatabas. Den aktuella modellen motsvarar den modell som återfinns i /SNA 2002/, med skillnaden att den här redovisas i gråskala, se även /Stephens et al. 1997, cf. figur 545/.

I nordväst, i gränsområdet mellan Sverige och Norge, avgränsas skölden av den **kaledoniska orogenerna** som bildades för mellan 510–400 miljoner år sedan. Slutfasen av den orogena utvecklingen av Kaledoniderna resulterade i en kollision mellan kontinenterna Baltica (nuvarande norra Europa) och Laurentia (Nordamerika och Grönland). I Skandinavien sträcker sig Kaledoniderna i ett 2 000 km långt och 100–200 km brett bälte från Nordkap i norr till Stavanger i söder. Kaledoniderna domineras av mer eller mindre kraftigt omvandlade sedimentära och vulkaniska bergarter.

En kännetecknande egenskap för de flesta sköldområden är att de spricker upp i berggrundsblock avgränsade av morfologiskt identifierbara så kallade lineament, vilka tolkas vara utträden för storregionala brantstående deformationszoner eller förkastningszoner /Milnes 2002/, se figur 2-1b. Översiktskartor av regionala lineament i “landskala” baserat på Landsatbilder och digitala terrängmodeller (DEM) har redovisats av /Röshoff 1989/ och redovisas även som sidobelyst DEM i Nationalatlasen /SNA 2002/ baserat på Lantmäteriverkets höjddatabas, se figur 2-1b. Av dessa underlag framgår att berggrunden visar tydliga tecken på rombformad uppsprickning i 10 km skala. Vidare framgår även skillnader mellan de olika orogenerna relaterade till de topografiskt indikerade lineamentens orientering och närheten till de storregionala zoner som identifierats ovan, se även figur 2-1b.

2.1.2 Indelning baserad på textur och mineralogisk sammansättning

De vanligaste bergarterna i den svenska ”kristallina berggrunden” är graniter och gnejser med varierande struktur och mineralogisk sammansättning. Även om variationen är mycket stor, betingad av såväl variationer i sammansättning som komplex strukturell uppbyggnad, kan en grov indelning i tre huvudsakliga kategorier göras /Milnes 2002, SKB 2010c/. Dessa tre huvudkategorier av kristallin berggrund utgör tillsammans drygt 70 % av den fennoskandiska sköldens yta i Sverige (resterande 30 % motsvarar de svenska Kaledoniderna, markerade med grön färg i figur 2-1a).

A. Massformiga, övervägande granitiska bergarter (40 %)

Domineras av ljusa mineral som till exempel kvarts och fältspat. Dessa bergarter saknar påtaglig struktur som foliation och bandning. De ingår ofta i vidsträckt magmatiska intrusioner. Typfall är granitgruppens bergarter.

B. Folierade/bandade, övervägande gnejsiga bergarter (30 %)

Domineras oftast av kvarts och fältspat med alternerande parallella skikt av mörka mineral som biotit och amfiboler. Dessa bergarter ingår vanligen i veckade metamorfa komplex vars ursprungliga komponenter kan vara såväl magmatiska som sedimentära. Typfall för denna grupp är olika varianter av gnejser.

C. Basiska bergarter, massformiga eller folierade (2 %)

Domineras av mörka mineral som pyroxen, amfibol och biotit. Kvarts saknas i regel. I jämförelse med de ovan nämnda grupperna uppträder dessa bergarter oftast som relativt små intrusioner. Typfall är gabbrogruppens bergarter.

Som framgår av tabell 2-1 representerar de undersökta områdena väl huvudgrupperna A och B ovan. Bergarterna i Forsmark tillhör grupp A och består huvudsakligen av granit, granodiorit och tonalit. I typområdesprogrammet studerades även grupp C (basiska bergarter) och ett typområde – Taavinnunen – undersöktes med ett borrhål. På grund av den ringa omfattningen på undersökningen är området inte medtaget som referensområde. En sammanställning av tillgänglig kunskap om egenskaper och utbredning av basiska bergarter i Sverige /Ahlbom et al. 1992e/ visade att basiska bergarter inte har väsentliga fördelar för ett slutförvar jämfört med de bergarter som ingår i huvudgrupperna A och B.

Referensområdena har uppdelats i följande undergrupper för att möjliggöra förenklad referens:

- A1) Granodiorit till kvartsmonzodioritiska bergarter (Laxemar, Klipperås och Äspö)
- A2) Gnejsig granodiorit (Finnsjön)
- A3) Granit till granodiorit (Forsmark)
- B1) Folierade (migmatit) – ådergnejser med sedimentärt ursprung (Fjällveden, Gideå och Svartboberget)
- B2) Metavulkanisk gnejs + folierad granodiorit till granit (Sternö)
- B3) Linagranit + biotitgnejs + diorit-granodiorit + kvartsitgnejs (Kamlunge)

Tabell 2-1. Forsmark och referensområdenas fördelning på de tre huvudsakliga kategorierna av kristallina bergarter (modifierad efter /SKB 2010c/).

Bergartskategori	A) Massformiga, övervägande granitiska bergarter	B) Folierade/bandade, övervägande gnejsiga bergarter	C) Basiska bergarter, massformiga eller folierade
Område	Klipperås, Äspö, Laxemar, Finnsjön och Forsmark	Sternö, Fjällveden, Svartboberget, Gideå och Kamlunge	–

2.2 Jämförelse av områden

2.2.1 Grundläggande antaganden och avgränsningar

Generellt så finns det en mycket god tillgång på mineralogiska och geokemiska analyser av bergmaterial från de nyss avslutade platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar. Detsamma gäller tillgången på mätningar i laboratorium av värmeledningsförmågan. Dessa laboratorieresultat, parade med geofysiska densitetsloggningar i borrhål, har givit ett gott underlag för att beskriva variationen av värmeledningsförmågan. Motsvarande underlag från äldre referensområden är, med undantag för Äspö, begränsat, med endast ett fåtal, oftast översiktliga, mineralogiska analyser, och likaledes ett fåtal mätningar av värmeledningsförmågan. Ett begränsat icke platsspecifikt mineralogiskt underlag finns i SGUs beskrivningar till vissa av berggrundskartorna kopplade till dessa äldre referensområden.

En jämförande diskussion av förekomst, frekvens och orientering av enskilda sprickor av begränsad utsträckning i referensområdenas berggrund försvåras av det faktum att metodik för kartering av sprickor i borrhål/borrhårens har utvecklats väsentligt under de senaste 30 åren och underlaget i SKB:s databaser är därför av varierande omfattning och kvalitet. Däremot är karteringen av öppna (potentiellt vattenförande) sprickor från sent 1970-tal och tidigt 1980-tal i stort sett jämförbar med det karteringsunderlag som finns från platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar. Data rörande frekvens av öppna sprickor har därför använts i den aktuella jämförande studien av strukturella skillnader mellan områdena.

I de avsnitt som följer diskuteras och jämförs vidare betydelsen av de större deformationszoner som har väsentlig inverkan på förvarslayouten. Deformationszoner, och framför allt zoner med tolkad längd större än 3 km (med tillskrivna respektavstånd¹) är geometriskt bestämmande för utnyttjandet av tillgängliga bergvolymerna på förvarsplatsen.

2.2.2 Bergets värmeledningsförmåga

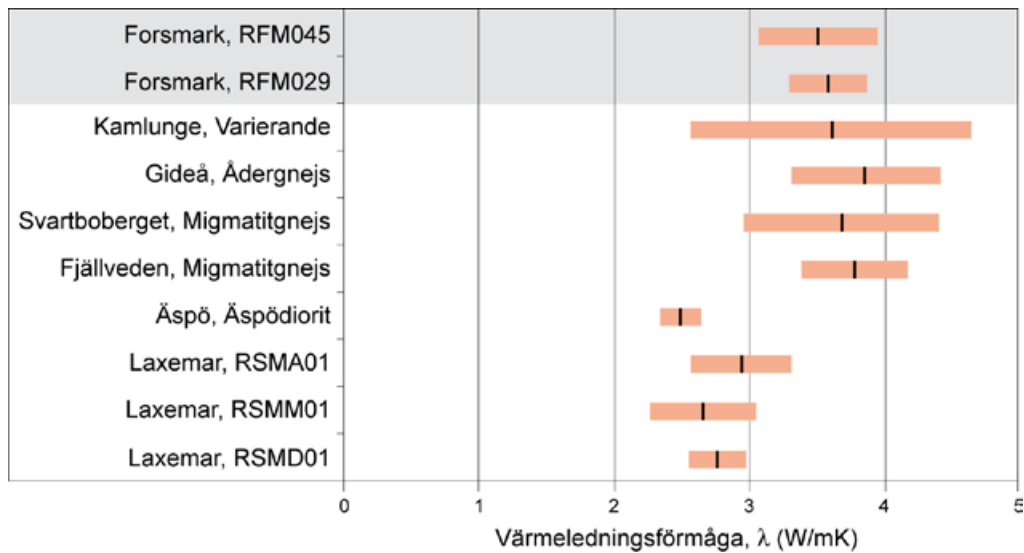
Bergarterna i Forsmark har en god värmeledningsförmåga. Detta beror på den mineralogiska sammansättningen som bl a karakteriseras av en hög kvartshalt (c. 35–40 %). I samband med platsundersökningarna har bergarter karterats på markytan och i borrhål och en bild har därigenom även erhållits av den volymmässiga fördelningen av bergarter. Platsspecifika indelningar av bergarter för äldre referensområden har företrädesvis kopplats till skillnader i hydrauliska egenskaper, se t ex /Ahlbom et al. 1991a, b/. Senare modelleringsarbete i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har haft en indelning av bergarter som företrädesvis kopplar till värmeledningsförmåga, se /Back et al. 2007, Sundberg et al. 2008, SKB 2008, 2009b/.

I figur 2-2 redovisas representativa mått på värmeledningsförmågan baserade på beräknade värden för de identifierade bergdomänerna (grupperingar av bergarter med liknande egenskaper) RFM029 och RFM045 i Forsmark (1 m skala) och RSMA01, RSMM01 och RSMD01 i Laxemar (2 m skala). Vidare redovisas värden på värmeledningsförmåga uppmätta på bergprover i laboratorium för referensområdena Fjällveden, Svartboberget, Gideå och Kamlunge (0,1 m skala).

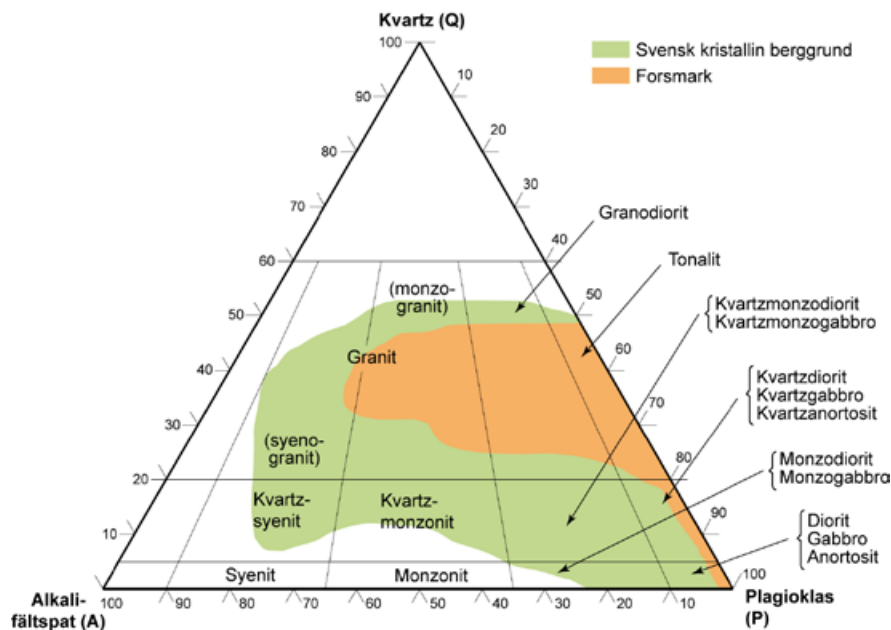
Även om berggrunden i Forsmark har delats upp i två bergdomäner (RFM029 och RFM045), /SKB 2008/, så är den litologiska homogeniteten i Forsmark relativt hög då de två domänerna uppvisar likartad hög värmeledningsförmåga. Båda domänerna domineras av granit till granodiorit, med skillnaden att den senare (RFM045) innehåller omvandlad (albitiserad) granit och mer amfibolit. Detta innebär en något lägre värmeledningsförmåga med en större spridning, se figur 2-2. Bergdomänerna RSMA01 och RSMD01 i Laxemar, som domineras av Ävrögranit respektive kvartsmonzodiorit uppvisar en hög grad av intern homogenitet /SKB 2009b/. Däremot skiljer sig värmeledningsförmågan markant mellan huvudbergarterna i dessa två bergdomäner, och är dessutom signifikant lägre än i Forsmark, se figur 2-2.

En förenklad jämförelse av den mineralogiska sammansättningen för bergarter associerade med TMB (se avsnitt 2.1) och den svekokareliska orogenen (omfattande bergarter av typ A och B i tabell 2-1) och bergarter i Forsmark redovisas i ett sk QAP-diagram i figur 2-3. Denna redovisning är överlagrad på en översiktlig klassificering av bergarter baserad på halterna av tre huvudsakliga mineral; kvarts,

¹ Det vinkelräta avståndet från en deformationszon som definierar den volym inom vilken deponering av kapslar inte är tillåten, med hänsyn till risken för framtida seismisk påverkan på kapseln.



Figur 2-2. Jämförelse mellan beräknad värmeledningsförmåga för bergdomäner i Forsmark (1 m skala) /Back et al. 2007/ och beräknad värmeledningsförmåga för bergdomäner i Laxemar (2 m skala) /Sundberg et al. 2008/ samt värmeledningsförmåga uppmätt i laboratorium (0,1 m skala) på bergprover från Gideå /Ahlbom et al. 1991a/, Fjällveden /Ahlbom et al. 1991b/, Svartboberget och Kamlunge /Ahlbom et al. 1992b/. Angivna värden är medelvärden ± 1 standardavvikelse.



Figur 2-3. Jämförelse mellan mineralogisk sammansättning hos bergarter i Forsmark och en sammanvägd bild av sammansättningar hos typiska bergarter associerade med TMB och den övriga delen av den svekokarelska orogenen, se avsnitt 2.1.2. Jämförelsen gjord i en QAP -plot: Kvarts (Q), Alkalifältspat (A), Plagioklas (P). Underlag för aktuella översiktliga fördelningar är hämtade bl a från /SKB 2008, 2009b/, /Sundberg 2003/ och /Kornfält och Bergström 1986/.

plagioklas och alkalifältspat. Generellt har bergarter med en hög halt av kvarts hög värmeledningsförmåga medan bergarter med låg andel kvarts och alkalifältspat har låg värmeledningsförmåga, se /Sundberg et al. 2009/.

Huvudbergarterna i Grupp B1 uppvisar en stor variation i värmeledningsförmåga, om än med medelvärden som är i paritet med beräknade värden för Forsmark, se figur 2-2. Mineralogiska analyser av bergmaterial från dessa områden saknas, med undantag för enskilda uppgifter för Gideå och Fjällveden /Ljunggren et al. 1985, Ahlbom et al. 1991b/. Det variationsspann och de spridningsmått för värmeledningsförmågan som noterats för dessa områden /Ahlbom 1991a/, kan hänföras till dessa bergarters sedimentära ursprung som i dag bl a återspeglas i bergarternas ådring, med en stratifierad variation i mineralogi och egenskaper som följd.

Grupp A1 har ett starkt litologiskt och mineralogiskt släktskap med de bergarter som undersökts i Laxemar (och Simpevarp). Detaljerad mineralogi och termiska egenskaper uppmätta i laboratorium saknas dock för huvudbergarterna i Klipperås, medan denna typ av egenskaper finns redovisade för bergarterna i Äspö /Sundberg 2003/, se figur 2-2. Sammantaget likställs de termiska och mekaniska egenskaperna för denna grupp med egenskaperna som tillskrivs huvudbergarterna i Laxemar/Simpevarp.

Den mineralogiska sammansättningen hos Blekinge kustgnejs /Kornfält och Bergström 1986/ antas överensstämma med bergarterna på Sternö (Grupp B2). Sammansättningen uppvisar en stor variation men är huvudsakligen granitisk till granodioritisk, och tillskrivs därför en medelhög värmeledningsförmåga, dock lägre än i Forsmark.

Granitoider i Östhammar, motsvarande de bergarter som uppträder i Finnsjön, (Grupp A2) uppvisar en mineralogisk sammansättning, se /Stålhös 1991/, som också överensstämmer väl med motsvarande sammansättningar för huvudbergarterna i Forsmark. Därutöver finns det geokemiska analyser från KFI01 som uppvisar en kvartshalt på ca 67 % /Scherman et al. 1978/. Med detta underlag som bas tillskrivs huvudbergarten i Finnsjön likvärdiga termiska egenskaper som de i Forsmark.

Bergarterna i Kamlunga (Grupp B3) uppvisar en stor litologisk variationsbredd som återspeglas i en motsvarande stor variation i värmeledningsförmågan i KKM01 /Ahlbom et al. 1992b/, se figur 2-2. Medelvärdet på värmeledningsförmågan är i paritet med medelvärden på den beräknade ledningsförmågan för de huvudsakliga bergdomänerna i Forsmark.

2.2.3 Öppna sprickor

Med öppna sprickor menas här naturligt förekommande sprickor som delar borrhärnan och som inte är orsakade av borring eller annan hantering av borrhärnan. Dessa sprickor har ofta en beläggning av sprickmineral och har potential att leda vatten.

Data rörande öppna sprickor från referensområden och från Forsmark har inhämtats från SKB:s databas Sicada. I karterade avsnitt i borrhärnan med kärnförluster och krosszoner har antalet öppna sprickor tillskrivits en frekvens på 50 m^{-1} . De beräknade frekvenserna, se tabell 2-2, visar att medelfrekvensen av öppna sprickor i djupintervallet 400 till 700 m på de studerade platserna varierar mellan ca 0,7 och 7 m^{-1} , och att Forsmark uppvisar en mycket låg frekvens.

En observation som gäller både Forsmark och referensområdena är att sprickfrekvensen i berget generellt minskar mot djupet. Det gäller även frekvensen av flödande sprickor, och därmed bergets genomsnittliga vattengenomsläpplighet. Dessa observationer är i paritet med bergmekaniska (bergets last) och paleo-ohydrogeologiska överväganden (effekter kopplade till glaciation och landhöjning/isostasi).

2.2.4 Layoutbestämmande strukturer

Deformationszoner av olika utsträckning, tjocklek och egenskaper förekommer allmänt i den svenska kristallina berggrunden. De zoner som har en avgörande påverkan på förvarslayout och volymutnyttjande är de som har en tolkad längd större än 3 km. Sådana zoner tillskrivs ett respektavstånd på 100 m vid utarbetandet av förvarslayouten /SKB 2009a/. Deformationszoner med tolkade längder mellan 1 000 och 3 000 m modelleras deterministiskt men tillskrivs inget respektavstånd. Deformationszoner och sprickor som är kortare än 1 000 m betraktas som en del av bergmassan mellan deterministiska deformationszoner, och behandlas stokastiskt (i diskreta DFN-modeller). Merparten av de deterministiskt modellerade strukturerna kan hanteras genom att förvarslayouten anpassas till zonerna och deras egenskaper.

Tabell 2-2. Frekvens av öppna sprickor^{*)} i bergmassan mellan deterministiskt modellerade deformationszoner i det vertikala djupintervallet 400 till 700 m. Där inte annat indikeras redovisas ett längdviktat medelvärde baserat på data i Sicada^{)}, jfr tabell 6-1.**

Område	Frekvens av öppna sprickor (P_{100}) (m^{-1})	Kommentar (utnyttjade data mm)
Kamlunge	2,5	Borrhål KKM01–04, KKM11–14.
Gideå	3,6	Borrhål KGI01–08, KGI10–11, KGI13.
Svartboberget	2,4	Data finns inte i Sicada. Observationsviktat medelvärde redovisas som är baserat på tabell 5.3.d i /Carlsson et al. 1983/.
Forsmark	0,7	Borrhål KKF01A, -01D, -02A, -04A, -05A, -06A, -06C, -07A, -08A, -08C, -09A, -09B.
Finnsjön	6,8	Borrhål KFI01–KFI07. Data finns inte i Sicada. Approximativt värde redovisas som är baserat på grafiskt redovisade sprickkarteringar inhämtade från rapporter /Scherman et al. 1978, Olkiewicz et al. 1979/.
Fjällveden	1,6	Data finns inte i Sicada. Observationsviktat medelvärde redovisas som är baserat på tabell 5.3.a i /Carlsson et al. 1983/.
Äspö	3,4	Borrhål KKAS02–KKAS08.
Laxemar	3,1	Borrhål KLX02-05, KLX07A, -08, -10, -11A, -12A, -13A, -15A, -17A, -18A, -19A, -21B.
Klipperås	4,1	Borrhål KKL02, KKL06, KKL09.
Sternö	0,8	Borrhål KKA01–KKA04. Data finns inte i Sicada. Approximativt värde redovisas som är baserat på grafiskt redovisade sprickkarteringar inhämtade från rapporter /Scherman et al. 1978, Olkiewicz et al. 1979/.

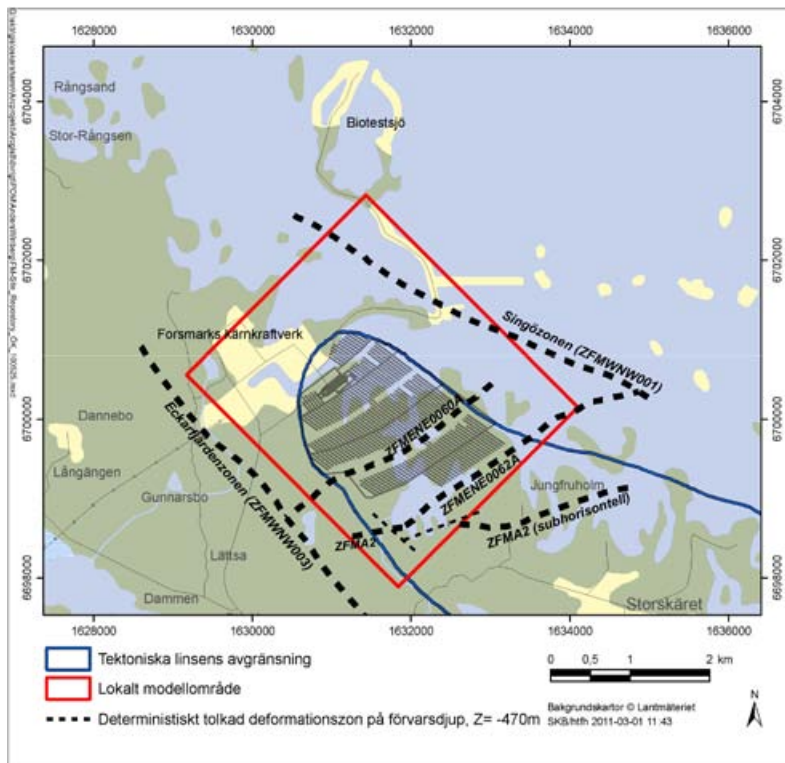
*) För karterade sektioner markerade som "krosszon" eller "kärnförlust" har antagits en sprickfrekvens av 50 sprickor/m.

**) Borrhålskarteringar från Finnsjön, Sternö, Fjällveden och Svartboberget finns endast på papper och är inte överförda i digital form till Sicada, se kommentarskolumn.

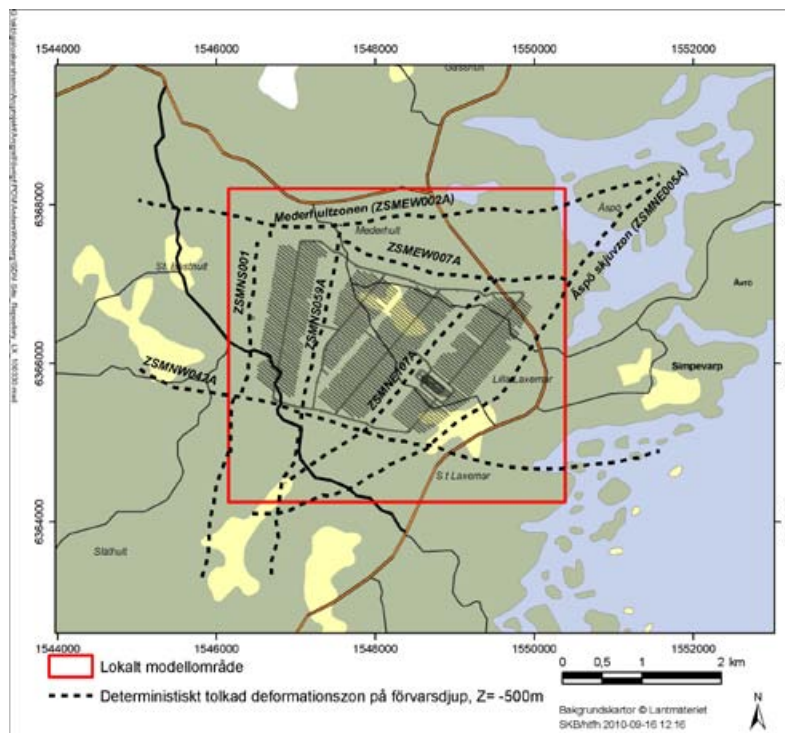
Möjliga regionala zoner har tolkats i olika skalor för de referensområden som har undersökts av SKB. De länsvisa översiktsstudier som SGU genomfört på uppdrag av SKB visar möjliga deformationszoner baserade på tolkning av terrängmodeller och flyggeofysik, se t ex /Antal et al. 1998a, b/. Det finns ingenting som tyder på att frekvensen av deformationszoner skulle vara lägre eller att zonernas egenskaper skulle vara mer fördelaktiga på andra platser än i Forsmark. Snarare kan det noteras att den föreslagna förvarsvolymen i Forsmark innehåller få deformationszoner, och att de som avgränsar och genomkorsar denna volym har låg vattengenomsläpplighet, god mekanisk hållfasthet och god värmeledningsförmåga /SKB 2008/.

I aktuell layout för Forsmark (figur 2-4) är förvarsområdet uppdelat i två förvarsdelar (deponeringsområden) /SKB 2009a/ medan det i layouten för Laxemar (figur 2-5) är uppdelat i tre förvarsdelar /SKB 2009c/. Frågeställningen är om tidigare undersökta referensområden, med tolkade deterministiska deformationszoner och med tillämpning av ovanstående kriterier, skulle ge fler eller färre förvarsdelar än i Forsmark.

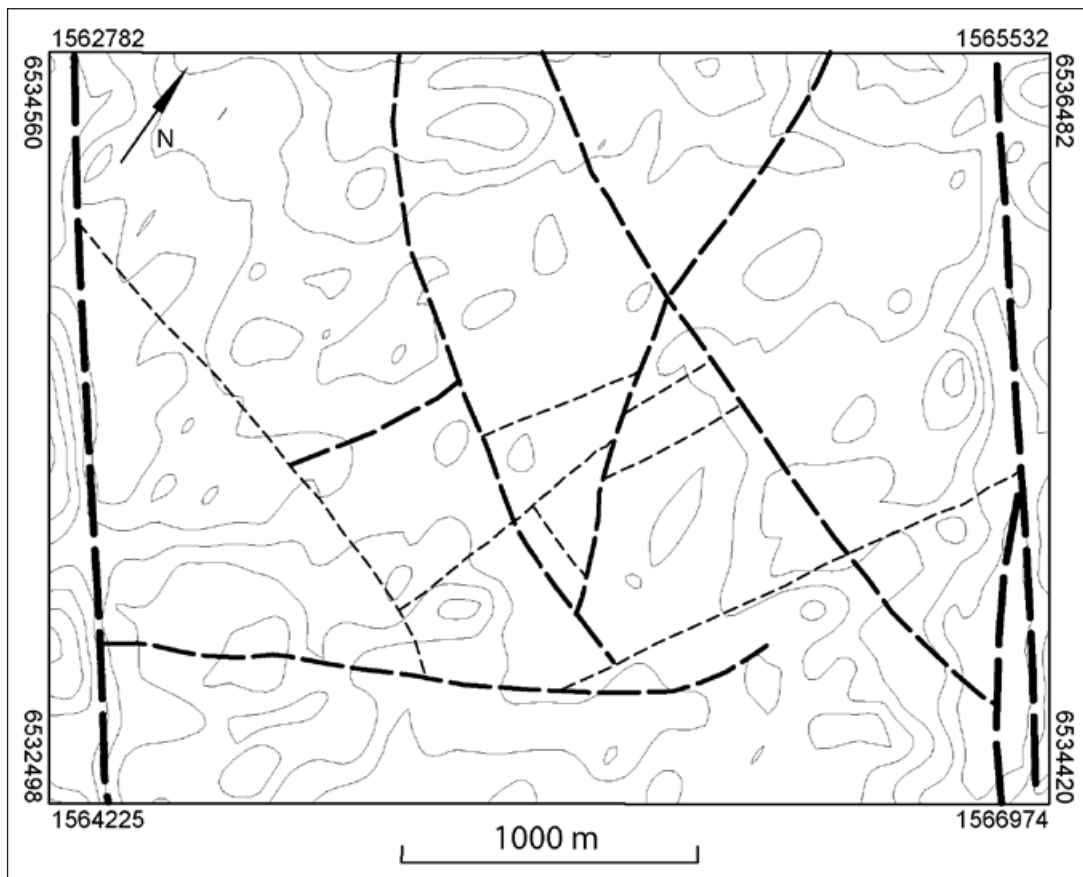
Översiktliga förvarslayouter (framtagna med annan metodik än för Forsmark och Laxemar) har presenterats både för Fjällveden /Ahlbom et al. 1991b/ (figur 2-6) och Gideå /Ahlbom et al. 1991a/ (figur 2-7) i samband med KBS-3, och senare för Gideå (Cberg) i samband med SR-97 /Munier et al. 1997, Walker och Gylling 1997/. Inget försök har gjorts att i efterhand tillämpa nu gällande längdbaserat kriterium för layoutbestämmande zoner på dessa två äldre referensområden. Översiktligt kan dock noteras att både Fjällveden och Gideå genomskärs av deformationszoner med tolkade längder i storleksordningen 3 km. Dessa två områden bedöms därmed inte uppvisa några fördelar i förhållande till Forsmark vad gäller layoutbestämmande strukturer.



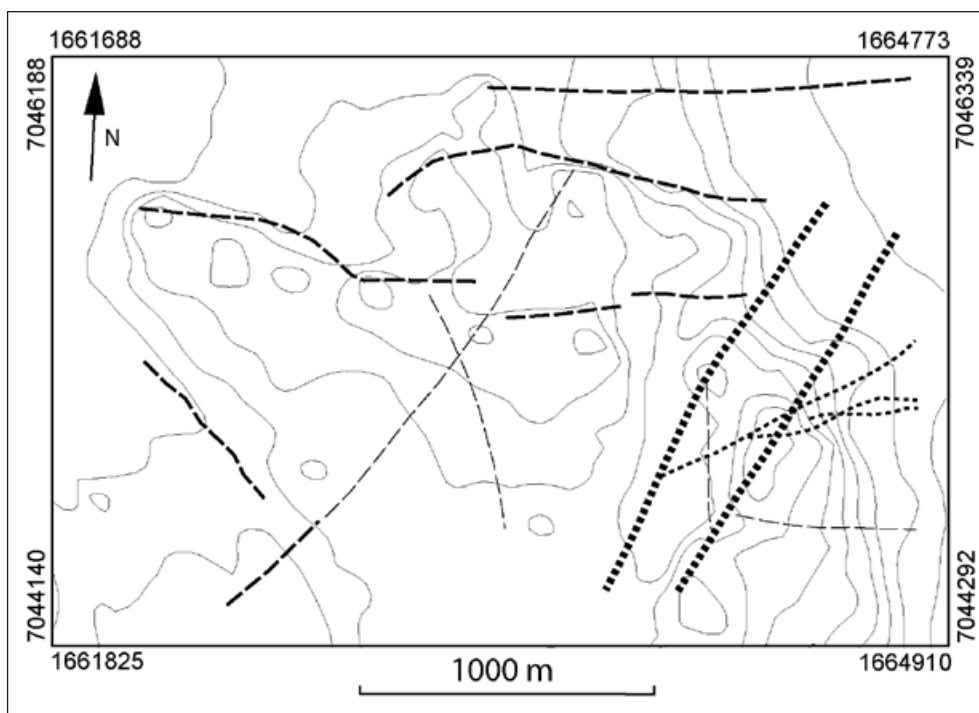
Figur 2-4. Layoutbestämmande element i Forsmark i termer av a) lokala större deformationszoner, b) den tektoniska linsens avgränsning /SKB 2008/, c) kärnkraftverket. Layout, linskontur och zoners geometrier avser förvarsdjup enligt /SKB 2009a/. De flankerande regionala zonerna, Singözonen och Eckerfjärdenzonen, är inte layoutbestämmande men har inkluderats som geologiska referenser. Notera att vissa zoners längder har av presentationsskäl förkortats i förhållande till tolkad längd.



Figur 2-5. Layoutbestämmande deformationszoner i Laxemar. Layout och samtliga zoners geometrier avser förvarsdjup enligt /SKB 2009c/. Mederhults zonen är indikerad som regional geologisk referens. Notera att vissa zoners längder har av presentationsskäl förkortats i förhållande till tolkad längd.



Figur 2-6. Deformationszoner i Fjällveden. Baserat på /Ahlbom et al. 1991b/. Zonernas lägen avser läget på markytan.



Figur 2-7. Deformationszoner i Gideå. Baserat på /Ahlbom et al. 1991a/. Zonernas lägen avser läget på markytan.

2.3 Slutsatser

Definierade bergdomäner i Forsmark domineras av granit till granodiorit och uppvisar en god värmeledningsförmåga med låg varians. Bergarterna i Kamlunge, Fjällveden, Gideå och Laxemar som huvudsakligen är av bandad/folierad gnejsig typ uppvisar motsvarande goda ledningsförmåga som Forsmark eller högre, men en högre varians som tillskrivs deras sedimentära ursprung. Bergarterna i Äspö, Laxemar och Klipperås (granodiorit till kvartsmonzodiorit) uppvisar klart lägre ledningsförmåga än Forsmark, med något lägre varianser.

Jämförelsen av frekvensen av öppna sprickor visar att Forsmark har en särställning med en betydligt lägre frekvens än alla referensområden förutom Sternö. Inga uppenbara korrelationer kan observeras mellan frekvensen öppna sprickor och dominerande bergart.

Layoutstyrande element i Forsmark delar upp den tänkta förvarsvolymen i två huvudsakliga delar, medan motsvarande volym i Laxemar delas upp i tre delar. Även om ingen uppdelning med motsvarande metodik gjorts för referensområden är det knappast troligt att det finns någon plats där inte deponeringsområdet i någon grad behöver delas upp med hänsyn till deformationszoner av längd större än 3 km.

Sammanfattningsvis kan konstateras att bergets sammansättning och frekvensen av strukturer i Forsmark är fördelaktiga för inplacering och utformning av ett förvar. En hög grad av litologisk homogenitet tillsammans med en geologi som är styrd av strukturella element ger i Forsmark en god grund för prognoser av geometri (på bergartskroppar), egenskaper och övriga förhållanden. Även om vissa referensområden uppvisar en värmeledningsförmåga som är likvärdig med den i Forsmark, uppvisar dessa dock en högre grad av variabilitet. Ingen annan plats bedöms därför vara uppenbart bättre än Forsmark ur studerade aspekter som rör bergets sammansättning och strukturer.

3 Framtida klimatutveckling

Klimatet kan påverka bergets egenskaper och funktion på förvarsdjup, men kan också påverka barriärernas funktion /SKB 2010a/. En inlandsis ovanför förvaret påverkar bland annat grundvattnets tryck, tryckgradienten (som driver grundvattenflödet) och den kemiska sammansättningen på det vatten som tillförs berget. Framtida istider kan därför ha stor inverkan på utvecklingen av grundvattnets sammansättning, vilket i sin tur kan påverka barriärfunktionerna hos buffert och kapsel (se kapitel 6 i /SKB 2010b/). En annan viktig frågeställning är om det finns risk för frysning på förvarsdjup under perioder av extrem permafrost, eftersom även detta kan påverka barriärfunktionen för återfyllning, buffert och kapsel.

3.1 Jämförelse av områden

3.1.1 Grundläggande antaganden och referensdata

Möjliga effekter av tänkbara framtida klimatförändringar analyseras här, liksom i säkerhetsanalysen SR-Site /SKB 2011a/, med utgångspunkt från permafrostperioder (tidsperioder och djup), glaciala perioder (maximal istjocklek/ hydrostatiskt tryck och mängden smältvatten i botten på isen) och täckning av hav (som påverkar grundvattnets salthalt). Givet att platsspecifika klimatdata i huvudsak saknas för äldre referensområden är diskussionen av projicerade framtida förhållanden på dessa platser i första hand kvalitativ.

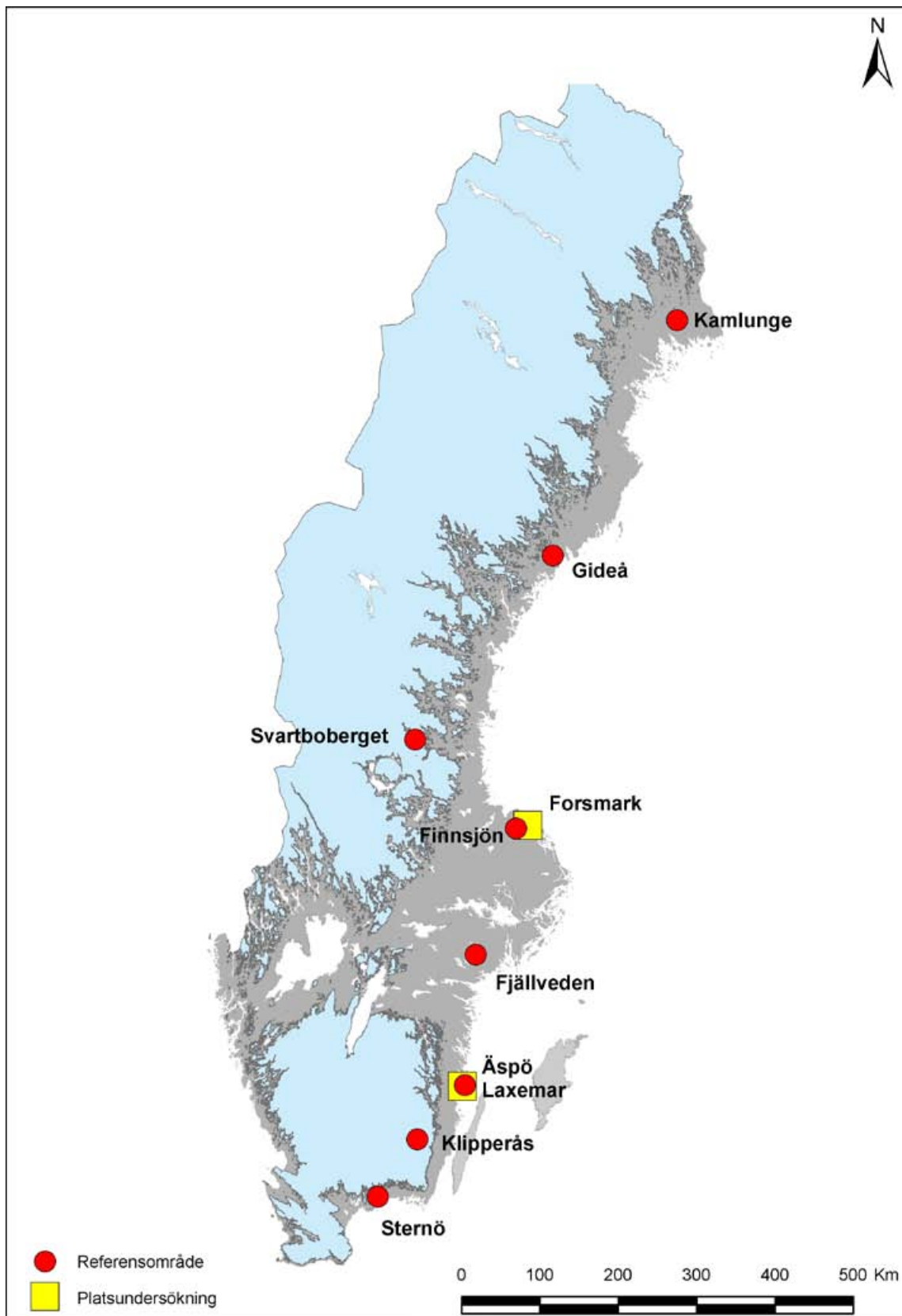
I SR-Site genomfördes analysen av klimateffekter i Forsmark med utgångspunkt från en framtida referensutveckling baserad på en antagen upprepning av förhållanden rekonstruerade för den senaste glaciationscykeln (Weichsel och Holocen) /SKB 2010a/. Referensutvecklingen utgör ett exempel på en tänkbar framtida klimatutveckling där alla relevanta klimatkopplade processer samverkar och utvecklas på ett realistiskt sätt. Denna referensutveckling kompletteras i SR-Site med andra tänkbara scenarier med potentiellt större inverkan på förvarets säkerhet /SKB 2010a/. För den aktuella jämförelsen av Forsmark med referensområden är det dock tillräckligt att använda sig av referensutvecklingen. Det ska i detta sammanhang nämnas att SR-Site i olika beräkningsfall även behandlar effekter av global uppvärmning (varmare och våtare klimat) /SKB 2010b/. Ett grundläggande antagande i jämförelsen är att noterade relativa skillnader i dagens klimat mellan Forsmark och referensområden i huvudsak kommer att bestå även under en framtida glaciationscykel. Detta grundar sig på att de huvudsakliga skillnaderna i klimat beror på skillnader i latitud (se figur 3-1) och altitud (uttryckt som medelhöjd över havet), se tabell 3-1.

Tabell 3-1. Topografiska och meteorologiska data från Forsmark och referensområdena. Klimatdata för perioden 1961–1990 är hämtade från /SMHI 2001/. Data är redovisade geografiskt från norr till söder, se figur 3-1.

Område	Altitud (medelhöjd över havet) (m)	Årsmedeltemperatur (°C) [skillnad mot Forsmark, °C]	Årsnederbörd (mm/år) [skillnad mot Forsmark, mm/år]
Kamlunge	135	+0,5 (Orrbyn) [–4,5]	530 (Morjärv) [–46]
Gideå	c. 100	+1,8 (Hemling) [–3,8]	708 (Torrböle) [+132]
Svartboberget	c. 260	+3,7 (Edsbyn) [–1,3]	585 (Edsbyn) [+9]
Forsmark	2 ^{*)}	+5,0 (Risinge)	576 (Östhammar)
Finnsjön	25	+5,0 (Films kyrkby) [±0]	606 (Vattholma) [+30]
Fjällveden	c.50	+5,8 (Valla) [+0,8]	521 (Vrena) [–55]
Laxemar (och Äspö) ^{*)}	24 ^{*)}	+6,4 (Oskarshamn) [+1,4]	553 (Oskarshamn) [–23]
Klipperås	c. 195	+6,3 (Drageryd) [+1,3]	545 (Orrefors) [–31]
Sternö	c. 25	+7,3 (Karlshamn) [+2,3]	556 (Karlshamn) [–20]

^{*)} Även om Äspö har en lägre medelaltitud än Laxemar, jämföras de två områdena i detta sammanhang.

^{**)} Regionalt modellområde. Inkluderar även resultat från mätningar av vattendjup (batymetri) i Östersjön. Därmed är inte altituden för Forsmark respektive Laxemar helt jämförbar med övriga områden där vattenområden inte ingår.



Figur 3-1. Referensområdenas geografiska lägen. Områden ovanför högsta kustlinjen är markerade med ljusblå färg.

3.1.2 Nuvarande klimatbestämmande faktorer

Temperatur och årsnederbörd

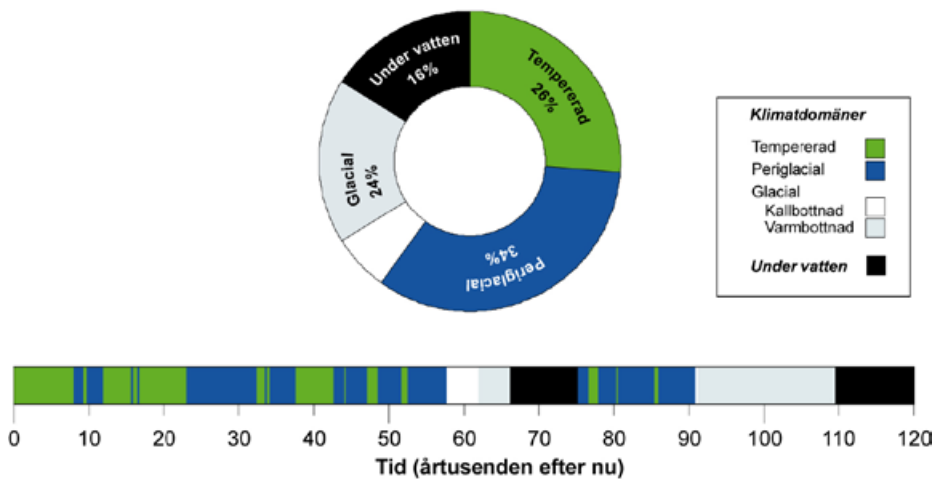
En tydlig latitudberoende gradient i temperatur är noterbar med den högsta årsmedeltemperaturen i söder (Sternö) och den lägsta i norr (Kamlunge), se tabell 3-1 och figur 3-1. Avståndet till kusten är inte helt avgörande för årsnederbörden utan noterade skillnader kan delvis tillskrivas lokala topografiska förutsättningar.

Högsta kustlinjens betydelse för grundvattenkemin

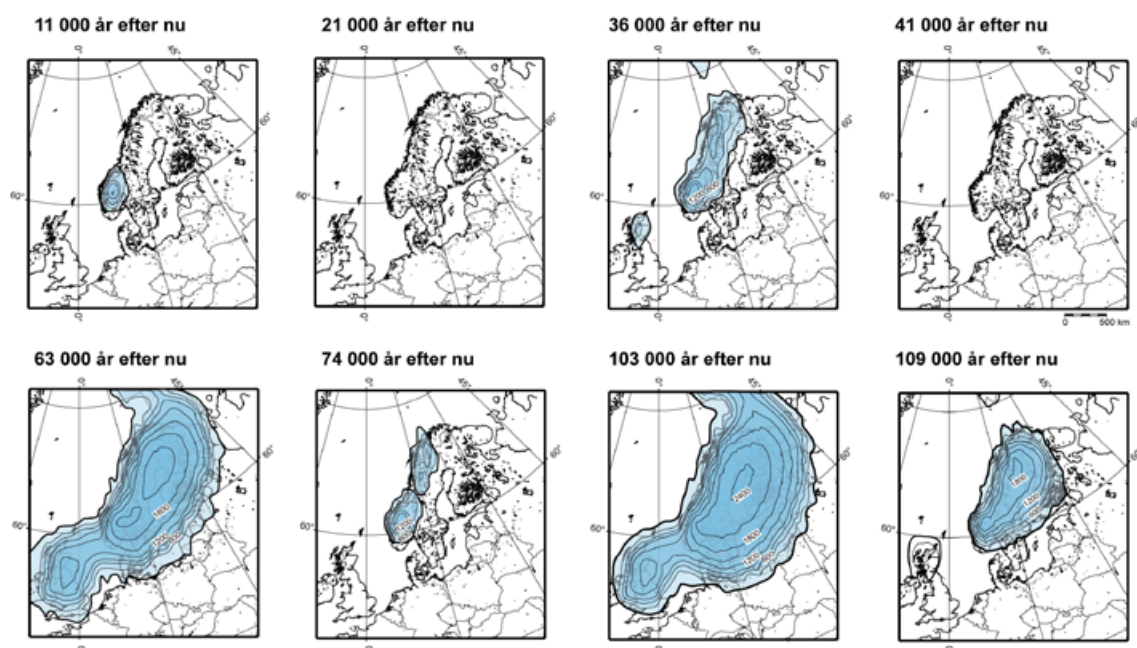
Med undantag för Klipperås och Svartboberget är referensområdena belägna under den högsta kustlinjen, se figur 3-1. Områden under högsta kustlinjen har varit täckta av havet efter den senaste deglaciationen, och kännetecknas därmed av högre salthalter i mark- och grundvatten än områden belägna över den högsta kustlinjen. Som nämns i kapitel 7 ger avståndet från nuvarande kustlinje, och den nuvarande utpräglade inströmningskaraktären, en mer färsk karaktär hos grundvatten provtagna i t ex Kamlunge, Gideå, Fjällveden och Svartboberget. En alltför låg salthalt kan ge förutsättningar för erosion av bentonitbufferten (se kapitel 6 i /SKB 2010b/. För områden belägna ovan högsta kustlinjen förstärks detta förhållande ytterligare (Klipperås och Svartboberget).

3.1.3 Generell framtida klimatutveckling

Olika tänkbara framtida klimatutvecklingar har analyserats i SR-Site, inklusive referensutvecklingen /SKB 2010a/. Den rekonstruerade växlingen i Forsmark mellan perioder med tempererat (varmt) klimat, perioder med glaciala förhållanden (inlandsis) och perioder med periglaciala förhållanden (kalla torra perioder med permafrost, men utan inlandsis) som bygger upp referensutvecklingen redovisas i figur 3-2. Den modellerade utbredningen och tjockleken på inlandsisen under denna glaciationscykel redovisas för ett antal diskreta tidpunkter i figur 3-3. För de aktuella referensområdena kan det översiktligt antas att isens utbredning, tjocklek och tidsrymden för de glaciala perioderna i stort följer samma mönster på en viss latitud. På samma sätt antas permafrostsituationen (tidsrymd och djupgående) vara likartad på platser med likartad årsmedeltemperatur i luften.



Figur 3-2. Beskrivning av klimatets utveckling i SR-Sites referensutveckling för Forsmark. Från /SKB 2010a/.



Figur 3-3. Simulerad isutbredning och istjocklek för SR-Sites referensutveckling, dvs upprepning av nedisningscykeln under Weichsel. Tidpunkter angivna relativt nutid. Från /SKB 2010a/.

Platsernas altitud (i princip indelade i kustnära områden och inlandsområden) förväntas även påverka temperaturen vid inlandsisens botten (vid markytan). Platser i inlandet har en större sannolikhet att utsättas för längre perioder med *kallbottnade förhållanden*², medan kustnära platser är mer benägna att utsättas för längre perioder med *varmbottnade förhållanden*³, och därmed en smältande *basal is*⁴, se /SKB 2010a/. Den senare situationen innebär en möjlighet för grundvattenbildning och generellt mer våta förhållanden, medan den förra situationen i princip utesluter grundvattenbildning under isen. Samtidigt innebär de kallbottnade förhållandena att berget helt eller delvis isoleras från den hydrauliska drivkraft (och hydrostatiska last) som isen utgör /Vidstrand et al. 2010/ och under dessa perioder reduceras även grundvattenflödet i berget.

Exempel på årsmedeltemperaturer i luften för ett kallt periglacialt klimat⁵ har simulerats med klimatmodeller /Kjellström et al. 2009/. Resultaten för referensutvecklingen visar att klimatet i Forsmark under den simulerade perioden är 12,5 grader kallare än i dag och att nederbörden samtidigt minskar med mer än 30 %. Ett sådant klimat är gynnsamt för permafrosttillväxt /SKB 2010a/. Klimatsimuleringarna visar också att de referensområden som inte täcks av inlandsis har ett klimat som är gynnsamt för tillväxt av permafrost, dvs alla platser (Forsmark, Laxemar och övriga referensområden) har förutsättningar för permafrost i referensutvecklingen, om än i olika omfattning.

² Den basala isen är frusen (istemperaturen är under smältpunkten vid aktuellt tryck och inget fritt vatten förekommer).

³ Den basala isen är smältande (istemperaturen är vid smältpunkten för aktuellt tryck och fritt vatten förekommer).

⁴ Isen i inlandsisens nedersta del, vilken är i kontakt med markytan.

⁵ Term som används för att beskriva landformer och processer som förekommer utanför och omkring regioner med glaciäris (inlandsis). I detta sammanhang motsvarar en periglacial klimatdomän ett periglacialt område med närvaro av permafrost, se även /SKB 2010b/.

I referensutvecklingen sker den första tillväxten av permafrost vid förvarsplatsen i Forsmark ca 8 000 år efter att förvarets driftfas avslutats /SKB 2010a/. Motsvarande tidpunkt för Laxemar är efter ca 8 300 år, se tabell 3-1 och figur 3-3. Baserat på dagens skillnader i årsmedeltemperatur (tabell 3-1), och för vissa platser baserat på simulerade årsmedeltemperaturer för kallare periglaciala klimat /Kjellström et al. 2009/, uppskattas tidpunkten för den första permafrosten vara ungefär densamma i Finnsjön, Fjällveden och Klipperås, medan permafrosttillväxten kommer senare i Sternö. Permafrosttillväxt vid de nordliga platserna börjar betydligt tidigare, i successionen Kamlunge, Gideå och Svartboberget.

Permafrostens djupgående förväntas bli störst på de nordligaste platserna, med successivt avtagande i maximalt permafrostdjup mot söder. Detta kan exemplifieras med Forsmark och Laxemar vilka har maximala permafrostdjup på 260 m respektive 160 m i referensutvecklingen, /SKB 2010a/. För de referensområden som i dag har lägre årsmedeltemperatur än i Forsmark, dvs Kamlunge, Gideå och Svartboberget, uppskattas det maximala permafrostdjupet i referensutvecklingen bli större än i Forsmark. För de referensområden där årsmedeltemperaturen i dag är högre än i Forsmark (Sternö, Finnsjön, Fjällveden, Klipperås) uppskattas det maximala permafrostdjupet för referensutvecklingen bli ungefär detsamma som för Forsmark, med undantag för Sternö där det maximala djupet uppskattas bli ca 100 m grundare än i Forsmark på grund av det sydligare läget. I detta sammanhang är det viktigt att notera att osäkerhetsintervallet för dessa beräknade permafrostdjup är betydande, framför allt pga den stora osäkerheten i den temperaturkurva som används vid permafrostsimuleringarna kopplade till referensutvecklingen. Den maximala osäkerheten, om man pessimistiskt sätter alla parametrar i det läge som gynnar permafrosttillväxt, är nästan ± 200 m /SKB 2010a/. På grund av att den största osäkerheten är kopplad till lufttemperaturen /Hartikainen et al. 2010/, kan denna maximala osäkerhet grovt betraktas som giltig även för referensområdena. Specifikt för Forsmark visar utförda beräkningar /SKB 2010a, b/ att inte ens under de mest gynnsamma klimatförhållandena för permafrost, och med de mest pessimistiska antaganden om osäkerheter i de parametrar som påverkar permafrosttillväxt, kan frysning ske på förvarsdjup i Forsmark. Resultaten visar vidare att det i Forsmark existerar en mycket stor marginal till frysning av bentonitbufferten, vars temperaturkriterium för frysning är satt till -4 C° i SR-Site. Analyser visar dessutom att bufferten i deponeringshål klarar att frysa och tina och sedan återfå sina egenskaper. Motsvarande förhållande gäller för återfyllnaden i deponeringstunnlar. Återfyllnadsmaterial i tillfarterna, på högre nivåer, fryser däremot vid upprepade tillfällen i referensutvecklingen /SKB 2011a/.

Tabell 3-2 redovisar ett försök till kvalitativ och relativ jämförelse av de väsentligaste klimatrelaterade aspekterna för referensområden i relation till motsvarande förhållanden i Forsmark.

Tabell 3-2. Kvalitativ och relativ jämförelse av projicerade klimatrelaterade förhållanden för referensområden med förhållanden för Forsmark enligt SR-Sites referensutveckling.

	Periglacial period med permafrost Permafrost-djup	Glacial period med inlandsis Maximal istjocklek/ hydro-statiskt tryck	Platsen täckt av hav Period med havstäckta förhållanden
Kamlunge	Djupare	Tjockare/högre	Kortare
Gideå	Djupare	Tjockare/högre	Kortare
Svartboberget	Djupare	Tjockare/högre	Kortare
Finnsjön	Ungefär samma	Ungefär samma	Ungefär samma
Fjällveden	Ungefär samma	Tunnare/lägre	Kortare
Laxemar och Äspö	Ytligare	Tunnare/lägre	Kortare
Klipperås	Ungefär samma	Tunnare/lägre	Kortare
Sternö	Ytligare	Tunnare/lägre	Längre

3.2 Slutsatser

Forsmarks kustnära läge resulterar enligt SR-Sites referensutveckling klimatmässigt i två långa perioder med täckande hav efter perioder med nedisning. En plats belägen längre norrut än Forsmark innebär generellt sett tjockare landis, längre perioder med permafrost och en djupare penetration av permafrost. Omvänt kännetecknas en sydligare plats generellt sett av kortare permafrostperioder och ytligare penetration av permafrost. Dessutom täcks referensområden söder om Forsmark (Laxemar och Klipperås undantagna) av hav under längre perioder än Forsmark. Inlandsisens tjocklek har generellt sett en begränsad betydelse för en jämförelse mellan olika platser då skillnader i hydrostatiskt tryck på grund av skillnader i istjocklek är av marginell betydelse i förhållande till de högsta tryck och isostatisk last som en kapsel kan motstå. Dock innebär en extremt nordlig placering att säkerhetsmarginalen reduceras. Bedömningen är också att den variation i klimat och strandlinjeförskjutning som är associerad med fallet med global uppvärmning inte heller förordar en annan förvarslökalisering än Forsmark.

Analysen i SR-Site visar att buffert och återfyllnad på förvarsdjup i Forsmark inte kommer att frysa /SKB 2010a, b/, och att återfyllanden på högre nivåer i förvaret reversibelt kommer att återfå sina egenskaper efter den frysning som sker i referensutvecklingen.

En samlad bedömning av effekter av permafrost och av isens tjocklek, havstäckning och global uppvärmning, är att det inte finns någon anledning att utifrån klimatrelaterade lokaliseringfaktorer förorda en annan förvarslökalisering än Forsmark.

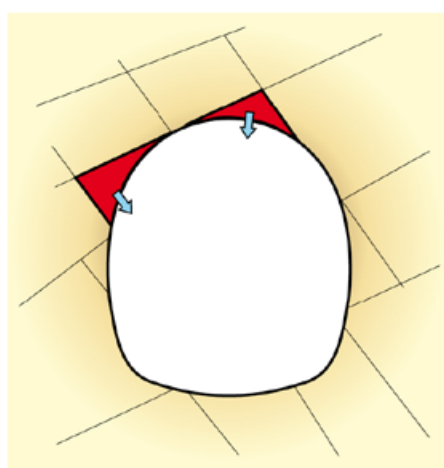
4 Bergmekaniska förhållanden

Stabiliteten hos bergutrymmen avgörs generellt av belastningarna (bergspänningarna), bergets hållfasthets- och deformationsegenskaper samt geometrin på de utrymmen som tillskapas. Stabilitetsförhållandena kan påverka bygge och drift av slutförvaret, men även långsiktig säkerhet. För den långsiktiga säkerheten är det främst två aspekter som måste beaktas. Den ena är möjlig instabilitet hos berget närmast deponeringshål och deponeringstunnlar till följd av lokal överbelastning. Den andra är rörelser i sprickor eller sprickzoner i samband med möjliga framtida jordskalv. Detta kapitel behandlar stabilitetsfrågor kopplade till lokala förhållanden kring deponeringsutrymmen. Jordskalv och deras konsekvenser diskuteras i nästföljande kapitel.

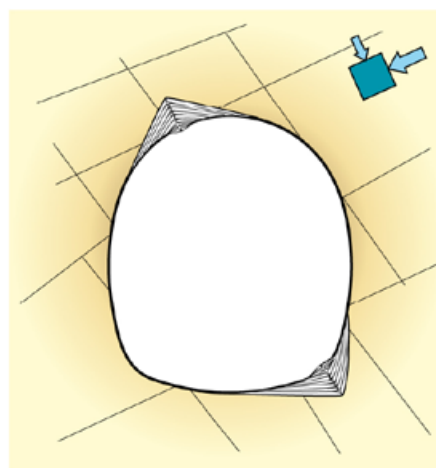
Figur 4-1 visar två principiella ytterlighetsfall av instabilitet i en tunnel. Den vänstra bilden illustrerar vad som brukar benämnas strukturkontrollerad instabilitet, där block faller eller glider ut i tunneln. Blocken formas av existerande sprickor i berget i samspel med geometrin på tunnelvärsnittet. Tunneln ger också blocken nödvändiga frihetsgrader att röra sig där den drivande kraften är gravitationen (genom blockens egentyngd). Denna typ av instabilitet förekommer i många former och dominerar i berg med en hög frekvens av öppna sprickor och/eller sprickor med lågt friktionsmotstånd. Låga belastningar tenderar att främja strukturkontrollerad instabilitet, eftersom låsningseffekter och valvbildning då försvagas eller helt uteblir. Så länge omfattningen är begränsad kan strukturkontrollerad instabilitet i regel förhindras med konventionell bergförstärkning. I svårare fall kan instabiliteten bli progressiv och leda till ras.

Den högra bilden i figur 4-1 illustrerar ett annat belastningsförhållande med höga bergspänningar. I tunnelns närhet omfördelas spänningsfältet och belastningarna runt tunnelperiferin blir ojämnt fördelade. Om belastningarna i särskilt utsatta avsnitt blir så höga att bergets hållfasthet överskrids sker brott i intakt berg genom spjälkning (eng *spalling*). Sprickfattigt berg främjar denna form av sönderbrytning, men den kan dominera även i berg som innehåller sprickor, därför att höga belastningar kan ge inspänningseffekter som motverkar rörelser i sprickorna.

Blandformer av de två exempel som illustreras i figur 4-1 är vanliga, men som principfall är exemplen användbara som utgångspunkter för en jämförelse av situationen i Forsmark med bakgrundsdata från andra platser.



**Strukturkontrollerad instabilitet
- blockutfall**



**Spänninginducerad instabilitet
- överbelastning och spjälkning**

Figur 4-1. Två grundformer av instabilitet i en tunnel. Vänstra bilden: Block eller kilar faller ut i tunneln av egentyngd. Högra bilden: Höga spänningar ger överbelastning och spjälkning av berget i särskilt utsatta avsnitt av tunnelperiferin. Övergångsformer mellan de två formerna av instabilitet är vanliga (bearbetad efter /Martin et al. 2001/).

4.1 Jämförelse av områden

4.1.1 Strukturkontrollerad instabilitet

När det gäller potentialen för strukturkontrollerade stabilitetsproblem, jfr vänstra bilden i figur 4-1, och åtgärdsbehov för att hantera dessa uppvisar Forsmark gynnsamma förhållanden. Bergförhållandena varierar en del inom den berörda bergvolymen /SKB 2008/, men berget har genomsnittligt sett en ur byggsynpunkt mycket god kvalitet. Detta framgår exempelvis tydligt av resultaten från den bergklassificering som gjorts med vedertagna empiriska metoder och bedömningar av förstärkningsbehov /SKB 2009a/. Den viktigaste bidragande orsaken är låg sprickfrekvens, särskilt på förvarsdjup.

Underlag från referensområden för jämförelser med Forsmark finns för sprickfrekvens (se avsnitt 2.2.3), men är mycket begränsat för väsentliga mekaniska parametrar såsom hållfasthets- och deformationsegenskaper hos intakt berg och sprickor /SKB 2010c/, se även avsnitt 4.1.3. Enda undantagen är Laxemar och Äspö, där dataunderlaget är omfattande och i fallet Äspö även inkluderar erfarenheter från bygge och drift på relevanta djup. Det finns också en omfattande generell erfarenhetsbank mot vilken Forsmark kan jämföras. Utan att gå in på enskilda jämförelseobjekt kan slutsatsen dras att Forsmark även i relativa termer är en gynnsam plats med avseende på strukturkontrollerad stabilitet. Bergförhållandena är inte unika – det finns liknande erfarenheter från jämförbara platser – men det är svårt att peka på något fall där lika bra bergenskaper dokumenterats över så stora volymer som i Forsmark.

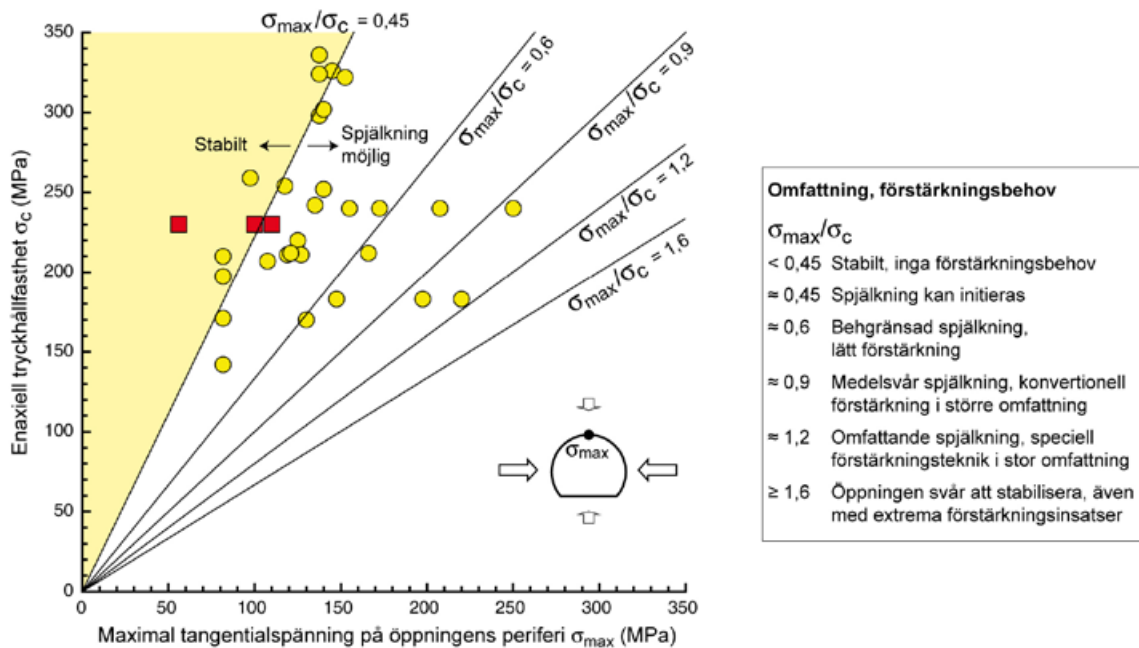
4.1.2 Överbelastning och spjälkning

De belastningsförhållanden och bergenskaper som kännetecknar Forsmark innebär att överbelastning med åtföljande spjälkning är den form av instabilitet som i första hand behöver beaktas. Både potentialen för spjälkning och möjliga konsekvenser har analyserats ingående som en del av den platsanpassade projekteringen av slutförvarsanläggningen. För ett deponeringshål kan ett visst mått av spjälkning innan deponering tillåtas, men blir omfattningen större kan hålet inte användas. En fullständig redovisning av analyser och slutsatser avseende spjälkning innan deponering ges i /SKB 2009a/.

De avgörande faktorerna är geometriska förhållanden, spänningstillståndet och bergets hållfasthet. Fullskaleexperiment vid Äspölaboratoriet /Andersson 2007, Andersson et al. 2009/ och erfarenheter från bergbyggande har visat att den belastning, uttryckt som spänning tangentiellt öppningens periferi (σ_{\max}), som krävs för att spjälkning ska kunna uppstå är proportionell mot bergartens enaxiella tryckhållfasthet (σ_c) som bestäms vid enaxiella kompressionstester av borrkärnor i laboratorium. En uppfattning om potentialen för överbelastning och spjälkning kan alltså fås med ledning av kunskap om spänningstillståndet och bergets tryckhållfasthet. Även omfattningen kan bedömas utifrån dessa parametrar.

Diagrammet i figur 4-2 visar en sammanställning av internationella erfarenheter av spjälkning, baserad på data om belastning och hållfasthet från tunnel- och gruvobjekt i olika bergartstyper och spänningförhållanden /Hoek 2010/. Resultaten från beräkningar för förvarsnivån i Forsmark har också markerats i diagrammet (röda symboler). Av figuren framgår att spjälkning erfarenhetsmässigt kan initieras vid ett förhållande mellan den maximala tangentialspänningen på öppningens periferi (σ_{\max}) och bergets enaxiella tryckhållfasthet (σ_c) på som lägst ca 0,45. Vid lägre belastningar uppträder berget elastiskt och förblir intakt. Detta överensstämmer väl med resultat från storskaliga försök vid Äspölaboratoriet /Andersson 2007/ och även med erfarenheter från svenska gruvor. Med ökande kvot mellan belastning och tryckhållfasthet ökar sannolikheten för spjälkning i allt större omfattning, med åtföljande behov av bergförstärkning för att upprätthålla en stabil öppning.

Tabell 4-1 redovisar de beräkningsfall från Forsmark som motsvaras av de röda markeringarna i figur 4-2. De antagna värdena på hållfasthet och *in situ* spänningar förklaras i avsnitten 4.1.3 och 4.1.4. Hur analysen genomförts redovisas i /SKB 2009a/.



Figur 4-2. Spjälkningspotential och generaliserade erfarenheter av spjälkning, som funktion av förhållandet mellan maximal tillåten tangentialspänning på öppningens periferi (σ_{max}) och bergartens enaxiella tryckhållfasthet (σ_c). Gula symboler avser data från litteraturen. Röda symboler är beräkningsresultat för förvarnsnivån i Forsmark enligt tabell 4-1 (modifierad efter figur 5-1 i /Andersson et al. 2009/).

Tabell 4-1. Data för bedömning av spjälkningspotential i tunnel respektive schakt/deponeringshål på förvarnsnivå i Forsmark (jfr röda symboler i figur 4-2).

Beräkningsfall	Spjälkningspotential		
	σ_{max} (MPa)	σ_c (MPa)	σ_{max}/σ_c (jfr figur 4-2)
1) Tunnel parallell med största horisontalspänningen.	56	230	0,24
2) Tunnel vinkelrät mot största horisontalspänningen.	110	230	0,48
3) Vertikalt schakt eller deponeringshål.	100	230	0,43

De övergripande slutsatserna av analysen är att:

- Spjälkning i en tunnel på förvarnsdjup kan inte uteslutas om tunneln har en ogynnsam riktning (nära vinkelrätt) i förhållande till största horisontalspänningen. Risken elimineras om tunneln orienteras parallellt med största horisontalspänningen.
- För schakt och deponeringshål kan spjälkning inte uteslutas.

Dessa slutsatser har stor betydelse för utformningen av slutförvarsanläggningen i Forsmark. Mera ingående analyser har gjorts för att bland annat värdera känsligheten för variationer i belastningar och hållfasthetsegenskaper samt de kombinerade geometriska effekterna av deponeringstunnel och deponeringshål /SKB 2009a/. Resultaten ändrar inte de övergripande slutsatserna ovan, men ger underlag för mera nyanserade prognoser. Kort kan sägas att med en anpassad förvarnsutformning kan spjälkning i deponeringsutrymmen i samband med utbrytning sannolikt undvikas, men det kan ändå inte helt uteslutas att spjälkning inträffar i en omfattning som innebär att ett antal planerade deponeringshål inte kan användas /SKB 2009a/. Motsvarande analyser har gjorts för Laxemar. Resultaten indikerar där en väsentligt lägre potential för spjälkning än för Forsmark, men möjligheten kan ändå inte helt uteslutas /SKB 2009c/.

Utöver de belastningar kring deponeringsutrymmen som vid utbrytning induceras av det naturliga spänningsfältet tillkommer termiskt inducerade spänningar när berget efter deponering successivt värms upp. Analyser som inkluderar dessa lasttillskott visar att, oberoende av om spjälkning uppstår redan vid utbrytning eller inte, så kommer den kombinerade effekten av spänningar inducerade av utbrytning och termisk last att vara så stor att spjälkning måste förväntas ske /Hökmark et al. 2010/.

För referensområdena har inga liknande stabilitetsanalyser gjorts. Jämförelser måste därför baseras på det begränsade underlag som finns för styrande parametrar dvs hållfastheter och bergspänningar. Dessa parametrar diskuteras i de efterföljande avsnitten.

4.1.3 Hållfasthet

Hållfasthetsbestämningar har gjorts på ett stort antal kärnprover från Forsmark. För de två bergdomäner som dominerar på förvarsnivå har medelvärdena för den enaxiella tryckhållfastheten (σ_c) bestämts till ca 230 MPa respektive 370 MPa /SKB 2008/. Analysen av spjälkningspotential enligt tabell 4-1 avser det lägre värdet. Spjälkningspotentialen minskar med ökande hållfasthet. Sammanställningar för referensområdena redovisar följande medelvärden för den enaxiella tryckhållfastheten:

Gideå: Ådergnejs 128 MPa, granit 201 MPa /Ahlbom et al. 1991a/

Finnsjön: Granodiorit 240 MPa /Ahlbom et al. 1992d/

Sternö: Gnejs 169 MPa /Ahlbom et al. 1992a/

Spridningen i medelvärden kan synas stor, både för Forsmark och för referensområdena, men speglar bara det faktum att tryckhållfastheten varierar starkt, lokalt för en bergart och mellan olika bergarter. Sett i relation till generell bakgrundskunskap framstår varken data från Forsmark eller de fåtaliga värdena från referensområdena som avvikande. Hållfasthetsvärdena för Forsmark kan enklast beskrivas som ”normala till höga” i relation till vad som kan förväntas för aktuella bergarter. Några övriga nackdelar med Forsmark, med avseende på bergets hållfasthetsegenskaper och i relation till andra platser, går inte att identifiera.

4.1.4 Bergspänningar

Under platsundersökningen har omfattande insatser gjorts för att bestämma bergspänningarna i Forsmark (se kapitel 6 i /Glamheden et al. 2007/). Data har hämtats från såväl mätningar som indirekta observationer i borrhål och på borrhäror. Mätningarna har gjorts ner till som mest ca 900 meters djup, med överborrning och olika hydrauliska metoder. Metoderna har svagheter och begränsningar som påverkar tillförlitligheten i resultaten, men sammantaget finns ändå ett omfattande dataunderlag. Som komplement till mätningarna har indikationer på överbelastning i samband med borrning studerats. Det gäller uppskivning av borrhäror (s k *core diskning*) och observationer av spjälkningstendenser i borrhållsväggarna (s k *borehole breakouts*) från loggning av borrhål med akustiska metoder. Förekomst, alternativt avsaknad, av dessa fenomen kan tillsammans med hållfasthetsdata användas för att gränssätta bergspänningarna.

En samlad analys och tolkning av alla mätdata och andra observationer i Forsmark har redovisats av /Martin 2007/ och sammanfattas i figur 4-3. De röda och svarta linjerna i diagrammen motsvarar de bästa tolkningar som kunnat göras av största horisontalspänningen (σ_H , vänstra diagrammet, röd linje), minsta horisontalspänningen (σ_h , högra diagrammet, röd linje) och vertikalspänningen (σ_v , svart linje) som funktion av djup. För horisontalspänningarna indikeras även ett osäkerhetsintervall. Dessa tolkningar, inklusive osäkerheter, har utgjort ingångsdata till de ovan refererade analyserna av spjälkningspotential.

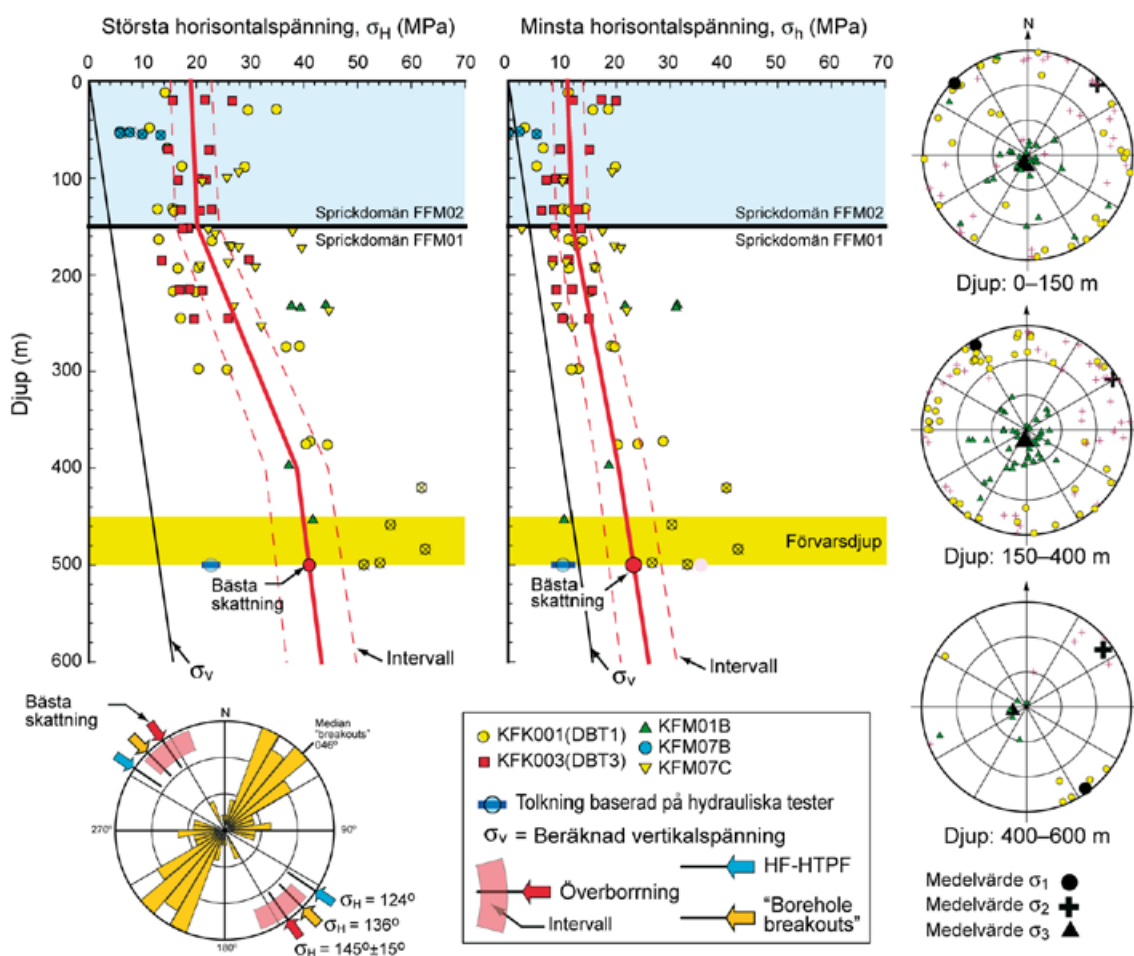
Viktiga resultat som kan utläsas ur figur 4-3 är följande:

- Tolkade spänningsmagnituder på förvarsdjup är $\sigma_H = 41$ MPa, $\sigma_h = 23$ MPa och $\sigma_v = 13$ MPa.
- Horisontalspänningarna ökar med djupet, men inte i jämn takt. Ökningstakten är olika inom olika djupintervall, och kan kopplas till identifierade sprickdomäner.
- Spridningen i mätdata för spänningsmagnituder är betydande (osäkerheterna i den samlade tolkningen är dock mindre än vad de enskilda mätpunkterna indikerar, eftersom skillnader i tillförlitlighet mellan olika mätningar och observationer beaktats).

- De två största huvudspänningarna, σ_1 och σ_2 , är praktiskt taget horisontella och kan därför approximeras med horisontalspänningarna σ_H respektive σ_h (se poldiagrammen i den högra delen av figur 4-3).
- Största horisontalspänningen är genomgående orienterad i nordväst-sydöstlig riktning (medelvärde 145 grader).

Av referensområdena (utöver Laxemar) är det endast Äspö som varit föremål för bergspänningsmätningar i större omfattning. Data från övriga områden inskränker sig till begränsade mätningar i Gideå och Finnsjön /SKB 2010c/. Ett bättre jämförelseunderlag än de fåtaliga mätningarna från referensområdena kan fås från databaser som samlar en stor del av resultaten från bergspänningsmätningar i de skandinaviska länderna fram till ungefär 1986 /Stephansson et al. 1991/. Figur 4-4 visar data för de största och minsta horisontella spänningskomponenterna, tillsammans med tolkningarna för Forsmark enligt figur 4-3. Bakgrundsdata har hämtats från ovan refererade databas, kompletterad med merparten av de mätningar som gjorts i Sverige efter 1986. Det kompletterande underlaget har tillhandahållits av Vattenfall Power Consultants AB (genom Dr Daniel Ask) som är den organisation som utfört mätningarna. Redovisade bakgrundsdata inkluderar även resultaten från referensområdena och Laxemar.

Det bör påpekas att redovisade bakgrundsdata ingalunda är felfria. Exempel på felkällor är brister hos mätmetoder eller att spänningsfältet där mätningar gjorts kan ha varit påverkat av närliggande berggrum, något som är vanligt i t ex gruvor. Men med bortseende från enskilda mätpunkter ger bakgrundsdata som helhet en god uppfattning om vad som är normala värden och ungefärliga spridningsintervall för horisontalspänningarna i skandinavisk berggrund.



Figur 4-3. Sammanfattning av data och tolkningar för bergspänningar i Forsmark (modifierad efter figur 7-18 i /SKB 2008/).

Figur 4-4 visar endast horisontalspänningarnas belopp. Spänningsfältet i Skandinavien kännetecknas också av att:

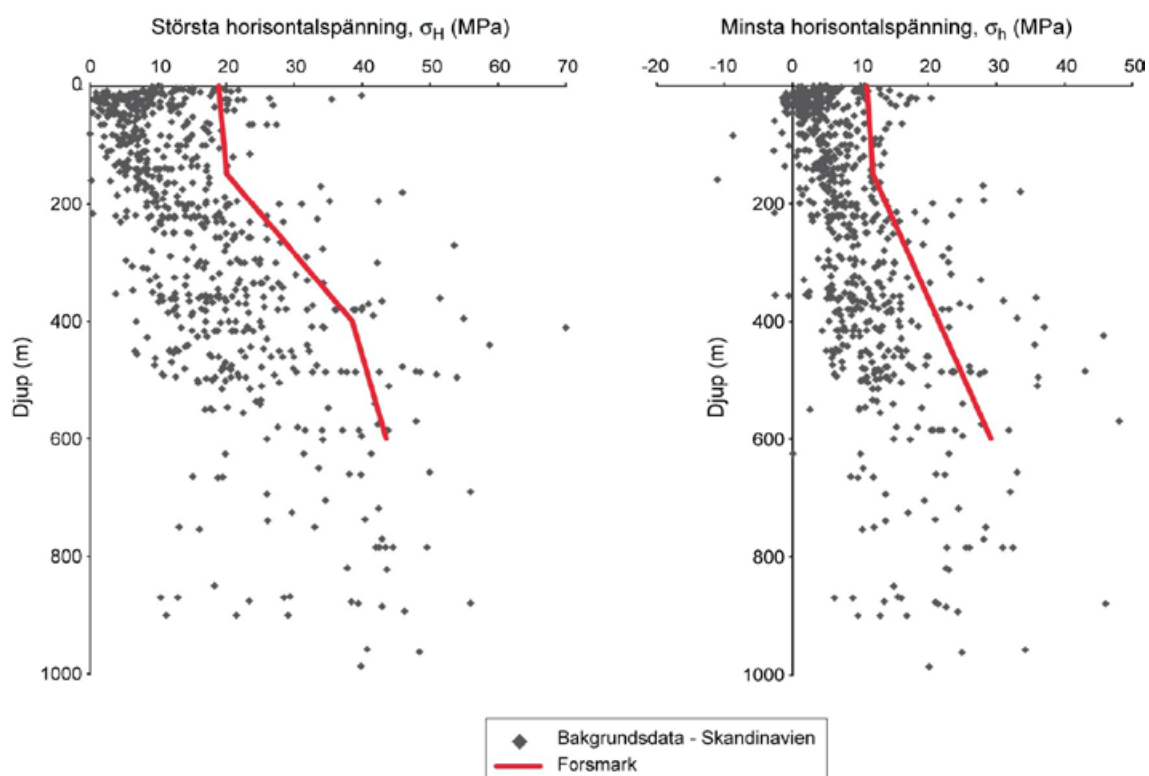
- De största spänningarna är horisontella eller nära horisontella.
- Den största horisontalspänningen är orienterad i ungefärligen nordväst-sydostlig riktning.
- Horisontalspänningarna är större än vertikalspänningen.
- Vertikalspänningen motsvarar approximativt belastningen från ovanliggande berg, och ökar alltså linjärt med djupet.

Dessa generella trender gäller med få undantag, som dessutom ofta kan förklaras av antingen osäkra mätningar eller påverkan av anomala geologiska förhållanden i lokal skala.

En jämförelse mellan mätresultaten från Forsmark och bakgrundsdata visar då följande:

- Den största horisontalspänningen, σ_H , i Forsmark har ett klart högre belopp än genomsnittet för bakgrundsdata, men faller inom variationsbredden.
- Den minsta horisontalspänningen, σ_h , i Forsmark är också högre än genomsnittet för bakgrundsdata.
- I alla övriga avseenden (riktningar, vertikalspänning σ_v) ansluter Forsmark väl till generella trender.

Slutsatsen blir därmed att Forsmark kännetecknas av höga – men inte unikt höga – horisontalspänningar, och i övrigt normala spänningsförhållanden. Det är dessa förhållanden som i kombination med tillkommande termisk belastning ger förutsättningarna för överbelastning och spjälkning kring deponeringshål, med åtföljande behov att anpassa förvarets utformning.



Figur 4-4. Horisontalspänningar – bakgrundsdata från mätningar i Skandinavien samt tolkade djupberoenden för Forsmark enligt figur 4-3 (heldragen röd linje).

Med beaktande av de geologiska förhållandena i Forsmark är förekomsten av höga bergspänningar på större djup inte förvånande. Inom den tektoniska lins där förvaret planeras ligga kännetecknas berggrunden av förhållandevis styva och höghållfasta bergarter, men framför allt av en låg frekvens av öppna sprickor (se tabell 2-2), som sammantaget ger en bergmassa med hög styvhet. Erfarenheter från gruvor och berganläggningar på olika håll i världen indikerar att berggrund med låg frekvens av öppna sprickor och hög styvhet relativt omgivningen tenderar att ha förhöjda spänningsnivåer. Den allmänt accepterade principiella förklaringen är att när ett material med lokalt varierande styvhet utsätts för en yttre belastning så kommer lastöverföringen inne i materialet att fördelas så att partier med hög styvhet överför högre belastningar än partier med lägre styvhet. Detta stämmer väl in på förhållandena i Forsmark. Den korrelation som kunnat påvisas mellan sprickfrekvens (sprickdomäner) och spänningsnivåer (se figur 4-3) inom den undersökta bergvolymen stöder också förklaringsmodellen. Man kan vidare notera att Äspö och Laxemar uppvisar både sprickfrekvenser och spänningsnivåer som är mera i paritet med genomsnittsvärden för svenskt urberg än vad som är fallet i Forsmark /Martin 2007/. De bergspänningssvården som finns från Gideå och Finnsjön pekar också på normala spänningsbelopp.

4.2 Slutsatser

De förhöjda bergspänningar som dokumenterats i Forsmark innebär nackdelar i form av särskilda krav på anpassning av förvarets utformning för att undvika överbelastning i anslutning till deponerings-tunnlar och deponeringshål. Möjligheten att överbelastning och spjälkning inträffar kan ändå inte helt avskrivs. Det står också klart att det finns platser där dessa nackdelar är mindre uttalade eller obefintliga, därför att spänningarna är lägre.

Bergspänningarna och deras möjliga konsekvenser måste emellertid värderas som en del av de geologiska förutsättningar för slutförvaret som Forsmark totalt sett erbjuder. Det finns stöd för slutsatsen att de förhöjda spänningarna är direkt relaterade till utmärkande egenskaper hos berget, såsom goda hållfasthets- och deformationsegenskaper och framför allt en låg frekvens av öppna sprickor på förvarsdjup. Dessa egenskaper ger väsentliga fördelar i flera avseenden, den viktigaste är att det finns få sprickor som kan leda vatten, vilken har avgörande betydelse för förutsättningarna att uppnå långsiktig säkerhet (se kapitel 6 och 8). Även byggande och drift underlättas, exempelvis genom begränsade behov av bergförstärkning och tätning vid tunneldrivning.

I en samlad värdering framstår alltså förhållandet med förhöjda bergspänningar som ett ”pris” som får betalas för tillgången till berggrund med i övrigt avgörande positiva egenskaper. Eftersom de nackdelar som följer av bergspänningarna kan hanteras genom anpassning av förvarets utformning och konstruktion, och de osäkerheter som efter dessa åtgärder kvarstår bedöms vara små, är detta sammantaget inget som talar till Forsmarks nackdel i förhållande till andra platser.

5 Jordskalv

Ett framtida större jordskalv kan eventuellt skada enskilda kapslars integritet och därmed förorsaka utsläpp av radionuklider. Risken för ett större framtida skalv är generellt mycket liten, men kan inte helt försummas. Genom att anpassa förvarets layout till förekommande deformationszoner och sprickor kan effekterna på ett slutförvar reduceras kraftigt, eller elimineras helt.

Möjliga framtida större jordskalv kopplade till zoner i förvarets närområde är betydelsefulla för den långsiktiga säkerheten då dessa kan resultera i sekundära rörelser i andra mindre zoner och sprickor. En kapselposition får därför inte skäras av någon sådan zon eller spricka. Layouter som tar hänsyn till inducerade effekter av framtida jordskalv har tagits fram för Forsmark och Laxemar, se avsnitt 2.3, men saknas för övriga referensområden. Metoder att undvika kapselpositioner med ovanstående risk har analyserats av /Munier 2010/. Möjligheterna till reaktivering och försvagning av existerande deformationszoner som ett resultat av framtida jordbävningar har analyserats för Forsmark av /Lund et al. 2009/, medan effekter på ett slutförvar analyserats av /Fälth et al. 2010/.

5.1 Jämförelse av områden

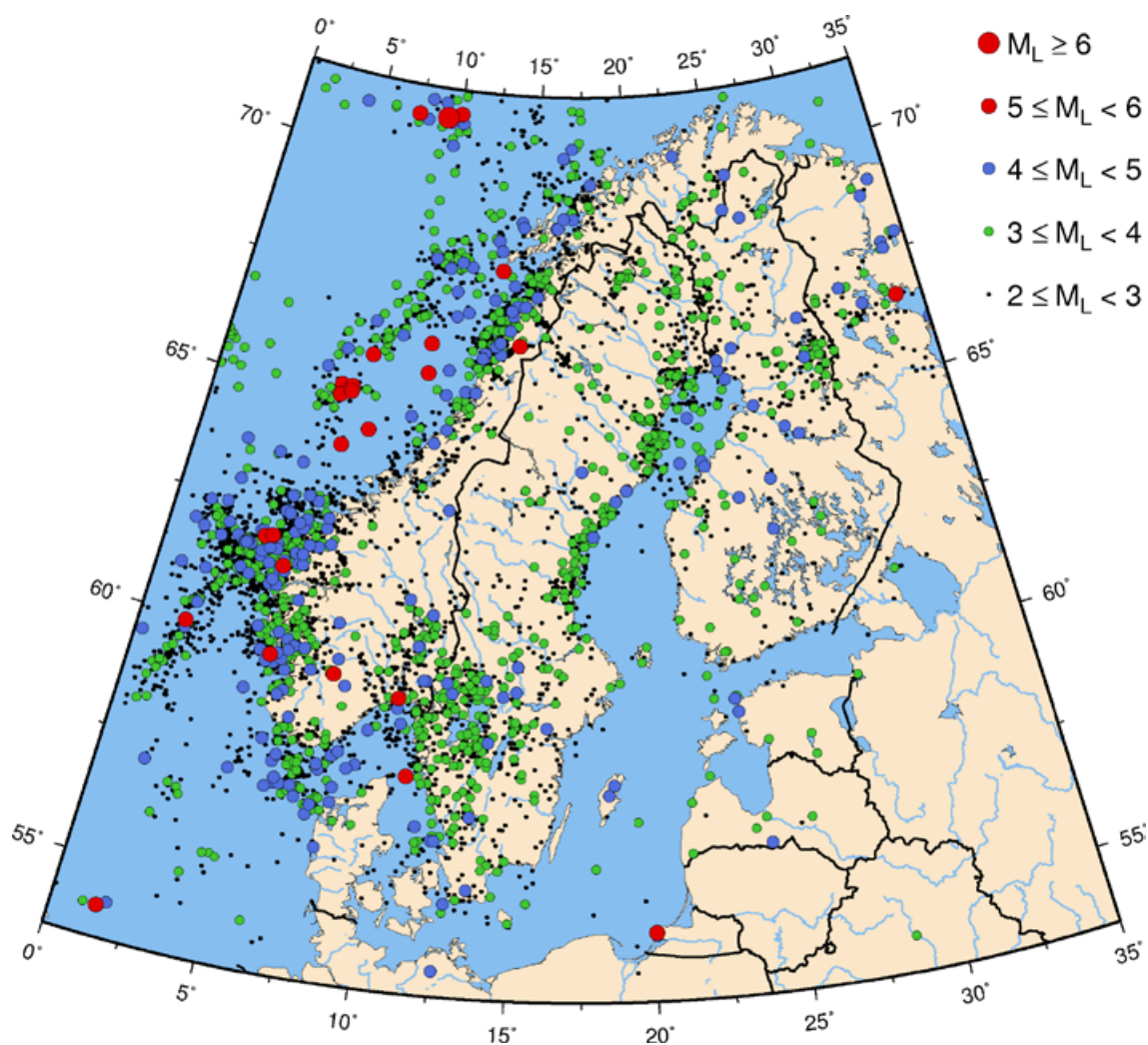
Förekommande jordskalv i Sverige är av låg magnitud och är geografiskt ojämnt fördelade, se figur 5-1. Betydligt större skalv, troligen M 8–9, förekom i norra Sverige i samband med inlandsisens avsmältning (sen- eller postglaciala förkastningar). I samband med platsundersökningarna av Forsmark och Laxemar gjorde SGU undersökningar för att spåra eventuella större jordskalv (>M7) sedan inlandsisens avsmältning i och omkring dessa båda områden. Några sådana spår kunde inte identifieras /Lagerbäck et al. 2005, Lagerbäck et al. 2006/. Liknande studier har inte genomförts för övriga referensområden.

Avsaknaden av sådana indikationer innebär inte att större framtida jordskalv i anslutning till de undersökta områdena helt kan uteslutas /Lagerbäck och Sundh 2008/.

5.2 Slutsatser

Förekomsten av jordskalv är låg i regionen kring Forsmark och spår av några större skalv sedan inlandsisens avsmältning för 10 000 år sedan har inte identifierats. Större framtida skalv kan emellertid inte uteslutas, särskilt visar händelser från norra Sverige att framtida istider kan ge upphov till sådana. Förvaret kommer därför att utformas så att större deformationszoner undviks, liksom kapselpositioner med potential för sekundära rörelser i sprickor som kan skada kapslar.

För Laxemar har liknande analyser gjorts, inklusive anpassning av ett tänkt förvar. Motsvarande analys har inte gjorts för övriga referensområden. Möjligen kan förekomsten av större skalv i norra Sverige i samband med inlandsisens avsmältning indikera att sannolikheten för framtida större jordskalv är större vid en nordlig förläggning än vid en förläggning i södra Sverige.



Figur 5-1. Epicentra och magnituder kopplade till jordskalv i Skandinavien mellan åren 1375 och 2007, modifierad efter /Böðvarsson et al. 2006/. Dataunderlag från nationella observationsnät i Danmark, Estland, Finland, Norge, Ryssland och Sverige. Den aktuella databasen benämns "Helsingforskatalogen".

6 Grundvattenströmning

Rådande hydrogeologiska förhållanden är bestämmande för grundvattenströmningen i förvarsvolymen och påverkar förutsättningarna för transport av lösta ämnen till bufferten, och påverkar därmed också buffertens och kapselns funktion. I den händelse att en kapsel skadas bestämmer de hydrogeologiska förhållandena även hur mycket radioaktiva ämnen som kan frigöras från det använda kärnbränslet och därefter spridas vidare med grundvattnet. Det är generellt fördelaktigt med en låg frekvens av vattenförande sprickor i ett deponeringsområde och att dessa sprickor har låg vattengenomsläpplighet. Dessa senare egenskaper leder sammantaget till att grundvattenflödet blir litet.

Grundvattnets strömning (riktning, storlek och variabilitet) bestäms av geometri (deformationszoner och sprickor), materialegenskaper (sprickors och deformationszoners transmissiviteter) och variationen i grundvattenytans läge och i grundvattentryck som bestämmer den hydrauliska gradienten. De flesta referensområdena finns i områden med flack topografi, karakteriserade av inströmning av grundvatten. En jämförande diskussion av flödesrelaterade aspekter avgränsas här till beskrivningar av bergmassans hydrauliska konduktivitet, dvs egenskaperna hos berget mellan deterministiskt modellerade deformationszoner på förvarsdjup.

Förändringar i framtida klimat kommer att påverka tillgången på vatten och de krafter som driver grundvattenströmningen, liksom den kemiska sammansättningen på infiltrerande vatten. Dessa aspekter behandlas inte vidare i detta kapitel men orsaker till sådana förändringar berörs översiktligt kapitel 3 och effekterna i kapitel 7.

6.1 Jämförelse av områden

6.1.1 Dataunderlag och normering av data

Undersökningsmetoder och utvärderingsmetodik för bestämning av hydrauliska materialegenskaper har utvecklats successivt över tid, och därigenom varierar även kvaliteten i data. Generellt bedöms dock data från hydrauliska tester i referensområden, med få undantag, vara användbara för jämförelser. Utnyttjade databaser för referensområden består av mätningar av hydraulisk konduktivitet i bergmassan mellan tolkade deterministiska deformationszoner, där alltså data som representerar tolkade deterministiska zoner i borrhålen inte ingår. Vidare har jämförelsen avgränsats till data från djup mellan 400 och 700 m. Förutom att data då representerar ett relevant förvarsdjup, elimineras med detta förfarande effekter av förhöjd och varierande hydraulisk konduktivitet som ofta karakteriserar det ytnära berget.

Undersökningar genomförda under platsundersökningarna /Follin 2008, Rhén och Hartley 2009/, samt i Äspölaboratoriet, t ex /Andersson et al. 2002/, kännetecknas i hög grad av en kvantifiering av enskilda konduktiva sprickors läge och egenskaper med hjälp av flödeslogggar (Posiva flödeslogg, PFL) understött av detaljerad kartering av borrhålen och borrhållsväggar. Då denna senare typ av detaljerad karakterisering saknas för äldre referensområden har jämförelser avgränsats till resultat från injektionstester på en ungefärlig mätskala av 20–25 m. För att normera dataunderlaget har data i 2 m eller 3 m skala från Finnsjön, Sternö och Äspö summerats (regulariserats) till motsvarande 20 m eller 21 m sektioner. Data i skala 100 m från lågkonduktiva delar av Forsmark och Laxemar har delats upp (deregulariserats) i 20 m sektioner, med antagande om jämt fördelad (uniform) konduktivitet i motsvarande 100 m sektion, se /SKB 2010b/. På detta sätt möjliggörs en statistisk bearbetning och jämförelse på en för alla områden enhetlig mätskala (eng *support*) och information i lågkonduktiva delar av berget i Forsmark och Laxemar inkluderas fullt ut. Det kan noteras att högupplösande flödesloggning (PFL) har genomförts i merparten av borrhålen i Forsmark och Laxemar. Dessa data har dock inte utnyttjats i den aktuella analysen.

En faktor som har betydelse för den statistiska analysen är den nedre mätgränsen för använd mätmetod (i huvudsak styrd av det minsta flöde som kan mätas). Bestämningen av denna mätgräns innefattar dock ett visst mått av subjektiv tolkning och kan därför variera mellan platser, och även mellan borrhål på en enskild plats. Betydelsen av den nedre mätgränsen för resultatet diskuteras vidare i avsnitt 6.1.3.

En sammanställning av analyserade data från Forsmark och referensområdena redovisas i tabell 6-1.

Tabell 6-1. Data som nyttjas för analys av hydraulisk konduktivitet i bergmassan mellan deterministiskt modellerade zoner i djupintervallet 400–700 m.

Område	Antal data	Längd på mätsektion (m)	Angiven mätgräns ¹⁾ K (m/s)	Kommentar
Forsmark	151	20, 100	100 m: $2,9 \cdot 10^{-13}$ 20 m: $1,2 \cdot 10^{-12}$	Borrhål KKF01A, -01D, -02A, -04A, -05A, -06A, -06C, -07A, -08A, -08C, -09A, -09B. Data från /SKB 2010b/.
Laxemar	172	20, 100	100 m: $4,7 \cdot 10^{-12}$ 20 m: $5 \cdot 10^{-12}$	Borrhål KLX02–05, KLX07A, -08, -10, -11A, -12A, -13A, -15A, -17A, -18A, -19A, -21B. Data från /SKB 2010b/.
Fjällveden	56	25	$1 \cdot 10^{-11}$	Borrhål KFJ01–KFJ02, KFJ04–KFJ08, KFJ09.
Äspö	35	3 (21)	$1 \cdot 10^{-11}$ – $5 \cdot 10^{-11}$	²⁾ Borrhål KKAS02–KKAS08.
Gideå	93	25	$1 \cdot 10^{-11}$	Borrhål KGI01–08, KGI10–11, KGI13.
Kamlunge	53	25	$1 \cdot 10^{-11}$	Borrhål KKM01–04, KKM11–14.
Svartboberget	34	25	$5 \cdot 10^{-12}$	Borrhål KSV01, KSV04–KSV06.
Klipperås	74	20, 25	$1 \cdot 10^{-11}$	Borrhål KKL01–KKL02, -06, -09, KKL12–KKL14.
Sternö	41	2 (20), 3 (21)	$4 \cdot 10^{-10}$ – $2,4 \cdot 10^{-9}$	Borrhål KKA01–KKA04. Steady-state ³⁾
Finnsjön	52	2 (20), 3(21)	$1 \cdot 10^{-10}$ – $3 \cdot 10^{-9}$	Borrhål KFI01–KFI07. Steady-state ³⁾

¹⁾ Huvudsakligen baserat på angivna värden i /SKB 2010c/.

²⁾ Gäller regulariserade värden för 21 m sektioner.

³⁾ Gäller regulariserade värden för 20 m eller 21m sektioner.

6.1.2 Metod

Som jämförande instrument används här i huvudsak en grafisk redovisning av fördelningar av hydraulisk konduktivitet (K) i form av kumulativa fördelningsplottar (sannolikhetsplottar), kombinerat med tabellerad statistik. Denna typ av plottar har genererats för hydraulisk konduktivitet i 20–25 m skala för Forsmark och för referensområdena. Konduktivitetsdata har logaritmerats och analyserats med hjälp av Excels dataanalysfunktion (Histogram) med intervallstorlekar om 0,25 log-enheter (bas 10). Från de producerade fördelningskurvorna för de enskilda platserna kan enkla jämförande mått utläsas, t ex medianen = 50 % percentilen, se figur 6-1. Vidare fås en visuell bild av den relativa spridningen i data, inklusive andelen data på den nedre mätgränsen.

6.1.3 Resultat och diskussion

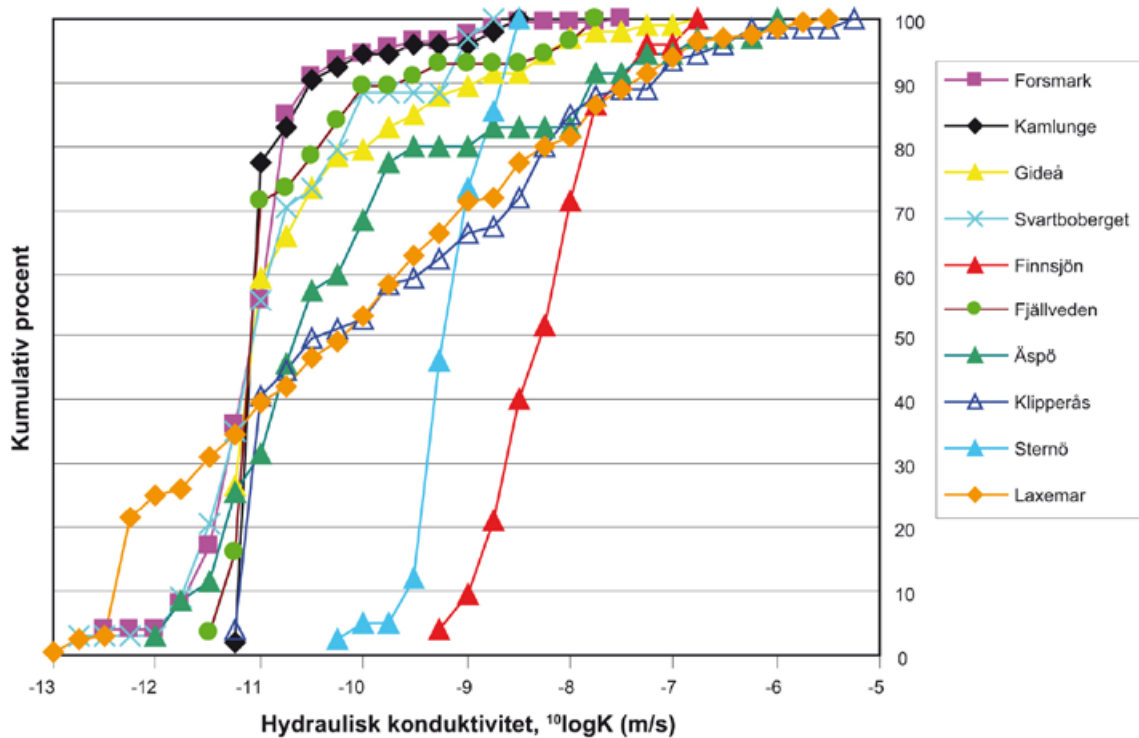
De producerade kumulativa fördelningarna för bergmassan i djupintervallet 400–700 m redovisas i ett gemensamt diagram i figur 6-1. Översiktligt kan tre grupperingar med likartade fördelningar identifieras:

Grupp 1: Forsmark, Fjällveden, Gideå, Kamlunge och Svartboberget,

Grupp 2: Laxemar, Äspö och Klipperås,

Grupp 3: Sternö och Finnsjön.

Fördelningarna för Fjällveden, Gideå och Kamlunge ansluter nära till den för Forsmark. Data från dessa tre platser uppvisar en stor stegvis förändring i fördelningen vid ca $K=1 \cdot 10^{-11}$ m/s, som sammanfaller med den lägre mätgränsen för dessa referensområden. Fördelningarna för Klipperås och Laxemar nära nog sammanfaller, och kännetecknas av en relativt stor spridning. Medianen för Äspö är något lägre än för Klipperås. Data från Äspö uppvisar en spridning som för låga konduktiviteter liknar Grupp 1, men ansluter till data från övriga områden i Grupp 2 för höga percentiler. Fördelningarna för Finnsjön och Sternö (Grupp 3) är förskjutna mot högre värden men med relativt begränsad spridning, där medianvärdet för data från Finnsjön är cirka en storleksordning högre än för Sternödata. För dessa områden var mätningarna förknippade med en högre mätgräns jämfört



Figur 6-1. Kumulativa fördelningar av uppmätt hydraulisk konduktivitet (K) i mätskala 20–25 m, för Forsmark och referensområden. Data representerar bergmassan mellan deterministiska deformationszoner i djupintervallet 400 till 700 m. Se även Appendix 1 beträffande effekter av mätgräns på beräknade fördelningar för Finnsjön och Sternö.

med övriga referensområden, se tabell 6-1. De statistiska resultaten är därför inte direkt jämförbara med resultaten för övriga områden. Viss statistik redovisas dock för att möjliggöra diskussionen i Appendix 1 av effekter av dessa höga mätgränser.

Skillnader mellan de olika fördelningarna, liksom relevansen av olika delar av de redovisade fördelningarna diskuteras i de följande avsnitten.

Delar av fördelningarna som är relevanta för säkerhetsanalysen

De delar av fördelningarna för bergmassan (dvs berget mellan deterministiskt modellerade deformationszoner) som är relevanta för säkerhetsanalysen är de höga percentilerna (högra delen av fördelningarna). Detta gäller t ex inflödeskriterier kopplade till deponeringshål och deras placering. Data som beskriver de höga percentilerna är dessutom oberoende av mätgränser, även om det finns en maxgräns även för det största möjliga flödet som går att mäta i samband med en injektionstest. Det maximalt tillåtna inflödet till ett deponeringshål har gränsatts till 0,1 L/min /SKB 2009d/, svarande mot en spricktransmissivitet på $3 \cdot 10^{-9}$ m²/s, /Smith et al. 2009/, vilket grovt motsvarar en hydraulisk konduktivitet i 10-meterskala (motsvarande deponeringshålets längd) om ca $3 \cdot 10^{-10}$ m/s. De aktuella fördelningarna, och andelen värden $\leq 3 \cdot 10^{-10}$ m/s kan därför betraktas som en översiktlig skattning av hur stor volymsandel av bergmassan som uppfyller detta kriterium, dvs den så kallade nyttjandegraden. Resultaten i tabell 6-2 visar att Grupp 1 (inklusive Forsmark) ger en nyttjandegrad på 88–97 % utifrån det angivna inflödeskriteriet. Motsvarande siffra för Grupp 2 är 60–80 %. Motsvarande resultat för Finnsjön och Sternö redovisas inte då de höga mätgränserna sammanfaller med det utnyttjade tröskelvärdet, se även diskussion i Appendix 1.

Tabell 6-2. Hydraulisk konduktivitet. Geometriskt medelvärde (K_g), standardavvikelse (StDev) och andelen värden $\leq 3 \cdot 10^{-10}$ m/s baserade på data på hydraulisk konduktivitet i 20–21 m skala. På grund av hög nedre mätgräns redovisas inte andelen data $\leq 3 \cdot 10^{-10}$ m/s för Finnsjön och Sternö, se diskussion i Appendix 1.

Plats	K_g (m/s)	StDev $^{10}\log K$	Andel data $\leq 3 \cdot 10^{-10}$ m/s (%)	Antal data	Grupp
Kamlunge	$1,4 \cdot 10^{-11}$	0,48	96,2	53	1
Gideå	$2,7 \cdot 10^{-11}$	1,0	85,0	93	1
Svartboberget	$1,5 \cdot 10^{-11}$	0,87	88,2	34	1
Finnsjön	$4,8 \cdot 10^{-9}$	0,57		52	3
Forsmark	$8,7 \cdot 10^{-12}$	0,67	96,7	151	1
Fjällveden	$2,0 \cdot 10^{-11}$	0,84	91,1	56	1
Åspö	$6,6 \cdot 10^{-11}$	1,52	80,0	35	2
Laxemar	$7,9 \cdot 10^{-11}$	1,88	62,8	172	2
Klipperås	$2,1 \cdot 10^{-10}$	1,55	59,5	74	2
Sternö	$6,4 \cdot 10^{-10}$	0,38		41	3

6.2 Slutsatser

Berget på förvarsdjup i Forsmark har låg hydraulisk konduktivitet. Detta beror huvudsakligen på en låg frekvens av vattenförande sprickor. Undersökningarna i Forsmark är omfattande, vilket dels gjort det möjligt att tydligt geometriskt avgränsa den bergvolym som karakteriseras av låg hydraulisk konduktivitet. Dessutom medför undersökningarnas omfattning att tilltron till uppmätta värden är hög. Den noterade låga hydrauliska konduktiviteten understöds av geologiska observationer med långa borrhålssektioner utan öppna sprickor, och en generell låg frekvens av öppna sprickor på förvarsdjup, se avsnitt 2.2.3.

Det som ger utslag på förutsättningarna för långsiktig säkerhet är huvudsakligen de högre percentilerna av fördelningen av hydraulisk konduktivitet, se figur 6-1 och tabell 6-2. En jämförelse mellan fördelningar i Forsmark och referensområden visar att Forsmark har den högsta andelen av data $< 3 \cdot 10^{-10}$ m/s (motsvarande givna konstruktionsförutsättningar för att undvika erosion av bufferten) med ett värde på nära 97 %. Referensområdena uppvisar en lägre andel.

Väsentligt högre (dvs sämre) nedre mätgränser för de hydrauliska testerna i Sternö och Finnsjön gör att fördelningarna för dessa två områden, se figur 6-1, inte kan jämföras de för övriga områden, se även diskussion i Appendix 1.

Det kan fastslås att Forsmark, vid en jämförelse med referensområdena, kännetecknas av låg uppmätt konduktivitet och låg frekvens av öppna sprickor. Detta innebär, sammantaget med det faktum att referensområdena representerar ett brett urval av geologiska miljöer, att det sannolikt inte finns någon plats som skulle kunna uppvisa väsentligt bättre hydrauliska egenskaper än Forsmark.

7 Grundvattnets sammansättning

Grundvattnets nuvarande och framtida sammansättning har stor betydelse för den långsiktiga säkerheten. Det gäller främst egenskaper som kan påverka kapseln och bufferten, såsom salthalt, redoxförhållanden (inklusive risk för löst syre i grundvatten) samt halter av andra ämnen som kan inverka skadligt på buffert eller kapsel. Även om dagens sammansättning är väl känd, ingår i säkerhetsanalysen att bedöma hur sammansättningen kommer att påverkas i framtiden på grund av klimatförändringar (kapitel 3) och associerade förändringar i grundvattenströmning och de fortgående processer som påverkar grundvattenkemin på förvarsdjup.

Grundvattnets *salthalt* och *innehåll av kalcium* påverkar stabiliteten hos bentonitleran i bufferten. Låga halter kan innebära problem med avseende på detta. Grundvattnets halt av sulfid är också viktig, eftersom sulfiden kan korrodera koppar och därmed skada kapseln. Om bentonitbufferten är intakt krävs det extremt höga sulfidhalter för att detta ska kunna bli ett problem. Om bufferten skadas blir dock sulfidhalten viktig. Grundvattnet på förvarsnivå får inte innehålla löst syre eftersom syre korroderar koppar. I dag förbrukas syret i infiltrerande nederbörd genom mikrobiella processer mycket nära ytan och kravet är därmed uppfyllt, men för den långsiktiga säkerheten är det också viktigt att bedöma bergets framtida förmåga att förbruka syret i infiltrerande vatten. Även bergets framtida *kapacitet att buffra pH*, främst genom tillgång av kalcit på bergets sprickytor, är viktig.

7.1 Dataunderlag

Provtagning och analyser av djupa grundvatten har genomgått en väsentlig utveckling från de första provtagningarna på Sternö och Finnsjön i slutet av 1970-talet, via regelbundna provtagningar vid Äspölaboratoriet, till omfattande provtagningar i Forsmark och Laxemar under senare års platsundersökningar. En generaliserad bild av djupa grundvattens kemi, liknande den som finns för ytliga grundvattens kemi genom SGUs brunnsgatabas, saknas dock på nationell nivå. De undersökningar av djupa grundvatten som genomförts av SKB i undersökta referensområden utgör ett begränsat antal riktade insatser. Provtagna borrhål på platser i inlandet karakteriseras företrädesvis av inflöde av grundvatten (grundvattenbildning). Sådana förhållanden parade med svårigheter att isolera ytliga delar av de provtagna borrhålen, innebär risk för att inströmmande ytliga vatten kontaminerar vattenprov i djupa borrhål, vilket också har konstaterats, se avsnitt 7.2. Referensområden i inlandet karakteriseras därför genomgående av att representativa grundvattendata saknas på relevanta djup för parametrar som kopplar till uppställda krav och önskemål på grundvattenkemi /SKB 2010c/. Situationen är mer fördelaktig i miljöer som karakteriseras av utströmning av grundvatten, t ex i Finnsjön och Äspö, se /SKB 2010c/, och även för Laxemar/Simpevarp och Forsmark. De geografiska lägena för de senare platserna, tillsammans med förbättrade provtagnings- och analysmetoder och en konsekvent tillämpad metodik för bedömning av kvalitet och representativitet, innebär att provtagningar genomförda under det senaste decenniet ger en mer rättvisande bild av djupa grundvattens kemi. Att notera är dock att äldre analyser från Finnsjön, som är kustnära, belyser de kemiska förhållandena på större djup på denna plats på ett acceptabelt sätt. Motsvarande förhållanden gäller dock inte för äldre analyser från Sternö, se avsnitt 7.2.

Ovanstående innebär att det finns svårigheter att kvantitativt jämföra analyser av djupa grundvatten från referensområden, givet skillnaderna i geografiskt läge och tidpunkter för utförda undersökningar. Generellt gäller att grundvattenprover från områden som karakteriseras av utströmning ger mer representativa dataunderlag än platser i inlandet som kännetecknas av en mer utpräglad inströmning. Grundvattnet i Forsmark är typiskt för de grundvatten som undersökts i den svenska berggrunden som kännetecknas av kustnära utströmningsförhållanden.

7.2 Jämförelse av områden

De specifika kraven kopplade till långsiktig säkerhet är att inget fritt syre får förekomma samt att salthalten inte får vara för låg. Givet svårigheterna med redoxmätningar (indikation på syre) fokuseras jämförelsen till uppmätta typiska värden på salthalt. För övriga grundvattenkemiska förhållanden av betydelse, som sulfidhalt, pH eller buffringskapacitet, saknas tillförlitliga data från andra platser än Forsmark, Laxemar och Äspö för att kunna göra meningsfulla jämförelser.

Grundvatten i Forsmark mellan 400 till 700 m djup kännetecknas av bräckta vatten med ökad salthalt mot djupet, lågt tritiuminnehåll (vilket indikerar begränsad inverkan av ytliga vatten), med inslag av glaciala vatten och Littorinavatten (marint ursprung). Motsvarande grundvatten återfinns också på liknande djup i de kustnära Laxemar och Äspö, och delvis i Finnsjön, med variationer mellan platserna som företrädesvis kopplar till lokal topografi, och därmed varierande lokal inverkan av Littorinahavet.

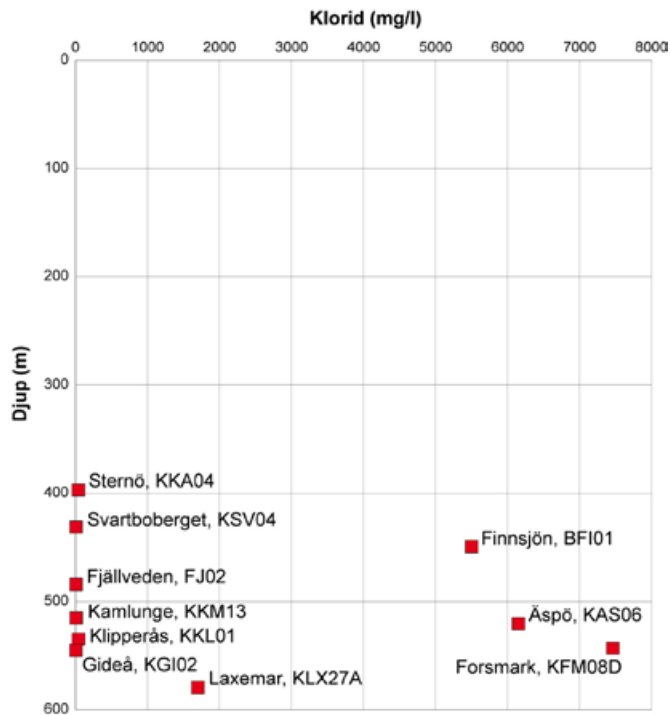
Med undantag för Klipperås och Svartboberget är samtliga referensområden belägna under den högsta kustlinjen, se figur 3-1. Det innebär att dessa områden varit täckta av havet efter den senaste deglaciationen, och därmed kännetecknas av högre salthalter i mark- och grundvatten än områden belägna över den högsta kustlinjen. Grundvatten som provtagits i inlandet (Fjällveden, Gidea, Klipperås och Kamlunge) karakteriseras av att det är mer lågsalint, men med en ökande salthalt mot djupet och spår av en glacial komponent. Figur 7-1 illustrerar översiktligt de kemiska förhållandena i termer av salthalt (här illustrerad med kloridkoncentrationen) i Forsmark och i referensområden. Av denna figur framgår de relativt höga kloridhalterna i kustnära Forsmark, Äspö och Finnsjön (5 500–7 500 mg/l) med väsentligt lägre uppmätt koncentration i de referensområden som ligger mera inland. Resultat från Laxemar hamnar, trots sin kustnära position, i en mellanställning med en kloridkoncentration på 1 700 mg/l. Att detta vatten utgör en blandning av ett bräckt vatten av glacialt ursprung stöds av ett lågt $\delta^{18}\text{O}$ ⁽⁶⁾, se figur 7-2. Typiskt visar meteoriska och bräckta marina vatten förhöjda $\delta^{18}\text{O}$ medan bräckta glaciala vatten visar låga $\delta^{18}\text{O}$. Det faktum att data från det havsnära Sternö visar en låg salthalt på ett djup av nära 400 m tillskrivs effekter av att proverna kontaminerats av ytvatten.

7.3 Slutsatser

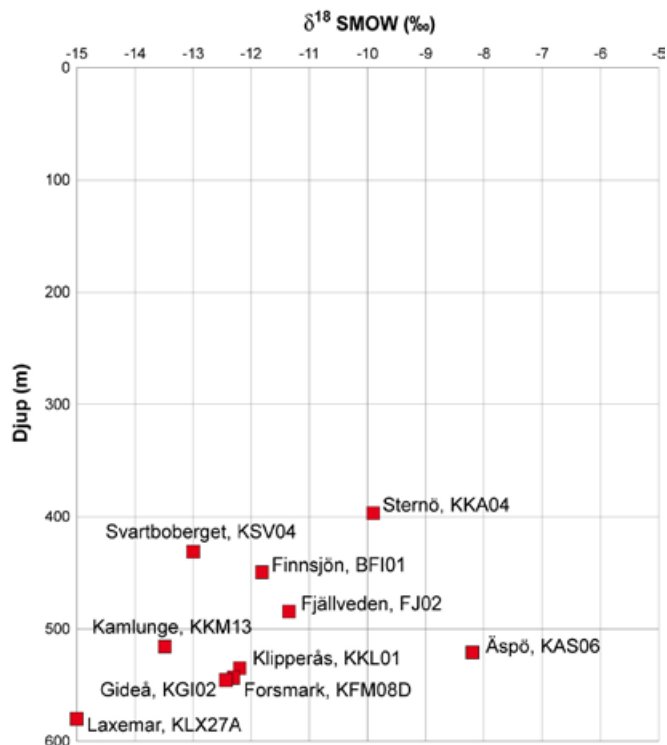
Säkerhetsanalysen SR-Site /SKB 2011a/ visar att Forsmark har en lämplig grundvattenkemi med avseende på långsiktig säkerhet. Det innefattar bl a en salthalt som inte befrämjar erosion av bufferten. Även övriga hydrogeokemiska parametrar/förhållanden i Forsmark (t ex redoxförhållanden) bedöms som lämpliga.

Tillgången på representativa vattenprover av hög kvalitet från referensområdena är begränsad, bortsett från prover från Laxemar och Äspö. Ett undantag är kloridhalt där en jämförelse visar att det inte finns någon undersökt plats som uppvisar en mer gynnsam situation än vad som påvisats i Forsmark.

⁶ $\delta^{18}\text{O}$ beskriver förhållandet mellan de naturligt förekommande stabila isotoperna ^{18}O and ^{16}O ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) relaterade till en internationellt accepterad standard benämnd V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). $\delta^{18}\text{O}$ ger en integrerad klimatologisk signatur (temperatur) hos de nederbördstillfällena som format grundvattnet och kan därmed användas för att kartera dess ursprung. $\delta^{18}\text{O}$ är därför ett viktigt verktyg vid beskrivningen av den palaeohydrogeologiska utvecklingen av en given plats.



Figur 7-1. Typisk kloridkoncentration i grundvatten provtagna i djupintervallet 400–700 m. För en fullständig dokumentation av representativa hydrogeokemidata i Forsmark och Laxemar, se /SKB 2008, 2009b/.



Figur 7-2. Redovisning av $\delta^{18}O$ (SMOW) i grundvatten provtagna i djupintervallet 400–700 m. För en fullständig dokumentation av representativa hydrogeokemidata i Forsmark och Laxemar, se /SKB 2008, 2009b/.

8 Fördröjning av lösta ämnen

Platsens förmåga att fördröja eventuellt frigjorda radionuklider i den händelse att kapslar skulle skadas är en viktig säkerhetsfunktion. Fördröjningen (retentionen) av frigjorda radionuklider från ett förvar beror på bergets flödesrelaterade retentionsegenskaper (uttryckt som transportmotståndet F) och materialparametergruppen MPG . Den förra är kopplad till storlek och fördelning av grundvattenflödet (se kapitel 6) och MPG bestäms huvudsakligen av diffusiviteten (som bestämmer utbytet av massa mellan vatten i sprickor och bergmatrisen) och sorption (fastgöring av massa på sprickytor och inre ytor i bergmatrisen). Dessa egenskaper beror av bergarternas mineralogi, grad av omvandling, bergets tektoniska historia och rådande grundvattenkemi. Egenskaperna samverkar genom att diffusion ger åtkomst till inre ytor i matrisberget där sorption kan ske.

8.1 Jämförelse av områden

Områden med låg grundvattenströmning och låg frekvens av öppna sprickor kännetecknas generellt av ett högt transportmotstånd. Erfarenheter från nyligen slutförda platsundersökningar, liksom från tidigare undersökningar i referensområden, indikerar små skillnader mellan platserna vad avser diffusions- och sorptionsegenskaper.

8.2 Slutsatser

Eftersom det bedöms vara små skillnader i diffusions- och sorptionsegenskaper mellan områdena kan inget område antas vara mer gynnsamt än något annat avseende dessa egenskaper. Däremot finns det stora skillnader i grundvattenströmning och sprickfrekvens. Givet att Forsmark har en mycket låg frekvens av konduktiva sprickor på förvarsdjup och en låg vattenföring, se kapitel 6, har Forsmark i detta avseende en fördel jämfört med referensområdena.

9 Möjlighet att karakterisera och beskriva platsen

För att det ska vara möjligt att uttala sig om säkerheten för ett slutförvar vid en viss plats är det nödvändigt att ha god tilltro till att beskrivningen av platsen redovisar verkliga förhållanden, eftersom säkerhetsanalysens prognoser bygger på dessa. Graden av tilltro i beskrivningen beror dels på hur mycket data och undersökningar som finns från platsen, men också på hur tydligt dessa data låter sig tolkas och ge en samstämmig integrerad förståelse.

Platskännedom, eller möjligheten att karakterisera och beskriva en plats, är att betrakta som en ”mjuk” faktor, som inte kan jämföras i någon kvantitativ mening då varje kvantifiering i termer av antal borrhål, antal tester etc måste kopplas till platsens geologiska komplexitet. Förutsättningarna för att uppnå en god platsförståelse varierar därmed mellan platser och kan därför jämföras främst ur ett erfarenhetsperspektiv. Till exempel kan en plats med god bergblottning/begränsat jordtäckte ha goda förutsättningar för kartläggning av berggrunden och dess variabilitet, liksom för att kartera deformationszoners utträde på markytan. Förutsättningarna för tredimensionell modellering med utgångspunkt från borrhålsdata är goda om den geologiska komplexiteten är låg.

9.1 Jämförelse av områden

Forsmark har en tydlig, strukturellt styrd och relativt homogen geologi, se avsnitt 2.2, som också avspeglar sig i platsens mekaniska, termiska och hydrogeologiska egenskaper. Detta förhållande ger goda förutsättningar att förstå platsen och kompenseras mer än väl platsens tjocka jordtäckte och låga blottningsgrad, som i platsundersökningens inledningsskede komplicerade beskrivningen av bergets geometri och egenskaper på djupet, utifrån mätningar på markytan. Platser med mer heterogen litologi och/eller mer komplicerad strukturgeologi (t ex Laxemar-Simpevarp, Kamlunge och Svartboberget) kräver mer omfattande undersökningar och modellering för att uppnå lika god platskännedom som i Forsmark. För några referensområden är också antalet undersökningsborrhål (antal borrhål per ytenhet), eller informationsmängden på relevant djup i den undersökta bergvolymen begränsat, se tabell 1-1.

En annan aspekt som bestämmer platskännedomen är graden av ämnesöverskridande integration i platsbeskrivningen. I det avseendet har platsmodelleringen i Forsmark och Laxemar kunnat dra nytta av den samlade erfarenheten som byggts upp under undersöknings- och modelleringsarbetet kopplat till tidigare referensområden, liksom viktiga erfarenheter från Stripa-projektet och Äspölaboratoriet. Dessutom har platsbeskrivningarna för Forsmark och Laxemar växt fram under en längre tid, präglad av ett flertal undersöknings- och modelleringssteg med regelbunden avstämning mot avnämare i form av representanter för projektering och analys av långsiktig säkerhet.

9.2 Slutsatser

Platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar intar en särställning med omfattande och systematiskt genomförda undersöknings- och modelleringssteg med en slutlig platsbeskrivning. Generellt är platskännedomen för dessa platser därför bättre än för referensområdena och är dessutom kopplad till återkommande redovisningar av tilltro och kvarvarande osäkerheter.

Förutsättningarna för att uppnå en tillfredställande platskännedomen i Forsmark har varit goda med bl a undersökningsresultat från ett flertal djupa borrhål, parat med en strukturellt kontrollerad geologi. Bedömningen är därför att risken är liten för överraskningar i samband med kommande detaljundersökningar i samband med byggandet av förvaret. Referensområdena kännetecknas av en varierad grad av geologisk komplexitet och har karaktäriserats med varierande insatser av borrhål och undersökningar. För dessa platser saknas dessutom det strukturerade arbetssättet med stegvisa undersökningar med integrerad modellering och platsbeskrivning. Det ska noteras att en god platskännedom skulle kunna uppnås även för övriga referensområden om undersökningar genomfördes på motsvarande sätt som under platsundersökningarna.

10 Övergripande slutsats

Relativa jämförelser mellan Forsmark och valda referensområden har utförts med avseende på följande säkerhetsrelaterade platsegenskaper:

- Bergartsfördelningens betydelse för bergets termiska egenskaper.
- Frekvens av öppna sprickor.
- Layoutbestämmande deformationszoner.
- Klimatrelaterade faktorer.
- Bergmekaniska förhållanden (bergspänningar, bergets hållfasthet samt effekter av jordskalv).
- Grundvattenströmning.
- Grundvattnets kemiska egenskaper.
- Bergets förmåga att fördröja frigjorda radionuklider.
- Allmän platskänedom.

Genomförda jämförelser av dessa platsegenskaper med de utvalda referensområdena visar att inget av dessa sammantaget uppvisar någon signifikant fördel jämfört med Forsmark som plats för ett slutförvar. Detta utesluter dock inte att det kan finnas platser som utifrån en sammanvägd bedömning av geovetenskapliga lokaliseringsfaktorer skulle kunna vara likvärdiga med Forsmark.

11 Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer.

- Ahlbom K, Carlsson L, Gentzschein B, Jämtlid A, Olsson O, Tirén S, 1983.** Evaluation of the geological, geophysical and hydrogeological conditions at Svartboberget. SKBF/KBS TR 83-55, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- Ahlbom K, Andersson J-E, Nordqvist R, Ljunggren C, Tirén S, Voss C, 1991a.** Gideå study site. Scope of activities and main results. SKB TR 91-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ahlbom K, Andersson J-E, Nordqvist R, Ljunggren C, Tirén S, Voss C, 1991b.** Fjällveden study site. Scope of activities and main results. SKB TR 91-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ahlbom K, Andersson J-E, Nordqvist R, Ljunggren C, Tirén S, Voss C, 1992a.** Sternö study site. Scope of activities and main results. SKB TR 92-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ahlbom K, Andersson J-E, Andersson P, Ittner T, Ljunggren C, Tirén S, 1992b.** Kamlunge study site. Scope of activities and main results. SKB TR 92-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ahlbom K, Andersson J-E, Andersson P, Ittner T, Ljunggren C, Tirén S, 1992c.** Klipperås study site. Scope of activities and main results. SKB TR 92-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ahlbom K, Andersson J-E, Andersson P, Ittner T, Ljunggren C, Tirén S, 1992d.** Finnsjön study site. Scope of activities and main results. SKB TR 92-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ahlbom K, Leijon B, Liedholm M, Smellie J, 1992e.** Gabbro as a host rock for a nuclear waste repository. SKB TR 92-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Almén K-E, Hansson K, Johansson B-E, Nilsson G, Andersson O, Wikberg P, Åhagen H, 1983.** Final disposal of spent nuclear fuel – equipment for site characterization. SKBF/KBS TR 83-44, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- Andersson C J, 2007.** Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö Pillar Stability Experiment, Final report. Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. SKB TR-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson C J, Martin C D, Stille H, 2009.** The Äspö Pillar Stability Experiment: Part II – Rock mass response to coupled excavation-induced and thermal-induced stresses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, s 879–895.
- Andersson J, Ström A, Svemar C, Almén K-E, Ericsson L O, 2000.** Vilka krav ställer djupförvaret på berget? Geovetenskapliga lämplighetsindikatorer och kriterier för lokalisering och platsutvärdering. SKB R-00-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson P, Byegård J, Dershowitz B, Doe T, Hermanson J, Meier P, Tullborg E-L, Winberg A (red), 2002.** Final report of the TRUE Block Scale project. 1. Characterisation and model development. SKB TR-02-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Antal I, Bergman S, Gierup J, Rudmark L, Thunholm B, Wahlgren C-H, Stephens M, Johansson R, 1998a.** Översiktsstudie av Kalmar län. Geologiska förutsättningar. SKB R-98-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Antal I, Bergman S, Gierup J, Persson C, Thunholm B, Stephens M, Johansson R, 1998b.** Översiktsstudie av Uppsala län. Geologiska förutsättningar. SKB R-98-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Back P-E, Sundberg J, 2007.** Thermal site descriptive model. A strategy for the model development during site investigations – version 2. SKB R-07-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Back P-E, Wrafter J, Sundberg J, Rosén L, 2007.** Thermal properties. Site descriptive modelling, Forsmark – stage 2.2. SKB R-07-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Böðvarsson R, Lund B, Roberts R, Slunga R, 2006.** Earthquake activity in Sweden. Study in connection with a proposed nuclear waste repository in Forsmark or Oskarshamn. SKB R-06-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Carlsson L, Winberg A, Grundfelt B, 1983.** Model calculations of the groundwater flow at Finnsjön, Fjällveden, Gideå and Kamlunge. SKBF/KBS TR 83-45, Svensk Kärnbränsleämnings AB.
- Follin S, 2008.** Bedrock hydrogeology Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2010.** Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository. Evaluation of modelling results and their implications for layout and design. SKB TR-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Glamheden R, Fredriksson A, Röshoff K, Karlsson J, Hakami H, Christiansson R, 2007.** Rock mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark Stage 2.2. SKB R-07-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hartikainen J, Kouhia R, Wallroth T, 2010.** Permafrost simulations at Forsmark using a numerical 2D thermo-hydro-chemical model. SKB TR-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hoek E, 2010.** Tunnel design for deep tunnels in poor rock. The International Tunnelling and Underground Space Association Training Session, Vancouver, 14–15 May 2010, World Tunnelling Congress 2010 Vancouver.
- Hult A, Gidlund G, Thoregren U, Magnusson K-Å, Duran O, 1978.** Permeabilitetsbestämningar. Geofysisk borrhålmätning. KBS TR 61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark H, Lönnqvist M, Fälth B, 2010.** THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson R, 2006.** Lokalisering av slutförvaret för använt kärnbränsle. En översikt av trettio års arbete. SKB R-06-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kjellström E, Strandberg G, Brandefelt J, Näslund J-O, Smith B, Wohlfarth B, 2009.** Climate conditions in Sweden in a 100,000 year time perspective. SKB TR-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kornfält K-A, Bergström J 1986.** Beskrivning till berggrundskartan Karlshamn NO. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning. (Serie Af 154)
- Lagerbäck R, Sundh M, 2008.** Early Holocene faulting and paleoseismicity in northern Sweden. Research Paper C 836, Sveriges Geologiska Undersökning.
- Lagerbäck R, Sundh M, Svedlund J-O, Johansson H, 2005.** Forsmark site investigation. Searching for evidence of late- and postglacial faulting in the Forsmark region. Results from 2002–2004. SKB R-05-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerbäck R, Sundh M, Svantesson S-I, 2006.** Oskarshamn site investigation. Searching for evidence of late- and postglacial faulting in the Oskarshamn region. Results from 2005. SKB P-06-160, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ljunggren C, Stephansson O, Alm O, Hakami H, Mattila U, 1985.** Mechanical properties of granitic rocks from Gideå, Sweden. SKB TR 85-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lund B, Schmidt P, Hieronymus C, 2009.** Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle. SKB TR-09-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Martin C D, 2007.** Quantifying in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark. Forsmark stage 2.2. SKB R-07-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Martin C D, Christiansson R, Söderhäll J, 2001.** Rock stability considerations for siting and constructing a KBS-3 repository. Based on experiences from Äspö HRL, AECL's URL, tunnelling and mining. SKB TR-01-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Milnes G A, 2002.** Swedish deep repository siting programme. Guide to the documentation of 25 years of geoscientific research (1976–2000). SKB TR-02-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, 2010.** Full perimeter intersection criteria. Definitions and implementations in SR-Site. SKB TR-10-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 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, Scherman S, Kornfält K-A, 1979.** Kompletterande berggrundsundersökningar inom Finnsjö- och Karlshamnsmrådena. SKBF/KBS TR 79-05, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- Rhén I, Hartley L, 2009.** Bedrock hydrogeology Laxemar. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-92, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Röshoff K, 1989.** Characterization of the morphology, basement rock and tectonics in Sweden. SKB TR 89-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Scherman S, Klockars C-E, Persson O 1978.** Förarbeten till platsval, berggrundsundersökningar. Berggrundsförhållanden i Finnsjöområdets nordöstra del. KBS TR 60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3. Sammanfattning. SKBF/KBS, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- SKB 1999.** Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 – Post-closure safety. Main report, Summary. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2000.** Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009a.** Underground design Forsmark. Layout D2. SKB R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009b.** Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase. SDM-Site Laxemar. SKB TR-09-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB 2009c.** Underground design Laxemar. Layout D2. SKB R-09-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB 2009d.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analysis. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB 2010a.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB 2010b.** Comparative analysis of safety related site characteristics. SKB TR-10-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB 2010c.** Referensområden. En sammanställning och utvärdering av typområdesundersökningar med mera. SKB P-10-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB 2011a.** Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB 2011b.** Miljökonsekvensbeskrivning. Mellanlagring, inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SMHI, 2001.** Temperaturen och nederbörden i Sverige 1961–1990: referensnormaler. 2. utg. Norrköping: Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut. (SMHI Meteorologi 99)
- Smith P, Johnson L, Snellman M, Pastina B, Gripi P, 2009.** Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Evolution report. SKB R-08-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SNA, 2002.** Sveriges nationalatlas. Berg och jord. 3. utg. Stockholm: SNA Förlag.
- Stephansson O, Ljunggren C, Jing L, 1991.** Stress measurements and tectonic implications for Fennoscandia. Tectonophysics, 189, s 317–322.
- Stephens M B, Wahlgren C-H, Weihed P, 1994.** Karta över Sveriges berggrund. Uppsala: Sveriges Geologiska Undersökning. (Serie Ba 51)

Stephens M B, Wahlgren C-H, Weihed P, 1997. Sweden. In: Moores E M, Fairbridge R W (eds). Encyclopedia of European and Asian regional geology. London: Chapman & Hall. (Encyclopedia of Earth Sciences)

Stålhös G 1991. Beskrivning till berggrundskartorna Östhammar NV med sammanfattande översikt av basiska gångar, metamorfos och tektonik i östra Mellansverige. Uppsala: Sveriges Geologiska Undersökning. (Serie Af 161)

Sundberg J, 2003. Thermal properties at Äspö HRL. Analysis of distribution and scale factors. SKB R-03-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sundberg J, Wrafter J, Back P-E, Rosén L, 2008. Thermal properties Laxemar. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sundberg J, Back P-E, Ericsson L-E, Wrafter J, 2009. Estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46, s 1023–1028.

Vidstrand P, Follin S, Zucec N 2010. Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions – Forsmark. SKB R-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Walker D, Gylling B, 1999. Site-scale groundwater flow modelling of Ceberg. SKB TR-99-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bestämning av hydraulisk konduktivitet – effekter av mätgränser

Effekter av mätgränser för data från Sternö och Finnsjön

Fördelningarna av regulariserade data i 20 eller 21 m sektioner för Sternö och Finnsjön ligger nära en till två storleksordningar högre än fördelningarna för övriga områden, se figur 6-1. Dessa skillnader är förvånade mot bakgrund av noterade frekvenser av öppna sprickor i motsvarande djupintervall på aktuella platser, se tabell 2-2. De markerade skillnaderna i uppmätta fördelningar av hydraulisk konduktivitet, se figur 6-1, tillskrivs höga nedre mätgränser i fallen Sternö och Finnsjön, vilket förskjuter fördelningarna av hydraulisk konduktivitet mot högre värden.

De höga mätgränserna, se tabell 6-1, tillskrivs två huvudorsaker. Dels utnyttjades korta manschetter ($L=0,3$ m) som kan medföra läckage i berget förbi manschetterna i samband med utförda tester. Motsvarande manschettlängd för mätningar i övriga referensområden (och även inom platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar) var 1 m. Mätningar med korta manschetter ger en ca faktor 2 högre mätgräns jämfört med mätningar där långa manschetter utnyttjats. Den noterade effekten tillskrivs dock huvudsakligen det faktum att upplösningen i flödesmätning förbättrades väsentligt mellan de inledande undersökningarna i samband med KBS-1 och KBS-2 /Hult et al. 1978/ och de senare mätningarna i samband med KBS-3 /Almén et al. 1983/. Denna förbättring av flödesmätare ledde till en faktor 20–80 lägre mätgräns för de senare injektionstesterna.

Sammantaget har de äldre mätningarna i Finnsjön och Sternö alltså en faktor 40–160 högre mätgräns i förhållande till senare typområden. Denna skillnad eliminerar effektivt möjligheten att mäta de låga konduktiviteterna i berget som karakteriserar den lägre svansen av den faktiska fördelningen av hydraulisk konduktivitet.

Detta faktum innebär att fördelningarna för Sternö och Finnsjön, se figur 6-1, inte kan jämföras direkt med övriga områden. Resultaten från Sternö och Finnsjön kan som bäst påvisa relativa skillnader inom och mellan dessa två områden, men fördelningarna ger i absoluta termer inte en rättvis bild av den faktiska fördelningen av den hydrauliska konduktiviteten.

Analys

Frekvenser av öppna sprickor i Sternö och Finnsjön har beräknats och redovisats i tabell 2-2. Vi antar vidare att frekvensen öppna sprickor motsvarar frekvensen av konduktiva (flödande) sprickor. Den uppmätta hydrauliska konduktiviteten kan då betraktas som proportionell mot frekvensen av öppna sprickor och mot (fördelningen av) spricktransmissiviteten. Vi antar vidare, som en första approximation, att fördelningarna av spricktransmissivitet i Sternö och Finnsjön är likartade. Den hydrauliskt bestämda rangordningen mellan de två områdena, med de mätförutsättningar som var gällande vid mitten av 1970-talet (korta manschetter och sämre flödesmätare), kan då direkt hänföras till skillnaden i beräknad frekvens av öppna sprickor P_{100} i Sternö ($0,8 \text{ m}^{-1}$) och Finnsjön ($6,8 \text{ m}^{-1}$).

Frekvensen av öppna sprickor i Sternö överstiger den för Forsmark ($0,7 \text{ m}^{-1}$), se tabell 2-2, med ca 10 %. Motsvarande geometriska medelvärde för hydraulisk konduktivitet K för Sternödata är $6,4 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$, se tabell 6-2, medan det geometriska medelvärdet för Forsmarksdata är $8,7 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$. Om vi antar att (fördelningen av) spricktransmissiviteten i Sternö och Forsmark är likartad så borde det "teoretiska geometriska medelvärdet" för Sternö (om mätt med nuvarande mätteknik) vara ca 10 % högre än för Forsmarksdata, dvs $9,5 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$. Detta senare värde är ca 65 gånger lägre än det geometriska medelvärde som beräknats baserat på faktiskt uppmätta värden i Sternö ($6,4 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$). Denna faktor (65) faller inom det intervall 40–160 som utgör en skattning på hur mycket högre mätgräns hos de äldre mätningarna (i Sternö och Finnsjön) är jämfört med den som gäller för senare undersökningar, se diskussionen ovan. Denna observation ger stöd för antagandet att de äldre mätningarna, och speciellt de som utförts på Sternö kännetecknas av en förskjutning av den uppmätta fördelningen av hydraulisk konduktivitet (speciellt i den del av fördelningen som beskriver låga värden) mot högre värden beroende på den höga nedre mätgränsen.

Den relativa skillnaden i geometriskt medelvärde av den uppmätta hydrauliska konduktiviteten mellan Finnsjön ($4,8 \cdot 10^{-9}$ m/s) och Sternö ($6,4 \cdot 10^{-10}$ m/s) är en faktor 7,5. Som en ytterligare konsistenskontroll kan denna faktor jämföras med den relativa skillnaden i frekvens öppna sprickor för de två områdena (6,8/0,8) som är en faktor 8,5. Denna jämförelse visar på en intern konsistens för dessa två områden vad gäller noterade skillnader i frekvens av öppna sprickor och för det geometriska medelvärdet av uppmätt hydraulisk konduktivitet.

Slutsatser

Den utförda analysen stöder antagandet att tidiga mätningar av hydraulisk konduktivitet i områdena Sternö och Finnsjön inte ger en rättvis bild av de hydrauliska förhållandena i dessa områden. Med antagande om likartad fördelning av spricktransmissivitet har relativa skillnader i frekvens av öppna sprickor utnyttjats för att stödja beräknade effekter av den förhöjda mätgränsen kopplad till den mätutrustning som utnyttjades i samband med undersökningarna i Sternö och Finnsjön.

Analysen visar också på en inbördes konsistens mellan noterade relativa skillnader i frekvenser öppna sprickor och hydraulisk konduktivitet. Det senare ger stöd för antagandet att spricktransmissiviteten i Sternö och Finnsjön i det aktuella djupintervallet är likartad. Detta förhållande ger i sin tur indirekt stöd för det gjorda antagandet om en likartad fördelning av spricktransmissivitet i Forsmark och Sternö.