

Vilka krav ställer djupförvaret på berget?

Geovetenskapliga lämplighetsindikatorer och kriterier för lokalisering och platsutvärdering

Johan Andersson
Golder Grundteknik

Anders Ström, Christer Svemar
Svensk Kärnbränslehantering AB

Karl-Erik Almén
KEA Geo-Konsult AB

Lars O Ericsson
Chalmers Tekniska Högskola

April 2000

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864
SE-102 40 Stockholm Sweden
Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00
Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



Vilka krav ställer djupförvaret på berget?

Geovetenskapliga lämplighetsindikatorer och kriterier för lokalisering och platsutvärdering

Johan Andersson
Golder Grundteknik

Anders Ström, Christer Svemar
Svensk Kärnbränslehantering AB

Karl-Erik Almén
KEA Geo-Konsult AB

Lars O Ericsson
Chalmers Tekniska Högskola

April 2000

Keywords: djupförvar, använt kärnbränsle, geovetenskapliga lämplighetsindikatorer, kriterier, långsiktig säkerhet, säkerhetsanalys, projektering, platsundersökningar

Förord

Denna rapport redovisar vilka krav djupförvaret för använt kärnbränsle ställer på berget samt vilka kriterier som kan användas vid lokalisering och vid utvärdering av platser i samband med platsundersökningar. Arbetet initierades under 1997 och delrapporterades i samband med FUD-program 98 /SKB, 1998/. Arbetet är en viktig del av SKB:s förberedelser inför genomförande av platsundersökningarna. Rapporten förmedlar SKB:s ståndpunkt i dessa frågor baserat på presenterat underlag.

Projektet har genomförts under knappt tre år av en grupp bestående av Karl-Erik Almén, Christer Svemar, Lars O Ericsson, Johan Andersson samt undertecknad. Till projektet hörde även en referensgrupp bestående av:

- Kaj Ahlbom, Lokalisering, SKB
- Karin Andersson, Teknisk miljöplanering, Chalmers
- Stefan Claesson, Isotoplaboratoriet, Naturhistoriska Riksmuseet
- Allan Hedin, Säkerhetsanalys, SKB
- Pär Olsson, Skanska

Referensgruppen har gett mycket värdefulla bidrag till slutrapporten.

Det bör även nämnas att ämnesexperter inom geologi, bergmekanik, geohydrologi, kemi, termiska egenskaper och inom bergets transportegenskaper har samlats vid ett antal tillfällen under resans gång för att successivt utöka den kunskapsbank som denna rapport ytterst vilar på.

Anders Ström
Projektledare
Enhet Djupförvarsteknik SKB

Sammanfattning

Denna rapport presenterar vilka krav som ställs på berget, vilka förhållanden i berget som är fördelaktiga (önskemål) och hur man ska bedöma uppfyllelsen av krav och önskemål (kriterier) inför val av platser för en platsundersökning och under en platsundersökning. Rapportens slutsatser och resultat baseras på den kunskap och erfarenhet som kommit fram under SKB:s mångåriga forsknings- och utvecklingsarbete. Speciellt utnyttjas de kunskaper som kommit fram vid SKB:s senast genomförda säkerhetsanalys, SR 97. De redovisade kraven, önskemålen och kriterierna kommer att användas i SKB:s fortsatta arbete med platsval och platsundersökningar.

Resultaten, och speciellt de angivna kriterierna, gäller ett förvar för använt kärnbränsle av typ KBS-3, dvs ett förvar där bränslet förvaras i kopparkapslar inbäddade i bentonitlera på 400–700 m djup i det svenska kristallina urberget. Om förvarskonceptet förändras eller om det görs nya tekniska/vetenskapliga landvinningar kan vissa krav, önskemål eller kriterier behöva anpassas. Det bör betonas att arbetet därför inte direkt kan användas som underlag för lokalisering av andra typer av förvar eller i andra geologiska miljöer.

Kravformuleringarna utgår från de villkor som definieras av lagar och föreskrifter. För att åstadkomma ett säkert slutförvar har SKB utvecklat ett slutförvarskoncept (KBS-3) som bygger på de grundläggande säkerhetsfunktionerna isolering och fördröjning. Dessa funktioner påverkas dels av utformningen och byggandet av anläggning och tekniska barriärer, dels av de platsspecifika förhållandena på förläggningsplatsen. Även för själva anläggningsbygget går det att formulera ett antal övergripande krav och önskemål.

I rapporten analyseras hur bergets olika geologiska förhållanden, mekaniska egenskaper, termiska egenskaper, hydrogeologiska egenskaper, kemiska egenskaper och transportegenskaper inverkar på djupförvarets funktioner och om det är möjligt att bestämma krav och önskemål på egenskapernas inverkan. Där så är möjligt har sedan dessa krav eller önskemål överförts till krav eller önskemål på de enskilda egenskaperna (parametrarna). Parametrar som kan användas för att bedöma om krav eller önskemål är uppfyllda kallas geovetenskapliga lämplighetsindikatorer. För att vid olika skeden under en platsundersökning kunna bedöma om krav och önskemål för en viss parameter är uppfyllda formuleras kriterier som baseras på de på storheter som kan mätas eller uppskattas vid det aktuella skedet av undersökningen.

Ofta används begrepp som lokaliseringsfaktor och kriterier utan att orden närmare definieras. I detta arbete gäller följande definitioner:

Begrepp	Definition
Funktion	Uppgift som djupförvaret är ämnat att fullgöra, t ex ha isolerande och fördröjande funktion.
Parameter	Fysikalisk eller kemisk storhet (egenskap, förhållande eller tillstånd i berget).
Krav	Villkor som måste uppfyllas, avser verkliga förhållanden oberoende av lokaliseringsskede. Samtliga krav måste vara uppfyllda.
Önskemål	Förhållanden som bör uppfyllas oberoende av lokaliseringsskede. Samtliga önskemål behöver inte vara uppfyllda.
Geovetenskapliga lämplighetsindikatorer	Mät- eller skattningsbara platsspecifika parametrar som vid ett visst lokaliseringsskede kan användas för att bedöma uppfyllandet av krav och önskemål.
Kriterier för platsutvärdering	Värden för lämplighetsindikatorer i ett visst lokaliseringsskede, som kan användas för att bedöma om en plats uppfyller ställda krav och önskemål.

Vilka krav ställer vi på berget?

Det finns en stor mängd förhållanden som behöver bestämmas vid en platsundersökning för att bygga upp en grundläggande förståelse av platsen. Det är dock bara vissa som har direkt betydelse för om platsen är lämplig för ett förvar eller har betydelse för hur förvaret bör utformas på den undersökta platsen.

Följande krav ställs på berget eller på hur djupförvaret ska placeras i berget:

- Bergarterna inom förvarets deponeringsområde får inte ha malmpotential dvs utgöras av så värdefulla mineral att det skulle kunna motivera brytning på hundratals meters djup.
- Regionala plastiska skjuvzoner ska undvikas om det inte kan visas att zonens egenskaper inte avviker från berget i övrigt. I närheten av regionala plastiska skjuvzoner kan det dock finnas s k tektoniska linser, där berggrunden är homogen och relativt opåverkad.
- Det måste vara möjligt att inplacera förvaret med hänsyn till sprickzonerna på platsen. Deponeringstunnlar och deponeringshål för kapslar får inte passera genom eller placeras för nära regionala och lokala större sprickzoner. Deponeringshål får inte korsa identifierade lokala mindre sprickzoner.
- Bergets hållfasthet, sprickgeometri och initiala bergspänningar får inte vara sådana att det uppstår omfattande stabilitetsproblem kring tunnlar eller deponeringshål inom deponeringsområdet. Detta kontrolleras genom en mekanisk analys där ingångsvärdena utgörs av tunnlarnas geometri, det intakta bergets hållfasthet och deformationsegenskaper, spricksystemets geometri och de initiala bergspänningarna.
- Grundvattnet på förvarsnivå får inte innehålla löst syre. Frånvaro av löst syre indikeras av negativa Eh, förekomst av Fe(II), eller förekomst av sulfid.
- Den totala salthalten (TDS) i grundvattnet måste understiga 100 g/l på förvarsnivå.

Förutom ovanstående krav finns det en större mängd önskemål, dvs förhållanden som är önskvärda och som man bör ta hänsyn till när förvaret placeras i berget:

- Eftersom det kan vara svårt att förutspå vilken användning olika bergarter kan ha i framtiden är det önskvärt att ett djupförvar lokaliserar till vanligt förekommande bergarter.
- Det är önskvärt med måttlig densitet (sprickyta per volym) av lokala mindre sprickzoner och med måttlig densitet av sprickor.
- Det är generellt en fördel om de initiala bergspänningarna på tänkt förläggningsdjup inte avviker från vad som är normalt i svensk kristallin berggrund.
- Det är önskvärt med för svensk berggrund normala hållfasthets- och deformations-egenskaper hos det intakta berget eftersom det erfarenhetsmässigt har visat sig vara möjligt att utföra bergarbeten med goda resultat i sådan berggrund.
- Det är önskvärt att temperaturutvidgningskoefficienten har normala värden för svensk berggrund (dvs inom intervallet 10^{-6} till 10^{-5} K^{-1}) och att den inte skiljer sig markant mellan de bergarter som finns i förvarsområdet.
- Berget bör ha högre värmeledningsförmåga än $2,5$ $W/(m,K)$. Områden med stor potential för geotermisk energiutvinning bör undvikas. Den ostörda temperaturen på förvarsdjup bör understiga 25 °C.
- Det är en fördel om en stor del av bergmassan i deponeringsområdet har en vattengenomsläpplighet (K) som är mindre än 10^{-8} m/s.
- Sprickzoner som behöver passeras under bygge bör ha så låg vattengenomsläpplighet att passage kan ske utan stora problem vilket innebär att zonerna bör ha en transmissivitet (T) som är lägre än 10^{-5} m^2/s och att de dessutom inte är byggnadstekniskt besvärliga.
- Det är en fördel om den lokala hydrauliska gradienten är lägre än 1 % på förvarsnivå, men det är ingen ytterligare fördel med ännu lägre värden.
- Ostört grundvatten på förvarsnivå bör ha ett pH i intervallet 6–10, ha en låg halt av organiska ämnen ($[DOC] < 20$ mg/l), låg kolloidhalt (lägre än 0,5 mg/l), låga ammoniumhalter, visst innehåll av kalcium och magnesium ($[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] > 4$ mg/l) och låga halter av radon och radium.
- Det är önskvärt att det i en stor del av berget går att finna kapselpositioner som i kapselhålsskala har lägre darcyhastighet än 0,01 m/år eftersom lägre flöden innebär att fördröjningen ökar av viktiga radionuklider.
- Det är ett önskemål att det sker en väsentlig fördröjning av viktiga radionuklider i geosfären. Ett kvantitativt önskemål kan uttryckas i form av transportmotståndet (F-parametern) där darcyhastighet, flödesfördelning och våta ytan per volym berg (eller motsvarande parametrar) är sådana att en stor del av alla strömningsvägar har F större än 10^4 år/m.
- Det är lämpligt att matrisdiffusivitet och matrisporositet inte är mycket lägre (en faktor 100 eller mer) än de värdeområden som analyserats inom säkerhetsanalysen SR 97. Det maximalt tillgängliga diffusionsdjupet bör åtminstone överstiga någon centimeter.
- Områden där biologisk mångfald och skyddsvärda arter kan hotas och områden som är eller kan bli en betydande vattentäkt, jordtäkt eller odlingsmark bör undvikas för djupförvarets ovanjordsanläggningar. (I lag skyddade områden undviks.)

Allmänt gäller att uppfyllda önskemål leder till större säkerhetsmarginaler, lägre kostnader, enklare undersökningar eller enklare konstruktion av förvaret. Samtliga önskemål behöver inte vara uppfyllda för att en plats ska kunna godkännas för ett djupförvar. Det kan mycket väl vara så att "sämre" värden för vissa parametrar kompenseras av "bättre" värden för andra. För att bedöma säkerhet och funktion behövs därför alltid en integrerad säkerhetsanalys och en byggnalys.

Förutom ovanstående önskemål som direkt har att göra med bergets egenskaper finns det önskemål som underlättar karakteriseringen av platsen. Speciellt gäller:

- Det är önskvärt att det finns en hög andel berg i dagen och i övrigt måttligt jorddjup (helst mindre än cirka 10 m) eftersom detta underlättar möjligheten att från markytan kartlägga de litologiska och strukturgeologiska förhållandena i den underliggande berggrunden.
- Det är önskvärt att berggrunden är homogen med få bergarter och med regelbunden uppsprickning. En småskalig variation i mineralsammansättning, exempelvis en gnejs, är dock ingen nackdel.

Även om kraven och önskemålen formulerats utifrån olika säkerhetssynpunkter och anläggningssynpunkter kan man konstatera att det knappast finns något exempel på att olika krav eller önskemål står i konflikt med varandra. Allmänt gäller att förhållanden som leder till god långsiktig säkerhet i regel också är fördelaktiga ur anläggnings-synpunkt.

Val av områden för platsundersökningarna

Krav och önskemål på berget ska givetvis så långt som möjligt användas för att formulera kriterier för val av platser för platsundersökningarna. Efter en genomförd förstudie finns vanligen en bra kunskap om förhållandena på markytan medan kunskapen om förhållandena i det djupa berget är mycket begränsad. Kriterier kan därför normalt bara formuleras för följande lämplighetsindikatorer:

- Efter genomförd förstudie görs fortsatta studier och undersökningar enbart av områden som inte bedömts ha potential för förekomst av malm eller värdefulla industri-mineral och som bedömts vara homogena och bestå av vanligt förekommande bergarter.
- Under förstudien väljs och anpassas undersökningsområdet så att ett djupförvar med god marginal kan inplaceras med hänsyn till regionala plastiska skjuvzoner och de vid förstudien tolkade regionala sprickzonerna.
- I lag skyddade områden undviks och områden för fortsatta undersökningar väljs så att de har få konkurrerande intressen (exempelvis vattentäkt) och så att ovanjordsdelen kan anpassas med liten påverkan av det ytnära ekosystemet.
- Områden med olämpligt hög topografisk gradient i regional skala (större än 1 %) väljs bort.

Förstudierna identifierar således områden med potential för lämpliga förhållanden. Men det krävs platsundersökningar (undersökningar från borrhål) för att kontrollera detta. Samtidigt visar rapportens genomgång av den generella kunskapen om den svenska kristallina berggrunden att det bör finnas goda förutsättningar att finna platser som uppfyller alla krav och de flesta av de väsentliga önskemålen i Sverige.

Vad kan göra att platsundersökningen bör avbrytas?

Vid den sammanvägda bedömningen av om en plats är lämplig utgör en samlad säkerhetsanalys och en samlad bygganalys väsentliga underlag. Platsen accepteras bara om det i säkerhetsanalysen går att visa att ett säkert djupförvar kan uppföras. Under en platsundersökning, då mätvärden erhållits från förvarsdjup, men innan den samlade analysen har genomförts, används kriterier för att kontrollera om ovanstående krav och önskemål kan vara uppfyllda. Kriterierna ger vägledning om hur analyserna kommer att utfalla och kan därför också användas som hjälpmedel för den som vill granska en säkerhetsanalys.

Följande kriterier är så skarpa att platsundersökningen bör avbrytas och annan plats väljas om de inte kan tillgodoses:

- Om omfattande förekomst av malmförande mineral eller värdefulla industrimineral påträffas inom förvarsområdet bör platsen överges.
- Under platsundersökningen anpassas förvaret mer noggrant till de då identifierade sprickzonerna. Lämpliga respektavstånd till identifierade regionala och lokala större sprickzoner kan bara bestämmas platsspecifikt men antas utgöra åtminstone flera tiotals meter till lokala större zoner och minst 100 meter till regionala zoner. Om förvaret inte kan inplaceras på ett rimligt sätt (om det skulle behöva delas upp i ett mycket stort antal delar) i förhållande till regionala plastiska skjuvzoner, regionala sprickzoner eller lokala större sprickzoner är platsen inte lämplig för ett djupförvar.
- Om förvaret inte rimligen kan utformas på ett sådant sätt att omfattande och allmänna stabilitetsproblem kan undvikas är platsen olämplig och bör överges. Omfattande problem med "core discing" av borrhävar bör direkt leda till misstankar om att det kan uppstå sådana problem.
- Minst någon av indikatorerna negativa Eh-värden, förekomst av Fe^{2+} eller förekomst av sulfid måste vara uppfylld för resultaten av mätningarna av grundvattnets sammansättning på förvarsdjup. Om ingen av indikatorerna tydligt kan påvisa frånvaro av löst syre krävs en fördjupad kemisk bedömning. Om inte ens dessa vidare studier kan påvisa syrefria förhållanden måste platsen överges.
- Uppmätta totala salthalter (TDS) på förvarsnivå måste vara lägre än 100 g/l. Enstaka högre värden kan accepteras om det kan visas att vattnet ligger i områden som kan undvikas och att vattnet inte kommer att kunna strömma till förvarsområdet.

Förutom dessa direkt diskvalificerande kriterier kan platsens lämplighet ifrågasättas om en stor del av bergmassan mellan sprickzoner har en vattengenomsläpplighet som är större än 10^{-8} m/s. Vid hög vattengenomsläpplighet finns behov av lokal detaljanpassning av förvaret om säkerhetsmarginalen ska bibehållas.

Innehåll

1	Inledning	17
1.1	Syfte	17
1.2	Mål	18
1.3	Bakgrund	18
1.4	Sammanhang och angränsande arbeten	19
	1.4.1 Säkerhetsanalysen SR 97	20
	1.4.2 Samlat program för undersökning och utvärdering av platser	21
1.5	Denna rapport	22
2	Övergripande krav och önskemål	23
2.1	Lagar, förordningar och föreskrifter	23
	2.1.1 Miljöbalken	23
	2.1.2 Kärntekniklagen och strålskyddslagen	23
	2.1.3 Föreskrifter och förslag till föreskrifter	23
2.2	Vad gör djupförvaret säkert	24
	2.2.1 Säkerhetsprinciper	24
	2.2.2 Säkerhetsanalys	27
	2.2.3 Hur säkerhetsanalysen kan användas för att formulera krav och önskemål på berget	29
2.3	Grundläggande byggtekniska aspekter	29
2.4	Övriga allmänna krav och önskemål	30
3	Förutsättningar, begrepp och arbetssätt	31
3.1	Förutsättningar	31
3.2	Definitioner	31
3.3	Inverkan på djupförvarets funktion	34
	3.3.1 Nedbrytning till funktioner inom olika ämnesområden	35
	3.3.2 Redovisning och tabeller	35
3.4	Krav och önskemål på parametrar	36
	3.4.1 Geovetenskapliga parametrar	36
	3.4.2 Framtagning av geovetenskapliga lämplighetsindikatorer	37
3.5	Kriterier	40
	3.5.1 Lokaliseringsskeden och kriterier	40
	3.5.2 Arbetet med att ta fram kriterier	41
	3.5.3 Jämförelse mellan platser?	43
4	Geologi	45
4.1	Geologiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion	45
	4.1.1 Inverkan på kapselns integritet	45
	4.1.2 Inverkan på buffertens isolerande förmåga	45
	4.1.3 Inverkan på bergets isolerande och fördröjande förmåga	45
	4.1.4 Biosfärsfrågor	46
	4.1.5 Anläggningsfrågor	46
4.2	Topografi	46
	4.2.1 Beskrivning av parameter och dess inverkan på funktioner	46
	4.2.2 Krav och önskemål	47
	4.2.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	47
	4.2.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier	47

4.3	Jordarter	47
4.3.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	47
4.3.2	Krav och önskemål	48
4.3.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	48
4.3.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	48
4.4	Bergarter	49
4.4.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	49
4.4.2	Krav och önskemål	51
4.4.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	51
4.4.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	51
4.5	Strukturgeologi – plastiska skjvzoner	52
4.5.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	52
4.5.2	Krav och önskemål	52
4.5.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	52
4.5.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	53
4.6	Strukturgeologi – Sprickzoner och sprickor	53
4.6.1	Beskrivning av parameter och deras inverkan på funktioner	53
4.6.2	Krav och önskemål	54
4.6.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	56
4.6.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	56
4.7	Sammanfattning lämplighetsindikatorer – geologi	57
5	Bergmekanik	59
5.1	Påverkan på djupförvarets funktion	59
5.1.1	Översikt	59
5.1.2	Inverkan på kapselns integritet	60
5.1.3	Inverkan på buffertens isolerande och fördröjande förmåga	60
5.1.4	Inverkan på bergets fördröjande förmåga	61
5.1.5	Anläggningsfrågor	61
5.2	Initiala bergspänningar	62
5.2.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	62
5.2.2	Krav och önskemål	62
5.2.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	62
5.2.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	63
5.3	Mekaniska egenskaper för intakt berg	64
5.3.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	64
5.3.2	Krav och önskemål	64
5.3.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	65
5.3.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	65
5.4	Sprickor och sprickzoner	65
5.4.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	65
5.4.2	Krav och önskemål	66
5.4.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	66
5.4.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	67
5.5	Mekaniska egenskaper för bergmassan som helhet	67
5.5.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	67
5.5.2	Krav och önskemål	68
5.5.3	Generisk kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	68
5.5.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	68
5.6	Temperaturutvidgningskoefficient	69
5.6.1	Beskrivning av parameter och dess inverkan på funktioner	69
5.6.2	Krav och önskemål	69
5.6.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	69
5.6.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	70

5.7	Kommande laster	70
5.7.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	70
5.7.2	Krav och önskemål	71
5.7.3	Användbarhet som lämplighetsindikatorer	71
5.8	Sammanfattning lämplighetsindikatorer – bergmekanik	71
6	Temperatur	73
6.1	Termiska egenskaper som påverkar djupförvarets funktion	73
6.1.1	Inverkan på kapseln integritet	73
6.1.2	Inverkan på buffertens isolerande och fördröjande förmåga	73
6.1.3	Inverkan på bergets isolerande och fördröjande förmåga	74
6.1.4	Biosfärsfrågor	74
6.1.5	Anläggningsfrågor	74
6.2	Parametrar som beskriver transport av värme	74
6.2.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	74
6.2.2	Krav och önskemål	75
6.2.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	75
6.2.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	76
6.3	Omgivande temperaturer	77
6.3.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	77
6.3.2	Krav och önskemål	77
6.3.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	77
6.3.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	78
6.4	Sammanfattning lämplighetsindikatorer – temperatur	78
7	Hydrogeologi	79
7.1	Påverkan på djupförvarets funktion	79
7.1.1	Inverkan på kapseln integritet	79
7.1.2	Inverkan på buffertens isolerande förmåga	79
7.1.3	Inverkan på geosfärens fördröjande funktion	80
7.1.4	Biosfärsfrågor	80
7.1.5	Anläggningsfrågor	81
7.2	Vattengenomsläpplighet – hydraulisk konduktivitet	81
7.2.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	81
7.2.2	Krav och önskemål	82
7.2.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	84
7.2.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	85
7.3	Porositet och magasin-koefficienter	85
7.3.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	85
7.3.2	Krav och önskemål	86
7.3.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	86
7.3.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	86
7.4	Grundvattnets egenskaper	86
7.4.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	86
7.4.2	Krav och önskemål	87
7.4.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	87
7.4.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	87
7.5	Ytnära ekosystem	88
7.5.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	88
7.5.2	Krav och önskemål	88
7.5.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	88
7.5.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	88

7.6	Randvillkor och stödjande data	89
7.6.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	89
7.6.2	Krav och önskemål	90
7.6.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	90
7.6.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	91
7.7	Sammanfattning lämplighetsindikatorer – hydrogeologi	91
8	Kemi – grundvattnets sammansättning	93
8.1	Påverkan på djupförvarets funktion	93
8.1.1	Inverkan på kapseln integritet	93
8.1.2	Inverkan på frigörelse till grundvattnet	93
8.1.3	Inverkan på buffertens stabilitet	94
8.1.4	Inverkan på fördröjningen i geosfären	94
8.1.5	Biosfärsfrågor	94
8.1.6	Anläggningsfrågor	94
8.2	Indikationer på förekomst av löst syre	95
8.2.1	Beskrivning av parametrar och inverkan på olika funktioner	95
8.2.2	Krav och önskemål	95
8.2.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	95
8.2.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	96
8.3	pH	97
8.3.1	Beskrivning av parameter och dess inverkan på funktioner	97
8.3.2	Krav och önskemål	97
8.3.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	97
8.3.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	97
8.4	Total salthalt (TDS)	98
8.4.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	98
8.4.2	Krav och önskemål	98
8.4.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	99
8.4.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	99
8.5	Organiska ämnen och övriga komponenter i grundvattnet	99
8.5.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	99
8.5.2	Krav och önskemål	100
8.5.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	101
8.5.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	101
8.6	Sammanfattning lämplighetsindikatorer – kemi	101
9	Bergets transportegenskaper	103
9.1	Påverkan på djupförvarets funktion	103
9.1.1	Inverkan på kapseln och buffertens integritet	103
9.1.2	Inverkan på geosfärens fördröjande förmåga	103
9.2	Flödesparametrar i deponeringshållsskala	104
9.2.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	104
9.2.2	Krav och önskemål	104
9.2.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	105
9.2.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	105
9.3	Egenskaper strömningsvägar	106
9.3.1	Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner	106
9.3.2	Krav och önskemål	107
9.3.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	107
9.3.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	109

9.4	Egenskaper för bergmatrisen längs strömvägar	109
9.4.1	Beskrivning av parameter och dess inverkan på funktioner	109
9.4.2	Krav och önskemål	110
9.4.3	Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden	110
9.4.4	Lämplighetsindikatorer och kriterier	110
9.5	Sammanfattning lämplighetsindikatorer – bergets transportegenskaper	111
10	Slutsatser	113
10.1	Resultat	113
10.1.1	Vilka krav ställer vi på berget?	113
10.1.2	Val av områden för platsundersökning	115
10.1.3	Vad kan göra att platsundersökningen bör avbrytas?	116
10.2	Erfarenheter från projektarbetet	117
11	Referenser	119
Bilaga A	Funktionstabeller	127
Bilaga B	Parametertabeller	137

1 Inledning

Denna rapport redovisar vilka krav och önskemål djupförvaret ställer på berget samt vilka kriterier som ska användas vid utvärdering av platser i samband med platsundersökningar. Arbetet initierades under 1997. En delrapport redovisades i samband med FUD-program 98 /SKB, 1998/.

1.1 Syfte

När SKB:s program för slutförvaring av använt kärnbränsle övergår till platsundersökningar är det nödvändigt att precisera vilka mätbara egenskaper i berget som kan ha betydelse för den långsiktiga säkerheten och vad som kan ha betydelse för möjligheterna att på ett rationellt sätt uppföra förvaret på den undersökta platsen. Informationen behövs för att ge vägledning till valet av platser, för att ge vägledning om vad som ska mätas vid platsundersökningen och för att på ett strukturerat sätt kunna utvärdera platsen under den pågående undersökningen.

Lagar och förordningar kräver att djupförvaret ska vara säkert. För att kontrollera om kravet uppfylls gör SKB en säkerhetsanalys. Analysen behandlar en stor mängd processer i förvaret och i berget som inverkar på hur förvaret fungerar och utvecklas med tiden. Förvarsplatsen kan också tänkas komma att utsättas för många olika händelser och omständigheter. Detta gör det svårt att entydigt specificera detaljerade krav på bergets olika egenskaper och på de initiala förhållandena på förvarsplatsen. De krav, önskemål och kriterier som kan ställas på berget kan därför bara ge vägledning. De ersätter inte behovet av samlade och fullständiga säkerhetsanalyser.

Frågan om lokalisering av djupförvar är aktuell i många länder. Lägesrapporten /Ström m fl, 1998/ beskriver översiktligt situationen i ett antal länder med speciell tonvikt på i vilken utsträckning krav och kriterier på berget har formulerats. Det finns generella internationella rekommendationer, som t ex IAEA:s dokument "Siting of deep geological repositories" /IAEA, 1994/. Den här föreliggande rapporten ger vägledning vid lokalisering av ett djupförvar för använt kärnbränsle av typ KBS-3 till en plats i den svenska kristallina berggrunden. Arbetet kan inte direkt användas som underlag för lokalisering av andra typer av förvar eller i andra geologiska miljöer.

1.2 Mål

Projektets mål har varit att så tydligt som möjligt svara på följande frågor:

- Vilka krav ställs på berget för att det ska vara lämpligt för ett djupförvar för använt kärnbränsle av typ KBS-3 och vilka förhållanden i berget gör det olämpligt för ett förvar?
- Vilka förhållanden i berget är fördelaktiga för ett sådant djupförvar?

Svaren på dessa frågor har stor inverkan på det fortsatta lokaliseringsarbetet. De tydliggör de geovetenskapliga målen med förstudier och platsundersökningar och de påverkar hur platsundersökningsprogrammet ska läggas upp.

Projektets mer detaljerade mål har varit att:

- identifiera och kvantifiera krav och önskemål på bergets egenskaper och förhållanden utifrån perspektiven långsiktig säkerhet och byggteknisk genomförbarhet,
- föreslå kriterier som kan användas både för att bedöma uppfyllelsen av krav och önskemål och för att om möjligt jämföra platser efter förstudier och under platsundersökningarna.

1.3 Bakgrund

Den av SKB föreslagna principiella utformningen av ett djupförvar för använt kärnbränsle, KBS-3, har analyserats och utvecklats under en period av över 20 år. Förutsättningar att slutförvara kärnavfall i den svenska kristallina berggrunden har analyserats över ännu längre tid. Metodens lämplighet har demonstrerats i ett flertal säkerhetsanalyser som t ex KBS-3 /KBS, 1983/ och nu senast i SR 97 /SKB, 1999a/. Från gruvor och anläggningsarbeten finns lång erfarenhet av bergrumsarbeten i den kristallina berggrunden. Stora insatser över lång tid har i landet lagts ned på att geovetenskapligt karakterisera berggrundens egenskaper och strukturella uppbyggnad.

I SKB:s FUD-Program 98 /SKB, 1998/ sätts etappmålet att år 2001 kunna välja minst två platser för platsundersökningar. Arbetet med att ta fram geovetenskapliga lämplighetsindikatorer utgör en del av det omfattande underlag som SKB behöver för att påbörja och på ett framgångsrikt sätt kunna bedriva platsundersökningarna. Behovet av att redovisa lämplighetsindikatorer har också sedan flera år påpekats av myndigheter och regering vid granskning och beslut om SKB:s FUD-program.

Övergripande lokaliseringsfaktorer har redovisats tidigare av SKB, exempelvis i samband med kompletteringen av FUD-Program 92 /SKB, 1994/. Dessa faktorer accepterades då av regering och myndigheter ”...som en lämplig utgångspunkt för det fortsatta arbetet”. SKB ansåg samtidigt att det inför platsundersökningarna var nödvändigt att precisera ”faktorer och kriterier”. SKB har i Översiktsstudie 95 /SKB, 1995b/ redovisat förhållanden i nationell skala som ska ge en allmän bakgrund till de grundläggande förutsättningarna för lokalisering av ett djupförvar. Under 1996 genomfördes ett omfattande arbete med att identifiera alla de parametrar som kan bestämmas vid en geovetenskaplig platsundersökning. Arbetet publicerades i en separat rapport /Andersson m fl, 1996/.

Regeringens beslut 1996-12-19, med anledning av SKB:s FUD-program 95 /SKB, 1995a/, innebar bland annat att Översiktsstudie 95 /SKB, 1995b/ borde kompletteras. I samband med redovisningen av FUD-program 98 /SKB, 1998/ gjordes en lägesredovisning /Ström m fl, 1998/ av projektet, som tillsammans med en separat redovisning av frågor kring kust/inlandsförläggning samt jämförelser mellan norra och södra Sverige /Leijon, 1998/ utgjorde den av regeringen önskade kompletteringen.

I regeringens beslut 2000-01-24, med anledning av SKB:s FUD program 98 /SKB, 1998/, ställs ett antal villkor för den fortsatta forsknings- och utvecklingsverksamheten. Enligt dessa ska SKB bland annat *"Redovisa en samlad utvärdering av slutförda förstudier och övrigt underlag för val av platser för platsundersökningar"*.

I SKI:s granskning av FUD-program 98 /SKI, 1999/ framförs följande: *"SKI är dock helt enig med SKB om att en plats lämplighet för slutförvar slutligen måste bedömas utifrån en samlad säkerhets- och bygganalys som tar hänsyn till osäkerheter och samverkan mellan olika faktorer. Kriterierna fyller en viktig funktion i att tydliggöra vad som kännetecknar en lämplig plats för ett slutförvar men de ger i sig inte tillräckligt underlag för att bedöma om platsen uppfyller de grundläggande säkerhetskraven"*.

SKI betonar även kopplingen mellan arbetet med att ta fram lokaliseringsfaktorer och arbetet med säkerhetsanalysen SR 97:

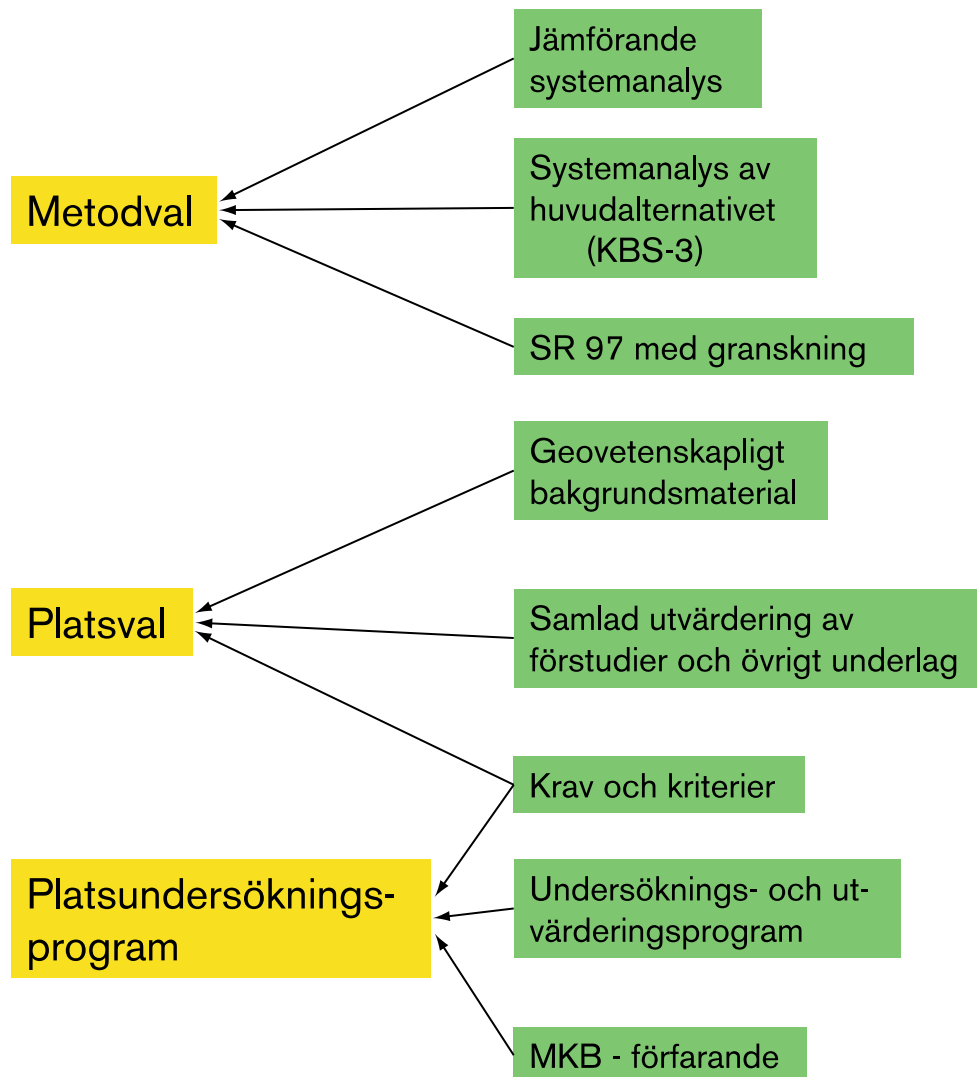
"att SKB utifrån en aktuell säkerhetsanalys (SR 97) stämmer av och tydligt redovisar de minimikrav och diskriminerande faktorer som avgör om en plats kan bedömas som lämplig för ett slutförvar".

"...SR 97, förutom att demonstrera metodik för säkerhetsanalys, också bör ge underlag för att; precisera de faktorer som ligger till grund för val av områden för platsundersökningar; härleda vilka parametrar som behöver bestämmas och vilka övriga krav som bör ställas på en platsundersökning...".

Dessa önskemål från SKI tillgodoses genom att arbetet i detta projekt i hög grad bygger på de resultat och insikter som uppnåtts inom SR 97. Detta framgår också av de olika referenser på vilka rapporten bygger.

1.4 Sammanhang och angränsande arbeten

Med regeringens beslut om FUD-program 98, yttranden från kärnkraftinspektionen och synpunkter från förstudiekommunerna som utgångspunkt avser SKB att inkomma med en kompletterande redovisning enligt villkoren i regeringens beslut. Redovisningen planeras ske samlat i en rapport, FUD 98-kompletteringen, med avsnitten metodval, val av undersökningsplatser, program för platsundersökningar och samråd. Föreliggande rapport utgör en del av underlaget till FUD 98-kompletteringen. Exempel på övrigt underlag är SR 97, platsundersöknings- och utvärderingsprogram och sammanställning av förstudier och övrigt lokaliseringsunderlag med val av platser. Figur 1-1 ger en överblick av underlagets omfattning.



Figur 1-1. Överblick av SKB:s samlade redovisning inför platsundersökningskedet, dvs kompletteringen av FUD 98. Arbetet med krav och kriterier utgör en av huvudreferenserna.

1.4.1 Säkerhetsanalysen SR 97

En central utgångspunkt för projektarbetet har varit den av SKB i december 1999 publicerade säkerhetsanalysen SR 97. Flera av målen med SR 97 har direkt beröring med arbetet med krav, önskemål och kriterier. Dessa mål är:

- SR 97 ska ge underlag för att påvisa möjligheten att finna en plats i svensk berggrund där KBS-3 metoden för djupförvaring av använt kärnbränsle uppfyller de krav på långsiktig säkerhet och strålskydd som anges i SSI:s och SKI:s föreskrifter.
- SR 97 ska ge underlag för att precisera de faktorer som ligger till grund för val av områden för platsundersökningar och härleda vilka parametrar som behöver bestämmas och vilka övriga krav som bör ställas på en platsundersökning.
- SR 97 ska ge underlag för att härleda preliminära funktionskrav på kapseln och de övriga barriärerna.

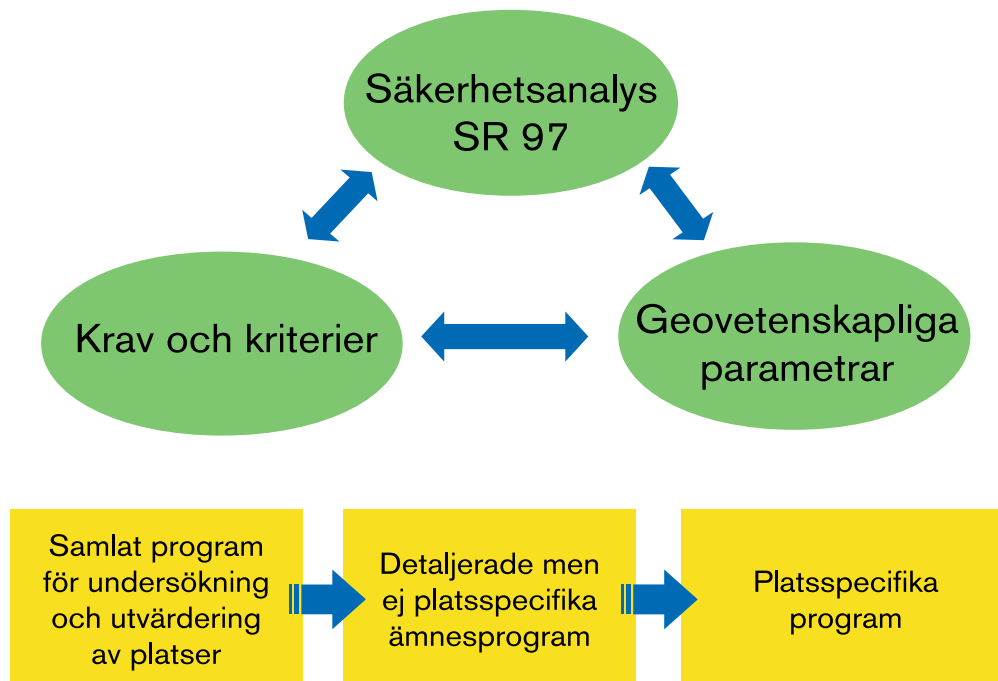
Den principiella uppläggnings av en säkerhetsanalys och hur denna kan användas för att ge underlag till lämplighetsindikatorer diskuteras i avsnitt 2.2. Denna rapport bygger i hög grad på resultat av analyser som genomförts inom SR 97.

SR 97 består av en fristående Huvudrapport /SKB, 1999a/ och tre underrapporter ("Förvarssystemrapporten" /SKB, 1999c/, "Processrapporten" /SKB, 1999b/ och "Data-rapporten" /Andersson, 1999/). Både huvudrapport och underrapporterna bygger i sin tur på arbeten som redovisas i ett stort antal andra rapporter.

1.4.2 Samlat program för undersökning och utvärdering av platser

I förberedelsearbetet inför platsundersökningarna ingår också att ta fram ett tydligt platsundersökningsprogram. Med platsundersökningsprogram avses här ett samlat program för undersökning och utvärdering av platser med avseende på långsiktig säkerhet och teknik. Det ska alltså framgå både vilken information som avses samlas in från en plats och hur den ska användas vid utvärdering av en plats. Här kommer föreliggande rapport in i bilden. Utvärderingsprogrammet kommer att visa på användningen av krav, önskemål indikatorer och kriterier under pågående platsundersökningar. Figur 1-2 ger en översikt av dessa angränsande aktiviteter och hur de kopplar till varandra.

Det samlade programmet kommer att kompletteras och detaljeras i ämnesspecifika program. Även dessa är generiska, dvs inte anpassade till de specifika förutsättningar som råder på respektive plats. När områden för platsundersökningar valts kommer de ämnesspecifika programmen att omarbetas till platsspecifika genomförandeprogram. I dessa tas hänsyn dels till de platsspecifika geologiska förhållandena, dels till mark- och miljöintressen och samhälleliga förhållanden.



Figur 1-2. Programskrivning inför platsundersökningarna och en översikt av avgränsande aktiviteter och hur de kopplar till varandra.

1.5 Denna rapport

Kapitel 1–3 beskriver förutsättningar och använd metodik. Själva redovisningen av arbetet återfinns in kapitel 4–9. Slutsatserna från arbetet redovisas i kapitel 10.

Kapitel 2 redovisar vilka grundläggande krav som ett djupförvar måste uppfylla. Krav och önskemål som redovisas i detta kapitel utgör grunden i arbetet med att ta fram mer detaljerade krav och önskemål på berget.

Kapitel 3 redogör för förutsättningar för arbetet och bland annat definieras begreppen funktion, parameter, krav, önskemål, lämplighetsindikator och kriterium. Under projektarbetet har det visat sig nödvändigt att använda en strikt vokabulär och struktur på redovisningen. Arbetssättet med att ta fram kriterier görs i steg och det ska kunna gå att förstå hur ett konkret krav eller önskemål på en viss egenskap hos berget utgår från något av de mer grundläggande krav som djupförvaret måste uppfylla.

Kapitel 4 till 9 redovisar krav och önskemål på djupförvarets funktion, krav och önskemål på bergets egenskaper (parametrar), förväntade värdeområden för dessa parametrar samt ger motiverade förslag till kriterier att användas dels under och efter en förstudie, dels under och efter platsundersökningarna. Kapitel 4 behandlar geologi, kapitel 5 bergmekanik, kapitel 6 temperaturegenskaper, kapitel 7 hydrogeologi, kapitel 8 grundvattnets sammansättning (kemi) och kapitel 9 bergets transportegenskaper. Innehållet i dessa kapitel sammanfattas också i tabeller i bilaga A och B.

2 Övergripande krav och önskemål

Det finns grundläggande krav som ett djupförvar måste uppfylla. Dessa krav definieras av lagar och föreskrifter från myndigheterna. Djupförvarets säkerhet bygger på säkerhetsfunktionerna isolering och fördröjning. Dessa funktioner påverkas dels av utformningen och byggandet av anläggning och tekniska barriärer, dels av de platsspecifika förhållandena på förläggningsplatsen. För att värdera säkerheten genomförs en säkerhetsanalys. Även för själva anläggningsbygget går det att formulera ett antal övergripande krav och önskemål. Dessa utgör grunden i arbetet med att ta fram detaljerade krav och önskemål på berget.

2.1 Lagar, förordningar och föreskrifter

De övergripande kraven på djupförvaret utgår från lagarna. De viktigaste lagarna är härvid miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen. För att få uppföra ett djupförvar krävs tillstånd enligt både miljöbalken och kärntekniklagen.

2.1.1 Miljöbalken

Miljöbalken reglerar bland annat frågor om tillåtlighetsprövningen vid lokaliseringen av djupförvaret och upprättandet av miljökonsekvensbeskrivningar. Balken reglerar vidare vilken miljöpåverkan djupförvarsanläggningen kan tillåtas ha, men inverkan från joniserande strålning regleras inte utan detta sker genom kärntekniklagen och strålskyddslagen.

2.1.2 Kärntekniklagen och strålskyddslagen

Krav på säkerhet och strålskydd utgår från lagen om kärnteknisk verksamhet och strålskyddslagen. Kärntekniklagen stadgar allmänt att kärnteknisk verksamhet ska bedrivas på ett säkert sätt. Strålskyddslagen stadgar allmänt att den som bedriver verksamhet med strålning ska, med hänsyn till verksamhetens art och de förhållanden under vilka den bedrivs, vidta erforderliga åtgärder och försiktighetsmått som behövs för att hindra eller motverka skada på människor, djur och miljö. De av regeringen utfärdade förordningarna till kärntekniklagen och strålskyddslagen innebär en viss detaljering och reglerar SKI:s och SSI:s verksamheter, men är fortfarande mycket allmänt hållna beträffande krav på djupförvarets säkerhet och strålskydd.

2.1.3 Föreskrifter och förslag till föreskrifter

Utöver de ovannämnda lagarna har SKI respektive SSI rätt att utfärda föreskrifter.

Statens strålskyddsinstitut (SSI) har nyligen utfärdat föreskrifter om slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle /SSI, 1998/. Dessa ger vägledning i arbetet med lämplighetsindikatorer och kriterier. Föreskrifterna anger att det slutgiltiga omhändertagandet av använt kärnbränsle ska vara strålskyddsmässigt optimerat, och utgå från bästa tillgängliga teknik. Ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall skall utformas så att den

årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken. Dessutom ska ett slutligt omhändertagande genomföras så att biologisk mångfald bevaras och ett hållbart utnyttjande av biologiska resurser skyddas mot skadlig inverkan av strålning.

Statens kärnkraftinspektion (SKI) har skickat ut förslag till föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall. Där framhålls att säkerheten, både på kort och lång sikt, ska baseras på ett system av passiva barriärer och att en brist som kan uppkomma i en av barriärerna inte påtagligt får försämra slutförvarets säkerhet. I förslaget sägs vidare att förhållanden, händelser och processer som har betydelse för säkerheten för ett slutförvar efter förslutning skall analyseras innan slutförvaret uppförs, innan det tas i drift och innan det försluts.

Huruvida de grundläggande kraven uppfylls för ett djupförvar på en specifik plats prövas i samband med att myndigheterna granskar de säkerhetsanalyser och miljökonsekvensbeskrivningar som det åligger SKB att redovisa. Det bör också uppmärksammas att föreskrifter inte direkt ställer krav på funktionen hos olika delar av djupförvarssystemet utan mer anger krav på systemet som helhet. Lagar och föreskrifter kan med andra ord inte direkt användas för att ställa krav eller önskemål på bergets egenskaper. Sådana krav eller önskemål kan bara härledas indirekt, utifrån den påverkan de kan ha på förvarets säkerhet.

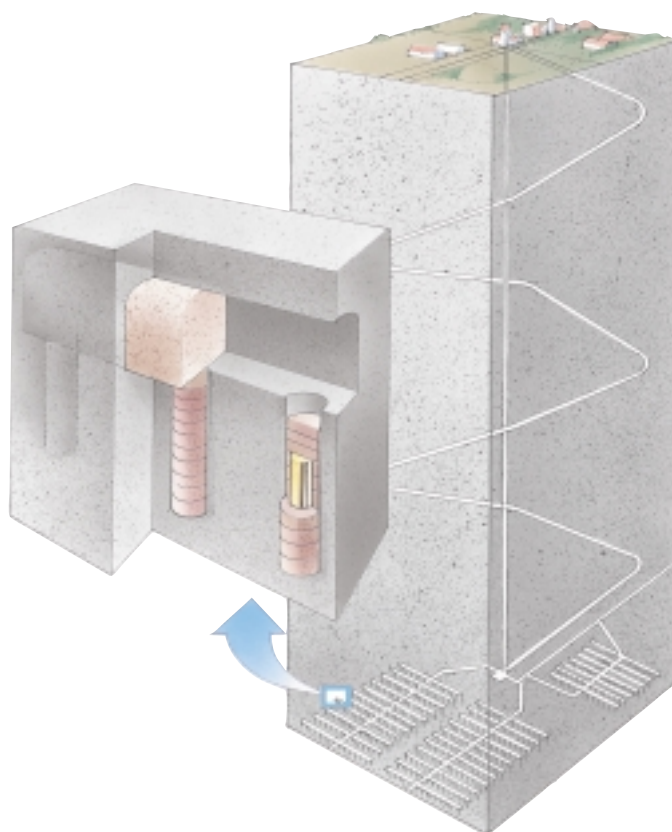
När det gäller själva bygget av djupförvaret anger Arbetarskyddsstyrelsen specifika krav på bl a bergarbeten (AFS 1997:3), samt på sprängarbeten (AFS 1994:17). Dessa föreskrifter måste beaktas vid planering av byggandet av djupförvaret och har därmed påverkan även på platsundersökningarna.

2.2 Vad gör djupförvaret säkert

2.2.1 Säkerhetsprinciper

I SR 97 redovisas säkerhetsprinciperna för ett djupförvar. Ett djupförvar ska i första hand isolera avfallet. I andra hand, om isoleringen av någon anledning till någon del skulle gå förlorad, ska förvaret fördröja utsläppet av radionuklider. Säkerheten åstadkoms med ett system av barriärer, se figur 2-1:

- Bränslet placeras i korrosionsbeständiga kopparkapslar. De fem meter långa kapslarna är försedda med en insats av järn som ger mekanisk hållfasthet.
- Kapslarna omges av ett lager av bentonitlera som skyddar kapseln mekaniskt vid berg rörelser och hindrar grundvatten att strömma kring kapseln, vilket hindrar korroderande ämnen att komma in till kapseln. Bentonitleran adsorberar även effektivt vissa radioaktiva ämnen som kan frigöras om kapslarna skulle skadas.
- Kapslarna med omgivande bentonitlera placeras på cirka 500 meters djup i urberget. Här råder långsiktigt stabila mekaniska och kemiska förhållanden.
- Om någon kapsel skulle skadas utgör bränslets och de radioaktiva ämnens kemiska egenskaper, t ex deras svårslöslighet i vatten, kraftiga begränsningar för transport av radioaktiva ämnen från förvaret till markytan. Detta gäller speciellt de långsiktigt farligaste ämnena som americium, neptunium och plutonium.



Figur 2-1. KBS-3 systemet med huvudalternativet att kapslarna deponeras en och en i vertikala hål. Varianter med fler kapslar per hål eller med horisontella hål kan bli aktuella. Rapportens slutsatser är tillämpliga även för dessa varianter.

Förvaret är alltså uppbyggt av flera barriärer som stöder och kompletterar varandra. Säkerheten hos förvaret ska vara tillräcklig även om någon barriär skulle vara defekt eller gå förlorad. Detta är innebörden i flerbarriärprincipen.

En annan princip är att göra förvaret "naturnära", dvs att använda naturliga material som koppar till kapselns hölje och bentonitlera till bufferten. Genom att välja material från naturen blir det möjligt att bedöma och utvärdera materialens långsiktiga stabilitet och uppförande i ett djupförvar med hjälp av kunskaper om naturliga förekomster. Av samma skäl strävar man efter att bygga ett förvar som förändrar de naturliga förhållandena i berget så lite som möjligt. Framför allt försöker man begränsa den kemiska påverkan förvaret ger i berget.

Huvudalternativet för KBS-3 metoden är att kapslarna deponeras en och en i vertikala hål från deponeringstunnlarna (figur 2.1). Varianter som kan bli aktuella är

- vertikal deponering av två kapslar i varje hål,
- horisontell deponering av flera kapslar per hål.

Denna rapportens resultat och slutsatser är tillämpligt även för dessa varianter.

Förvarets primära funktion – isolering

I första hand ska djupförvaret isolera avfallet från människa och miljö. Detta åstadkoms direkt av kopparkapseln. Bufferten ska bidra till isoleringsfunktionen genom att hålla kapseln på plats och hindra korroderande ämnen i grundvattnet att komma i kontakt med kapseln.

Även berget ska bidra till isoleringen genom att erbjuda en stabil kemisk och mekanisk omgivning för kapslarna och bufferten. De kemiska förhållandena bestäms framför allt av grundvattnets sammansättning. Det är gynnsamt om vattnet innehåller låga halter av ämnen som skulle kunna vara skadliga för främst kopparkapseln och bentonitleran. Det är också gynnsamt om vattenflödet förbi förvaret är lågt så att tillförseln av oönskade ämnen därigenom begränsas. Mekaniskt ska urberget erbjuda en långsiktigt stabil miljö för ett djupförvar.

Förvarets sekundära funktion – fördröjning

Om isoleringen av någon anledning skulle skadas, eller om någon kapsel initialt skulle ha en defekt som inte upptäcks vid tillverkningskontrollen, har förvaret i andra hand en fördröjande funktion. Med det menas att tiden det tar för radionuklider att transporteras från förvaret till biosfären görs så lång att farligheten hinner avta väsentligt innan radionukliderna når människan eller hennes omgivning.

Samtliga barriärer bidrar till förvarets fördröjande funktion. Även en delvis skadad kopparkapsel kan effektivt bidra till fördröjningen genom att försvåra inflöde av vatten till kapselns inre och uttransport av frigjorda radionuklider. Bränslet, där huvuddelen av radionukliderna ligger inbäddade, består av ett beständigt material som ger ett viktigt bidrag till fördröjningen. Om bränslet kommer i kontakt med grundvatten startar en mycket långsam upplösningsprocess som leder till att radionuklider frigörs. Frigörelsen begränsas av att många av de långsiktigt farligaste radionukliderna är svårösliga i vatten, det medium i vilket radionuklider kan tänkas transporteras genom såväl buffertens porer som bergets spricksystem. Lerbufferten ska ha en förmåga att länge hålla kvar många av de långsiktigt farligaste radionukliderna genom att dessa fastnar på lerpartiklarnas ytor. Berget ska bidra till fördröjningen genom att radionuklider fastnar på sprickornas ytor och/eller tränger in i mikrosprickor med stillastående vatten så att de får en betydligt längre transporttid än själva grundvattnet. Förutom själva utformningen av djupförvaret är det i första hand grundvattnets sammansättning (kemi), grundvattenströmningen i berget (hydrogeologi) och bergets transportegenskaper som påverkar förvarets fördröjande funktion.

Spädning och spridning

Tidigare har ibland också spädning och spridning nämnts som en tredje säkerhetsfunktion: Genom att förlägga förvaret så att eventuella utsläpp får en hög grad av utspädning i biosfären lindras konsekvenserna. I säkerhetsanalysen SR 97 /SKB, 1999/ betraktas, av flera skäl, detta inte som någon säkerhetsfunktion eftersom:

- Biosfären och därmed utspädningen förändras betydligt snabbare än själva förvarssystemet och dessutom på ett sätt som är svårt att förutsäga. Det blir därmed inte rimligt att basera en långsiktig säkerhetsfunktion på förhållanden i biosfären.
- Visserligen lindras konsekvenserna för de som drabbas mest av ett utsläpp, men å andra sidan kan en större population beröras.

Utspädningen är dock en viktig faktor som påverkar radionuklidspridningen i biosfären och därmed konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp från förvaret. En värdering av utspädningsförhållandena vid en förvaringsplats måste därför ingå i en säkerhetsanalys men utspädningen betraktas alltså inte som en säkerhetsfunktion i sig.

2.2.2 Säkerhetsanalys

För att utvärdera den långsiktiga säkerheten genomförs en säkerhetsanalys. Syfte, innehåll och uppläggning av en säkerhetsanalys beskrivs detaljerat i SR 97. I korthet kan säkerhetsanalysen sägas bestå av:

- en noggrann beskrivning av förvarssystemets utseende eller tillstånd då det just byggts,
- en kartläggning av vilka förändringar förvaret kan tänkas genomgå med tiden till följd av dels inre processer, dels yttre påverkan, samt
- en utvärdering av förändringarnas konsekvenser för den långsiktiga säkerheten.

Detta angreppssätt är vanligt vid analys av system som förändras med tiden. Ett system avgränsas med en systemgräns och ett initialt tillstånd beskrivs. Därefter bestäms systemets utveckling av tidsberoende, inre processer och av växelverkan med en föränderlig omgivning.

Lika viktigt som bedömningen av förvarets isolerande förmåga och det numeriska resultatet av analysen av fördröjningen är tilltron till resultatet. Underlaget till en säkerhetsanalys är alltid behäftat med brister av olika slag. Enkelt uttryckt står man inför uppgiften att visa huruvida förvaret utformats med tillräckliga marginaler för att vara säkert trots den bristande kunskapen. Tilltron till resultatet beror bl a av hur metodiskt denna hantering av osäkerheter/brister genomförs.

Genomförandet och redovisningen av SR 97 kan delas in i ett antal moment:

Systembeskrivning: Först görs en strukturerad beskrivning av alla inre processer, sambanden dem emellan och de egenskaper hos förvaret som respektive process påverkar. Här ingår också att definiera gränsen mellan system och omgivning.

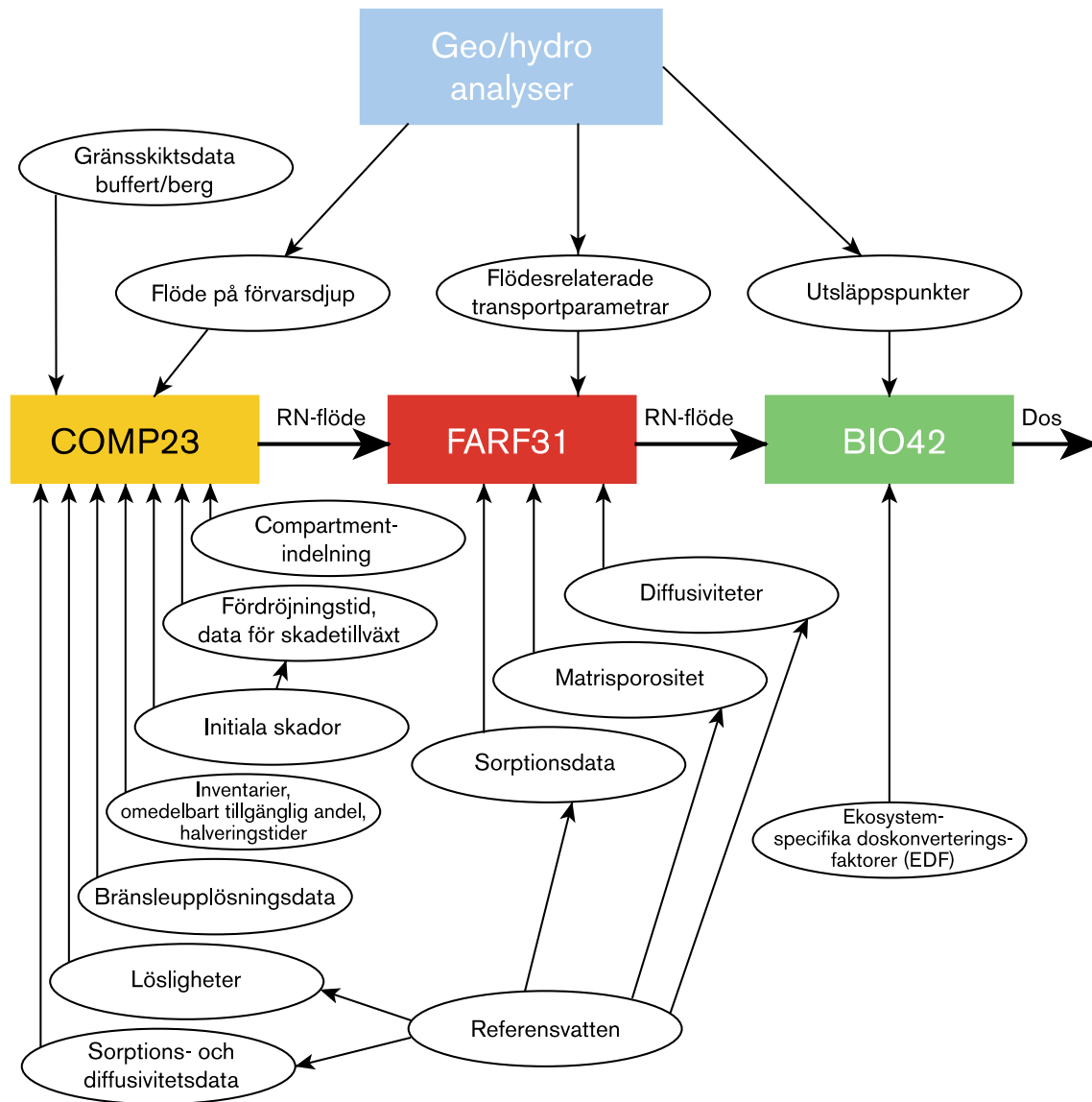
Initialt tillstånd: Därefter görs en beskrivning av förvarets utseende då det just har byggts (dimensioner och material för de konstruerade delarna av förvaret och struktur och egenskaper för geosfären kring förvaret).

Val av scenarier: Förvarets utveckling påverkas av omgivningen. För att täcka in olika situationer i omgivningen analyseras förvarets utveckling för ett antal olika händelseutvecklingar i omgivningen; ett antal olika scenarier väljs ut och analyseras. De valda scenarierna bör tillsammans ge en rimlig täckning av de olika utvecklingsvägar förvaret och dess omgivning kan tänkas ta.

Analys av valda scenarier: Med hjälp av systembeskrivningen analyseras förvarets utveckling för var och en av de valda scenarierna. Här används efter behov en rad olika verktyg och metoder, allt ifrån resonemang och enkla överslag till detaljerade modellberäkningar baserade på platsspecifika data. För de scenarier som innebär att kapslar skadas beräknas hur radionuklider transporteras från den skadade kapseln genom de olika barriärerna och vilken dos detta utsläpp skulle kunna föra med sig. Beräkningarna

genomförs med en kedja av transportmodeller (COMP23, FARF31, BIO42) som i sin tur får indata från olika mer eller mindre komplexa modellberäkningar eller dataanalyser av olika förhållanden eller fenomen, se figur 2-2.

Utvärdering: Slutligen görs en samlad bedömning av förvarets säkerhet. Här vägs de olika scenarierna ihop till en total riskbild. Slutsatserna i bedömningen utgör analysens resultat. Här måste också tilltron till resultatet diskuteras i ljuset av de osäkerheter som finns i underlaget till analysen.



Figur 2-2. I SR 97 använda modeller för beräkning av radionuklidtransport (rektanglar) och indata till dessa modeller (ellipser).

2.2.3 Hur säkerhetsanalysen kan användas för att formulera krav och önskemål på berget

Arbetet med att ta fram geovetenskapliga lämplighetsindikatorer och kriterier bygger på många års erfarenheter, analyser och utvecklingsarbete av KBS-3 metoden. Säkerhetsanalysen SR 97 har utgjort ett väsentligt komplement till det underlag som använts i projektet. Bedömningarna av vad som är väsentligt ur perspektivet långsiktig säkerhet bygger på de analyser som genomförts inom ramen för SR 97, kompletterat med tidigare kunskaper och erfarenheter.

- För varje platsrelaterad parameter som behövs för att beskriva säkerhetsanalysens sk initiala tillstånd (se ovan) har frågan ställts om denna parameter bör vara en geovetenskaplig lämplighetsindikator.
- Säkerhetsanalysen har använts för att söka svar på frågan om det finns värdeområden för bergets egenskaper där djupförvarets isolering kan hotas. Av försiktighet har sådana värdeområden utgjort underlag för kravformuleringar, även om det inte alltid är klart att djupförvaret definitivt skulle vara osäkert om kraven inte uppfylls. Kraven kan bara omprövas i ljuset av ny kunskap eller om förvarets utformning förändras väsentligt.
- Säkerhetsanalysen har också använts för att finna grund för önskemål om värdeområden som bidrar till god isolering eller god fördröjning. Sådana värdeområden resulterar i önskad funktion, men behöver inte precisera gränsen till oacceptabel funktion. En sådan gräns påverkas i många fall av andra parametrar, är relativ, är okänd eller kan påverkas genom förvarsutformning.

Kraven visar förhållanden som inte får förekomma. Önskemålen visar förhållanden som leder till god isolering och fördröjning, men djupförvaret kan mycket väl visa sig vara säkert även om flera önskemål inte är uppfyllda. Kraven och önskemålen har formulerats för att ge vägledning i lokaliseringsarbetet och för att kunna prioritera undersökningsinsatser vid platsundersökningar. De ersätter inte behovet av samlade och fullständiga säkerhetsanalyser. (Kapitel 3 ger striktare definitioner på begreppen funktion, parameter krav, önskemål, lämplighetsindikator och kriterium.)

2.3 Grundläggande byggtekniska aspekter

Krav och önskemål som ställs utifrån bergprojekteringen blir delvis av något annorlunda karaktär än de direkta säkerhetskraven. Förvarsutformningen görs främst för att uppnå så god funktion och säkerhet som möjligt; kapsel- och tunnelavstånd bestäms av krav på temperatur i och kring förvaret, större sprickzoner undviks m m. Vidare kommer även hänsyn att tas till rena bergbyggnadsaspekter, som vatteninläckage och bergstabilitet i tunnlar. Generellt gäller att förhållanden som är fördelaktiga ur säkerhetssynpunkt i regel också innebär god byggbarhet och säker arbetsmiljö. En god byggbarhet och en stabil berganläggning är vidare fördelaktigt för säkerheten under anläggningens drift. Det finns därför sällan någon konflikt mellan de krav och önskemål som kan framställas ur olika utgångspunkter.

De generella kraven ur ett byggtekniskt perspektiv kan sammanfattas i följande punkter:

- arbetsmiljön ska vara säker,
- miljöpåverkan från undersökningar och från anläggningsbygget ska begränsas och hållas inom acceptabla nivåer,
- anläggningsbygget ska enbart ge begränsad och övergående påverkan på djupförvarets säkerhetsfunktioner,
- utbyggnad av deponeringsområden ska kunna ske samtidigt som deponering sker i andra områden.

Därutöver finns det önskemål om att

- bergarbetena kan utföras med få avbrott och med liten insats av extraordinära förstärknings- och tätningsinsatser (god byggbarhet),
- deponeringsområdet inte behöver delas upp i ett mycket stort antal delområden och att det är möjligt att placera deponeringstunnlar på ett flexibelt sätt i de utvalda deponeringsområdena.

Under och efter genomförda platsundersökningar genomförs en bygganalys för den framtagna förvarsutformningen där genomförbarhet, tids- och materialåtgång, miljöpåverkan, arbetsmiljö m m för bergbygget analyseras. Om säkerhets- eller bygganalysen visar på orimliga konsekvenser eller kostnader för vald utformning behöver denna ändras. Bygganalysen ställer med andra ord inga direkta krav utan anpassning kan i regel ske till rådande förhållanden. Däremot finns ett antal faktorer som påverkar genomförbarhet och ekonomi.

2.4 Övriga allmänna krav och önskemål

Som tidigare noterats är det nu redovisade arbetet begränsat till bergets och markens egenskaper. Denna avgränsning innebär att t ex frågor om transporter, markanvändning, hushållning med naturresurser, liksom samhällsfaktorer inte behandlas inom föreliggande rapport.

Inför valet av platser för platsundersökningar och inför valet av plats för detaljundersökning behöver givetvis samtliga förhållanden som kan påverka valet bedömas samlat, inte bara de geovetenskapliga. Alla geovetenskapliga krav måste givetvis uppfyllas. Inför valet av plats till detaljundersökning måste en säkerhetsanalys visa att ett säkert djupförvar kan uppföras där. Många geovetenskapliga önskemål är dock sådana, att om de uppfylls innebär det lägre kostnader eller kortare undersökningstid. Sådana önskemål får vid val av plats för djupförvaret vägas mot andra önskemål ur miljösynpunkt eller ur samhällelig synpunkt. SKB kommer i ett annat sammanhang att redogöra för hur denna sammanvägning ska gå till. Pågående och kommande MKB-samråd berör dessa frågor och kommer att förtydliga dessa övriga aspekter.

3 Förutsättningar, begrepp och arbetssätt

Projektarbetet har utgått från ett antal förutsättningar och har bedrivits stegvis. I detta kapitel definieras vissa grundläggande begrepp. Därefter beskrivs den metodik som använts i arbetet.

3.1 Förutsättningar

Följande förutsättningar gäller för arbetet:

- Arbetet är avgränsat till att ta fram krav, önskemål, lämplighetsindikatorer och kriterier.
- Krav och önskemål avser ett förvar för använt kärnbränsle av typ KBS-3, dvs ett förvar där bränslet förvaras i kopparkapslar inbäddade i lera på 400–700 m djup i den kristallina berggrunden (se avsnitt 2.2). (Det bör dock noteras att förhållanden som är lämpliga respektive mindre lämpliga för ett KBS-3 förvar med varianter rimligen också är lämpliga respektive mindre lämpliga för andra utformningar av djupförvar i kristallin berggrund. Mer specifika krav och önskemål, liksom den relativa betydelsen av olika faktorer kan dock ändras om andra förvarsutformningar studeras.)
- Arbetet har avgränsats till att diskutera bergets och markens egenskaper. Denna avgränsning innebär att t ex frågor om transporter, markanvändning och hushållning med naturresurser, eller samhällsaspekter inte behandlas annat än översiktligt. (Sådana frågor hanteras inom andra delar av SKB:s lokaliseringsstudier.)

Precisering av kriterier begränsas till skedena inför platsundersökning samt under och efter genomförd platsundersökning. I vissa fall förs dock en principiell diskussion om kriterier som bara blir meningsfulla vid detaljundersökningen eller under deponerings-skedena.

3.2 Definitioner

En central utgångspunkt för detta projekt är att skilja mellan de krav och önskemål som kan ställas på berget, vilka olika mätningar som kan göras för att söka bestämma bergets egenskaper samt vilka beslut som kan fattas när mätresultaten analyserats. Ofta används begrepp som "lokaliseringsfaktor" och "kriterier" utan att orden närmare definieras. I olika sammanhang tycks det också vara så att orden används med något olika betydelser. I detta arbete används därför striktare definitioner av ett antal begrepp (se även tabell 3-1):

Med *funktion* för ett djupförvar avses uppgifter som djupförvaret är ämnat att fullgöra, t ex ha isolerande och fördröjande funktion. Exempel på funktion: kapseln ska isolera avfallet från omgivningen, berget ska fördröja eventuellt utsläpp av radionuklider.

Med *parameter* avses en fysikalisk eller kemisk storhet (egenskap, förhållande, tillstånd, variabel) av relevans för djupförvaret. En parameter kan anta olika värden. Exempel: orientering av sprickzoner, flödesporositet, pH-värde.

Krav avser villkor som måste uppfyllas. Krav kan avse såväl funktion som enskilda parametrar. Kraven avser gränser för vad som inte accepteras på en plats. Exempel: kravet att grundvattnet på försvarsdjup inte får innehålla löst syre kan fastläggas utifrån den grundläggande säkerhetsfunktionen att kapselns integritet (isolering) inte får hotas.

Önskemål avser förhållanden som bör uppfyllas. Önskemål kan avse såväl funktion som enskilda parametrar. Önskemålen anger vad som är bra, men inte är nödvändigt. Exempel: önskemålet om att berget ska ha god värmeledningsförmåga kan fastläggas utifrån byggprojekterings önskemål om att kunna få rum med många kapslar inom ett givet deponeringsområde.

Med *geovetenskapliga lämplighetsindikatorer* avses parametrar som beskriver bergets och grundvattnets egenskaper och tillstånd för vilka det finns platsspecifika värden/bedömningsgrunder, och som vid ett eller flera skeden av lokaliseringsarbetet, kan användas för att bedöma i vilken utsträckning krav och önskemål är uppfyllda. Exempel: förekomst av Fe^{2+} som indikerar syrefria förhållanden.

Med *kriterier* för platsutvärdering avses kännetecknande värden för lämplighetsindikatorer vilka, i ett visst skede, kan användas för att bedöma om en plats uppfyller ställda krav och önskemål. Kriterier är kopplade till nivån av kunskap och förändras därför under olika lokaliseringsskeden. Exempel: uppmätt förekomst av Fe^{2+} för kvalitetsgodkända vattenprov under platsundersökning skulle kunna användas som kriterium för kontroll av kravet att grundvattnet inte ska innehålla löst syre på försvarsdjup.

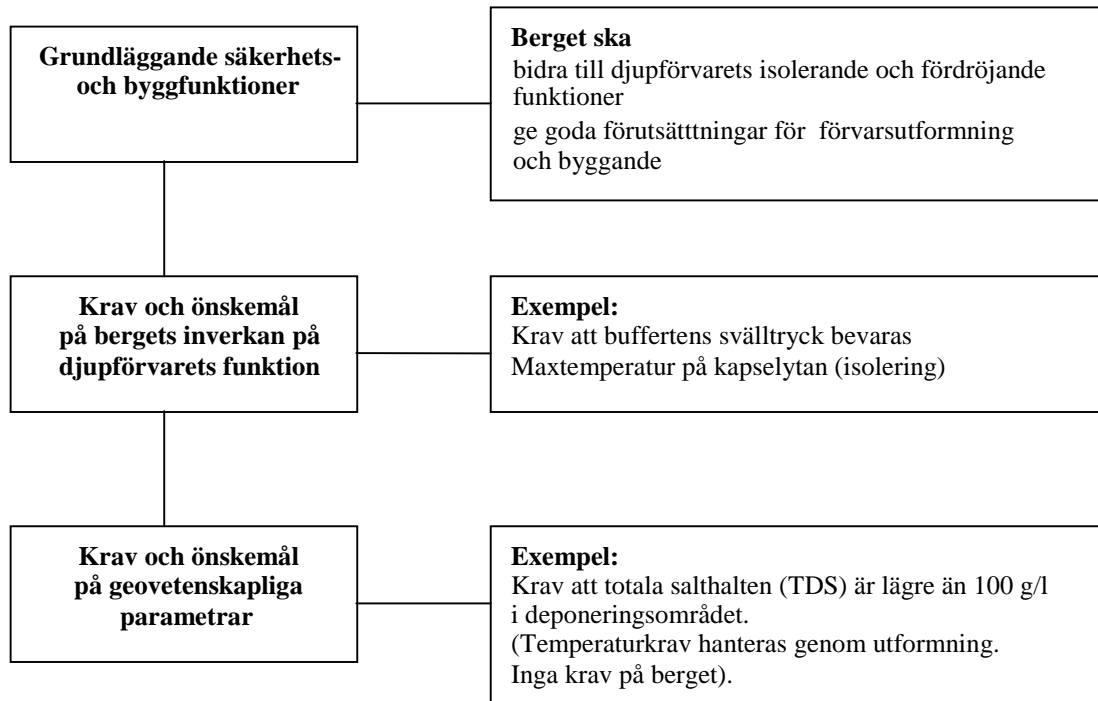
Kraven och önskemålen avser verkliga förhållanden och de förblir desamma under olika skeden av lokaliseringsarbetet. Det som kan förändra krav eller önskemål är ändrade förutsättningar, nytt försvarskoncept eller betydande ny kunskap. Samtliga krav ska vara uppfyllda.

Uppfyllda önskemål leder i allmänhet till större säkerhetsmarginaler, lägre kostnader, enklare undersökningar eller enklare konstruktion av förvaret. Samtliga önskemål behöver inte vara uppfyllda för att en plats ska kunna godkännas för ett djupförvar. Det kan mycket väl vara så att ”sämre” värden för vissa parametrar kompenseras av ”bättre” värden för andra. För att bedöma säkerhet och funktion behövs därför alltid en integrerad säkerhetsanalys och bygganalys. Önskemålen, som de är formulerade i denna rapport ger bara vägledning, men kan inte ersätta säkerhetsanalysen.

I arbetet används begreppet geovetenskaplig lämplighetsindikator i stället för begreppet lokaliseringsfaktor, som ofta använts i tidigare diskussioner om lokalisering av djupförvar. Anledningen till detta är delvis att ordet lokaliseringsfaktor har använts med flera betydelser, men framförallt att ordet lämplighetsindikator bättre motsvarar vad som brukar användas i andra miljösammanhang. Standarden ISO 14 031, som handlar om ”Environmental management” och ”Environmental performance evaluation”, definierar ”environmental condition indicator” som ”specific expression that provides information about the local, national or global condition of the environment”, dvs en beskrivande term. Genom tilläggen ”geovetenskaplig” och ”lämplighet” förtydligas att indikatorerna avser att beskriva vilka av bergets egenskaper som har betydelse för att bedöma om berget är lämpligt i perspektiven långsiktig säkerhet och teknik. Ordet indikator förtydligar också att projektet inte handlar om viktningfaktorer.

Distinktionen mellan krav/önskemål å ena sidan och kriterier å den andra är nödvändig eftersom geovetenskapliga undersökningar aldrig ger fullständig kunskap om bergets och grundvattnets tillstånd och egenskaper. Vid bedömningen av platsspecifika data behöver man därför värdera precisionen i parameterskattningen mot ställda krav och önskemål.

En lämplighetsindikator, och därmed även ett kriterium, bygger på något mät- eller skattningsbart. Figur 3-1 illustrerar den hierarki för krav, önskemål och kriterier som varit utgångspunkt för arbetet med att ta fram lämplighetsindikatorer och kriterier för dessa.



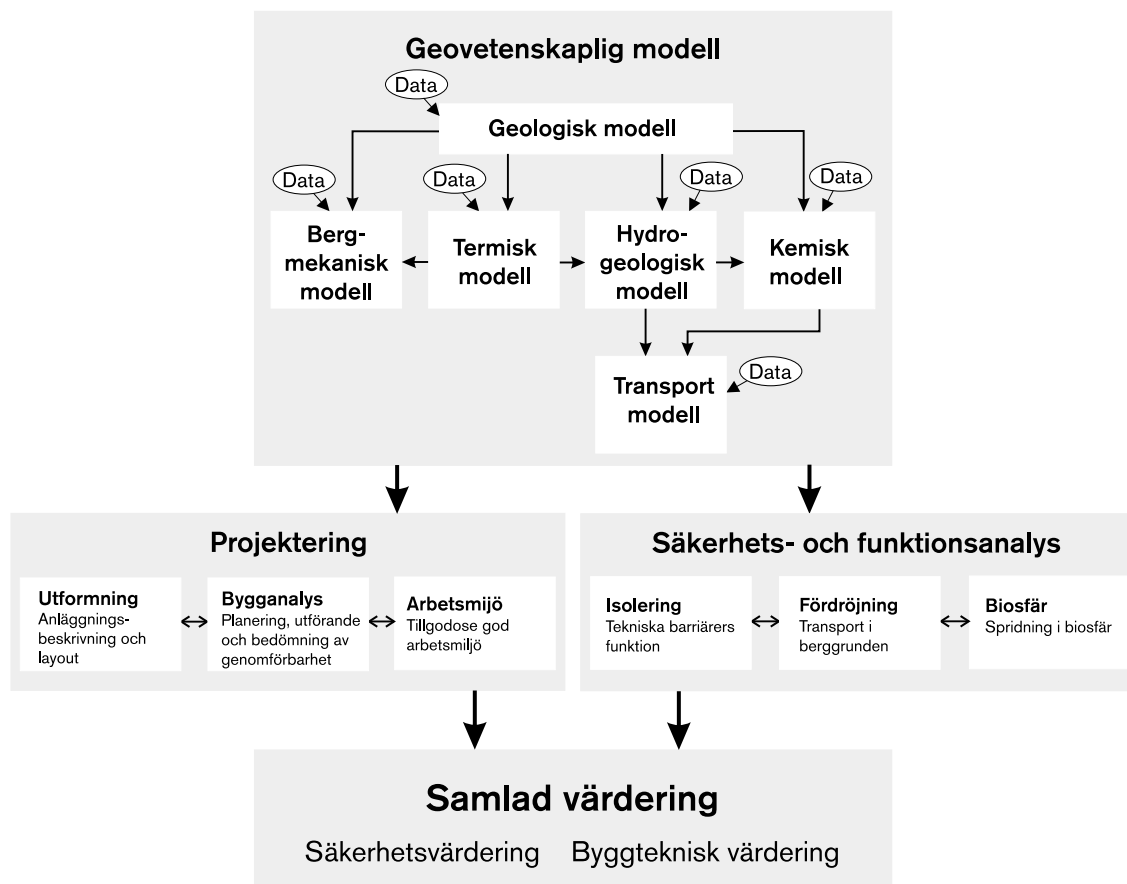
Figur 3-1. Illustration av den kravhierarki som varit utgångspunkten för arbetet. Krav på (platsen och) berget för att djupförvaret slutligt ska kunna accepteras som säkert för deponering (avser verkliga förhållanden oavsett lokaliserings-, byggnads- eller driftskede). Det är inte alla krav på funktion som leder till krav på berget.

Tabell 3-1. Korta definitioner av centrala begrepp.

Begrepp	Definition
Funktion	Uppgift som djupförvaret är ämnat att fullgöra, t ex ha isolerande och fördröjande funktion.
Parameter	Fysikalisk eller kemisk storhet (egenskap, förhållande eller tillstånd i berget).
Krav	Villkor som måste uppfyllas, avser verkliga förhållanden oberoende av lokaliseringsskede. Samtliga krav måste vara uppfyllda.
Önskemål	Förhållanden som bör uppfyllas oberoende av lokaliseringsskede. Samtliga önskemål behöver inte vara uppfyllda.
Geovetenskapliga lämplighetsindikatorer	Mät- eller skattningsbara platsspecifika parametrar som vid ett visst lokaliseringsskede kan användas för att bedöma uppfyllandet av krav och önskemål.
Kriterier för platsutvärdering	Värden för lämplighetsindikatorer i ett visst lokaliseringsskede, som kan användas för att bedöma om en plats uppfyller ställda krav och önskemål.

3.3 Inverkan på djupförvarets funktion

De krav och önskemål, som kan ställas på djupförvaret, gäller främst vilka funktioner som måste eller bör tillgodoses. I en analys av funktionen ingår ett flertal geovetenskapliga parametrar, vilket översiktligt illustreras av figur 3-2 och i vissa fall kan kraven på en viss funktion efter utförd analys brytas ned till krav på enskilda parametrar. Det är dock i många fall svårt att genomföra denna nedbrytning eftersom funktionen beror på de samverkande förhållandena för många parametrar. En viss funktion kan uppnås genom många olika kombinationer av parametervärden.



Figur 3-2. Illustration av hur geovetenskapliga modeller utnyttjas för projektering respektive säkerhets- och funktionsanalys. Data om bergets egenskaper (parametrar) ligger till grund för geovetenskapliga modeller av berggrunden och därmed för bedömning av djupförvarets funktion.

3.3.1 Nedbrytning till funktioner inom olika ämnesområden

De generella kraven och önskemålen på djupförvarets funktion som beskrevs i kapitel 2 har brutits ner och detaljerats. Frågan ställs, i tur och ordning, om geologiska förhållanden, bergmekaniska egenskaper, termiska egenskaper, hydrogeologiska egenskaper, grundvattnets sammansättning eller bergets transportegenskaper inverkar på djupförvarets olika funktioner. Om inverkan är betydande formuleras krav eller önskemål på hur stor denna inverkan får vara. Vidare identifieras funktionsanalyser, som kan användas under den pågående platsutvärderingen för att kontrollera krav/önskemål. Det anges även vilka geovetenskapliga parametrar som därvid är berörda.

3.3.2 Redovisning och tabeller

Krav och önskemål ur ett funktionsperspektiv har ordnats per geovetenskapligt ämnesområde. Struktureringen har genomförts med hjälp av tabeller indelade i ämnesområdena geologi, termiska egenskaper, hydrogeologi, bergmekanik, kemi och transportegenskaper. För varje ämnesområde ställs det upp en tabell i vilken radindelningen gjorts med hänsyn till de allmänna kraven på säkerhetsfunktioner. Tabell 3-2 visar ett utdrag från en sådan tabell. Tabellerna redovisas i sin helhet i bilaga A. Innehållet i tabellerna redovisas även som det första avsnittet i respektive kapitel 4–9.

Varje tabell är indelad i kolumnerna:

- berörd funktion,
- specifika förhållanden som påverkar funktion,
- krav,
- önskemål,
- funktionsanalys och berörda parametrar, samt
- referenser.

Avsikten med dessa kolumner diskuteras i det följande.

Tabell 3-2. Exempel på den struktur för presentation av krav och önskemål på berget vad gäller djupförvarets funktion som utarbetats. Exemplet är hämtat från ämnesområdet temperatur samt den grundläggande säkerhetsfunktionen avseende kapselns isolerande funktion. Den fullständiga funktionstabellen finns återgiven i bilaga A.

Berörd funktion	Termiska förhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referenser
Inverkan på kapselns och buffertens integritet	Temperatur på kapselyta påverkar kemisk miljö och därmed kapselns funktion.	Krav på högsta temperatur på kapselytan $T < 100$ C.		Layout bestäms så att temperaturkrav uppfylls. Temperatur i närområdet bestäms av layout, värmeledningsförmåga, värmekapacitet, randvillkor, bentonitens vattenmättnad.	Werme, 1998. SR 97 Basscenariot

Berörd funktion

De generella krav och önskemål på djupförvarets funktion som varit utgångspunkt för att ta fram mer detaljerade krav och önskemål (se kapitel 2).

Specifika förhållanden som påverkar funktion

För varje allmän funktion anges de ämnesspecifika förhållanden som har betydelse, dvs kan inverka på funktionen.

Krav

Ämnesspecifika krav anges där så är möjligt. I princip anges här enbart prohibitiva krav, dvs om kravet inte uppfylls innebär detta att platsen för djupförvaret är olämplig eller att förvarsutformningen måste göras om på ett avgörande sätt. Vidare gäller att säkerhetsfunktionen inte automatiskt är uppfylld även om alla krav tillgodoses. Kraven ska ange gränser för vad som inte accepteras.

Önskemål

Ämnesspecifika önskemål anges där så är möjligt. Önskemålen ska ge vägledning om vad som behövs för att en säkerhetsanalys eller en byggnadsanalys ska visa på fullgoda förhållanden. Önskemålen kan därmed avse t ex kända värdeområden för fullgoda förhållanden, men behöver inte precisera gränsen till oacceptabla förhållanden eftersom en sådan gräns i många fall är relativ, okänd eller kan påverkas genom förvarsutformning.

Inför beslutet att påbörja detaljundersökning och ansöka om tillstånd för uppförande av djupförvar måste under alla förhållanden en integrerad säkerhetsanalys genomföras. Om alla väsentliga önskemål uppfylls bör med all sannolikhet denna analys visa att djupförvaret har fullgod säkerhet och det råder goda förutsättningar för anläggningsarbetena.

Funktionsanalyser och berörda parametrar

I kolumnen funktionsanalyser preciseras vilka analyser (beräkningar m m) som kan användas för att utvärdera funktionen samt vilka parametrar som primärt beaktas vid en sådan analys. Efter genomförda funktionsanalyser kan kraven och önskemålen preciseras ytterligare.

3.4 Krav och önskemål på parametrar

Utifrån identifierade krav och önskemål på djupförvarets funktion analyseras i vilken utsträckning det är möjligt att formulera krav eller önskemål direkt på de parametrar som bestämmer funktionen.

3.4.1 Geovetenskapliga parametrar

SKB har identifierat parametrar av betydelse att bestämma vid geovetenskaplig platsundersökning /Andersson m fl, 1996/. Parametrarna är indelade efter ämnesområdena: geologi, bergmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, grundvattenkemi och transportegenskaper. Denna rapport har även översatts till engelska /Andersson m fl,

1998a/, där vissa marginella förändringar har införts samt en del kompletterande figurer infogats. De redovisade parametrarna innefattar samtliga lokaliseringsfaktorer som presenterats i /SKB, 1994/. I /Andersson m fl, 1998a/:

- identifieras, beskrivs och värderas geovetenskapliga parametrar som är av betydelse att känna till för att kunna genomföra funktions- och säkerhetsanalyser av ett djupförvar och som kan erhållas från en platsundersökning,
- diskuteras hur identifierade parametrar används och vilka platsspecifika mätningar som kan utnyttjas för att bestämma parametern i fråga,
- redovisas och diskuteras databehov för bergprojektering,
- redovisas och diskuteras vissa databehov för beskrivning av övriga miljöaspekter,
- redovisas övrigt databehov för analys och allmän förståelse av geovetenskapliga förhållanden.

Det konstateras även att få geovetenskapliga parametrar mäts direkt utan de bestäms ofta genom ett tolkningsförfarande vilket kan ge upphov till olika fel och osäkerheter. Rena mätfel utgör bara en liten del av denna osäkerhet. Problem relaterade till skalberoende parametrar och rumslig variation kan ge upphov till mer betydande osäkerheter. Relevansen hos olika geovetenskapliga parametrar behöver därför sättas i relation till de tillgängliga mät- och utvärderingsmetoder som finns för att bestämma parametern. De flesta test som görs i fält (t ex injektionstest, hydraulisk spräckning, spår försök) ger indirekt information om t ex hydraulisk ledningsförmåga, bergspänningar eller retentionsegenskaper.

3.4.2 Framtagning av geovetenskapliga lämplighetsindikatorer

Lämplighetsindikatorerna utgör bara en delmängd av alla de geovetenskapliga parametrar som redovisas av /Andersson m fl, 1998a/. De geovetenskapliga lämplighetsindikatorerna är de parametrar som på ett väsentligt sätt inverkar på djupförvarets funktioner. En systematisk metod har använts, precis som i processen för att ta fram detaljerade krav på hur berget får inverka på djupförvarets funktioner.

Struktur för arbetet – tabeller

Parametrarna har ordnats per geovetenskapligt ämnesområde. Varje ämnesområde ger upphov till en tabell i vilken radindelningen gjorts med hänsyn till de geovetenskapliga parametrarna enligt /Andersson m fl, 1996/. Tabellernas struktur framgår av tabell 3-3. Tabellerna redovisas i sin helhet i bilaga B. Innehållet i tabellerna utgör även det huvudsakliga innehållet i kapitel 4–9 i denna rapport.

Varje tabell är indelad i kolumnerna (se tabell 3-3):

- referens till funktion i funktionstabell,
- krav på parameter,
- önskemål på parameter,
- värdeområde i svensk berggrund,
- användbarhet som lämplighetsindikator, samt
- kriterier.

Tabell 3-3. Exempel i tabellform på den struktur som används för att identifiera och motivera geovetenskapliga lämplighetsindikatorer. Exemplet är hämtat från ämnesområdet kemi (grundvattenkemisk sammansättning) samt parametern "TDS" (total dissolved solids). För denna parameter kunde tydligt krav formuleras. Den fullständiga kemitabellen finns återgiven i bilaga B.

Geovetenskaplig parameter	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighetsindikator?	Kriterier under förstudie (FS) och under platsundersökning (PLU)
TDS (total salthalt)	TDS<100 g/l på förvarsnivå		Ner mot 1 000 m djup 0–35 g/l. Upp mot 100 g/l har uppmätts på 1 700 m djup.	Ja	FS: nej (dock uppmärksamhet vid kustområden) PLU: Kvalitetsgodkända uppmätta TDS-halter på förvarsnivå måste uppfylla krav. Enstaka högre värden kan accepteras om det kan visas att vattnet ligger i områden som kan undvikas.

Den kolumn som refererar till beskrivningen av funktioner och analyser i funktionstabellen har utelämnats av utrymmesskäl. I denna kolumn ges information om hur den geovetenskapliga parametern i fråga kommer in i olika funktionsanalyser. Kolumnen finns dock med i de fullständiga tabellerna som redovisas i bilaga B.

Krav på värdeområden för parameter

I största möjliga utsträckning söks krav (på värdeområden) som kan ställas direkt på enskilda parametrar. I vissa fall är det möjligt att utifrån ställda krav på funktion direkt ange otillåtet värdeområde för parametern. I regel är det svårt att direkt ange krav på geovetenskapliga parametrar. Det finns flera skäl för detta:

- parametern utgör bara en av flera parametrar som bestämmer en funktion och lämpligt värdeområde beror även på värdet av de andra parametrarna,
- parametern kan påverka flera funktioner och det är inte uppenbart att värdeområden som är lämpliga för en viss funktion också är lämpliga för andra funktioner,
- parametern påverkar en funktion som "bara" är ett önskemål enligt funktionstabellen.

Önskemål om värdeområden för parameter

I denna kolumn anges önskemål om värdeområden för parametern i fråga. Motiv för att ange önskemål istället för krav har redovisats ovan. Önskemålen ska ge vägledning om vad som behövs för att en funktions- eller säkerhetsanalys ska resultera i fullgoda förhållanden. Önskemålen kan därmed avse t ex värdeområden för parametern som resulterar i en önskad funktion, men behöver inte precisera gränsen till oacceptabel funktion eftersom en sådan gräns i många fall är relativ, okänd eller kan påverkas genom förvarsutformning.

Inför beslutet att påbörja detaljundersökning och ansöka om tillstånd för uppförande av djupförvar måste under alla förhållanden en integrerad säkerhetsanalys genomföras. Om

alla väsentliga önskemål uppfylls bör det i högsta grad vara sannolikt att denna analys visar att djupförvaret har fullgod säkerhet och att bygghanalysen visar god genomförbarhet.

Värdeområde i svensk kristallin berggrund

I de fall det finns allmän kunskap om parametrarnas värde eller värdeområde i svensk kristallin berggrund har detta dokumenterats. Värdeområden diskuteras för samtliga geovetenskapliga parametrar och inte enbart för de utvalda lämplighetsindikatorerna.

Användbarhet som lämplighetsindikator

Huvudsyftet med tabellen som helhet är att systematiskt utröna huruvida de geovetenskapliga parametrarna i något skede under lokaliseringsarbetet kan vara en tänkbar lämplighetsindikator. I pågående projekt är en geovetenskaplig parameter en användbar lämplighetsindikator om något av följande villkor är uppfyllt:

- ett direkt krav eller ett väsentligt önskemål har formulerats för parametern,
- eller
- parametern har förväntat stor inverkan på resultatet av en eller flera viktiga funktionsanalyser.

Parametern ska dessutom kunna bestämmas under förstudier eller platsundersökningar. En kort motivering, som bygger på ovanstående regler, finns med i tabellen för varje parameter, se bilaga B.

Kunskapsnivå vid olika lokaliserings- eller undersökningsskeden

Utifrån listan på tänkbara lokaliseringsfaktorer diskuteras nivån av kunskap som kan eller bör uppnås vid en förstudie, platsundersökning och detaljundersökning. Det är inte rimligt att utnämna en parameter till lämplighetsindikator om parametern inte kan mätas eller uppskattas på annat sätt.

För att kunna ange om en parameter är en användbar lämplighetsindikator, men framförallt för att kunna ange kriterier under och efter ett visst undersökningsskede, behövs kunskap om vilken precision som kan förväntas i parameterskattningen. Kunskapen om parametern ökar från förstudie (FS), platsundersökning (PLU) och detaljundersökning (DETU). Däremot varierar betydelsen av de olika undersökningssorgen starkt mellan olika parametrar. Givetvis kan även ambitionsnivån för de olika undersökningsskedena påverka i vilken utsträckning en parameter kan bestämmas.

Det är inte alltid möjligt att på ett enkelt sätt kvantifiera den förväntade precisionen. Däremot är det möjligt att kvalitativt diskutera precision, tabell 3-4 visar ett illustrerande exempel. En sådan kvalitativ diskussion är värdefull som underlag till vilka kriterier som kan kopplas till en viss parameter vid ett visst undersökningsskede. Utifrån information av detta slag kan man sedan bedöma när lämplighetsindikatorn blir tillämplig.

Kriterier

Beträffande kriterier se nästa avsnitt.

Tabell 3-4. Exempel på hur kunskap om en geovetenskaplig parameter förändras i olika skeden av lokaliseringsarbetet. Av parametrarna i tabellen är det endast topografi där full kunskap nås redan under en försstudie.

Geovetenskaplig parameter	Kunskap under förstudie (FS)	Kunskap under platsundersökning (PLU)	Kunskap under detaljundersökning (DETU)
TDS (Total salthalt)	Generisk	Platsspecifik information från djupa borrhål, tillräcklig för att karakterisera förvarsområdet.	Tillför eventuell ny kunskap om TDS i det lågpermeabla berget, men medför, å andra sidan, en risk för störningar.
Topografi	Full kunskap i regional skala	Full kunskap	Full kunskap
Läge, storlek, riktning för sprickzoner och sprickor	Regionala zoners läge vid markytan kan bedömas	Rimlig precision för regionala och lokala större sprickzoner. Stokastisk information om lokala mindre sprickzoner och sprickor (frekvens, orientering, storlek)	Hög precision för regionala och lokala större sprickzoner i förvarsområdet. Hygglig för lokala mindre. Stokastisk information om sprickor. Kunskap om sprickzoners och sprickors läge vid tunnlars.
Vattengenomsläpplighet för bergmassa	Generisk för vald geologi	Rumslig fördelning och medelvärden	Direkt kunskap nära tunnlars.

3.5 Kriterier

Kriterier formuleras för de parametrar som bedömts vara användbara som lämplighetsindikatorer. Kriterierna ska kunna användas för att bedöma om en plats uppfyller eller inte uppfyller ställda krav och i vilken utsträckning önskemål är uppfyllda. Framförallt inriktas kriterierna mot att se till att olämpliga platser utesluts, vilket överensstämmer med de generella rekommendationer som ges av IAEA /IAEA, 1994/. Den slutliga bedömningen om ett förvar vid en viss plats är säkert görs dock vid en samlad säkerhetsanalys. En samlad byggnadsanalys genomförs för att bedöma omfattning och konsekvenser av anläggningsarbetena. Kriterierna ger snarare vägledning om hur analysen kommer att utfalla. Kriterierna kan förändras under lokaliseringsarbetets gång eftersom informationen om platser förändras. Krav och önskemål förblir dock desamma.

3.5.1 Lokaliseringsskeden och kriterier

Kriterier formuleras för skedena inför platsundersökning och under platsundersökning. Kriterierna behöver kopplas till den information som finns tillgänglig vid det aktuella skedet av lokaliseringsarbetet och till den beslutssituation vid vilken de ska användas.

- Inför en platsundersökning är det viktigt att kunna utesluta klart olämpliga områden och att kunna peka ut områden som bör prioriteras för vidare undersökningar, dvs områden där prognosen är god att platsundersökningarna kommer att visa att berget har lämpliga egenskaper. Kriterier kan i detta skede inte göras alltför skarpa med tanke på den begränsade information som då finns om bergets egenskaper på djupet. Kriterierna ska användas för att välja lämpliga områden för platsundersökningar. En utvärdering huruvida alla krav och önskemål är uppfyllda får karaktären av en övergripande prognos.

- Under en platsundersökning måste man med stor säkerhet kunna visa om en plats är lämplig eller olämplig som djupförvarsplats. Vidare kan det bli meningsfullt att använda kriterier för att jämföra platser. När platsundersökningen är klar avgörs platsernas lämplighet i en samlade utvärderingen inom ramen för en samlad säkerhetsanalys och en samlad bygganalys. Under platsundersökningen ska plats-specifika data i relation till de redan tidigare specificerade kriterierna ge god vägledning om vad en sådan samlad analys förväntas resultera i.

Kriterierna baseras på betydelsen av de olika lämplighetsindikatorerna och en bedömning av precisionen i aktuell information. De tas fram för att användas som underlag vid SKB:s olika beslut inför och under platsundersökningen och för att tydliggöra beslutsunderlaget. De ersätter inte de samlade bedömningar som SKB, berörda myndigheter och andra beslutsfattare behöver göra.

3.5.2 Arbetet med att ta fram kriterier

Arbetet med att ta fram kriterier har utgått från alla identifierade lämplighetsindikatorer och inriktas i första hand på att kontrollera om en plats är lämplig eller olämplig. Utgående från bedömd informationsmängd och beslutssituation inför och under platsundersökningen analyseras de redan identifierade lämplighetsindikatorerna genom att följande frågor har ställts:

- Vilka preciserade och kvantifierade kriterier kan meningsfullt användas inför val av områden för platsundersökningar? Vilka är följderna av om kriterier inte uppfylls?
- Vilka preciserade och kvantifierade kriterier kan meningsfullt användas under platsundersökningarna och inför val av plats för detaljundersökningar? Vilka är följderna av om kriteriet inte uppfylls?
- Kan säkerhet eller teknisk lämplighet endast bedömas i termer av en plats-specifik funktionsanalys eller bygganalys? Vilken analys behöver i så fall göras och vilka är följderna av olika utfall av en sådan analys?
- Är det möjligt att ange om vissa utfall, inom det lämpliga området, av parameter-skattningar eller av funktionsanalyser är bättre än andra? Innebär dessa utfall en avsevärd förbättring av funktionen eller är förbättringen av underordnat intresse?

Exempel på ett kvantifierat kriterium kan vara ett intervall eller ett medianvärde med spridningsmått. Exempel på en funktionsanalys kan vara beräkning av grundvattenströmning eller retentionsförmåga. Exempel på följderna av att ett kriterium inte blir uppfyllt kan vara att platsen direkt bedöms som olämplig, men skulle också kunna vara att det då finns behov av en funktionsanalys, en sammanvägd säkerhetsanalys, en sammanvägd bygganalys eller bättre dataunderlag för att bedöma platsens lämplighet. En förändrad förvarsutformning kan också övervägas för att uppnå önskade säkerhetsfunktioner.

För vissa redan identifierade lämplighetsindikatorer, till exempel de som avser indikatorer på löst syre i grundvattnet på förvarsnivå, är det enkelt att ange tydliga kriterier. För andra indikatorer, som de som har att göra med bergets retentionsförmåga, är kriterierna mer komplexa eftersom de påverkar olika funktioner på olika sätt; de uppvisar betydande rumslig variabilitet och analys av fältdata innebär ofta ett omfattande modellarbete. Arbetet med att precisera kriterier kommer därför inte att leda fram till preciserade värdeintervall för samtliga lämplighetsindikatorer. Däremot ska det, för varje indikator,

klart framgå hur informationen tas om hand inom ramen för säkerhetsanalysen eller byggnalysen. För de fall där preciserade kriterier inte kan anges på parameternivå ska detta motiveras.

Begreppet kriterier belyses ytterligare i tabell 3-5 där möjliga kriterier vid olika skeden i processen att nå fram till ett djupförvar anges.

Tabell 3-5. Två exempel på relationen mellan krav, lämplighetsindikatorer, kunskapsnivå och kriterier. Krav avser verkliga förhållanden oberoende av lokaliseringsskede. Kriterier är en tillämpning av lämplighetsindikatorer i ett visst skede som underlag till beslut. De fullständiga kriterieformuleringarna presenteras senare i rapporten.

	Översiktsstudier	Förstudier	Platsundersökning	Detaljundersökning	Drift
Krav:	Inget löst syre i grundvatten på försvarsnivå				
Kunskap	Generisk	Generisk	Platsspecifik information från djupa borrhål, som är tillräcklig för att karakterisera försvarsområdet.	Tillför eventuell ny kunskap i det lågpermeabla berget, men medför, å andra sidan, en risk för störningar.	Tillför eventuell ny kunskap i det lågpermeabla berget, men medför, å andra sidan, en risk för störningar.
Lämplighetsindikatorer	–	–	Eh, [Fe ²⁺] och [HS ⁻] som indikatorer på frånvaro av löst syre.	–	–
Exempel på möjliga kriterier	Inga kriterier	Inga kriterier	Minst någon av indikatorerna låga Eh, förekomst av Fe ²⁺ eller förekomst av HS ⁻ ska vara uppfylld. Platsen måste annars överges.	–	–
Krav:	Deponeringshåll får ej skäras av sprickzoner				
Kunskap	Regionala zoners läge vid markytan kan bedömas	Regionala zoners läge vid markytan kan bedömas	Rimlig precision för regionala och lokala större sprickzoner. Stokastisk information om lokala mindre sprickzoner och sprickor (frekvens, orientering, storlek)	Hög precision för regionala och lokala större sprickzoner i försvarsområdet. Hygglig för lokala mindre. Stokastisk information om sprickor. Kunskap om sprickzoners och sprickors läge vid tunnlar.	Kunskap om samtliga sprickzoners läge vid deponeringshåll.
Lämplighetsindikatorer	Läge, orientering, längd, bredd av regionala sprickzoner.	Läge, orientering, längd, bredd av regionala sprickzoner och lokala större sprickzoner.	Läge, orientering, längd och bredd av sprickzoner och sprickor.	Läge, orientering, längd och bredd av sprickzoner och sprickor.	Läge, orientering, längd och bredd av sprickzoner och sprickor.
Exempel på möjliga kriterier	Stora homogena områden med stort avstånd mellan regionala sprickzoner är av intresse för fortsatta studier.	Fortsatta studier lämpliga i områden med så stora avstånd mellan tolkade regionala sprickzoner att de rymmer ett förvar.	Revidera utformning efter ny kunskap. Om förvaret ej ryms (blir uppdelat i ett mycket stort antal delar) bör annan plats väljas.	Olämpligt läge för deponeringstunnlar kan undvikas.	Direkt kontroll av kravet möjlig. Olämpliga positioner för deponeringshåll kan undvikas.

Notera att kriterier i vissa skeden även kan baseras på lämplighetsindikatorer som inte varit föremål för krav. Det gäller exempelvis önskemål beträffande bergets värmeledningsförmåga. God värmeledningsförmåga är fördelaktigt och denna lämplighetsindikator kan därför vara en grund för ett kriterium i tidiga lokaliseringsskeden. Uppfyllt önskemål leder, bland annat, till lägre kostnader genom att förvaret kan göras mindre. Om önskemålet inte är uppfyllt kan dock detta kompenseras med att förvarsutformningen förändras så att det övergripande kravet på säkerhet ändå uppfylls (låg värmeledningsförmåga kompenseras genom större avstånd mellan kapslarna i djupförvaret).

3.5.3 Jämförelse mellan platser?

Det är bara i vissa fall som kriterierna direkt kan användas till att jämföra platser. Om kraven inte är uppfyllda på en plats, men är det på en annan är det ju uppenbart att bara den senare platsen kan komma ifråga för fortsatta studier. För att jämföra platser där både alla krav och ett flertal önskemål uppfylls blir den sammanvägda jämförelsen mer komplex. Vid den sammanvägda bedömningen av om en plats är lämplig utgör miljökonsekvensbeskrivningen, en samlad säkerhetsanalys och en samlad bygganalys väsentliga underlag, se kapitel 2. Att ersätta den sammanvägda bedömningen med enklare metoder, som t ex viktningspoäng på olika parametrar skulle kunna leda till grov förenkling av säkerhets- och bygganalysen och risken är stor att "poängmetoder" skulle kunna leda till missvisande resultat. De i rapporten presenterade kriterierna ska dock ge god vägledning om hur de sammanvägda analyserna kommer att utfalla.

- Vissa kriterier, kopplade till krav, är så skarpa att platsen måste överges eller förvarskonceptet väsentligt förändras om kriterierna inte uppfylls.
- Om en plats har många egenskaper som enligt kriterierna ligger inom de gynnsamma värdeområdena är detta en stor fördel eftersom det då är mycket troligt att säkerhetsanalysen kommer att visa att säkerhet kan uppnås med bred marginal till satta säkerhetsmål.
- Det finns ingen anledning att rangordna platser ur säkerhetssynpunkt om säkerhetsanalysen visar att säkerhetsmålen kan nås med en rimligt bred marginal på dessa platser. En vidare jämförelse av hur platserna uppfyller säkerhetsrelaterade kriterier är därvid inte meningsfullt.

Det förtjänar att understrykas att det är principiellt omöjligt att ta fram kriterier som leder till den "bästa platsen". Givetvis ska alla tänkbara krav tillgodoses och en plats som har många fördelaktiga egenskaper är troligen "bättre" än en plats med få fördelaktiga egenskaper. Vad som är bäst i absolut mening är dock inte självklart eftersom många olika uppsättningar av parametervärden kan leda till samma funktion. När man jämför olika platser är det också helt nödvändigt att beakta att de flesta av bergets egenskaper varierar kraftigt i rummet och att de bara kan bestämmas med en viss precision. Efter ett urval, enligt ovan, av lämpliga platser i den svenska kristallina berggrunden kommer det med stor sannolikhet att visa sig att eventuella skillnader mellan de lämpliga platserna inte påverkar funktionen i nämnvärd grad. Vidare kommer skillnaden i många egenskaper knappast att vara statistiskt signifikant.

4 Geologi

4.1 Geologiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion

Beskrivningen av ett områdes geologi kan i stort delas upp i en beskrivning av jordarter, bergarter och bergets deformationszoner. Geologin bestämmer områdets mekaniska, termiska, hydrauliska och kemiska egenskaper. Den geologiska informationen om en plats används i första hand som underlag för att bestämma dessa egenskaper, men det finns viss geologisk information som direkt inverkar på djupförvarets funktion. Det är dessa, senare, förhållanden som diskuteras i detta kapitel. Inverkan på funktionen och tillhörande krav och önskemål sammanfattas i tabell A.1 i bilaga A.

4.1.1 Inverkan på kapselns integritet

För att trygga kapselns mekaniska stabilitet behövs stabila geologiska förhållanden. Det valda djupförvarskonceptet med placering i urberg uppfyller generellt detta önskemål. Mer specifika krav och önskemål härleds främst från resonemang om bergets mekaniska, termiska, hydrauliska och kemiska egenskaper och diskuteras därför först i följande kapitel (kapitel 5–9). För att aktivt se till att djupförvaret förläggs till särskilt stabila områden i berget ska förvaret placeras så att förvarstunnlarna i möjligaste mån undviker större deformationszoner i berget. Deformationszonerna indikerar att omvandlingar eller rörelser har skett någon gång under den geologiska utvecklingshistorien. Zonerna har oftast försämrade hållfasthet och förhöjd vattengenomsläpplighet.

För att erhålla en enhetlig terminologi, som utan missförstånd ska kunna förstås av olika ämnesföreträdare, använder SKB begreppen ”plastiska skjuvzoner”, respektive ”sprickzoner” för att beteckna zoner där deformationen varit plastisk respektive spröd. Avsnitten 4.5 och 4.6 ger striktare definitioner av begreppen, liksom en analys av vilka krav och önskemål som kan ställas beträffande djupförvarets placering i förhållande till olika typer av deformationszoner.

4.1.2 Inverkan på buffertens isolerande förmåga

Det är önskvärt med stabila geologiska förhållanden även för att bufferten ska kunna behålla sin isolerande och tätande förmåga. Krav och önskemål på de geologiska förhållandena liknar de som kan härledas från krav och önskemål på hur kapselns funktion ska kunna tillgodoses (se ovan). Inga ytterligare krav och önskemål tillkommer. De mer specifika kraven och önskemålen på bergets mekaniska, termiska, hydrauliska och kemiska egenskaper tillkommer dock, (se kapitel 5–9).

4.1.3 Inverkan på bergets isolerande och fördröjande förmåga

Djupförvarets isolering skulle kunna brytas om det i framtiden bedrivs annan underjordsverksamhet på stora djup i förvarsområdet. Betydelsen av ”intrång” behandlas i SR 97. Minsta acceptabla avstånd beror på omfattningen av verksamheten. Sannolikheten för framtida underjordsverksamhet bedöms vara kopplad till malmpotential, förekomst av

värdefulla mineral, förekomst av ovanliga bergarter och bedömning av andra konkurrerande intressen. Krav och önskemål kan därmed kopplas till områdets bergartfördelning (se avsnitt 4.4).

För att bergets ska ha god och förutsägbar retentionsförmåga är det önskvärt med stabila och homogena geologiska förhållanden. Krav och önskemål på de geologiska förhållandena liknar de som kan härledas från krav och önskemål på hur kapselns funktion ska kunna tillgodoses (se ovan). Inga ytterligare krav och önskemål tillkommer. De mer specifika kraven och önskemålen på bergets mekaniska, termiska, hydrauliska och kemiska egenskaper tillkommer dock, (se kapitel 5–9).

4.1.4 Biosfärsfrågor

Biosfärsfrågorna behandlas samlat i avsnitt 7.5.

4.1.5 Anläggningsfrågor

För bergprojekteringen och byggande av anläggningen gäller följande:

- arbetsmiljön ska vara säker,
- miljöpåverkan från undersökningar och från anläggningsbygget ska begränsas och hållas inom acceptabla nivåer,
- anläggningsbygget ska enbart ge begränsad och övergående påverkan på djupförvarets säkerhetsfunktioner och bygge och deponering ska kunna pågå parallellt,
- det finns önskemål om att anläggningsarbetena kan utföras med få avbrott och med liten insats av extraordinära förstärknings- och tätningsinsatser (god byggharhet),
- för att underlätta undersökningar, bygge och drift finns det ett önskemål om att deponeringsområdet inte behöver delas upp i ett mycket stort antal delområden och att det är möjligt att placera deponeringstunnlar på ett flexibelt sätt.

Förvarets utformning styrs till stor del av den geologiska informationen. Den av SKB valda metodiken att utforma förvaret så att deponeringstunnlarna i möjligaste mån undviker större deformationszoner i berget (se avsnitt 4.5 och 4.6), underlättar även möjligheterna att uppnå ovan ställda krav och önskemål. Mer specifika anläggnings-tekniska frågeställningar diskuteras i kommande kapitel, främst i kapitel 5 (bergmekanik) och i kapitel 7 (hydrogeologi).

4.2 Topografi

4.2.1 Beskrivning av parameter och dess inverkan på funktioner

Topografi inklusive annan geodetisk information utgör väsentlig grundinformation om en plats.

Detaljerad topografisk information utnyttjas för att identifiera sprickzoner i olika skalor. Informationen är därför indirekt av väsentlig betydelse för att bedöma bergets isolerande egenskaper och grundvattenströmningen i berget.

I regional skala antas ofta topografin ge randvillkor för grundvattenströmningen i förvarsområdet (se vidare avsnitt 7.6). Även havets och sjöars botten-topografi har betydelse för att kunna bedöma inverkan av havsnivåförändringar. Topografin påverkar den yt-nära vattenomsättningen och har därför stor betydelse för förhållanden i biosfären. Sjöars och vattendrags botten-topografi behövs vid bestämning av volymer i biosfärs-modeller och vid bedömning om framtida förändringar.

4.2.2 Krav och önskemål

Ur hydrogeologisk synpunkt är det önskvärt med en liten regional topografisk gradient eftersom denna begränsar storleken på den hydrauliska gradienten. Detta önskemål behandlas vidare under avsnittet hydrogeologi (7.6).

4.2.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Enligt FUD-Program 95 /SKB, 1995a/ ligger den topografiska gradienten vanligen inom intervallet 0,1–1 % i regional skala. Högre värden förekommer främst inom fjällkedjan.

Topografisk information kan rekvireras från Lantmäteriverket. I samband med en plats-undersökning behöver dock denna kompletteras för att öka detaljeringsgraden. Detta gäller även botten-topografi för sjöar, vattendrag och eventuellt berörda havsområden.

4.2.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Topografin utgör i huvudsak grundinformation för den allmänna geovetenskapliga beskrivningen och kan därför inte i sig utgöra en användbar lämplighetsindikator.

4.3 Jordarter

4.3.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Med jordarter menas lösa avlagringar som bildar jordtäckets ovanpå berggrunden. Även lösa avlagringar på sjö- och havsbotten räknas till jordtäckets i detta sammanhang. Jordmånen är den översta delen av jordtäckets som har förändrats av klimatets, vegetationens, faunans och människans påverkan.

Generellt sett har jordtäckets begränsad betydelse för djupförvarets isolerande och fördröjande funktioner. De viktigaste funktionerna är att jordtäckets bidrar till syrefria förhållanden i den ytliga berggrunden (genom bakteriell reduktion) samt att torvmossar liksom sediment på sjö- och havsbotten (främst leror) kan absorbera radionuklider. Jordtäckets mäktighet liksom eventuell förekomst av botten-sediment påverkar även randvillkoren för grundvattenströmningen i berget, men inverkan är av begränsad och indirekt betydelse. Studier av jordtäckets kan ge indikationer på postglaciala rörelser (neotektonik). Indikationerna kan vara strandlinjeförskjutningar eller indikationer på förekomst av seismiter (jordarter som visar tydliga tecken på att de vid något tidigare tillfälle mist sin bärighet). Det är väsentligt att kartlägga om postglaciala rörelser kan ha förekommit i ett område. Om det finns indikationer på sådana rörelser påverkar detta bedömningen av områdets långsiktiga mekaniska stabilitet.

Jordtäcket egenskaper ingår i säkerhetsanalysens beskrivning av spridningen av radionuklider i biosfären (se t ex SR 97 Huvudrapporten, avsnitt 9.9 /SKB, 1999a/). Jordtäcket påverkar den yttnära transporten, framför allt genom dess förmåga att absorbera, och ackumulera, radionuklider. Den samlade doskonsekvensen beror dock på flera olika faktorer och bestäms framförallt av om det överhuvudtaget förekommer utsläpp till biosfären. Det är nödvändigt att känna till jordtäcket egenskaper för att kunna genomföra analysen, men biosfären har ingen säkerhetsfunktion (se kapitel 2) och det finns därmed ingen grund att ställa krav eller önskemål på jordtäcket egenskaper från denna utgångspunkt.

Vid genomförandet av en platsundersökning begränsar jordtäcket möjligheten att från markytan kartlägga förhållanden i den underliggande berggrunden. Jordtäcket mäktighet och jordartsfördelningen är också av betydelse för förvarsutformning vid projektering. Bland annat kan tunnelpåslag bli mer komplicerade att utföra vid mäktiga jordlager. Detta kan påverka ekonomin, men har ingen betydelse ur säkerhetssynpunkt.

4.3.2 Krav och önskemål

Det finns inga krav kopplade till jordarter eller till jordtäcket mäktighet.

Däremot finns det flera önskemål om förhållanden som förenklar platsundersökningarna. Dessa är att det ska finnas en hög andel berg i dagen och i övrigt måttligt jorddjup (helst mindre än cirka 10 m) eftersom detta underlättar möjligheten att från markytan kartlägga förhållanden i den underliggande berggrunden. Det är vidare en fördel att undvika storblockig och vattensjuk terräng, lerområden och utpräglade jordbruksmarker.

4.3.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Jordartsförhållandena varierar mycket i Sverige. Den dominerande jordarten i Sverige är morän (cirka 75 %). Vidare förekommer glacifluviala och alluviala sediment. Finsedimenten har olika ursprung och kan vara glaciala, postglaciala och marina. Jordtäcket visar ej sällan tecken på att svallningsprocesser har ägt rum. Dock gäller att ovan ställda önskemål uppfylls på ett mycket stort antal platser. Erfarenheterna från typområdesundersökningarna är att omfattande och mäktiga jordtäcken innebär svårigheter i det fortsatta tolkningsarbetet.

En förstudie ger vanligtvis en översiktlig bra bild om förekommande jordarter och deras mäktigheter. En detaljerad bild erhålls vid platsundersökningar.

4.3.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Jordartsinformationen kan ha viss betydelse för val mellan platser i skedet inför en platsundersökning. Speciella kriterier under platsundersökningen behövs inte.

4.4 Bergarter

4.4.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

I den fasta jordskorpan bildar kombinationer av grundämnen olika mineral. Ett relativt fåtal av dessa mineral utgör huvudbeståndsdelar i våra vanligaste bergarter. Större delen av Sverige består av vad som i dagligt tal kallas urberg. Med detta menas mer än 600 miljoner år gamla kristallina bergarter, som exempelvis granit, gabbro och gnejs.

Indelningsgrunden för bergarter är komplex. Till exempel avser beteckningen "granit" en bergart av en viss mineralsammansättning, medan "gnejs" är en strukturell term. Härav följer att en gnejs mycket väl kan ha en granitisk sammansättning. Krav och önskemål beträffande bergarter ställs utifrån deras egenskaper och sammansättning. I varje specifikt fall av en platsundersökning definieras där använda beteckningar på bergarterna och vilka mineralsammansättningar som gäller för dessa bergarter.

Bergarternas betydelse för ett djupförvar ligger främst i att de har olika termiska och mekaniska egenskaper (värmeledningsförmåga, hållfasthet, styvhet m m). Dessa påverkar i sin tur byggbarheten samt den termomekaniska påverkan från det uppvärmda förvaret inklusive hur värmen sprider sig. Indirekt information om bergets hållfasthet ges ofta från parametrar som har att göra med bergarternas kornstorlek, mineralsammansättning, och mineralogisk omvandling/vittring. Krav och önskemål på bergarter ur dessa perspektiv diskuteras i kapitel 5 (bergmekanik) och kapitel 6 (termiska egenskaper).

Skillnader i bergarters hållfasthet, struktur och geologisk historia har medfört olika spricksystem i olika bergarter. Exempelvis uppvisar graniter ofta ett regelbundet spricksystem medan sprickorna i gnejser ofta är styrda av bergartens struktur. Generellt sett utgör bergartsgränser, som till exempel gränsen mellan gångbergart (t ex diabas) och sidoberg, potentiella svaghetszoner i berget. Detta beror på att bergarternas olika fysikaliska egenskaper också påverkar förmågan till deformation i olika grad. Det blir därför lättare att beskriva berget om berggrunden är homogen med få bergarter.

Spricksystemet påverkar i sin tur andra parametrar som har att göra med bergmassans hållfasthet och grundvattenflödet genom bergmassan. Förutom variation mellan bergarter varierar sprickbildningen inom samma bergart och mellan olika delar av bergmassan. Krav och önskemål på sprickornas mekaniska och hydrauliska egenskaper diskuteras i kapitel 5 (bergmekanik) och kapitel 7 (hydrogeologi).

Bergarterna påverkar även grundvattnets sammansättning. Genom oxidation av mineralerna förbrukas syret hos nedträngande grundvatten (se kapitel 8). Mineralen kan även kontrollera pH, Eh och andra kemiska parametrar som karbonathalten genom olika buffringsreaktioner. Skillnaden i bergartssammansättning i det kristallina svenska urberget ger dock ingen anledning att ställa speciella krav eller önskemål på bergartssammansättningen ur denna aspekt.

Sorption på sprickmineral kan begränsa rörligheten av radionuklider i bergmassan, men inverkan är begränsad. I SR 97 antas pessimistiskt att transporten av radionuklider inte fördröjs genom sorption i sprickmineral. Därmed finns ingen grund för att ställa krav eller önskemål om sprickmineral. Kunskap om sprickmineral är dock väsentlig för att bygga upp en geovetenskaplig förståelse av platsen.



Figur 4-1. Bergarterna inom förvarets deponeringsområde får inte ha malmpotential dvs utgöras av så värdefulla mineral att det skulle kunna motivera brytning på hundratals meters djup. Vidare gäller att en inhomogen berggrund kräver större undersökningsinsatser med fler borrhål än en homogen.

Vissa bergarter är intressanta som naturresurser. Det kan till exempel vara sura vulkaniter som i många regioner är malmförande och därmed olämpliga för ett djupförvar. Andra bergarter kan vara intressanta för industrimineralutvinning eller som nyttosten. Eftersom det kan vara svårt att förutspå vilken användning olika bergarter kan ha i framtiden är det en fördel om ett djupförvar lokaliseras till vanligt förekommande bergarter, främst granit och gnejs.

Mycket höga halter av uranhaltiga mineral kan innebära speciellt stora krav på ventilationsåtgärder i förvarsanläggning för att hålla radonhalten på tillräckligt låg nivå.

4.4.2 Krav och önskemål

Det är ett krav att bergarterna inom deponeringsområdet inte har malmpotential, se figur 4-1, eller utgörs av så värdefulla mineral att det skulle kunna motivera brytning på hundratals meters djup.

Eftersom det kan vara svårt att förutspå vilken användning olika bergarter kan ha i framtiden är det önskvärt att ett djupförvar lokaliserar till vanligt förekommande bergarter. Vidare är det önskvärt att berggrunden är homogen med få bergarter, eftersom detta förenklar beräkningar och prognoser av termiska, mekaniska, kemiska och hydrauliska förhållanden i förvarsområdet. För mer specifika krav ur dessa perspektiv, se kap 5 och 6.

Det är en fördel om berget innehåller få mineral som avger radon, men en fullgod arbetsmiljö kan alltid uppnås genom olika ventilationsåtgärder.

4.4.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Informationen om bergartsfördelningen i Sverige finns sammanställd på geologiska kartor utgivna av Sveriges geologiska undersökning (SGU). Informationen kompletteras i samband regionala översiktstudier /t ex Stephens och Johansson, 1999ab/.

Kunskapen om huvudbergarter i den ytliga berggrunden är vanligen god redan under en förstudie. Detaljerad kunskap om bergartsfördelning på större djup erhålles under platsundersökningarna.

4.4.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Bergartsfördelningen är en viktig lämplighetsindikator bland annat för att bedöma kravet att förvarsområdet inte ska ha potential för förekomst av malm eller industrimineral. Bergartsfördelningen används även för att bedöma vissa mekaniska och termiska lämplighetsindikatorer (se kapitel 5 och 6).

Ovan ställda krav och önskemål kan tillgodoses på ett stort antal platser i Sverige. Inom de regionala översiktstudierna /t ex Stephens och Johansson, 1999ab/ anges områden som i regionalskala kan anses som potentiellt lämpliga respektive potentiellt olämpliga ur bland annat denna synpunkt. Mer detaljerad kunskap finns inom förstudiekommunerna. Efter genomförd förstudie görs fortsatta studier och undersökningar enbart av områden som inte bedömts ha potential för förekomst av malm eller värdefulla industrimineral och som bedömts vara homogena och bestå av vanligt förekommande bergarter.

Samma kriterier används under platsundersökningen med den skillnaden att prognosen av bergartsfördelningen nu innehåller färre osäkerheter. Detta tillåter en mer lokal anpassning av förvaret. Om omfattande förekomst av malmförande mineral eller värdefulla industrimineral påträffas bör platsen överges.

4.5 Strukturgeologi – plastiska skjuvzoner

4.5.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Berggrunden har under årmiljonernas lopp utsatts för krafter och temperaturer som delvis har smält och deformationerat densamma. Deformation och omvandling har skett under vissa perioder, som varit åtskilda av andra betydligt längre perioder med mycket lugnare geologiska förhållanden. Utvecklingsförloppet har varit tämligen komplext och uppvisar regionala skillnader /Larsson och Tullborg, 1993/.

Deformationen har skapat s k deformationszoner i berget. En deformationszon är en svaghetszon i berggrunden i vilken deformationen är betydligt kraftigare än i omgivande bergmassa. Deformationen kan ha varit plastisk (se nedan) eller spröd (se 4.6). För en mer utförlig diskussion, se /Bergman m fl, 1999/.

Om temperaturen och trycket varit tillräckligt höga har deformationen skett plastiskt, dvs utan spröda brott. En stor del av den äldre berggrunden i Sverige deformationerades plastiskt för mellan 1 och 2 miljarder år sedan. Den låg då på stort djup i jordskorpan, upp till flera tiotal km, med temperaturer upp till 500–600 °C eller mer. Som ett resultat av deformationerna veckades berggrunden och olika linjär- och planstrukturer (veckaxlar, skiffrighet, ådring) bildades. Deformationen har även resulterat i uthålliga plastiska skjuvzoner, som kan innehålla bergarten mylonit.

Om ett område klassificeras som en regional plastisk skjuvzon visar detta att området utsatts för stråkvis kraftig deformation, som i sin tur kan ha gett upphov till heterogen berggrund. Sådana stråk kan utgöra svaghetszoner i berggrunden där reaktivering under spröda förhållanden gett upphov till vattenförande sprickzoner och kan vara förknippade med nedsatt mekanisk hållfasthet.

4.5.2 Krav och önskemål

Vid val av områden för platsundersökningar finns krav om att regionala plastiska skjuvzoner undviks, om det inte kan visas att zonens egenskaper inte avviker från berget i övrigt. I närheten av regionala plastiska skjuvzoner kan det dock finnas s k tektoniska linser /SKB, 1997/, där berggrunden är homogen och relativt opåverkad. Det finns inget hinder att förlägga djupförvaret inom sådana linser, förutsatt att de är tillräckligt stora och att berget där i övrigt har lämpliga egenskaper.

Se för övrigt krav och önskemål för sprickzoner.

4.5.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Kunskap om förekomsten av plastiska skjuvzoner erhålls redan vid de regionala översiktsstudierna (t ex /Stephens och Johansson, 1999ab/) och inom förstudier (t ex Östhammar /SKB, 1997/). Plastiska skjuvzoner identifieras i regel med fjärranalys (t ex flygmagnetiska mätningar, satellitbilder m m) kombinerat med data om planstrukturer (gnejsighet, skiffrighet) i berggrunden. Tolkade zoner kontrolleras med geologisk fältkartering. Framförallt i områden med stor andel berg i dagen är kunskap om vertikala plastiska skjuvzoner god redan under en förstudie, medan det saknas möjligheter att finna subhorisontella zoner. I jordtäckta områden är informationen sämre, men ofta kan tillfredställande kunskap erhållas från flygmagnetiska mätningar och från den regionala geologiska bilden. Under platsundersökningar bör det vara möjligt att nå god kunskap om de plastiska skjuvzonerna.

4.5.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Diskussionen ovan visar att information om plastiska skjuvzoner är en användbar geovetenskaplig lämplighetsindikator.

Under förstudien anpassas undersökningsområdet så att regionala plastiska skjuvzoner undviks. Om tillräcklig förvarsvolym inte kan erhållas på kvarvarande område är platsen olämplig.

Den ökade kunskap som erhållits vid platsundersökningen, beträffande läget för de plastiska skjuvzonerna och beträffande skjuvzonernas egenskaper används vid framtagande av platsanpassad berggrumslayout. Om förvaret ej kan inplaceras på ett rimligt sätt, dvs skulle behöva delas upp i ett mycket stort antal delar, måste annan plats väljas.

4.6 Strukturgeologi – Sprickzoner och sprickor

4.6.1 Beskrivning av parameter och deras inverkan på funktioner

Med sprickzoner avses deformationszoner där deformationen varit av spröd karaktär, dvs en mekanisk uppsprickning av bergarterna. Sådana deformationer har skett högre upp i jordskorpan där temperaturen och trycken är lägre än vad som är fallet för plastisk deformation. Sprickzoner har i regel lägre mekanisk hållfasthet och högre vattengenomsläpplighet än berget i övrigt. Förekomst av sprickzoner har därför direkt betydelse för den bergmekaniska (kapitel 5) och hydrogeologiska (kapitel 7) beskrivningen av en plats.

Indelningen mellan spröda och plastiska deformationszoner kan inte göras helt strikt eftersom det finns övergångsformer. Vidare förekommer olika benämningar på olika typer av deformationszoner. En förkastning är en sprickzon längs vilken rörelser skett längs med zonen. Termen lineament används för en ospecificerad, topografiskt och/eller geofysiskt framträdande linjär (långsträckt) struktur i landskapet. Terminologin är inte heller enhetlig inom olika teknikområden. Ord som struktur, svaghetszoner eller diskontinuitet används ofta för att beteckna sprickzoner. För att erhålla en enhetlig terminologi, som utan missförstånd ska kunna förstås av olika ämnesföreträdare, använder SKB samlingsbegreppet sprickzoner för att beteckna alla olika typer av deformationszoner där deformationen varit av spröd karaktär. Om det bara finns indirekt information om förekomsten av en sprickzon, exempelvis en dalgång eller en geofysisk anomali, använder SKB begreppen lineament eller tolkad sprickzon.

SKB har vidare valt att indela sprickzoner efter längd (storlek) och använder beteckningarna regionala sprickzoner, lokala större sprickzoner, lokala mindre sprickzoner samt sprickor (se tabell 4-1). Sprickzonernas ofta komplexa uppbyggnad och geometri medför att gränserna används något flytande beroende på skalan eller undersökningens syfte. Regionala sprickzoner och större lokala sprickzoner kan ofta bestämmas deterministiskt. Med detta menas att sprickzonernas lägen kan fastslås under platsundersökningarna. För mindre lokala sprickzoner och sprickor är detta inte möjligt i hela den bergmassa som omger ett förvar. I stället används statistiska beskrivningar av deras lägen och egenskaper. För regionala grundvattenmodeller är man oftast hänvisad till tolkade sprickzoner.

Tabell 4-1. Indelning och benämning av berggrundens spröda strukturer samt ambitionsnivå för beskrivning vid platsundersökning (angivna längd- och breddmått är ungefärliga).

Benämning	Längd	Bredd	Ambition för beskrivning
Regionala sprickzoner	> 10 km	> 100 m	Deterministisk
Lokala större sprickzoner	1–10 km	5–100 m	Deterministisk (med osäkerheter)
Lokala mindre sprickzoner	10 m–1 km	0,1–5 m	Statistisk (vissa deterministiskt)
Sprickor	< 10 m	< 0,1 m	Statistisk

Längdindelningen ger i sig inte grund för att sprickzoner av olika storlek skulle ha olika egenskaper. För att karakterisera en sprickzon behövs information om dess läge, orientering, längd och bredd, men också om dess egenskaper. Sprickzonernas och sprickornas mekaniska och hydrauliska egenskaper diskuteras vidare i avsnitten 5.2 respektive 7.2. De regionala och lokala större sprickzonerna har ofta utbildats i anslutning till primära plastiska zoner. De karakteriseras vanligen av kraftig förskiffring med stor sprickfrekvens eller med lokalt krossade, i bland leromvandlade, avsnitt. Ur mekanisk synpunkt kan man generellt förvänta sig större framtida deformationer i stora (långa) sprickzoner än i små (korta) (SR 97, Processrapporten /SKB, 1999b/). Stora sprickzoner är vidare oftast mer vattengenomsläppliga än det omgivande berget, men det förekommer enskilda sprickor som är väl så vattenförande som större sprickzoner.

Information om sprickzoner och sprickor används direkt vid framtagande av layout för djupförvaret. Arbetet sker i steg. Under platsundersökningen bestäms korridorer för tillfarts- och transporttunnlar och volymer för deponeringsområdet. Deponeringstunnlarnas riktning bestäms. En detaljerad utformning i termer av t ex exakta koordinater för varje deponeringshål behöver dock inte föreligga förrän deponeringstunnlarnas exakt lägen bestämts. Detta sker först under detaljundersökningsskedet eller under förvarsutbyggnaden.

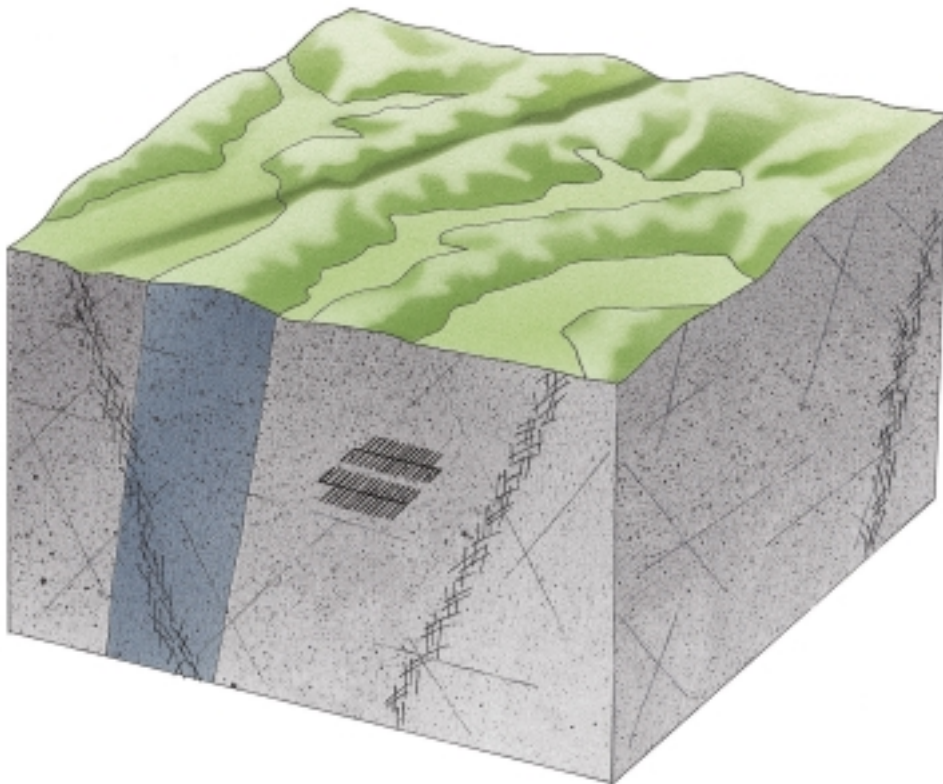
I kommande arbeten kommer SKB att ta hänsyn till den detaljerade information om enskilda sprickor och mindre sprickzoner som kan erhållas vid undersökningar direkt från tillredning av undersöknings-, transport- och förvarstunnlar, för att successivt förfinas förvarets utformning och placering av enskilda deponeringshål. I hittills genomförda säkerhetsanalyser (t ex SR 97) tillgodoräknas inte denna möjlighet till ytterligare förbättrad förvarsutformning genom detaljanpassning av layouten till de aktuella förhållandena.

4.6.2 Krav och önskemål

För att undvika att deponeringshål placeras i områden där det finns hög risk för kommande deformationer och hög vattengenomsläpplighet är det ett krav att deponeringstunnlar och deponeringshål inte passerar eller placeras för nära regionala och lokala större sprickzoner, se figur 4-2. Kravet gäller inte sprickzoner som visats vara mekaniskt och hydrauliskt lika det omgivande berget. Kraven gäller inte tillfartstunnlar och transporttunnlar.

Det är ett krav att deponeringshål inte korsar identifierade lokala mindre sprickzoner. Det är därför önskvärt med måttlig sprickdensitet (sprickyta per volym) av sprickor och av lokala mindre sprickzoner.

Det är inte möjligt att generellt ange krav på det minsta avstånd som kan accepteras mellan deponeringstunnlar och regionala eller lokala större sprickzoner. Grundvattenströmningen genom förvaret och förvarets mekaniska stabilitet beror på sprickzonens och det omgivande bergets egenskaper och den mekaniska och hydrogeologiska funktionen behöver därmed alltid utvärderas för gjord layout. Under framtagandet av olika layouter av förvaret kommer dock SKB att använda s k "respektavstånd" mellan deponeringstunnlar och identifierade regionala och lokala större sprickzoner. Respektavstånden sammansätts dels av ett avstånd som bedömts utgöra ett lämpligt minsta avstånd mellan tunnel och sprickzon och dels av en säkerhetsmarginal som kompenserar för att sprickzonernas läge inte är fullständigt känt. Bedömningen av vad som är ett minsta lämpligt avstånd mellan tunnel och sprickzon liksom storleken av den säkerhetsmarginal som behövs för att hantera osäkerheten i sprickzonernas läge beror på graden av kunskap om berget och har därmed i sig mer karaktären av kriterier än fasta krav och önskemål. Tänkbar storlek på respektavstånden diskuteras därför under rubriken kriterier nedan. Ansatta respektavstånd kommer att användas i samband med den stegvisa platsundersökningen och projekteringen (se nedan). Men de verkliga avstånd som behövs fastställs genom en platsspecifik funktionsanalys.



Figur 4-2. Deformation under årmiljoners lopp har skapat deformationszoner i berget. En deformationszon är en svaghetszon i berggrunden i vilken deformationen är betydligt kraftigare än i omgivande bergmassa. Deformationen kan ha varit plastisk eller spröd (sprickzoner). Det är ett krav att deponeringstunnlar och deponeringshål inte passerar eller placeras för nära regionala och lokala större sprickzoner.

4.6.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Förekomsten av regionala och lokala större sprickzoner är kartlagt med varierande noggrannhet i olika delar av landet. Mer riktade studier görs i samband med regionala översiktsstudier /t ex Stephens och Johansson, 1999ab/. Sprickzoner för de platser som analyseras i SR 97 redovisas av Rhén m fl (1997), Andersson m fl (1991) respektive Hermanson m fl (1997). Saksa och Nummela (1998) diskuterar osäkerheterna i dessa beskrivningar.

Det material som finns tillgängligt vid en förstudie ger möjlighet för en preliminär identifiering av regionala sprickzoner. Prognosen förbättras om blottningsgraden är hög (se avsnitt 4.3.4).

Tolkade zoner kontrolleras med geologisk fältkartering. Framför allt i områden med stor andel berg i dagen är kunskap om vertikala regionala sprickzoner god redan under en förstudie, medan det saknas möjligheter att finna subhorisontella zoner. I jordtäckta områden är informationen sämre, men ofta kan tillfredsställande kunskap erhållas från flygmagnetiska mätningar och från den regionala geologiska bilden.

Vid platsundersökningar är ambitionsnivån att beskriva alla regionala och lokala sprickzoner deterministiskt medan lokala mindre sprickzoner och enskilda sprickor normalt endast kan beskrivas statistiskt. Sannolikheten för att det ska finnas oupptäckta större sprickzoner inom området behöver också uppskattas.

4.6.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Information om sprickzoner och diskreta sprickor utgör viktiga lämplighetsindikatorer.

Under en förstudie väljs tänkbara områden för fortsatta undersökningar så att ett djupförvar med god marginal kan inplaceras med hänsyn till de sprickzoner som identifierats vid förstudien. Även om detta (nästan) alltid kan uppnås genom att dela upp förvarets utformning i olika delar är det uppenbarligen önskvärt att förvaret inte behöver delas upp i alltför många delar. Tillgängliga data får inte indikera att sprickzonerna ligger så tätt att ett förvar skulle behöva delas upp på ett orimligt stort antal delar. Möjliga undersökningsområden får bara genomkorsas av ett fåtal regionala sprickzoner.

Under platsundersökningen anpassas det tänkta förvaret till de då identifierade zonerna. Lämpliga respektavstånd till identifierade regionala och lokala större sprickzoner kan bara bestämmas platsspecifikt men antas utgöra åtminstone flera tiotals meter till lokala större zoner och minst 100 meter till regionala zoner. Information om zonernas samt intilliggande bergmassas mekaniska och hydrauliska (vattengenomsläpplighet) egenskaper tillgodogörs. Beroende på sprickzonernas och bergmassans egenskaper kan detta innebära att avståndet till vissa zoner kan behöva ökas, medan avståndet till andra zoner kan behöva minska. De ovan angivna riktvärdena för respektavstånd kommer dock att användas i det inledande layoutarbetet. Om förvaret måste delas upp i ett mycket stort antal olika delar är platsen inte lämplig för ett djupförvar.

Vidare bör noteras att information om sprickzoner och enskilda sprickor utgör väsentligt underlag för analys av platsens bergmekaniska (se 5.4) och hydrogeologiska (7.2) förhållanden.

4.7 Sammanfattning lämplighetsindikatorer – geologi

Föregående avsnitt har redovisat vilka geologiska lämplighetsindikatorer som kan komma i fråga i olika skeden av lokaliseringsarbetet. Den kompletta redovisningen av arbetet återfinns i tabellerna A-1 i bilaga A och B-1 i bilaga B och sammanfattas i tabell 4-2.

Tabell 4-2. Lämplighetsindikatorer för geologi (den kompletta redovisningen återfinns i bilaga A och B).

Parametrar – gruppvis	Krav eller önskemål	Kriterier under förstudie (FS) och under platsundersökning (PLU)
Topografi	–	Viktig grundinformation, men ej primär indikator. Se hydrogeologi.
Jordarter	Önskemål om liten mäktighet och stor andel berg i dagen.	FS: – PLU: Ej relevant under platsundersökning.
Bergarter	Krav på ej malmpotential. Önskemål om att värdefull nyttosten eller industrimineral ej förekommer. Önskemål om vanlig bergart. (Indirekta krav/önskemål från bergmekanik och hydrogeologi).	FS: Undvik kända malmpotentiella områden och heterogen eller ovanlig berggrund. PLU: Lokal anpassning av förvaret med hänsyn till indikatorn. Om omfattande förekomst av malmförande mineral påträffas bör platsen överges.
Plastiska skjuvzoner	Regionala plastiska skjuvzoner undviks, om det inte kan visas att zonens egenskaper inte avviker från berget i övrigt. I närheten av regionala plastiska skjuvzoner kan det dock finnas så k tektoniska linser som kan vara lämpliga för ett djupförvar.	FS: Undvik kända regionala plastiska skjuvzoner. Om tillräcklig förvarsvolym ej kan erhållas måste annat område väljas. PLU: Revidera utformning efter ny kunskap. Om förvaret ej kan inplaceras på ett rimligt sätt (skulle behöva delas upp i ett mycket stort antal delar) måste annan plats väljas.
Sprickzoner	Deponeringstunnlar och deponeringshåll får inte passera eller vara i närheten av regionala och lokala större sprickzoner. Antagna respektavstånd kommer att användas i samband med den stegvisa platsundersökningen och projekteringen. Men de verkliga avstånd som behövs fastställs genom en platsspecifik funktionsanalys. Deponeringshåll får inte korsa identifierade lokala mindre sprickzoner. Det är vidare önskvärt med måttliga frekvenser (sprickyta per volym) av sprickor och av lokala mindre sprickzoner.	FS: Välj område för fortsatta studier så att ett djupförvar med god marginal kan inplaceras med hänsyn till de sprickzoner som identifierats vid förstudien. Området är olämpligt om kända sprickzoner ligger så tätt att ett förvar skulle behöva delas upp på ett orimligt stort antal delar. PLU: Lämpliga respektavstånd till identifierade regionala och lokala större sprickzoner kan bara bestämmas plats-specifikt men antas utgöra åtminstone flera tiotals meter till lokala större zoner och minst 100 meter till regionala zoner. Om förvaret ej kan inplaceras på ett rimligt sätt (skulle behöva delas upp i ett mycket stort antal delar) i förhållande till plastiska skjuvzoner, regionala sprickzoner eller lokala större sprickzoner är platsen inte lämplig för ett djupförvar.

5 Bergmekanik

5.1 Påverkan på djupförvarets funktion

Bergets mekaniska egenskaper påverkar både djupförvarets isolerande och fördröjande funktioner. De bergmekaniska egenskaperna har dessutom stor betydelse för hur förvarets utformning och byggas. Rent allmänt är de tekniska förutsättningarna att bygga berggrum i det svenska urberget goda. Tabell A.2 i bilaga A sammanfattar hur bergets mekaniska egenskaper påverkar djupförvarets funktioner och vilka krav och önskemål som kan härledas därifrån.

5.1.1 Översikt

Berget är ett mekaniskt system som normalt befinner sig i statisk jämvikt under de rådande lasterna. Störningar av jämvikten kan bero på lastförändringar, t ex genom uttag av berggrum, eller på att de mekaniska egenskaperna förändras. Instabilitet leder till att bergmassan deformeras och brott kan uppstå om hållfastheten överskrids. Brottillståndet som sådant behöver dock inte innebära allvarlig instabilitet: små deformationer, utan konsekvenser för funktion och säkerhet, kan vara tillräckliga för att systemet skall återvinna jämvikten om brott skulle uppstå.

De mekaniska störningarna sker under olika tidsepoker och i olika delar av berget. Störningarna sker också i olika skalor, dels finns olika problemskalor som deponeringshål, tunnlar, hela tunnelsystemet, bergvolymen kring förvaret och dels kan störningarna ge både småskaliga och storskaliga förändringar. Den geometriska fördelningen av sprickzoner och bergarter och deras mekaniska egenskaper styr var deformation och eventuella brott kommer att ske. I första hand sker rörelser utefter sprickor och sprickzoner. Dessutom har olika bergarter olika hållfasthet och olika deformationsegenskaper.

Det berguttag som sker vid själva förvarsbygget ger en omfattande förändring av den mekaniska jämvikten vilket leder till spänningsomlagring och deformationer kring tunnarna. Om spänningsnivåerna är höga relativt bergmassans hållfasthet kan lokalt brott uppstå. Detta kan ske snabbt i spröda bergarter och benäms målande för ”smällberg”. Vidare kan lösa bergblock falla ut beroende på sprickgeometri, spänningssituation samt bergets och sprickornas mekaniska egenskaper. Det finns därför flera anläggnings-tekniska krav och önskemål som kopplas till förutsättningarna för bergbygget.

Säkerhetsanalysen utgår från initialtillståndet att förvarets tunnlar är byggda. Störningarna som är kopplade till berguttaget och anläggningsbygget har därför bara indirekt påverkan på förvarets säkerhet. Deponering sker ju bara i de tunnlar som utförts på ett tillfredsställande sätt.

Förändringar av deponeringshålens geometri skulle kunna skada buffert eller kapsel. Omfattande rörelser längs sprickor och sprickzoner eller omfattande nybildning av sprickor skulle kunna försämra bergets retentionsegenskaper. De lastfall som behöver beaktas är i första hand förändringar i porttryck vid återmättnad, svälltrycket från bentoniten, bergets värmeutvidgning, effekter av jordskalv och effekter av omfattande klimatförändringar (som glaciationer). Dessutom är det nödvändigt att beakta att bergets mekaniska egenskaper kan förändras med tiden. För närzonsberget kan detta vara

reducerad friktion eller kohesion i sprickor, uppluckring på grund av ökad belastning eller att förstärkningsåtgärder som vidtagits för att stabilisera tunneln under bygge och för drift upphör med tiden (t ex när bergbultar korroderar).

För en mer utförlig genomgång av hur bergmekaniska processer inverka på förvarets säkerhet hänvisas till SR 97 Huvudrapporten och Processrapporten /SKB, 1999ab/.

5.1.2 Inverkan på kapselns integritet

Om deponeringshålen deformeras för mycket skulle kapseln kunna skadas. Beräkningar med en tidigare, mindre deformationstålig, utformning av kapseln /Börgesson, 1992/ visade att berg rörelser av storleksordningen 0,1 m inte leder till omedelbara kapselbrott. Kapselutformningen som analyserats i SR 97 tål större belastningar, varför denna kapsel bör tåla större deformationer av deponeringshålet. I SR 97 Huvudrapporten /SKB, 1999a/ konstateras å andra sidan att olika osäkerheter i analysen (krypdeformation av kopparkapseln, bergrörelsens hastighet, m m) gör att man pessimistiskt bör använda kriteriet att berg rörelser av storleksordningen 0,1 m och därutöver kan leda till kapsel-skador.

Kriteriet skulle givetvis kunna ändras med ytterligare förändringar av kapselutformning eller utformningen av deponeringshålet. De principiella förhållanden som är fördelaktiga respektive mindre fördelaktiga beträffande förvarets mekaniska stabilitet förändras dock inte av mindre förändringar av förvarets utformning. Det är givetvis önskvärt att deformationen blir så liten som möjligt. Praktiskt hanteras detta stabilitetskrav genom att inte förlägga deponeringshålen för nära de stora sprickzonerna.

I SR 97 Huvudrapporten /SKB, 1999a/ diskuteras även om deponeringshålen på sikt skulle kunna deformeras av kryprörelser i berggrunden. Sådana rörelser kan uppkomma om de mekaniska egenskaperna i förvarsberget förändras med tiden så att rörelser sker på grund av redan verkande spänningar. Förändringarna kan bero direkt på spänningstillståndet, t ex instabil tillväxt av mikrosprickor i intakt berg. Ojämn fördelning av skjuvspänningar längs sprickplan i alla skalor kan leda till initiering och tillväxt av mikrosprickor och efterhand till lokal plastisering i anslutning till spänningskoncentrationer vid ojämnheter i sprickytor. Kunskapen är dålig, men de ansatser som gjorts av att analysera förloppet har visat på långsamma förlopp och små deformationer.

5.1.3 Inverkan på buffertens isolerande och fördröjande förmåga

För att bevara buffertens isolerande och fördröjande förmåga får deformation av deponeringshål ej innebära att bufferten skadas. Skador skulle dock bara kunna uppkomma vid omfattande deformationer /Pusch och Börgesson, 1992/. Sprickbildning som ger upphov till hålrum kring deponeringshålet skulle också kunna orsaka erosion av bentoniten. Deformationer får inte skapa så stora hålrum kring deponeringshålet att bufferten kan spridas ut och förlora sitt svälltryck. Deformationer av deponeringshålet (momentana och eller ackumulerade) får heller inte bli så stora att diffusionsavståndet genom bufferten blir för litet. De mekanismer som kan leda till deformationer av deponeringshålet har redan diskuterats i föregående avsnitt.

De sprickor som korsar deponeringshålet kan, tillsammans med hålväggen, bilda lösa block, s k kilar. Om blocken faller ut krävs speciella åtgärder för att fylla utrymmena där blocken suttit med bentonit. Blockutfall är därför inte önskvärt och vid omfattande blockutfall blir deponeringshålet givetvis oanvändbart. Liknande problem kan uppstå om de inducerade spänningarna på randen av deponeringshålet överskrider bergets tryckhållfasthet.

5.1.4 Inverkan på bergets fördröjande förmåga

Om sprickor (och sprickzoner) deformeras förändras deras vattengenomsläpplighet eftersom sprickvidden (aperturen) förändras. Även nybildning av sprickor påverkar vattengenomsläppligheten. Förutom i förvarets omedelbara närhet kan det dock förväntas att förändringarna blir relativt små jämfört med den initialt redan mycket stora rumsliga variationen av sprickornas vattengenomsläpplighet.

Det finns inga mekaniska krav på bergets isolerande och fördröjande funktioner. Det är dock önskvärt att deformation av bergmassa och sprickzoner leder till försumbara förändringar av vattengenomsläppligheten i förhållande till övriga osäkerheter. Önskemålet gäller dels i lokal skala, kring deponeringshålet och dels i den större skalan som representerar berget mellan deponeringshålet och större sprickzoner. Störningar som påverkar vattengenomsläppligheten i deponeringshålskalan kan, i princip, förekomma för alla tänkbara lastfall (se ovan), medan störningar som påverkar berget i större skala skulle kunna orsakas av temperaturförändringar och yttre laster orsakade av till exempel jordbävningar eller glaciationer.

5.1.5 Anläggningsfrågor

Förvaret utformas så att sannolikheten för skador på förvaret på grund av stora deformationer och förkastningar minimeras. Det finns dessutom flera bergmekaniska frågeställningar som måste beaktas vid bygge och drift:

- Alla krav på personsäkerhet ska uppfyllas.
- Smällberg, annat omfattande bergutfall eller ras behöver generellt sett undvikas.
- Omfattande stabilitetsproblem kan inte accepteras i deponeringstunnlar eller deponeringshål eftersom detta skulle omöjliggöra att dessa utformas på tänkt sätt.
- Det finns ett önskemål om att anläggningsarbetena kan genomföras med få komplikationer. (Förstärkningsbehov, stilleståndstider m m utreds i samband med projekteringen.)
- Om förvarsområdet måste delas upp i många delområden kan separata utredningar erfordras angående förutsättningar att passera de sprickzoner som delar områdena.

Ovanstående krav och önskemål kan i regel tillgodoses genom lämplig förvarsutformning, val av förläggingsdjup och val av utförandemetoder. De ökande bergspänningsnivåerna med ökande djup gör att byggbarheten försämras vid alltför stora förläggingsdjup /Winberg, 1996/. Förvarsutformningen anpassas till de regionala och lokala större sprickzonerna (se avsnitt 4.5 och 4.6) samt på bedömningar av hur tunnlar bör orienteras i förhållande till bergegenskaper och spänningstillstånd (se t ex /Munier m fl, 1997/).

För projekteringen behövs information om en mängd parametrar för att kunna välja lämpliga utförandemetoder och för att kunna planera arbetet. Vid val av fullortsborrning bör egenskaper som inträngningsindex, borrarhet och slitegenskaper bestämmas. Därutöver kan spänningsinducerade brott i tunnelkonturen påverka möjligheten att utföra fullortsborrning. Vid val av sprängmetod och sprängmedel bör sprängbarheten bedömas. Ingen av dessa parametrar är betydelsefulla för platsvalet, men kan påverka anläggningskostnaderna.

5.2 Initiala bergspänningar

5.2.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Bergspänningstillståndet är en tillståndsvariabel för alla mekaniska processer. Spänningstillståndet är en tensor, och karakteriseras av tre sinsemellan vinkelräta huvudriktningar, var och en svarande mot en huvudspänning. Om alla tre huvudspänningarna är lika stora är spänningstillståndet isotropt och huvudriktningarna obestämda. Om huvudspänningarna är olika stora är spänningstillståndet anisotropt (deviatoriskt). Stabiliteten hos bergmekaniska system beror av lastförhållandena.

Förutom att ge randvillkor och stöd för den bergmekaniska analysen ger kunskap om den initiala spänningsfördelningen indirekt information om bergets stabilitet. Höga och deviatoriska spänningar komplicerar framförallt utförandet av bergarbeten eftersom det är i detta skede som det sker stora förändringar i spänningsfältet kring tunnlar och deponeringshål. Bergspänningar i tunnelperiferin verkar stabiliserande. Alltför höga eller deviatoriska tangentialspänningar i tunnelperiferin i förhållande till det intakta bergets hållfasthet kan dock ge smällbergsfenomen eller bidra till annat bergutfall. Storlek och riktning på det initiala spänningsfältet påverkar därmed direkt vad som är lämpliga tunnelriktningar och val av bergdrivningsmetoder.

5.2.2 Krav och önskemål

Det är ett krav att det inte uppstår omfattande smällbergsfenomen eller annat omfattande bergutfall inom deponeringsområdet eftersom detta kan omöjliggöra konstruktion av beständiga deponeringshål (figur 5-1). Utanför deponeringsområdet mildras kravet och det är här också möjligt att förstärka berget, vilket knappast kan göras direkt i deponeringshålen. Funktionen kontrolleras med en platsspecifik bergmekanisk analys där bland annat den resulterande spänningssituationen kring tunnlar prognostiseras. Den initiala spänningsfördelningen ingår i en sådan analys men det är inte möjligt att direkt ange krav på den initiala spänningsfördelningen.

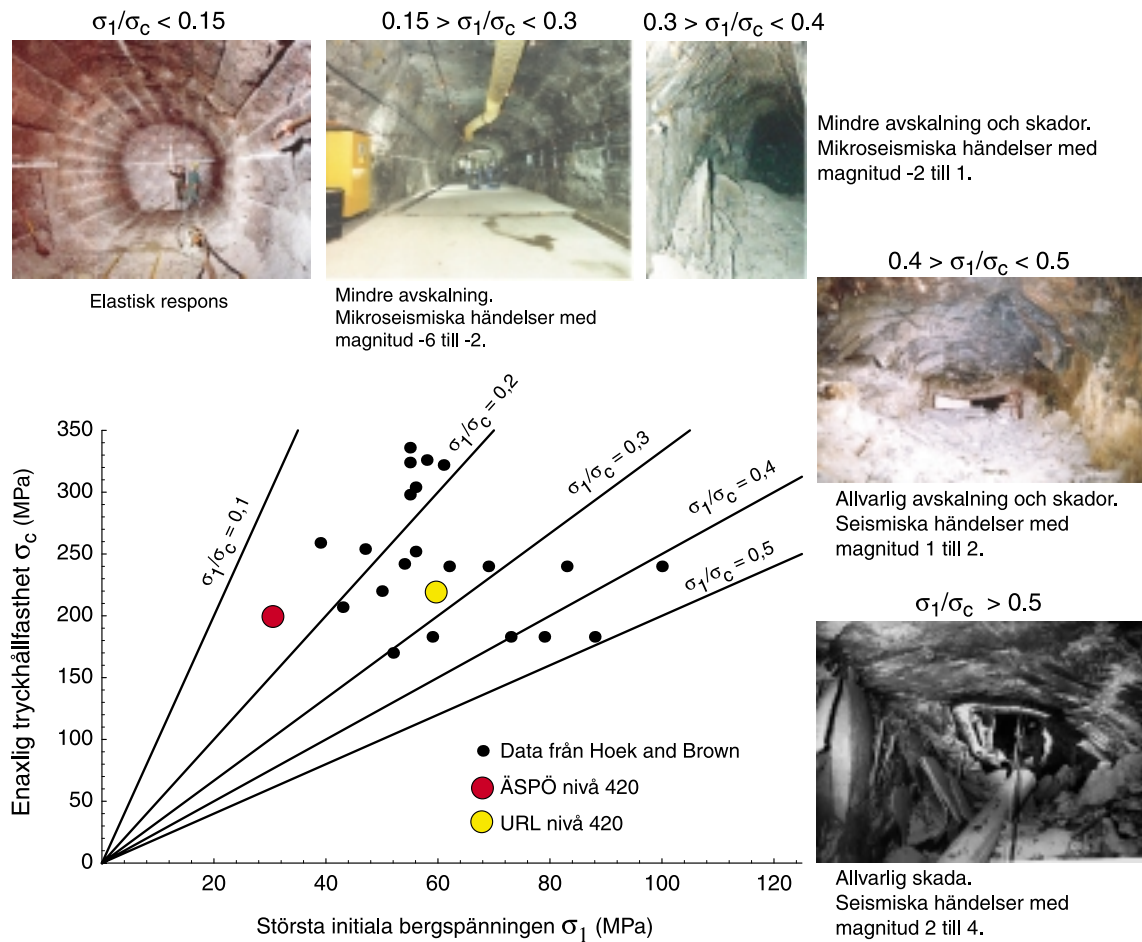
Det är generellt en fördel om det initiala spänningarna inte avviker från vad som är normalt i svensk berggrund (dvs är väsentligt lägre än 70 MPa) och är så isotropa som möjligt på tänkt förläggningsdjup.

5.2.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Det finns viss generisk kunskap om de initiala bergspänningarna. Vertikalspänningen är i regel approximativt lika med tyngden av den överliggande bergmassan och ökar därmed linjärt med djupet. På nivån 500 m är vertikalspänningen normalt cirka 14 MPa. Största horisontalspänningen på detta djup ligger i intervallet 10–70 MPa /Stille och Nord, 1990/.

Vid förstudier sammanställs tidigare erfarenheter från undermarksbyggen i området. Erfarenheterna från undermarksbyggande (se t ex förstudien i Östhammar /SKB, 1997/) är dock att det ofta förekommer stora lokala variationer och att undersökningar på en specifik plats med borrhningar till avsett djup är nödvändiga för att eventuella lokala problem ska uppenbaras och tillförlitliga byggnadstekniska bedömningar kunna göras.

Vid platsundersökning kan de initiala spänningarna mätas i borrhål genom t ex överborrning och hydraulisk spräckning. Osäkerheterna och den rumsliga variationen är dock relativt stora /Ljunggren m fl, 1998/. Under detaljundersökning och försvarsutbyggnad kan ytterligare spänningsmätningar genomföras från borrhål på försvarsnivå.



Figur 5-1. Empirisk stabilitetsklassificering utvecklad för gruvorter med fyrkantigt tvärsnitt i Sydafrika. Modifierad av /Martin m fl, 1999/ från /Hoek och Brown, 1980/. Figuren är kompletterad med data från Äspölaboratoriet och Underground Research Laboratory (URL) i Kanada. Det är ett krav att det inte uppstår omfattande smållbergsfenomen eller annat omfattande bergutfall inom deponeringsområdet.

5.2.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Initiala bergspänningar är uppenbart användbara som lämplighetsindikatorer, dels för deras betydelse vid val av anläggningsutformning och dels för att de ingår i en analys av stabilitetsförhållandena vid bygge och drift.

Det finns ingen grund för att utfärda kriterier baserat på kunskap från förstudier annat än de översiktliga värderingar som redan görs inom ramen för förstudierna.

Under platsundersökningen skall en kvalificerad platspecifik bergmekanisk analys genomföras där kommande spänningssituation i berget närmast tunnarna och den resulterande bergstabiliteten under och efter byggfasen prognostiseras. Ingångsvärden i analysen är tunnarnas geometri och den under platsundersökningen uppskattade värdena och geometriska fördelningen av det intakta bergets hållfasthet och deformationsegenskaper, spricksystemets geometri, deformationsegenskaper och de initiala bergspänningarna. Eftersom funktionen beror på flera samverkande faktorer kan ett specifikt kriterium för acceptabla initiala spänningar inte sättas upp. Vidare behöver osäkerheterna i bergspänningsmätningarna beaktas.

Om borrhärnan spricker upp i skivor ("core discing") är det en stark indikation på höga spänningsnivåer. Omfattande problem med "core discing" bör därför direkt leda till misstankar om att det kan uppstå problem med smällberg under tunnelbygget.

Analysen används främst för att anpassa förläggningsdjupet och utformningen (förstärkningar, tunnelgeometri, riktningar) till de rådande förhållandena. Om förvaret inte rimligen kan utformas på ett sådant sätt att omfattande och allmänna smällbergsproblem kan undvikas är platsen olämplig och bör överges.

5.3 Mekaniska egenskaper för intakt berg

5.3.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Med "intakt berg" avses i bergmekaniska sammanhang berg utan synliga sprickor. I regel beskrivs det intakta bergets deformationsegenskaper med en linjär del, i form av elasticitetsmodulen (E) och Poissons tal (ν), och en plastisk del som är beroende av materialets hållfasthet. Ytterligare parametrar förekommer i en del materialmodeller.

Stabiliteten hos bergmekaniska system beror av lastförhållandena och bergets hållfasthet. Idealiserade samband, brottkriterier, ger beroendet som funktion av huvudspänningarna. Sprickbildningsprocessen startar dock i själva verket vid lägre laster än den egentliga brottslasten. Berg som befinner sig i ett spänningstillstånd motsvarande cirka 80 % av brottslasten kan, utan ytterligare lastökning, komma att fragmenteras efter någon tid om spänningsnivån bibehålls /Martin, 1994/. Fenomenet kan observeras på stort djup där primärspänningarna är höga och där berguttag för att skapa tunnlar och andra typer av hålrum ger upphov till stora spänningskoncentrationer. Intill hålrumsväggarna är tangentialspänningarna stora och den radiella inspanningen liten, vilket kan ge bergutfall på grund av uppsprickning parallellt med hålrumsväggen (så kallad "spjälkning-spjälkbrott"). Om spjälkbrottet är våldsamt har en typ av smällberg inträffat.

De mekanismer som styr tillväxten av mikrosprickor styr i princip också propagering av befintliga sprickor. I inspänt berg kan propagering av enskilda sprickor ske dels genom att sprickan utbreder sig i sitt eget plan genom skjuvbrott, dels genom uppsprickning i vinkel mot det egna planet genom dragbrott vid sprickans periferi, sk "splay cracks" /Scholz, 1990/.

För val av drivningsmetoder i samband med bergprojekteringen behöver egenskaper som inträngningsindex, borrhärdhet (DRI), slitsegenskaper och sprängbarheten bestämmas. Parametrarna har ingen betydelse ur säkerhets- eller lokaliseringssynpunkt. De används i projekteringsarbetet för berganläggningen.

5.3.2 Krav och önskemål

För formulering av krav se avsnitt 5.2.2.

Det är önskvärt med för svensk berggrund normala hållfasthets- och deformations-egenskaper hos det intakta berget eftersom det erfarenhetsmässigt har visat sig vara möjligt att utföra bergarbeten med goda resultat i sådan berggrund. Vidare är det önskvärt att bergets hållfasthet ska ha marginal att för vald tunnelutformning klara den spänningomlagring som sker på grund av att berget utvidgas på grund av värmets i de deponerade kapslarna.

5.3.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Det finns god generisk kunskap om det intakta bergets mekaniska egenskaper /Stille och Nord, 1990/. Det intakta berget i svenskt urberg har i regel en elasticitetsmodul mellan 5 och 100 GPa, Poissons tal mellan 0,15 och 0,30, en tryckhållfasthet mellan 50 och 250 MPa och en draghållfasthet mellan 2 och 10 MPa.

Förstudiens bedömning av vilka bergarter som förekommer ger ytterligare information eftersom hållfastheten varierar med olika bergarter. Platsspecifik information kan erhållas från kartering, klassning och prov på borrkärnor som tagits upp i samband med platsundersökning. Detaljundersökningen ger mer direkt kunskap för det intakta berget, som ligger nära tunnlar och deponeringshål.

Parametrarna sprängbarhet, inträngningsindex, borrbarhet och slitegenskaper används översiktligt i byggnalys för att bedöma byggkostnader, samt i detaljprojekteringsskedet. Ingen av dessa parametrar påverkar platsvalet.

5.3.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Det intakta bergets tryckhållfasthet är en användbar lämplighetsindikator men kan inte användas isolerat för att bedöma risk för omfattande smällberg eller andra omfattande bergutfall.

Den bergartsbedömning som kan göras under en förstudie ger ett översiktligt underlag för att bedöma det intakta bergets hållfasthet och deformationsegenskaper. Skillnaden i egenskaper mellan de bergarter som kan bli aktuella för djupförvaret är dock relativt begränsad. För kriterier under platsundersökning se avsnitt 5.2.4.

5.4 Sprickor och sprickzoner

5.4.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Förekomsten av sprickor och sprickzoner har stor betydelse för bergets mekaniska egenskaper. Jämfört med berget utan synliga sprickor är sprickornas hållfasthet och styvhet liten i sprickornas och zonernas plan. Sprickorna och sprickzonerna har vidare försumbar draghållfasthet vinkelrätt mot sprickplanen. Styvheten mot förskjutningar i sprickans/zonens plan begränsar dess uthållighet. Stora (uthålliga) sprickzoner har större förutsättningar att förskjutas än små.

Sprickor kan deformeras vinkelrätt mot sprickans plan (normaldeformation) eller i sprickans plan (skjuvdeformation). Varierar spänningen vinkelrätt mot sprickans plan kan sprickan öppnas eller stängas. Sambandet mellan normalspänning och normaldeformationen brukar beskrivas med hjälp av normalstyvhet /se t ex Barton m fl, 1985/. Sprickor kan även deformeras i sprickans plan – s k skjuvrörelser. Vid för hög belastning uppstår skjuvbrott. Sprickans skjuvhållfasthet beror bland annat på hur stor normalspänningen är över sprickan (friktion). Om förhållandet mellan skjuvbelastningen och normalspänningen överstiger ett visst värde ("friktionsvinkeln") räcker inte friktionen till för att hindra en rörelse. Rörelsens storlek bestäms dock även av sprickans storlek (Turcotte, 1992). För korta sprickor blir deformationen liten även om friktionen försummas.

Normaldeformationer leder till att sprickornas vidd förändras. Därvid ändras även sprickans vattengenomsläpplighet. Skjuvning längs icke plana sprickor kan orsaka sprickviddsvariationer på grund av sprickans råhet och vågighet. Även detta leder i sin tur till förändringar av sprickans vattengenomsläpplighet. Denna hydromekaniska koppling har dock relativt begränsad betydelse för den långsiktiga säkerheten, men kan behöva beaktas vid utvärderingen av hydrauliska tester (t ex /Rutqvist m fl, 1996/).

För bedömning av den mekaniska stabiliteten i ett bergrum är den enskilda sprickans deformationsegenskaper av viss betydelse. Det är generellt en fördel om sprickorna har hög friktionsvinkel eftersom detta ytterligare ökar bergstabiliteten. Stabiliteten bestäms väsentligen av valvbildning, risk för blockutfall (bergkilar) och av förekomst av bergbryggor av intakt berg. För den mekaniska bedömningen är det främst tunnelns geometri (riktning), sprickornas geometri (riktningar) i förhållande till riktningar av spänningsfält och kommande förändringar i detta som är av betydelse, men hög friktion i sprickorna bidrar till ökad stabilitet.

5.4.2 Krav och önskemål

För att säkerställa att deponeringshålen inte deformeras på ett sätt så att det skulle kunna skada kapseln är det ett krav att deponeringshål inte tillåts i eller i närheten av regionala eller lokala större sprickzoner (se vidare diskussion i avsnitt 4.6).

Även geometrin för lokala mindre sprickzoner och för enskilda sprickor har stor betydelse för om deponeringshålen kan deformeras. Enskilda deponeringshål inte placeras så att de korsar lokala mindre sprickzoner. Även de enskilda sprickorna har betydelse, men de funktionsanalyser med mekanisk modell som gjorts inom ramen för SKI-projektet SITE-94 /Hanson m fl, 1995/ kunde dock inte påvisa något fall där deformationen av deponeringshålet översteg 0,1 m. Förvarsutformningens anpassning till spricknätverkets geometri har direkt betydelse för graden av påverkan vid seismiska händelser, se /LaPointe m fl, 1999/. Det är dock inte möjligt att ange krav eller önskemål beträffande geometrin för sprickor eller sprickzoner, utan den resulterande funktionen behöver analyseras.

Det finns ingen grund för att ange preciserade krav eller önskemål på hur sprickornas deformationsegenskaper inverkar på vattengenomsläppligheten.

Ur bergbyggnadssynpunkt väljs lämplig placering, utformning och förstärkning av tunnlar utifrån rådande sprickfrekvens, sprickgeometri och bergspänningar. Sprickgeometri och friktionsvinklar bör också vara sådan att mängden blockutfall i deponeringshålen (se avsnitt 5.1.3) inte blir för stora. Inte heller här kan dock mer preciserade önskemål på geometrin anges, utan en bedömning får göras från fall till fall. Ur stabilitetssynpunkt under bygget är det också önskvärt att sprickornas friktionsvinkel inte är för liten. Hög friktionsvinkel är även fördelaktigt för den långsiktiga säkerheten men friktionsvinkeln är inte avgörande för förvarets mekaniska stabilitet.

5.4.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Beträffande geometri för sprickor och sprickzoner se avsnitt 4.6. Det finns god generisk kunskap om sprickors mekaniska egenskaper /Stille och Nord, 1990/.

En förstudie tillför i sig ingen ny information. Platsspecifik information kan erhållas genom att utföra laborietester på sprickor i borrhäror som tagits upp i samband

med platsundersökning. Med tanke på informationens begränsade betydelse behövs dock inte ett stort antal mätningar. Detaljundersökningen ger mer direkt kunskap för de enskilda sprickor som ligger nära tunnlar och deponeringshål.

5.4.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Förekomst och geometri av sprickzoner är uppenbarligen användbara som lämplighetsindikatorer även ur bergmekanisk synpunkt. För att, för en given sprickgeometri, kunna bedöma om krav eller önskemål uppfylls är det dock i regel nödvändigt att genomföra en specifik mekanisk analys för att bedöma risk för blockutfall. En sådan kan dock, i enkla fall, genomföras med enbart geometrisk information. Kriterier för anpassning av förvaret till kända sprickzoner diskuteras i avsnitt 4.6.4.

Det är inte meningsfullt att genomföra en kvantitativ bergmekanisk analys med den information som finns tillgänglig efter en förstudie. Efter en platsundersökning ska läget av de flesta regionala och lokala större sprickzonerna vara känt. Om frekvensen av dessa är så stor att ett förvar inte kan placeras in utan att bli uppsplittrat i ett mycket stort antal olika delar är platsen olämplig.

Mekaniska egenskaper hos sprickor behöver framförallt bedömas vid detaljundersökning och förvarsutbyggnad. Sprickornas mekaniska egenskaper är därför mindre användbara som lämplighetsindikatorer även om det finns önskemål om att det inte bör förekomma sprickor med extremt låg friktion inom förvarsområdet.

De laborietester på borrhärdar som kan göras under en platsundersökning ger egenskaper i centimeterskala. Dessa värden behövs för att bygga upp den geovetenskapliga förståelsen och kan vidare användas inom byggnadsanalysen (t ex för bedömning av förstärkningsbehov). I säkerhetsanalysen görs i regel konservativa antaganden (friktions- och kohesionslösa sprickor). På grund av önskemålets ringa betydelse och de stora mätproblemen, finns det ingen anledning att ange kriterier ens under platsundersökningen.

5.5 Mekaniska egenskaper för bergmassan som helhet

5.5.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Vid praktisk bergmekanisk modellering av stabilitet i förvarsskala är det bara de större sprickzonerna som modelleras explicit, och då i regel som zoner med avvikande hållfasthetsegenskaper. Berget, både i sprickzoner och däremellan, representeras med begreppet bergmassa som representerar hållfasthetsegenskaperna för de ej explicit beskrivna sprickorna och det intakta berget tillsammans.

Begreppet bergmassa måste relateras till den skala i vilket berget beskrivs. För de bergmekaniska analyser som SKB normalt genomfört beskrivs regionala och lokala större sprickzoner explicit och ingår därför inte i bergmassan. För mer detaljerade diskreta analyser kan även lokala mindre och enskilda sprickor beskrivas explicit, om än stokastiskt. Det mellanliggande berget motsvarar "intakt berg" i detta senare fall.

Det är inte brukligt att ange värden på bergmassans hållfasthet. Om det sker brott i bergmassan sker det i de flesta fall genom en komplex kombination av brott i det intakta berget och deformation/brott i sprickorna. En exakt beskrivning av brottförloppet

kan sällan göras, utan man använder sig normalt av empiriska brottkriterier och klassningar av bergmassan, som Q-systemet /Barton, 1974/ eller RMR-systemet (se t ex /Brady och Brown, 1993/) för att bedöma om det finns risk för problem. De empiriska klassificeringsmetoderna kan användas som underlag för dimensionering av bergförstärkning /Vägverket (1999)/, men kan kritiseras för att de ger en allt för förenklad bild av komplicerade förlopp och samband. Empiriska klassificeringar kan användas som verktyg i det löpande projekteringsarbetet, men genomförbarhet beläggs genom bergmekaniska analyser.

5.5.2 Krav och önskemål

Det är inte meningsfullt att ange krav på bergmassan.

Ur främst byggbarhetssynpunkt finns det önskemål om att bergmassan som omfattar lokala mindre sprickzoner, enskilda sprickor och det intakta berget har en hållfasthet som minst motsvarar normala förhållanden för svensk berggrund.

5.5.3 Generisk kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Det finns god generisk kunskap om bergmassans mekaniska egenskaper.

Vid förstudier, kan tidigare erfarenheter från undermarksbyggen i området sammanställas. Erfarenheterna från undermarksbyggande (se t ex förstudien i Östhammar /SKB, 1997/) är dock att det ofta förekommer stora lokala variationer och att undersökningar på en specifik plats med borrhningar till avsett djup är nödvändiga för att eventuella lokala problem ska uppenbaras och tillförlitliga byggnadstekniska bedömningar kunna göras.

Platsspecifik information om bergmassans egenskaper kan erhållas bl a genom kartering och klassning av borrhkärnor som tagits upp i samband med platsundersökning. Detaljundersökningen ger mer kunskap, framförallt den direkta erfarenheten från att bygga i det aktuella berget.

5.5.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Med tanke på ovanstående önskemål är bergmassans hållfasthet en användbar lämplighetsindikator. Kravet på precision i bestämningen är dock begränsat och i analyser baserade på platsundersökningsdata kommer främst känslighetsanalyser för kända extremvärden att utföras.

Det finns ingen grund för att utfärda kriterier baserat på kunskap från förstudier annat än de översiktliga värderingar som redan görs inom ramen för förstudierna.

Den prognos av bergmassans egenskaper som görs i samband med platsundersökningen utnyttjas för förvarsutformning och för byggbarhetsprognosen. Byggbarhetsprognosen ingår i det totala jämförelsematerialet mellan platser men har ingen direkt säkerhetsrelaterad betydelse. God byggbarhet är givetvis fördelaktigt.

5.6 Temperaturutvidgningskoefficient

5.6.1 Beskrivning av parameter och dess inverkan på funktioner

Temperaturutvidgningskoefficienten anger bergets volymförändring vid en temperaturförändring. Temperaturutvidgningskoefficienten, tillsammans med värmetransportdata (värmeledningsförmåga och specifikt värme) ingår som modelldata vid beräkning av de spänningsförändringar och deformationer som uppkommer på grund av värmelast. Efter som berget i förvaret är inspant, undertrycks expansionen helt eller delvis och termospänningar genereras i deponeringshålens och förvarets omgivning. Storleken av volymexpansionen och termospänningarna beror på temperaturutvidgningskoefficienten och bergets deformationsegenskaper.

Förvarets värmeproduktion gör att uppmärksamhet speciellt måste riktas mot att dragspänningar inte uppstår på alltför stort djup. Kring enskilda deponeringshål är det viktigt att temperaturutvidgningen sker tillräckligt jämt.

Temperaturutvidgningskoefficienten beror på mineralsammansättningen och beror därmed i princip på bergarten. Variationerna är dock inte stora. Inledande analyser har gjorts av Hökmark (1996).

De termiska rörelserna som sådana har inga direkta effekter på säkerheten. Det termiska lasttillskottet kan däremot tillsammans med de laster som verkar redan i initialtillståndet innebära att hållfastheten för intakt berg och för sprickor överskrids. Detta behöver kontrolleras i en platsspecifik funktionsanalys, men innebär inga direkta krav eller önskemål på temperaturutvidgningskoefficienten.

5.6.2 Krav och önskemål

Det finns ingen anledning att ställa krav på temperaturutvidgningskoefficienten inom den variationsbredd som är möjlig i en kristallin berggrund.

Det är önskvärt att parametrarna har normala värden för svensk berggrund (dvs inom intervallet 10^{-6} till 10^{-5} K^{-1}) och att de inte skiljer sig så mycket mellan de bergarter som finns i förvarsområdet.

5.6.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Troliga värdeområden för svensk kristallin berggrund är att temperaturutvidgningskoefficienten ligger mellan $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ och $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Det finns god generisk kunskap om värdet på temperaturutvidgningskoefficienten. En förstudie kan ge viss ledning om vilka bergarter som förekommer på djupet. Det är dock först vid platsundersökningarna som prov på borrhärlor som erhålls vid platsundersökningar kan ge en mer rättvisande bild av bergartsfördelningen inom förvarsområdet. Detaljundersökningen ger mer direkt kunskap, i områden som ligger nära tunnlar och deponeringshål.

5.6.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Temperaturutvidgningskoefficienten är inte en primär lämplighetsindikator men behöver bestämmas under en platsundersökning. Koefficienten är nödvändig att känna till vid termomekanisk analys, men värden inom ovan angivna värdeområden kan användas. Eventuella önskemål i deponeringshållsskala hanteras under förvarsutbyggnad och vid val av deponeringshåll.

Under förstudien erhålls en översiktlig mineralogisk beskrivning, men inhomogeniteter i bergarterna kan bara bedömas översiktligt från ytkaraktiseringen. Starkt inhomogena förhållanden i ytan innebär dock ökat krav på noggrann karakterisering under platsundersökningen.

Inte heller den ökade detaljkunskapen som erhålls från borrhärdor under en platsundersökning ger grund för kvantitativa kriterier. Om berget är mycket heterogent krävs utökade undersökningsinsatser. En termomekanisk analys behöver under alla förhållanden utföras, men resultatet av denna beror mer på sprickgeometri och initiala spänningsförhållanden.

5.7 Kommande laster

5.7.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Framtida yttre händelser kan påverka bergets mekaniska stabilitet. Inom SR 97 /SKB, 1999a/ studerades framförallt inverkan av jordskalv och kommande istider.

I den seismiska analysen som genomförts inom ramen för SR 97 /LaPointe m fl, 1999/ uppskattades den seismiska aktiviteten för de kommande 100 000 åren genom att extrapolera från dagens seismiska aktivitet. Denna uppskattning (frekvens och magnitud) ingår direkt i analysen. Enligt analysen är det bara jordbävningar över cirka magnitud 7 och som inträffar i sprickzoner i förvarets omedelbara närhet kan ge så stora deformationer att kapseln skadas. Så stora jordbävningar kan, å andra sidan bara inträffa i regionala sprickzoner. Dessa kommer att undvikas vid placeringen av förvaret. Analysen överdriver dessutom konsekvenserna eftersom det antas att sprickornas skjuvdeformation inte hindras av friktion i sprickans plan. Analysen bygger med andra ord på flera pessimistiska antaganden.

I analys av en istid studeras den mekaniska påverkan från istäcket. För de lastfall som hittills analyserats i numeriska modeller /t ex Hansson m fl, 1995/ har inga sprickrörelser som varit stora nog att skada kapslar erhållits. Också för andra rimliga statistiska lastfall kan man göra bedömningen att inga skjuvrörelser hos sprickor som skär genom kapselhållspositioner kommer att vara tillräckligt stora för att skada kapseln SR 97 Huvudrapporten kap 10 /SKB, 1999a/.

5.7.2 Krav och önskemål

Det är uppenbarligen fördelaktigt om kommande seismisk aktivitet är av låg magnitud och inträffar med liten frekvens. De regionala skillnader som finns i olika prognoser är dock för små i förhållande till osäkerheterna. Både istid och jordbävningar tillhör scenarier som analyseras inom ramen för en säkerhetsanalys, men analyserna har liten koppling till platsvalet. Genom att förvaret anpassas så att deponeringshål inte tillåts korsa lokala mindre sprickzoner (se 5.4). minimeras även risken för jordbävningpåverkan.

5.7.3 Användbarhet som lämplighetsindikatorer

Prognoserna av kommande jordbävningar och istider och analys av konsekvenserna om de inträffar måste göras inom ramen för en säkerhetsanalys. Säkerhetsanalysen SR 97 /SKB, 1999a/ bygger på pessimistiska bedömningar av omfattningen av dessa händelser. Med tanke på osäkerheterna är det dock inte rimligt att använda prognoser av framtida seismisk aktivitet eller prognoser av kommande istider som lämplighetsindikatorer.

5.8 Sammanfattning lämplighetsindikatorer – bergmekanik

Föregående avsnitt har redovisat vilka bergmekaniska lämplighetsindikatorer som kan komma i fråga i olika skeden av lokaliseringsarbetet. Den kompletta redovisningen av arbetet återfinns i tabellen A-2 i bilaga A och tabell B-2 i bilaga B.

Som framgått ovan används lämplighetsindikatorer främst för att bedöma huruvida krav och önskemål är uppfyllda. Tabell 5-1 ger en sammanställning av de lämplighetsindikatorer som preliminärt identifierats för bergmekanik.

Tabell 5-1. Lämplighetsindikatorer för bergmekanik (den kompletta redovisningen återfinns i bilaga A och B).

Parametrar – gruppvis	Krav eller önskemål	Kriterier under förstudie (FS) och under platsundersökning (PLU)
Initiala bergspänningar	<p>Omfattande smällberg eller annat omfattande bergutfall får inte förekomma inom en stor del av deponeringsområdet. Funktionen kontrolleras med en platsspecifik analys.</p> <p>Önskemål om normala (väsentligt lägre än 70 MPa) på förvarsdjup.</p>	<p>FS: Inga kriterier</p> <p>PLU: Beräknad spänningssituation i berget närmast tunnarna och den resulterande bergstabiliteten under och efter byggfasen används främst för att anpassa förlägningsdjupet och utformningen. Om förvaret inte rimligen kan utformas på ett sådant sätt att omfattande och allmänna smällbergsproblem kan undvikas är platsen olämplig och bör överges. Omfattande problem med "core discing" bör direkt leda till misstankar om att det kan uppstå problem med smällberg under tunnelbygget.</p>
Intakt berg (E, v, tryckhållfasthet m m)	<p>Omfattande smällberg eller annat omfattande bergutfall får inte förekomma inom en stor del av deponeringsområdet.</p> <p>Det är önskvärt med för svensk berggrund normala hållfasthets- och deformationsegenskaper hos det intakta berget.</p>	<p>FS: Bedömning utifrån en preliminär bergartsprognos ska inte indikera ogynnsamma förhållanden.</p> <p>PLU: Speciell uppmärksamhet om bergarternas hållfasthet starkt avviker från de normala i svensk berggrund. Se f ö initiala bergspänningar.</p>
Sprickor och sprickzoner	<p>För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi.</p> <p>Tunnelutformning/placering väljs utifrån spänningar och sprickriktningar.</p> <p>Lämpligt med stor friktionsvinkel.</p>	<p>FS: För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi.</p> <p>PLU: För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi.</p> <p>Bergmekanisk analys av funktion (se intakt berg ovan).</p>
Bergmassan som helhet	<p>Inga krav</p> <p>Egenskaper som minst motsvarar normala förhållanden för svensk berggrund.</p>	<p>FS: Inga kriterier</p> <p>PLU: Den prognos av bergmassans egenskaper som görs i samband med platsundersökningen utnyttjas för förvarsutformning och för byggbarhetsprognosen. Byggbarhetsprognosen ingår i det totala jämförelsematerialet mellan platser men har ingen direkt säkerhetsrelaterad betydelse. God byggbarhet är givetvis fördelaktigt.</p>
Temperaturutvidgningskoefficient	<p>Inga krav</p> <p>Önskvärt med normala och homogena egenskaper.</p>	<p>Inga kriterier under FS och PLU, dock uppmärksamhet på heterogena förhållanden.</p> <p>Eventuella problem med bergartsgränser hanteras under detaljundersökning/ förvarsutbyggnad.</p>
Kommande laster	Inga krav	Ingen grund för jämförelser eller kriterier med hänsyn till osäkerheter i prognoser.

6 Temperatur

6.1 Termiska egenskaper som påverkar djupförvarets funktion

Bergets termiska egenskaper kan främst påverka djupförvarets isolerande funktion. Säkerhetskrav kan dock alltid uppnås genom lämplig utformning av förvaret. Ur byggsynpunkt, men även indirekt ur säkerhetssynpunkt finns därför önskemålet att förvaret inte blir för utspritt. Den nödvändiga storleken på förvarsområdet påverkas av bergets termiska egenskaper. Bilaga A-3 sammanfattar hur de termiska egenskaperna påverkar funktioner och vilka krav och önskemål som kan härledas därifrån. Djupförvarets termiska utveckling, liksom utvecklings konsekvenser för djupförvarets funktioner, analyseras ingående i SR 97 huvudrapporten, avsnitt 8.6 /SKB, 1999a/.

6.1.1 Inverkan på kapseln integritet

Det är ett krav att högsta temperatur på kapselytan ska vara lägre än 100 °C /Werme, 1998/. Det är inte lämpligt att vattnet kokar så att saltavlagringar bildas som senare skulle kunna lösas upp och ge ett kemiskt mer "aggressivt" grundvatten. (Efter förslutning kommer dock grundvattentrycket, och därmed vattnets kokpunkt, att öka väsentligt.)

Temperaturen bestäms av det använda bränslets restvärme, förvarsutformningen, bergets värmeledningsförmåga, värmekapacitet, initial temperatur och bentonitens vattenmättnad. Förvarsutformningen bestäms så att temperaturkravet uppfylls (se även Basscenariot SR 97 i Huvudrapporten /SKB, 1999a/). Därmed kan inga krav ställas på bergets termiska egenskaper. Det är dock önskvärt att förvaret inte blir för utspritt eftersom detta leder till ett dyrare förvar och även skulle kunna försvåra platsundersökningen och öka risken för att andra oönskade egenskaper i berget inte upptäcks.

6.1.2 Inverkan på buffertens isolerande och fördröjande förmåga

Av samma skäl som för kapseln är det ett krav att högsta temperatur i bufferten är lägre än 100 °C. Högre temperaturer i kombination med olämplig vattenkemi skulle kunna påverka bentonitens stabilitet. Detta krav är dock automatiskt uppfyllt om kapselkravet klaras. Det kan inte uteslutas att det uppstår en isolerande luftspalt mellan kapsel och bentonit /Bjurström, 1997/. I SR 97 /SKB, 1999a/ hanteras inverkan av spalten genom att anta ett temperaturfall av 10 °C mellan buffert och kapsel och dessutom antogs en säkerhetsmarginal om 10 grader för att hantera osäkerheter i olika data /Ageskog och Jansson, 1999/. Den maximalt tillåtna temperaturen på buffertens inre rand blir därmed 80 °C. Kravet kan alltid uppnås med lämplig förvarsutformning (se f ö 6.1.1).

6.1.3 Inverkan på bergets isolerande och fördröjande förmåga

Termomekaniska krav och önskemål på berget diskuteras under avsnittet bergmekanik (avsnitt 5.1).

För att säkerställa bergets isolerande förmåga är det önskvärt att platsen inte har speciellt lämpliga förutsättningar för uttag och lagring av geotermisk energi (konkurrerande intressen). Frågan diskuteras i Översiktsstudie 95 och en preliminär slutsats är att detta önskemål tillgodoses genom de lämplighetsindikatorer som redan tillämpas i förstudierna.

För att förenkla den hydrogeologiska analysen är det önskvärt att termisk konvektion inte blir en, relativt andra drivkrafter, betydande drivkraft för grundvattenströmningen. I regel är den termiska drivkraften försumbar jämfört med den topografiska (se t ex Thunvik och Braester, 1980). Ur hydrogeologisk synpunkt finns det därför inga skäl till krav eller önskemål på bergets termiska egenskaper.

6.1.4 Biosfärsfrågor

Restvärmets från förvaret får inte innebära en märkbar temperaturförhöjning vid markytan. En sådan höjning skulle kunna påverka ekosystemen. Analysen av basscenariot i SR 97 (Huvudrapporten avsnitt 8.6.2 /SKB, 1999a/) visar dock att värmen från förvaret bara kommer att ha en ytterst marginell inverkan (cirka en promille av solinstrålningen) på de termiska förhållandena på markytan, varför detta önskemål alltid kommer att tillgodoses.

6.1.5 Anläggningsfrågor

För utformning av djupförvaret finns ett ekonomiskt önskemål om att kunna förvara så mycket bränsle som möjligt i varje kapsel. Utformning bestäms dock så att temperaturkrav och önskemål enligt ovan uppfylls. Detta är i princip alltid möjligt att göra, men den resulterande temperaturfördelningen för en viss utformning måste analyseras med termisk analys för att kontrollera temperaturfunktionerna. Eftersom det även finns andra faktorer (främst förekomst av regionala och lokala större sprickzoner) som styr utbredningen av förvaret är det dock inte säkert att det till slut blir temperaturkraven som styr förvarets utsträckning.

6.2 Parametrar som beskriver transport av värme

6.2.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Värmetransporten genom berget sker främst genom värmeledning, som bestäms av bergets värmekapacitet och värmeledningsförmåga. (Värmetransport genom strålning och konvektion kan försummas.) Värmetransporten genom berget påverkar temperaturen i de olika barriärerna. Vid temperaturförändringar påverkas även bergets volym vilket bestäms av temperaturutvidgningskoefficienten. Denna parameter har dock redan diskuterats i avsnittet om bergmekanik (avsnitt 5.6).

Det är ett krav att temperaturen understiger 100 °C på kapselns yta. Uppfylls detta krav kommer temperaturen inte överstiga 100 °C i någon av de andra barriärerna heller. Kravet kan alltid uppnås genom att anpassa förvarsutformningen, t ex genom mängden bränsle i kapsel eller genom att anpassa avstånd mellan deponeringshål, under förutsättning att bergets termiska egenskaper och omgivande temperaturer (se nedan) är kända. God värmeledning och hög värmekapacitet ger därmed förutsättningar till att ha ett mer tätt packat förvar.

6.2.2 Krav och önskemål

Det finns inga krav beträffande bergets termiska egenskaper eftersom tillämpliga funktionskrav alltid kan tillgodoses med lämplig utformning av förvaret.

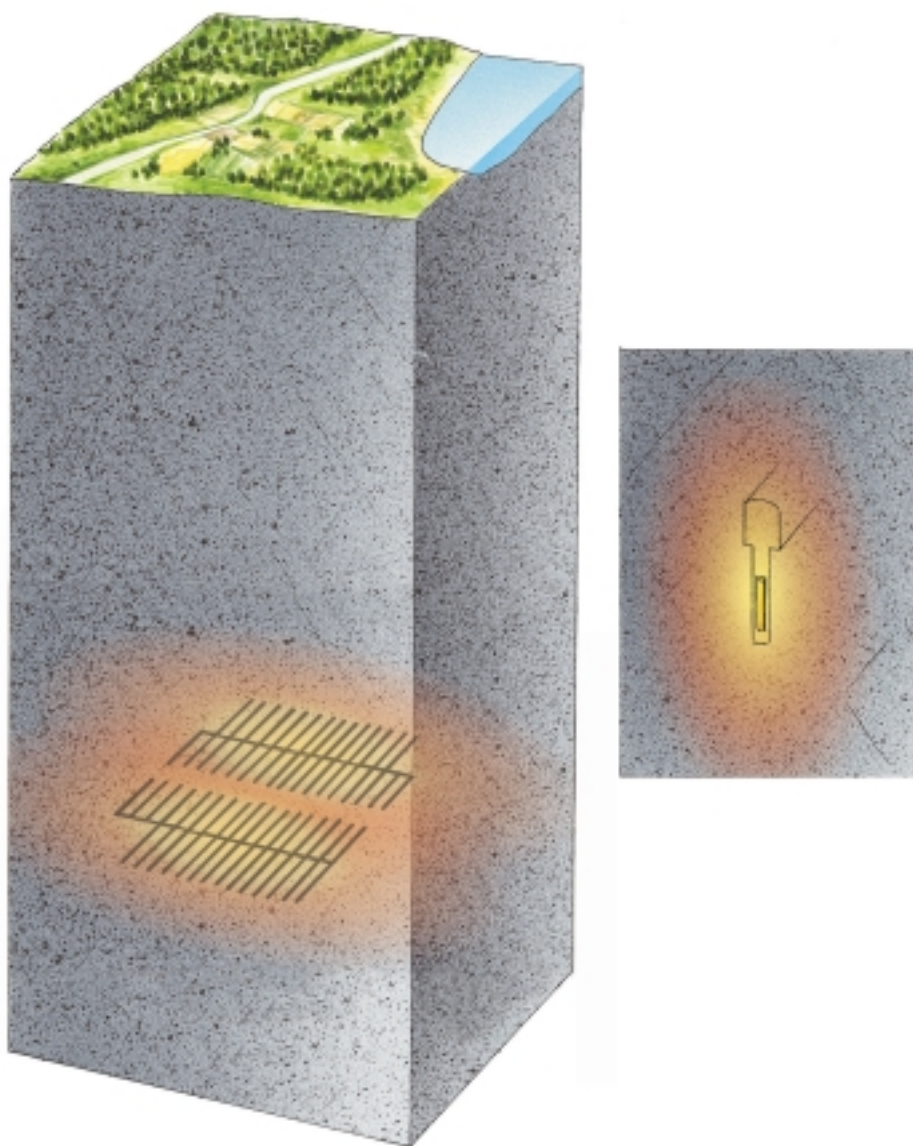
Det finns önskemål om hög värmeledningsförmåga, dvs $\lambda > 2,5 \text{ W(mK)}^{-1}$ (figur 6-1). Vid lägre värmeledningsförmåga måste avståndet mellan deponeringshålen i KBS-3 utformningen öka eller också måste andelen bränsle i varje kapsel minska. Det är också bra om de termiska egenskaperna är homogena i berget. Önskemålen är främst ekonomiska, eftersom ett mer utbrett förvar blir mer kostsamt. Indirekt har dock önskemålen en viss säkerhetskoppling eftersom det kan vara svårare att på ett bra sätt karakterisera ett mycket utbrett och komplext förvarsområde. Förvarsområdets storlek bestäms dock troligen mer av de närvarande sprickzonerna. Det svenska kristallina berget uppfyller i regel de satta önskemålen.

6.2.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Typiska värdeområden för de termiska egenskaperna hos den Fennoskandiska sköldens kristallina berggrund har sammanställts utifrån en modifierad bergartsgruppering enligt Sveriges Nationalatlas samt utifrån en statistisk bearbetning av termiska egenskaper baserade på mineralsammansättningar enligt SGU /Sundberg, 1995 och Sundberg, 1988/. Goda korrelationer mellan värden baserade på modalanalys (mineralsammansättning) och värmeledningsmätning i fält har erhållits i tidigare studier /Ericsson, 1985 och Sundberg, 1988/. Skillnad i mineralsammansättning medför olika värmeledningsförmåga hos förekommande bergarter. Kvarts har en värmeledningsförmåga ($7,7 \text{ W(mK)}^{-1}$) som är 3–4 gånger högre än för andra mineraler och därför har kvartsinnehållet en avgörande betydelse för bergarternas värmeledning.

En förenklad gruppering av medelvärden och intervall för olika bergarter ger följande resultat. Basiska bergarter (porfyriter, basiska vulkaniter, diabas, gabbro, diorit, amfibolit, etc) har ett medelvärde av $2,5 \text{ W(mK)}^{-1}$ och värden förekommer vanligen i intervallet $1,7\text{--}3,6 \text{ W(mK)}^{-1}$. Bergarter med intermediär sammansättning (granodioriter, vissa gnejser, vissa vulkaniter) har ett medelvärde av $3,2 \text{ W(mK)}^{-1}$ och värden förekommer vanligtvis i intervallet $2,2\text{--}4,2 \text{ W(mK)}^{-1}$. Kvartsrika bergarter (graniter, sura gnejser, kvartsiter, sura vulkaniter, etc) har ett medelvärde av $3,6 \text{ W(mK)}^{-1}$ med typiskt värdeintervall $2,5\text{--}5,5 \text{ W(mK)}^{-1}$.

De termiska egenskaperna bestäms främst utifrån kunskap om bergartsammansättning. Som tidigare redovisats (se avsnitt 4.4) är kunskapen om huvudbergarter i den ytliga berggrunden vanligen god under en förstudie. Detaljerad kunskap om bergartsfördelning på större djup erhålls under platsundersökningarna.



Figur 6-1. Det är bra om berget har högre värmeledningsförmåga än $2,5 \text{ W/(mK)}$.

6.2.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Parametrar för värmetransport bör ingå som lämplighetsindikatorer eftersom förvarets utformning delvis bestäms av dessa parametrar. Funktionskraven kan dock alltid uppfyllas, med hög säkerhet, genom lämplig förvarsutformning. För jämförelse mellan platser skulle parametrarna kunna ha viss betydelse eftersom förutsättningarna att ha ett litet förvarsområde (och därmed ett litet område som behöver undersökas noggrant) kan vara ekonomiskt betydelsefullt. Å andra sidan finns det även andra faktorer (t ex frekvens av sprickzoner) som också påverkar hur stort område som behöver studeras och användas. Avståndet mellan deponeringshål kan dessutom inte göras hur litet som helst av t ex hållfasthetsskäl. Det är därför ingen ytterligare fördel om värmeledningsförmågan är mycket högre än det satta önskemålet på $2,5 \text{ W/(mK)}^{-1}$.

Under en förstudie finns kunskap om vilka bergarter som finns i intressanta områden och en uppskattning av vilken temperatur som kan förväntas på förvarsdjup. Därmed kan förvarets storlek med hänsyn till värmekraven beräknas. I praktiken varierar emellertid värmeparametrarna lite inom bergarter som granit och gnejs, varför skillnader i dessa parametrar förmodligen får liten betydelse för vilka områden som väljs för platsundersökning. Det är bara om det görs en bedömning att värmeledningsförmågan understiger den önskade, som storleken på det område som måste studeras påverkas.

Vid platsundersökningen finns god kunskap om bergartssammansättning och värmeledningsegenskaper vilket används för att anpassa förvarsutformningen. Värmeledningsförmågan påverkar dock bara förvarets storlek om den det finns risk att den understiger önskemålet.

6.3 Omgivande temperaturer

6.3.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Temperaturfördelningen i berget bestäms av transportparametrarna diskuterade i föregående avsnitt samt av den initiala temperaturen i berg och grundvatten (initialvillkor), som huvudsakligen bestäms av årsmedeltemperatur på ytan och den geotermiska gradienten.

Funktionskrav och önskemål för temperaturfördelningen kan alltid uppnås genom att anpassa utformning (t ex mängden bränsle i kapsel, avstånd mellan deponeringshål eller förläggingsdjup) under förutsättning att bergets termiska egenskaper och omgivande temperaturer är kända. Det är dock en fördel om den initiala temperaturen på förvarsdjup inte är större än den behöver vara för att välja avstånd mellan deponeringshål och deponeringstunnlar.

Områden med stor potential för geotermisk energiutvinning (mycket hög geotermisk gradient) bör undvikas ur naturresurssynpunkt. I ett internationellt perspektiv förekommer dock inte sådana områden i det svenska urberget.

6.3.2 Krav och önskemål

Det finns inga krav på omgivande temperaturer, förutom att områden med stor potential för geotermisk energiutvinning (mycket hög geotermisk gradient) bör undvikas.

För att få rimlig storlek på förvaret finns det ett önskemål om att den initiala temperaturen på förvarsdjup ska understiga 25 °C. Detta önskemål är dock enbart formulerat ur ett ekonomiskt perspektiv.

6.3.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Den initiala temperaturen på 500 m djup ligger mellan 7 °C (norra Sverige) och 18 °C (södra Sverige). Den termiska gradienten ligger mellan 10 °C/km och 15 °C/km /Sundberg, 1995/.

Den initiala temperaturfördelningen i berget bestäms i första hand av platsens geografiska läge varför god kunskap om denna kan erhållas redan under förstudier. Eventuella anomalier kan avslöjas från borrhål i samband med platsundersökningar.

6.3.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Den initiala temperaturen på förvarsdjup bör ingå som lämplighetsindikator eftersom förvarets utformning delvis bestäms av denna parameter. Funktionskravet kan dock alltid uppnås, med hög säkerhet, genom lämplig förvarsutformning. För jämförelse mellan platser skulle dock den initiala temperaturen kunna ha viss betydelse eftersom förutsättningarna att ha ett litet förvarsområde (och ett litet område som behöver undersökas noggrant) kan vara ekonomiskt betydelsefullt. Temperaturen har dock liten betydelse för jämförelse mellan platser, om den bedöms ligga under önskemålet (25 °C). Det finns andra faktorer (t ex hållfasthet, frekvens av sprickzoner m m) som mer påverkar hur stort område som behöver studeras och användas. Under platsundersökningen finns data för en mer detaljerad utformning.

6.4 Sammanfattning lämplighetsindikatorer – temperatur

Föregående avsnitt har redovisat vilka termiska lämplighetsindikatorer som kan komma i fråga i olika skeden av lokaliseringsarbetet. Den kompletta redovisningen av arbetet återfinns i tabell A-3 i bilaga A och tabell B-3 i bilaga B.

Som framgått ovan används lämplighetsindikatorer främst för att bedöma huruvida krav och önskemål är uppfyllda. Tabell 6-1 ger en sammanställning av de lämplighetsindikatorer som preliminärt identifierats för termiska egenskaper.

Tabell 6-1. Lämplighetsindikatorer för termiska egenskaper (den kompletta redovisningen återfinns i bilaga A och B).

Parametrar – gruppvis	Krav eller önskemål	Kriterier under förstudie (FS) och under platsundersökning (PLU)
Transport av värme (värmeledningsförmåga och värmekapacitet)	Inga krav Önskemål om god värmeledningsförmåga (påverkar förvarsutformning, förvarsstorlek) dvs $\lambda > 2,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.	FS: Om det görs en bedömning (från bergarter) att värmeledningsförmågan understiger den önskade, påverkas storleken på det område som måste studeras. PLU: Detaljerad kunskap om bergarter och värmeledningsförmåga används för att anpassa förvarsutformning. Värmeledningsförmågan behöver dock främst bara beaktas om det finns risk att den understiger önskemålet ($2,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).
Omgivande temperatur (initial, yttemperatur och geotermisk gradient).	Områden med potential för geotermisk energiutvinning (mycket hög geotermisk gradient) bör undvikas. Önskemål att initial temperatur på förvarsnivå $< 25 \text{ °C}$.	FS: Undvik områden med bedömd stor potential för geotermisk energiutvinning. Om den initiala temperaturen bedöms överstiga den maximalt önskade måste den beaktas i vid val av hur stort område som behöver undersökas. PLU: Som FS. Vid förvarsutformningen måste man ta hänsyn till den initiala temperaturen om den ligger över eller nära den maximalt önskade.

7 Hydrogeologi

7.1 Påverkan på djupförvarets funktion

Grundvattenströmningen genom berget påverkar både djupförvarets isolerande och fördröjande funktioner. En genomgång av de funktioner som påverkas av grundvattnets strömning visar att det främst är bergets vattengenomsläpplighet som påverkar funktionerna, se bilaga A-4. Krav och önskemål på parametrar som är kopplade till hydrogeologin diskuteras i detalj i de följande avsnitten.

7.1.1 Inverkan på kapselns integritet

För att säkerställa lämplig kemisk miljö för kapseln bör grundvatten med olämplig sammansättning inte kunna strömma till förvarsområdet annat än under kortare tid.

Det finns i princip ett önskemål om låg grundvattenströmning i deponeringshålskala för att begränsa tillförseln av ämnen som skulle kunna korrodera kopparkapseln, men beräkningar visar (t ex SR 97 basscenariot /SKB 1999/) att flödet inte spelar någon avgörande roll om sulfidhalten i vattnet ligger inom de värden som har mätts upp i djupa grundvatten i Sverige och Finland (se avsnitt 8.2.3).

Kapselns förmåga att klara hydrostatiska tryck är platsberoende. Kapseln utformas för att, med god säkerhetsmarginal klara en extern last sammansatt av det hydrostatiska trycket och bentonitens svälltryck /Werme, 1998/. Analys i SR 97 visar dessutom att kapslarna klarar de högre tryck som uppstår under en glaciation (SR 97, Huvudrapporten /SKB, 1999a/).

7.1.2 Inverkan på buffertens isolerande förmåga

Grundvattenströmningen i närzonen påverkar buffertens uppvätning och svällning. Mycket ojämn uppvätning kan påverka svälltrycket runt kapseln under uppvättningsförloppet. Vattenhalten i bentoniten påverkar även värmeledningsförmågan hos densamma. Efter vattenmättnad uppstår ett jämt svälltryck. Upprätthållande av vattenmättnad och svälltryck är en förutsättning för att bufferten ska fungera som diffusions-spärr.

Det är ett krav att svällningen av bentoniten sker så att inte kapseln skadas. Ojämn tillförsel av vatten till deponeringshålet kan innebära att bentoniten sväller ojämnt och frågan har ställts om detta skulle kunna innebära en fara för kapseln. I tidigare genomförda enkla handboksberäkningar /Werme, 1998/ analyserades ett antal hypotetiska fall med ojämn svällning. Beräkningarna tog inte hänsyn till bentonitens egen förmåga att ta upp deformationer och överdrev därmed betydelsen av den ojämna svällningen. I regel visar dock dessa enkla beräkningar att uppkomna spänningar understiger kapselns hållfasthet. För vissa fall behövs dock mer avancerade beräkningar för att kontrollera om kapseln riskerar att skadas. Inom ramen för SR 97 genomfördes FEM-beräkningar där

man även tagit hänsyn till bentonitens materialegenskaper för att ge en mer realistisk belastning på kapseln /Börgesson och Hernelind, 1998/. Största dragspänningarna i kapselinsatsen visade sig då ligga under 55 MPa, vilket är långt under sträckgränsen för gjutjärnsinsatsen. Detta innebär att det inte finns någon grund för att ställa krav på jämna flöden i deponeringshålet.

Det finns ett önskemål om tillräcklig tillförsel av vatten från berget så att bufferten mätas tillräckligt snabbt och så att värmeledningsförmågan därmed blir tillräckligt hög. I SR 97 genomfördes funktionsanalyser om svällning och samverkan med grundvattenströmningen i berget (SR 97 Huvudrapporten kap 8 /SKB, 1999a/ och /Börgesson och Hernelind, 1998/).

Önskemålet om låga flöden för att nå stor fördröjning av radionuklidtransporten (se avsnitt 7.1.3), står i viss motsats till önskemålet om tillräcklig tillförsel av vatten för bentonitens svällning. Frågeställningen studeras bland annat inom det pågående ”prototypförvarsprojektet” vid Äspölaboratoriet (se t ex /Hermanson m fl, 1999/). Om det, mot förmodan, skulle visa sig vara problem att nå tillräcklig vattenmättnad vid alltför torra borrhål kan detta lösas med olika tekniska åtgärder. Önskemålet om låga flöden för att nå god fördröjning är därmed starkare än önskemålet om tillräcklig tillförsel av vatten för vattenmättnaden av bentoniten.

7.1.3 Inverkan på geosfärens fördröjande funktion

Det är önskvärt att transporten av radionuklider fördröjs i övergången buffert/berg och tunnel/berg. Fördröjningen är stor vid låga grundvattenflöden och få sprickor med liten apertur i skärningen med deponeringshålen /Moreno och Gylling, 1998/. Beräkningar inom SR 97 (Huvudrapporten, kapseldefektsscenario /SKB, 1999a/) visar att om grundvattenflödet (”darcyhastigheten”) för de sprickor som korsar deponeringshålet är större än $q_{\max}=0,01$ m/år blir fördröjningen i övergången buffert/berg i det närmaste försumbar (se avsnitt 9.2). Det är givetvis önskvärt med lägre flöden, men det finns ingen grund för krav eftersom beräkningarna också visar att utsläppet till biosfären kan hållas under nivåer satta i SSI:s föreskrifter /SSI, 1998/ även om fördröjningen i övergången buffert/berg försummas.

Grundvattenströmningen mellan en skadad kapsel och biosfären är en viktig faktor för hur mycket radionuklider fördröjs i själva berget /Andersson m fl, 1998b/. Beräkningar i SR 97 (Huvudrapporten, avsnitt 9.11 /SKB, 1999a/) visar att fördröjningen i geosfären blir betydande för transportvägar som har ett s k ”transportmotstånd” (eller F-parameter) som är större än 10^4 m/år (se avsnitt 9.3). Det är givetvis önskvärt med stora transportmotstånd i geosfären, men det är inte möjligt att ange ett mer preciserat krav än att den samlade barriärfunktionen ska räcka för att ge fullgod säkerhet. Utsläppet till biosfären kan hållas under nivåer satta i SSI:s föreskrifter /SSI, 1998/ även om inte alla transportvägar från förvar till biosfär har ett stort transportmotstånd.

7.1.4 Biosfärsfrågor

Det finns inga krav på de ytnära förhållandena. Ur naturresurssynpunkt finns det önskemål om att undvika områden som är (eller kan bli) en betydande vattentäkt, jordtäkt eller odlingsmark. Stora och vattenförande mäktigheter hos jordlagren komplicerar undersökningar ur bygg- och driftsynpunkt. Ur naturskyddssynpunkt finns det krav/önskemål att undvika områden där biologisk mångfald och skyddsvärda organismer kan hotas direkt eller indirekt genom byggnation av tillfartsvägar och dylikt i obrutna områden.

Data över de marknära ekosystemen är i första hand värdefulla för att kunna bygga upp en trovärdig modellbeskrivning. God tillgång på sådana data av hög kvalitet ökar med andra ord trovärdigheten hos gjord modellering och minskar osäkerhetsintervallen för resultaten.

Vidare måste påverkan på det ytliga grundvattnet (grundvattenavsänkningar och kemisk påverkan) minimeras. Detta innebär önskemål om begränsat inläckage av grundvatten i förvaret under bygge och drift. Önskemålet kan tillgodoses genom lämpliga utformning av förvaret, val av lämpliga injekteringsmetoder och genom lämpligt val av metoder för att bygga förvaret (se 7.1.5).

7.1.5 Anläggningsfrågor

Det finns ett antal hydrogeologiska förhållanden som måste beaktas vid utformningen och bygget av djupförvaret.

- Det är önskvärt med måttlig vatteninläckning eller att områden med för stor inläckning kan tätas med rimliga injekteringsinsatser (injekteringsbehov) eftersom detta påverkar kostnader och byggtider.
- Injektion måste utföras så att det inte finns risk för allvarlig miljöpåverkan eller negativ inverkan på grundvattnets sammansättning i djupförvaret.
- Även ur arbetarskyddssynpunkt måste sannolikheten för kraftig vatteninläckning/ras vara liten, men problem kan dock alltid hanteras med ökade kostnader som följd.

Utformning styrs så att grundvattenflöde i förvarsområdet blir lågt genom att regionala och lokala större sprickzoner undviks i deponeringstunnlarna.

7.2 Vattengenomsläpplighet – hydraulisk konduktivitet

7.2.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Grundvattenströmningens storlek och fördelning i berget bestäms i första hand av bergets vattengenomsläpplighet. För en diskret spricka bestäms genomsläppligheten teoretiskt av sprickvidden ("aperturen"). Sprickvidden, och därmed genomsläppligheten varierar i sprickans plan. Vattengenomsläppligheten för en bergvolym som innehåller diskreta sprickor (t ex en del av bergmassan, en del av en sprickzon) bestäms dels av genomsläppligheten för de sprickor som finns i volymen och dels av hur väl dessa är förbundna med varandra (konnektivitet). Berg utan synliga sprickor har mycket liten vattengenomsläpplighet. En större bergvolym innehåller tusentals sprickor och det är inte möjligt att i detalj beskriva varje spricka. I stället används olika makroskopiska eller statistiska mått.

Den vanligaste beskrivningen är att representera vattengenomsläppligheten hos en bergvolym av en viss storlek ("skala") med en s_k hydraulisk konduktivitet (K). För små volymer (kub med sidan tiotals meter eller mindre) kommer den hydrauliska konduktiviteten att variera kraftigt i rummet. I större skala kommer den rumsliga variationen att avta (men medelvärdet tenderar att öka något, se /Walker m fl, 1997/). I den grundvattenmodell som SKB använder för närvarande beskrivs denna rumsliga variation med en s_k stokastisk kontinuummodell /Neuman, 1987, Norman, 1992/.

För geometriska objekt som är tvådimensionella till sin karaktär (t ex sprickor och sprickzoner) kan vattengenomsläppligheten också beskrivas med en transmissivitetsfördelning. Transmissiviteten (T) för en spricka eller en sprickzon är den sammanlagda vattengenomsläppligheten över hela sprickvidden (bredden på zonen).

Alternativt kan bergets genomsläpplighet beskrivas med en stokastisk diskret nätverksmodell /Dershowitz m fl, 1999/. Modellen bygger på en statistisk beskrivning av de diskreta sprickornas orientering, storlek, frekvens och vattengenomsläpplighet. Genomsläppligheten beskrivs i regel som en transmissivitetsfördelning för de diskreta sprickorna. I SR 97 studerades detta modellkoncept som ett alternativ. Jämfört med en kontinuummodell kan den diskreta modellen ge mer information om flödet i detaljerad skala och om sambandet mellan flöde och olika förhållanden som påverkar radionuklidtransporten.

Det är komplicerat att diskutera krav och önskemål på bergets genomsläpplighet eftersom det finns olika modeller för hur genomsläppligheten ska beskrivas och eftersom egenskaperna i viss mån beror på i vilken skala beskrivningen sker. Erfarenheterna från de omfattande hydrogeologiska analyser som genomförts inom SR 97 visar dock att det är meningsfullt att diskutera önskemål om vattengenomsläppligheten utifrån begreppet hydraulisk konduktivitet i cirka 30 m skalan. Skälen är att radionuklidtransportberäkningarna baserats på resultat från hydrogeologiska analyser i denna skala och att jämförelsen mellan den stokastiska kontinuummodellen och den diskreta nätverksmodellen visar liknande resultat. I kommande beskrivningar av bergets vattengenomsläpplighet är det möjligt att SKB väljer andra skalor eller väljer andra modellkoncept. Nedan angivna önskemål kan dock modifieras så att de även skulle kunna appliceras i dessa kommande beskrivningar.

7.2.2 Krav och önskemål

Det finns inga direkta krav på transmissivitetsvärden för regionala och lokala större sprickzoner. Sådana sprickzoner är normalt kopplade till stora flöden och snabba transportvägar och tillåts därför ur säkerhetssynpunkt normalt inte passera enskilda deponeeringstunnlar (se avsnitt 4.6 och figur 7-1) Undantag från detta krav kan göras om det går att visa att vattengenomsläppligheten för sprickzonen inte signifikant avviker från bergmassan i övrigt. Om sprickzonerna ligger utanför förvarsområdet har deras vattengenomsläpplighet begränsad inverkan på säkerheten. Rent teoretisk skulle det rent av kunna vara en fördel om vissa sådana zonerna hade hög vattengenomsläpplighet eftersom detta skulle kunna avskärma grundvattenströmningen i förvarsområdet.

För bergarbetena är det önskvärt att de sprickzoner som behöver passeras under bygge (dvs normal sett lokala större och lokala mindre sprickzoner) har så låg vattengenomsläpplighet att inläckaget blir måttligt eller att de kan tätas med normala injekteringsinsatser. Sprickzoner med en låg transmissivitet ($T < 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) utgör inga väsentliga problem, men det är inget avgörande hinder om ett fåtal zoner har högre transmissivitet förutsatt att de inte är byggnadstekniskt besvärliga (t ex hög sprickdensitet och vittring, lera). Ett fåtal mer komplexa passager kan accepteras.

Det är inte möjligt att ur säkerhetssynpunkt ange preciserade önskemål för vattengenomsläppligheten hos enskilda lokala mindre sprickzoner. Detta beror på att det är de geometriska förhållandena och egenskaper i systemet av sprickzoner och sprickor som bestämmer lokalt grundvattenflöde och kapacitet för transportvägar genom berget. Det är dock generellt sätt fördelaktigt med låg frekvens av lokala mindre sprickzoner och att dessa har låg vattengenomsläpplighet. Det är önskvärt att transmissiviteten inte överstiger de värden som använts inom SR 97 /Walker m fl, 1997/.

För enskilda deponeringshål accepteras enbart att dessa korsas av enskilda sprickor. Ur säkerhetssynpunkt är det önskvärt att den samlade vattengenomsläppligheten hos de sprickor som korsar deponeringshålet är liten eftersom detta innebär en fördröjning av radionuklidtransporten i övergången buffert/berg. Utsläppet från djupförvaret kan dock hållas till mycket låga värden även om grundvattenströmningen är mycket stor kring deponeringshålen. Beräkningar inom SR 97 (/Walker och Gylling, 1998/, /Walker och Gylling, 1999/, /Gylling m fl, 1999/, Datarapporten /Andersson, 1999/) visar att en darcyhastigheten i närområdet knappast överstiger $q_{\max}=0,01$ m/år om den hydrauliska konduktiviteten i 30 m skala understiger 10^{-8} m/s. För att behålla ett bidrag till fördröjningen i övergången buffert/berg är det ett önskemål att undvika områden där den hydrauliska konduktiviteten i deponeringshålskala har en hydraulisk konduktivitet som överstiger 10^{-8} m/s.

Grundvattenströmningen har större inverkan på hur mycket radionuklidtransporten fördröjs i berget mellan den skadade kapseln och biosfären. Det är en klar fördel om grundvattenflödet är lågt även om det totala utsläppet av radionuklider (och resulterande doser) inte avgörande bestäms av fördröjningen i berget. Datarapportens /Andersson, 1999/ sammanställning av de hydrogeologiska analyserna (/Walker och Gylling, 1998/, /Walker och Gylling, 1999/, /Gylling m fl, 1999/) visar att bergets transportmotstånd blir betydande ("F" större än 10^4 m/år, se kapitel 9) om endast en begränsad del av bergmassan, i skalan 30 m, har en hydraulisk konduktivitet som överstiger 10^{-8} m/s¹⁾ (figur 7-1). Visserligen inverkar även andra faktorer, som flödesvätt yta, transportlängd och hydraulisk gradient, på storleken av transportmotståndet (se kapitel 9), men om vattengenomsläppligheten ligger inom det önskade området blir transportmotståndet betydande när de andra faktorerna har rimliga värden. Det visar sig med andra ord att det relativt svaga önskemålet på den hydrauliska konduktiviteten med hänsyn till inverkan av fördröjningen i övergången buffert/berg ligger på samma nivå som det betydligt starkare önskemålet avseende inverkan på fördröjningen i berget.

För att praktiskt klara deponeringen gäller vidare att flödet till enskilda deponeringshål under deponeringsfasen inte får vara för stort. En övre gräns har ännu inte fastlagts men flödet bör under alla förhållanden understiga 10 l/min. Detta önskemål kan alltid uppfyllas genom aktivt val av deponeringshål (och eventuella tättningsinsatser), men det är uppenbart att platsen blir mindre användbar om berget innehåller få lämpliga kapselpositioner. För att understiga ett inflöde om 10 l/min bör den lokala konduktiviteten kring deponeringshålen (skala 10–30 m) helst inte överstiga 10^{-8} – 10^{-7} m/s. Det innebär att de byggtekniska och säkerhetsmässiga önskemålen på bergets vattengenomsläpplighet i deponeringshålskala i stort sett är överensstämmande.

Med tanke på komplexiteten hos den hydrauliska informationen och att grundvattenströmningen beror både på genomsläpplighet och randvillkor, är det alltid nödvändigt att ställa upp modeller för grundvattenströmningen som kan beräkna funktionen i djupförvaret. Detta gäller även om parametervärdena ligger inom de önskvärda områdena.

Slutligen bör påpekas att det pågår omfattande forsknings- och utvecklingsinsatser för att bättre kunna beskriva grundvattenflöde och transport i kristallint berg. Denna forskning och utveckling kommer sannolikt att visa att ovanstående önskemål till stor del kan klaras av genom att på ett aktivt sätt välja var i berget som deponeringshålen placeras.

¹⁾ Värdet $K < 10^{-8}$ m/s kan också "härledas" genom följande enkla överslag:

$$F = a_r L / q \text{ och } q = -K \text{grad}(H)$$

där a_r är flödesvätt ytan per volym berg, L transportvägen, q darcyhastigheten, K den hydrauliska konduktiviteten och grad(H) gradienten för grundvattnets trycknivå. Om man antar att grad(H) är 1 %, L är 30 m (kan t ex vara avståndet till en större sprickzon) och att a_r är cirka $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ blir $F > 10^4$ år/m om $K < 10^{-8}$ m/s.



Figur 7-1. Det är en fördel om en stor del av bergmassan i deponeringsområdet har en vattengenomsläpplighet (K) som är mindre än 10^{-8} m/s (i skalan 30 m). Sprickzoner (regionala och lokala större) med stora flöden tillåts normalt inte passera enskilda deponeringstunnlar.

7.2.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Värdeområden för förekomst och frekvens av sprickzoner diskuteras under rubriken strukturgeologi (se kapitel 4).

För de platser som analyserats inom SR 97 (data från Äspö, Finnsjön och Gideå) varierade den hydrauliska konduktiviteten i skalan 30 m för sprickzoner mellan $1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s och $2 \cdot 10^{-10}$ m/s. För bergmassan sammansatt av diskreta sprickor och lokala mindre sprickzoner varierade den hydrauliska konduktiviteten (i skalan 30 m) mellan 10^{-6} m/s och 10^{-12} m/s. Värdena baseras på en samlad geostatistisk analys /Walker m fl, 1997/.

För de kommuner som undersökts i förstudieskedet ger brunnarsarkivet, som upprätthålls av SGU enligt lagen om uppgiftsskyldighet vid grundvattentäcksundersökning och brunnborrning /SFS 1975:425/en approximativ uppfattning om variationen i vattengenomsläpplighet för de översta 100 m i olika bergarter inom kommunen, se t ex Follin m fl /1996/. En platsundersökning ger möjlighet att studera variationen i vattengenomsläpplighet på större djup och ger dessutom möjligheter att bestämma (statistiska) transmissivitetfördelningar för enskilda sprickor. Detaljundersökningen ger ökad kunskap om de hydrauliska egenskaperna för de sprickzoner och sprickor som korsar eller befinner sig nära undersökningstunnlarna.

7.2.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Genomsläpplighet hos regionala och lokala större sprickzoner är inte i första hand väsentliga lämplighetsindikatorer eftersom dessa zoner undviks genom att anpassa förvarets utformning. Den geometriska beskrivningen av dessa strukturer är däremot mycket viktig, se avsnitt 4.4. Genomsläppligheten hos dessa zoner är dock fortfarande viktig att känna till för att kunna göra en bra hydrogeologisk modell av platsen.

Genomsläppligheten för den del av berget som bara innehåller lokala mindre sprickzoner och diskreta sprickor bör dock vara viktiga lämplighetsindikatorer (se önskemål på ”bergmassan” ovan). Osäkerheterna i uppskattningen liksom den rumsliga fördelningen måste dock beskrivas och hanteras, vilket komplicerar jämförelser mellan platser. En samlad hydrogeologisk modellering är nödvändig även om enkla överslagsberäkningar snabbt kan ge en relativt god bild av de hydrogeologiska förhållanden som resulterar från en given genomsläpplighet.

Under förstudieskedet finns det inte tillräckligt med information om den hydrauliska konduktiviteten på djupet för att kunna formulera användbara kriterier.

En stor andel av de vid platsundersökningen tolkade värdena av hydraulisk konduktivitet i 30 m skalan för den del av berget som inte ligger i tolkade sprickzoner (bergmassan) bör vara lägre än 10^{-8} m/s. Om detta kriterium inte uppfylls ställs särskilda krav på noggrann anpassning av förvaret till de lokala förhållandena om säkerhetsmarginalen ska bibehållas.

Det är vidare fördelaktigt om förvaret anpassas så att flertalet tolkade lokala större och lokala mindre sprickzoner, som behöver passeras med tillfartstunnlar, har en transmissivitet lägre än 10^{-5} m²/s. Om det finns många zoner med högre transmissivitet och som samtidigt är breda och lerfyllda kompliceras förvarets utformning och bygge. Speciell uppmärksamhet måste då också riktas på eventuella miljöeffekter från grundvattenavsänkningar och injekteringsarbeten. En bedömning av miljöpåverkan från anläggningsarbetena behöver alltid göras.

7.3 Porositet och magasinskoefficienter

7.3.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Flödesporositeten uttrycker förhållandet mellan volymen av vattengenomsläppliga hålrum och sprickor och bergets totalvolym. Flödesporositeten påverkar transporthastigheten för icke sorberande ämnen, som t ex Cl⁻, och är därför en viktig parameter för transient modellering av saltvattenströmning. Flödesporositeten är dock av mindre betydelse för fördröjningen av de radionuklider som kan förekomma i ett utsläpp från en skadad kapsel (SR 97 Huvudrapporten, kapseldefektscenariot /SKB, 1999a/). De flesta av dessa har god sorptionsförmåga varvid fördröjningen helt domineras av matrisdiffusion och sorption oberoende av den mycket måttliga fördröjningen direkt i de vattengenomsläppliga sprickorna. De fåtal nuklider som inte har god sorptionsförmåga och samtidigt har kunnat lämna kapsel och buffert är så långlivade att uppehållstiden i berget inte hinner påverka halterna.

Magasinskoefficienten behövs vid transient utvärdering av pumpförsök. Magasinskoefficienten beror stor del av bergmassans kompressibilitet. Den har liten betydelse för förvarets funktion.

För enskilda deponeringshål finns ett krav att porositeten inte får vara så stor att bentonit kan tryckas ut i stora hålrum och sedan eroderas bort. Detta krav kan dock enkelt tillgodoses genom aktivt val av deponeringshål och leder inte till krav på bergets egenskaper. För god närområdesfunktion (begränsat utläckage av radionuklider från buffert till omgivande berg) är det i princip gynnsamt med så låg porositet som möjligt, men inverkan är svag och det finns ingen grund att ställa krav (se avsnitt 9.2).

7.3.2 Krav och önskemål

Det finns inga krav på flödesporositet eller magasinskoefficient för någon av bergets strukturer eller omgivande berg.

Det finns heller inga speciella önskemål om flödesporositet. Värdena på förvarsdjup bör dock ej starkt avvika i jämförelse med normala förhållanden i svenska berggrunden (se nästa avsnitt) eftersom det saknas erfarenhet från sådana (hypotetiska) förhållanden. Skulle det dock visa sig att en plats har mycket avvikande porositetsförhållanden betyder det inte att platsen skulle vara olämplig utan bara att ytterligare utredningar om porositetens betydelse skulle kunna behöva göras.

7.3.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

För regionala och lokala sprickzoner ligger flödesporositeten i intervallet $10^{-3} < \epsilon_f < 10^{-2}$ och den specifika magasinskoefficienten i intervallet $10^{-6} \text{ m}^{-1} < S_s < 10^{-5} \text{ m}^{-1}$. För resten av berget gäller $10^{-4} < \epsilon_f < 10^{-2}$ för flödesporositeten och $10^{-7} \text{ m}^{-1} < S_s < 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ för den specifika magasinskoefficienten. Värdena baseras främst på uppskattningar gjorda inom Äspöprojektet /Rhén (ed), 1992/, /Winberg (ed), 1996/, samt /Rhén (ed) 1997/.

Flödesporositet och magasinskoefficient kan uppskattas i samband med platsundersökningar.

7.3.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Parametrarna är inte användbara som lämplighetsindikatorer eftersom de har försumbar betydelse för djupförvarets funktion enligt ovan. Inga kriterier behöver formuleras.

7.4 Grundvattnets egenskaper

7.4.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Grundvattnets densitet och viskositet påverkar vattengenomsläppligheten. Densitetsvariationer (som kan bero både på temperatur och koncentrationsskillnader) ger dessutom, via gravitationen, upphov till drivande krafter. Den största temperaturpåverkan sker från förvaret, men även denna densitetspåverkan har relativt liten betydelse för grundvattenströmningen /Thunvik och Braester, 1980/. Densitetsvariationer på grund av varierande salinitet kan vara mer betydelsefulla och behöver beaktas vid grundvattenberäkningar /Voss och Andersson, 1993; Follin, 1995; Hartley m fl, 1998/. I sådana beräkningar är det dock nödvändigt att beakta storskaliga tidsberoende förändringar som t ex landhöjning.

Hög salinitet på djupet i berggrunden kan vara en indikation på låg grundvattenomsättning och vilket i princip är gynnsamt, men vid transienta förlopp t ex orsakade av landhöjning blir bilden inte lika enkel – även det salta vattnet kan röra sig. Salt grundvatten komplicerar också den hydrogeologiska karakteriseringen. Vidare kan det av kemiska skäl vara olämpligt med hög salthalt eftersom denna kan störa olika barriärfunktioner (se kapitel 8). Salt grundvatten minskar, å andra sidan, risken för att området i en framtid används för utvinning av grundvatten för konsumtion.

7.4.2 Krav och önskemål

Ur hydrogeologisk synpunkt finns det inga krav eller önskemål på vattnets densitet och viskositet. Densitetsförhållandena är dock viktiga att känna till och måste beaktas vid grundvattenmodellering. Ur hydrogeologisk synpunkt är det dock inte generellt möjligt att enkelt ange om det är en fördel eller nackdel med höga salthalter. Ur kemisk synpunkt finns det dock ett tydligt krav på att den totala salthalten på förvarsnivå inte får vara för hög (se avsnitt 8.4).

7.4.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Grundvattnets densitet och viskositet påverkas av rådande temperatur och salinitet. Salinitetsvärden diskuteras inom kemiavsnitten (avsnitt 8.4). Den generiska kunskapen om temperaturfördelningen (se avsnitt 6.3) är tillräcklig för att bestämma grundvattnets temperaturberoende egenskaper.

7.4.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Grundvattnets densitet eller viskositet utgör inte primära lämplighetsindikatorer ur hydrogeologisk synvinkel. Salinitet är dock en viktig indikator ur kemisk synvinkel. Höga och starkt varierande salinitetsförhållanden komplicerar dock analysen av en plats lämplighet. Under alla förhållanden måste densitetsvariationerna beaktas vid platsspecifik hydrogeologisk modellering. Parametern är därför mycket viktig att känna till.

Den tillgängliga informationen under förstudier tillåter inte meningsfulla platsspecifika prognoser av grundvattenströmningen. Om förstudien indikerar att det kan finnas salt vatten mot djupet i det undersökta området (läge i förhållande till kust, förekomst av salt grundvatten i bergborrade brunnar etc) innebär detta sannolikt att den hydrogeologiska situationen delvis behöver beskrivas som transient densitetsberoende strömning. Detta bör inverka på vilka data som samlas in under platsundersökningen.

Om platsundersökningen visar att grundvattnet ner till cirka 600–700 m har högre koncentrationer av salt än cirka 1 % är det nödvändigt att åtminstone delvis modellera grundvattenströmningen som transient och densitetsberoende /Freeze och Cherry, 1979/.

7.5 Ytnära ekosystem

7.5.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

De marknära ekosystemen kan beskrivas i termer av identifierade ekosystem (skog, sjö, äng, etc), deras aktivitet (markutnyttjande, upptagningshastigheter etc,) samt transport av vatten och partiklar (meteorologiska/hydrologiska data) samt hydrogeologisk beskrivning (vattengenomsläpplighet, mäktighet och porositet) av jordlagren. Informationen behövs för att kunna beskriva omsättning, spridningsvägar och konsekvenser av radionuklider som kommer ut i miljön. De marknära förhållandena inverkar även på grundvattenbildningen och grundvattenkemin i stort, även om grundvattenomsättningen på djupet är mycket långsam.

7.5.2 Krav och önskemål

Det finns inga krav på de ytnära förhållandena. Förvarets isolerande och fördröjande funktion skall under alla förhållanden vara så bra att fullgod säkerhet kan nå oavsett vilka mark- och recipientförhållanden som råder. I lag skyddade områden ska undvikas.

Ur naturressurssynpunkt finns det önskemål om att undvika områden som är (eller kan bli) en betydande vattentäkt, jordtäkt eller odlingsmark. Stora och vattenförande mäktigheter komplicerar undersökningar. Ur naturskyddssynpunkt finns det önskvärt att ovanjordsanläggningen undviker områden där biologisk mångfald och skyddsvärda arter kan hotas direkt eller indirekt genom byggnation av tillfartsvägar och dylikt i obrutna områden.

Data över de marknära ekosystemen är i första hand värdefulla för att kunna bygga upp en trovärdig modellbeskrivning. God tillgång på sådana data av hög kvalitet ökar med andra ord trovärdigheten hos gjord modellering.

7.5.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Den specifika avrinningen i Sverige varierar i grova drag mellan 100–300 mm/år. Jordlagrens hydrauliska konduktivitet ligger inom intervallet 10^{-9} m/s till 1 m/s. Normala jorddjup ligger i intervallet 0–30 m. Endast i undantagsfall har djup upp mot 100 m uppmätts i Sverige.

Platsspecifik marknära informationen om recipientförhållanden och hydrogeologi kan erhållas utan att genomföra ett borrhålsprogram. En del information tas fram redan i samband med gjorda förstudier. Befintliga data kan dock behöva ytterligare sammanställas. Vidare behöver ytterligare och mer detaljerad information samlas in under platsundersökningarna och vid förberedelser av dessa.

7.5.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Förhållanden i de ytnära ekosystemen utgör inte geovetenskapliga lämplighetsindikatorer, men beaktas givetvis vid lokaliseringen av ett djupförvar. Områden som har höga värden ur naturskydds- eller naturressurssynpunkt identifieras under förstudierna. Om en platsundersökning planeras i ett sådant område krävs att dessa värden särskilt beaktas.

En preliminär anpassning av djupförvarets ovanjordsdelar till de ytnära ekosystemen görs redan utifrån den information som erhålls från förstudien. I lag skyddade områden undviks. Det är ett önskemål att intressanta områden för platsundersökningar har få

konkurrerande intressen och att ovanjordsdelen kan preliminärt anpassas så att liten påverkan sker på det yttnära ekosystemet. En mer detaljerad analys och anpassning görs i ett tidigt skede under platsundersökningen vid val av område för den fortsatta platsundersökningen, men samma principiella kriterier tillämpas.

7.6 Randvillkor och stödjande data

7.6.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Det finns flera olika hydrogeologiska data som avser aspekter av grundvattenströmningen men som inte ingår som oberoende modellparametrar vid en hydrogeologisk modellering. Det gäller till exempel portryck, grundvattnets trycknivå (summan av tryckhöjd och geometrisk höjd – ”grundvattenytan”), uppmätt grundvattenflöde, karakterisering av in- och utströmningsområden och resultat av storskaliga pumptester och spår försök. Sådana data kan användas för att kontrollera rimligheten hos modeller (stödjande data) eller för randvillkorssättning. Specifika faktorer att beakta är i) hydraulisk gradient, ii) fördelning av in- och utströmningsområden och iii) strandförskjutningen på grund av landhöjning m m.

Portrycket påverkar direkt kapselns funktion (se 7.1.1). Ställda krav uppfylls genom att inte välja för stort förvarsdjup eftersom portrycket, med mycket små variationer, bestäms av djupet.

Gradienten för grundvattnets trycknivå är den viktigaste drivande kraften för grundvattenströmningen. I princip gäller att ju lägre gradient desto lägre grundvattenströmning. Storskaligt varierar gradienten inte lika mycket som bergets vattengenomsläpplighet utan bestäms i hög grad av den topografiska variationen. Räknat över större områden kan den hydrauliska gradienten inte bli större än den topografiska, men den kan bli lägre än den topografiska i områden med hög vattengenomsläpplighet. Områden med lokalt liten hydraulisk gradient behöver därmed inte alltid innebära en liten grundvattenströmning. Om vattengenomsläppligheten är mycket hög räcker inte grundvattenbildningen till för att hålla grundvattnets ”energinivå” i markytan och gradienten kan bli mycket låg, även om grundvattenströmningen är hög. Utanför fjällkedjan är i Sverige den regionala topografiska gradienten begränsad och i regel lägre än 1 %, se avsnitt 4.2.3. Variationer av den hydrauliska gradienten inom sådana relativt flacka områden är bara delvis kopplade till var grundvattenströmningen är stor. Det är primärt bergets vattengenomsläpplighet som bestämmer grundvattenströmningens storlek.

Vid höga salthalter, där vattnets densitetsskillnader kan ge upphov till flytkrafter som även de driver grundvattenströmningen, kompliceras situationen av att den drivande kraften inte längre enbart kan beskrivas som en gradient av en trycknivåfördelning. Det påverkar dock inte ovanstående resonemang i nämnvärd grad.

Fördelningen av in- och utströmningsområden ger i princip viktig information vid randvillkorssättning av hydrogeologiska modeller även om grundvattenomsättningen på djupet främst bestäms av det djupa bergets vattengenomsläpplighet. Principiellt borde det vara en fördel att förlägga förvaret under ett inströmningsområde eftersom detta bör maximera längden på strömvägarna från förvaret. Det grundvatten som passerar förvaret kommer dock till slut att komma upp i ett utströmningsområde och hittills gjorda grundvattenmodeller tyder på att dessa utströmningsområden ofta inte ligger långt ifrån förvaret (/Walker och Gylling, 1998/, /Walker och Gylling, 1999/, /Gylling m fl, 1999/) eftersom cirkulationen i hög grad styrs av strukturer i berget och

den lokala topografin. Fördelningen av in- och utströmningsområden beaktas i den del av säkerhetsanalysen som beskriver effekter på de marknära ekosystemen. De marknära ekosystemen är också goda indikatorer på potentiella in- och utströmningsområden.

Strandförskjutningen förändrar randvillkoren för alla platser som ligger i kustnära områden. Vid en framtida glaciation sker en omfattande påverkan på grundvattenströmningen, oavsett platsens läge. Effekterna av dessa två processer diskuteras och analyseras inom ramen för klimatscenariot i SR 97 Huvudrapporten /SKB, 1999a/.

7.6.2 Krav och önskemål

Allmänt gäller att randvillkor och stödjande data i första hand är värdefulla för att kunna bygga upp en trovärdig systembeskrivning. God tillgång på sådana data av hög kvalitet ökar med andra ord trovärdigheten hos gjord modellering.

Det finns inga krav beträffande hydrauliska gradienter, fördelning av in- och utströmningsområden eller beträffande strandförskjutningen.

Det finns ett önskemål om att de naturliga lokala hydrauliska gradienterna på försvarsnivå inte är högre än vad som är normalt utanför den svenska fjällkedjan (dvs lägre än cirka än 1 %). Det är dock ingen ytterligare fördel med mycket låga hydrauliska gradienter.

Det är principiellt fördelaktigt om försvarsområdet placeras under ett lokalt inströmningsområde, men med tanke på att utströmningsområdena ofta inte ligger långt ifrån förvaret (se ovan) är det tveksamt om detta önskemål ska ges speciellt stor vikt. Fullgod säkerhet och retentionsförmåga måste under alla förhållanden visas i den platsspecifika säkerhetsanalysen.

Om strandförskjutningen är betydande är det nödvändigt att beakta denna i den hydrogeologiska modelleringen eftersom antaganden om stationära tillstånd kan ge en missuppfattning om grundvattenströmningen /Voss och Andersson, 1993, Svensson, 1999/. Modelleringen förenklas om strandförskjutningen är liten, men landhöjningen i Sverige är så stor att hänsyn måste tas till strandförskjutningen överallt längs den svenska kusten norr om Skåne.

Det finns ingen grund att ställa krav eller önskemål på glaciationsfrekvens. Glaciation analyseras som scenario i säkerhetsanalysen.

7.6.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Inom SR 97 är typiska värden för den naturliga regionala gradienten på försvarsdjup 0,05–0,2 % för Äspö, 0,2–0,3 % för Finnsjön och 0,5–0,6 % för Gideå /Walker m fl, 1997/. Beträffande prognoser för strandförskjutning och framtida glaciationer hänvisas till klimatscenariot i SR 97 Huvudrapporten, kap 6 och kap 10 /SKB, 1999a/.

Information om in- och utströmningsområden, liksom uppfattningar om gradienter (baserat på topografi) torde vara känt redan från förstudierna. Ytterligare, och mer detaljerad information kan samlas in under platsundersökningarna. Mätningar av portryck och trycknivåer kan bara erhållas vid platsundersökningarna.

Prognoser av strandförskjutning och glaciationer påverkas inte av de olika skedena i en platsundersökning.

7.6.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Stödande data är inte i första hand användbara som lämplighetsindikatorer utan behövs för att bygga upp trovärdiga systembeskrivningar. Svårtolkade data, eller svårighet att få överensstämmelse mellan modeller och stödande data borde dock vara negativt ur lokaliseringssynpunkt. Endast fjällkedjan är uppenbart olämplig på grund av höga gradienter men den har redan uteslutits av andra skäl (se Översiktstudie 95 /SKB, 1995b/).

Information om den hydrauliska gradienten, liksom fördelningen av ut- och inströmningsområden är väsentliga för den hydrogeologiska förståelsen av platsen men varierar för lite för att kunna vara primära lämplighetsindikatorer.

Prognoser av glaciationsfrekvens är inte användbara lämplighetsindikatorer. Dels finns ingen speciell grund att ställa krav eller önskemål. Dels måste sådana prognoser betraktas som alltför osäkra för att ligga till grund för ett platsval. Scenariot glaciation analyseras i säkerhetsanalysen oavsett vilken plats som kommer att bli aktuell.

Information om topografisk gradient och strandförskjutning erhålls under förstudien. Områden med olämpligt hög topografisk gradient (mycket större än 1 %) sorteras bort redan under förstudierna.

Under platsundersökningen och till den hörande hydrogeologiska modelleringen bör det vara möjligt att bedöma läget för de in- och utströmningsområden som är kopplade till den grundvattenströmning som passerar förvaret. Informationen används i den plats-specifika säkerhetsanalysen. God säkerhet och isolerande förmåga kan dock erhållas även om förvaret placeras nära ett utströmningsområde, varför det inte är motiverat att på förhand formulera kriterier baserade på fördelning av in- och utströmningsområden.

Alla stödande data beaktas vid den hydrogeologiska modelleringen som utförs under platsundersökningen.

7.7 Sammanfattning lämplighetsindikatorer – hydrogeologi

Föregående avsnitt har redovisat vilka hydrogeologiska lämplighetsindikatorer som kan komma i fråga i olika skeden av lokaliseringsarbetet. Den kompletta redovisningen av arbetet återfinns i tabell A-4 i bilaga A och tabell B-4 i bilaga B.

Som framgått ovan används lämplighetsindikatorer främst för att bedöma huruvida krav och önskemål är uppfyllda. Tabell 7-1 ger en sammanställning av de lämplighetsindikatorer som preliminärt identifierats för hydrogeologi.

Tabell 7-1. Lämplighetsindikatorer för hydrogeologi (den kompletta redovisningen återfinns i bilaga A och B).

Parametrar – gruppvis	Krav eller önskemål	Kriterier under förstudie (FS) och under platsundersökning (PLU)
Vattengenomsläpplighet för sprickzoner och sprickor	<p>Deponeringshål tillåts inte placeras i närheten av regionala eller lokala större sprickzoner. (Undantag från detta krav kan göras om det går att visa att vattengenomsläppligheten bergmassan i övrigt.) Se vidare sprickzoner – geologi.</p> <p>Det är en fördel om en stor del av bergmassan i deponeringsområdet har $K < 10^{-8}$ m/s (i deponeringshållsskala). Samlad funktionsanalys behövs.</p> <p>Zoner som behöver passeras under bygge bör ha så låg vattengenomsläpplighet att passage kan ske utan stora problem. (Zoner med $T < 10^{-5}$ m²/s eller zoner som inte är byggnadstekniskt besvärliga.)</p>	<p>För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi.</p> <p>FS: Inga kriterier.</p> <p>PLU: Stor del av tolkade K i bergmassan på förvarsnivå har $K < 10^{-8}$ m/s. (Annars behov av lokal detaljanpassning om säkerhetsmarginalen ska bibehållas.)</p> <p>Sprickzoner som behöver passeras vid bygge bör ha en tolkad transmissivitet $T < 10^{-5}$ m²/s och sakna lerfyllnad (annars ökande uppmärksamhet på injektering och övriga byggtekniska risker).</p>
Flödesporositet och magasinskoefficient	Nej, eftersom parametrarna inte påverkar fördröjning av sorberande ämnen eller långlivade icke sorberande ämnen (se transport).	–
Densitet och viskositet	Densitetsskillnader påverkar den hydrogeologiska modelleringen, men ingen grund för krav/önskemål (se dock kemi).	–
Ytnära ekosystem	<p>I lag skyddade områden undviks.</p> <p>Undvik områden för djupförvarets ovanjordsanläggningar där biologisk mångfald och skyddsvärda organismer kan hotas och områden som är eller kan bli betydande vattentäkt, jordtäkt eller odlingsmark. Data över de marknära ekosystemen är i första hand värdefulla för att kunna bygga upp en trovärdig modellbeskrivning.</p>	<p>FS: I lag skyddade områden ska undvikas. Det är ett önskemål att intressanta områden för platsundersökningar har få konkurrerande intressen och att ovanjordsdelen kan preliminärt anpassas så att liten påverkan sker på det ytnära ekosystemet.</p> <p>PLU: Kriterier som ovan.</p>
Stödjande data (trycknivåer, in- och utströmningsområden m m)	<p>Data behövs i första hand för att bygga upp trovärdiga grundvattenmodeller.</p> <p>Fördel om lokala gradienten < 1 % på förvarsnivå (men ingen fördel med ännu lägre).</p>	<p>FS: Områden med olämpligt hög gradient (mycket större än 1 %) väljs bort.</p> <p>PLU: Information om stödjande data används främst för att bygga upp trovärdiga modeller.</p>

8 Kemi – grundvattnets sammansättning

8.1 Påverkan på djupförvarets funktion

Grundvattnets sammansättning påverkar både djupförvarets isolerande och fördröjande funktioner. En genomgång av de funktioner som påverkas av grundvattnets sammansättning visar att funktionerna påverkas av ett fåtal väsentliga grundvattenkemiska parametrar, se bilaga A-5. Krav och önskemål på dessa grundvattenkemiska parametrar diskuteras i detalj i de följande avsnitten i detta kapitel.

8.1.1 Inverkan på kapseln integritet

Det är ett krav att grundvattnets sammansättning vid kapseln ska vara sådan att allmän korrosion av kopparn inte kan förekomma (att kopparn är termodynamiskt stabil). Detta innebär att inget löst syre får finnas i grundvattnet vid kapseln under längre tid. Det är vidare önskvärt med låg total salthalt och låga halter av ämnen som påverkar kopparkorrosionen som sulfid, ammonium, nitrit och nitrat. Kopparkorrosion diskuteras i Basscenariot för SR 97 /SKB, 1999a/ baserat på arbeten av /Werme m fl, 1992, Wersin m fl, 1994/ men också i olika rapporter som tagits fram av Posiva i Finland /Ahonen, 1999, Saario m fl, 1999/.

8.1.2 Inverkan på frigörelse till grundvattnet

Det är önskvärt med en grundvattensammansättning som fördröjer bränsleupplösningen och som leder till låg löslighet hos frigjorda nuklider.

Modellen för bränsleupplösning som används i kapseldefektscenariot i SR 97 (Huvudrapporten /SKB, 1999a/) förutsätter att det omgivande grundvattnet är fritt från löst syre. För att förenkla analysen gäller därmed kravet om syrefria förhållanden även för att tillgodose en långsam bränsleupplösning. Själva bränsleupplösningen styrs dock i modellen av oxidanter som bildas genom radiolys av vattnet som kommer i kontakt med bränslet.

Även om bränslet löses upp kan de ingående ämnena åter fällas ut, varvid det resulterande utläckaget kontrolleras av ämnenas löslighet. I Bruno m fl /1997/ diskuteras osäkerheterna i de framräknade lösligheterna med avseende på indata. Det är framför allt redoxförhållanden, pH, karbonathalt och temperatur som påverkar lösligheten. Önskemål på sammansättningen sätts utifrån att lösligheterna inte ska vara avsevärt högre än vad som använts i säkerhetsanalysen SR 97 /SKB, 1999a/.

8.1.3 Inverkan på buffertens stabilitet

Grundvattnets sammansättning påverkar bentonitens stabilitet, vilket i sin tur påverkar buffertens isolerande och fördröjande förmåga. Det är ett krav att buffertens svälltryck bevaras (Huvudrapporten SR 97 /SKB, 1999a/).

Om porvattnet i bentoniten innehåller salt, vilket kan vara följden av antingen att bentoniten vattenmättats med salthaltigt grundvatten eller att salt diffunderat in i porvattnet efter vattenmättnad, påverkas svälltryck och svällförmåga /Karnland, 1997/. Svälltrycket minskar med ökande salthalt. Minskningen är relativt sett störst vid låg kompakteringsgrad av bentoniten.

För att lergelen ska vara kemiskt stabil och inte dispergeras till en kolloidal suspension krävs vidare att vattnet innehåller en tillräcklig halt av positiva joner (SR 97, Huvudrapporten avsnitt 8.9.3 /SKB, 1999a/). Lergelen är stabil om halten av tvåvärda joner (kalcium och magnesium) överstiger 4 mg/l /Laaksoharju m fl, 1995/.

8.1.4 Inverkan på fördröjningen i geosfären

Grundvattnets sammansättningen påverkar flera av bergets retentionsegenskaper – främst sorptionen (se t ex /Carbol och Engqvist, 1997/) och diffusionen in i bergmatrisen. Om vattnet innehåller kolloider finns risk att retentionen försämras. Det finns ett allmänt önskemål om goda sorptionsegenskaper i berget, liten organisk komplexbildning och försumbar kolloidtransport. Det finns inga absoluta krav, men den samlade funktionen ska vara tillräcklig för att ge fullgod säkerhet i en samlad säkerhetsanalys. Det är främst grundvattnets totala salthalt, pH, Eh och karbonathalt som påverkar retentionsegenskaperna.

8.1.5 Biosfärsfrågor

För att beskriva de ytnära ekosystemen behövs kunskap om det ytnära grundvattnets sammansättning. Kunskapen är också viktig för att kunna påvisa om senare upptäckta förändringar orsakas av förvaret eller är en följd av den ”naturliga” utvecklingen.

8.1.6 Anläggningsfrågor

Det finns ett antal kemiska förhållanden som måste beaktas vid utformningen och bygget av djupförvaret.

- Ämnen som är farliga ur arbetarskyddssynpunkt (t ex radon) måste hållas till halter som understiger gränsvärden. (Detta kan dock i regel alltid åstadkommas med lämpliga åtgärder som t ex god ventilation.)
- Vattensammansättningen (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_2) kan påverka val av lämpliga injekteringsmedel. Det finns dock ingen grund för krav eller önskemål.
- Det är ett krav på begränsad miljöpåverkan från undersökningar och drift (t ex kan avledning av salt grundvatten bli nödvändig) och från anläggningsbygget och drift (t ex påverkan från spränggaser eller injektering).

8.2 Indikationer på förekomst av löst syre

8.2.1 Beskrivning av parametrar och inverkan på olika funktioner

Det finns en överväldigande erfarenhet från analyser av grundvatten i kristallint berg som bekräftar att grundvattnet inte innehåller löst syre på förvaringsnivå. Undersökningar har gjorts i Sverige, Finland eller Kanada, se t ex /Laaksoharju m fl, 1993 och Laaksoharju m fl, 1998/.

Om det fanns löst syre i grundvattnet skulle detta kunna leda till korrosion av kopparkapseln. Även sulfid i grundvattnet kan angripa kopparkapseln, se avsnitt 8.5.1. Syre är dock mycket besvärligare än sulfid eftersom syret kan orsaka gropfrätning. Indikation på att löst syre inte förekommer är därmed väsentligt för att uppfylla den grundläggande säkerhetsfunktionen att kapseln ska vara tät.

Förekomst av syre påverkar också bränsleupplösningen, lösligheter och sorptions-egenskaper i buffert och i berg (se 8.1). Även för dessa funktioner är det fördelaktigt om löst syre inte förekommer.

Det finns flera olika kemiska parametrar som kan användas som indikatorer för att se om det finns löst syre i grundvattnet. Närvaro av löst syre i grundvattnet indikeras vid mätningar av redoxpotentialen (Eh). Vid förekomst av löst syre är mätvärdena positiva. Om det inte finns löst syre närvarande, vilket är fallet i djupa grundvatten, är redoxpotentialen bestämd av järn II/III förhållandet eller av sulfid- och andra svavelföreningar i vattnet. Då är mätvärdena vanligtvis negativa. Eh-värdet mäts kontinuerligt under grundvattenkemiska borrhålsundersökningar och ger en god uppfattning om förhållandena redan under själva undersökningskampanjen. I vissa fall kan det vara svårt att erhålla tillförlitliga Eh-värden. Detta gäller vid besvärliga provtagningsförhållanden och/eller om halterna av järn och sulfid är låga. Då är förekomst av Fe^{2+} , förekomst av Mn^{2+} eller förekomst av HS^- i sig bevis för att löst syre inte förekommer. Dessa ämnen analyseras på prov som tas vid undersökningskampanjen.

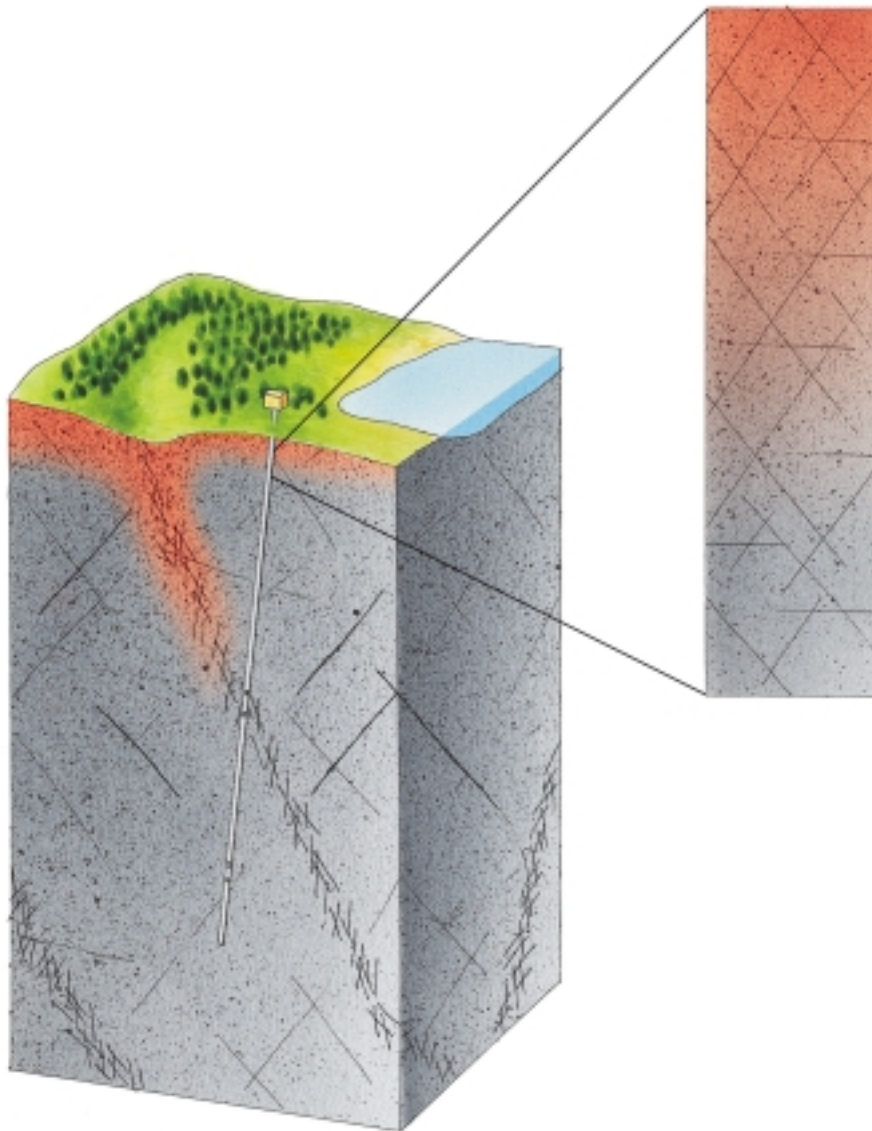
8.2.2 Krav och önskemål

För kapselns isolering är det ett krav att det, vid ostörda förhållanden och senast en kort tid efter att förvaret förslutits, inte förekommer löst syre på förvaringsdjup (se 8.1.1 och figur 8-1). För att detta krav ska vara uppfyllt behöver minst någon av indikatorerna; negativa Eh, förekomst av Fe^{2+} eller förekomst av HS^- ; vara uppfylld eller att man på annat sätt kan bevisa att löst syre inte förekommer.

8.2.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Mätdata från djupa grundvatten i Sverige och Finland /Laaksoharju m fl, 1993 och Laaksoharju m fl, 1998/ visar att ovanstående krav alltid är uppfyllt. På förvaringsdjup gäller att kvalitetsgodkända Eh-värden är negativa, halter av Fe^{2+} ligger i intervallet 5 $\mu\text{g/l}$ –10 mg/l och att sulfidhalterna ligger inom intervallet 0,01–5 mg/l .

Olika översiktsstudier eller förstudier tillför ingen ny kunskap om de ovan nämnda syreindikatorerna jämfört med den allmänna kunskap som redan finns. Den väsentliga platsspecifika informationen om parametrarna erhålls i vattenprover från de djupa borrhål som borrar i samband med platsundersökningar. Detaljundersökningar (undersökningar från tunnlar) tillför eventuell ny kunskap i den del av berget som har mycket låg vattengenomsläpplighet.



Figur 8-1. Det får inte förekomma löst syre på förvarsdjup. Syret som finns löst i ytvattnet förbrukas normalt redan i markzonen, men kan nå större djup i sprickzoner.

8.2.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Det är uppenbart att de parametrar som kan indikera förekomst av löst syre är mycket viktiga lämplighetsindikatorer eftersom de är kopplade till krav. Parametrarna kan dessutom framgångsrikt bestämmas vid en platsundersökning.

Inga meningsfulla kriterier kan ställas upp innan platsundersökningarna är genomförda. Erfarenhetsmässigt kan man dock förvänta sig att krav enligt ovan kommer att vara uppfyllt.

Under platsundersökning gäller att minst någon av indikatorerna negativa Eh-värden, förekomst av Fe^{2+} eller förekomst av HS^- måste vara uppfyllt. Om ingen av indikatorerna tydligt kan påvisa frånvaro av löst syre krävs en fördjupad kemisk bedömning. Studier av Fe(II)- och sulfidmineral, som t ex pyrit och biotit kan användas för att ytterligare klarlägga redoxförhållandena. Om inte ens dessa vidare studier kan påvisa syrefria förhållanden måste platsen överges.

8.3 pH

8.3.1 Beskrivning av parameter och dess inverkan på funktioner

Det finns omfattande erfarenhet och data om pH-förhållanden i kristallint berg. I huvudsak styrs pH av kalcit/karbonatsystemet. Grundvattnets pH påverkar i första hand kapselkorrosion, sorption, (/Carbol och Engqvist, 1997/, Yu och Neretnieks /1997/) och lösligheter av radionuklider /Bruno m fl, 1997/ (se även SR 97 Huvudrapporten kapitel 8 /SKB, 1999a/).

8.3.2 Krav och önskemål

Det är ett önskemål att pH för grundvattnet under nivån 100 m ligger mellan 6 och 10. Alla pH-värden inom detta intervall är i princip lika lämpliga. För grundvattnet över 100 m djup finns inga önskemål. Önskemålet grundar sig framförallt på att kunskapsbasen för i säkerhetsanalysen utnyttjade sorptionsparametrar ("K_d-värden") bygger på mätningar inom det önskade pH-intervallet. Om värden ligger utanför intervallet behöver databasen kompletteras.

8.3.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Mätdata från djupa grundvatten i Sverige och Finland visar att under djup av 100 m ligger pH i regel mellan 6 och 10, men avvikelser (högre värden) förekommer, t ex vid Stripa /Laaksoharju m fl, 1993 och Laaksoharju m fl, 1998/. Ovanför 100 m förekommer lägre pH-värden.

Olika översiktsstudier eller förstudier tillför ingen ny kunskap om pH jämfört med den generella kunskap som redan finns. Den väsentliga platsspecifika informationen om parametrarna erhålls i vattenprover från de djupa borrhål som borrar i samband med platsundersökningar. Detaljundersökningar (borrhål från tunnlrar) tillför eventuellt ny kunskap om pH i det lågpermeabla berget.

8.3.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

pH är en användbar lämplighetsindikator eftersom den är kopplad till önskemål. Parametern kan dessutom framgångsrikt bestämmas vid en platsundersökning.

Under förstudier kan inga meningsfulla kriterier kan ställas upp. Erfarenhetsmässigt kan man dock förvänta sig att önskemål enligt ovan kommer att vara uppfyllda.

Vid platsundersökningarna bör kvalitetsgodkända uppmätta pH-värden ligga inom det angivna önskemålet (6<pH<10) under nivån 100 m. Om detta kriterium inte uppfylls behövs fördjupad analys, komplettering av databasen för sorptionsparametrar och eventuellt utökad provtagning. Om analysen visar att pH väsentligen avviker från givna intervall kan platsens lämplighet ifrågasättas.

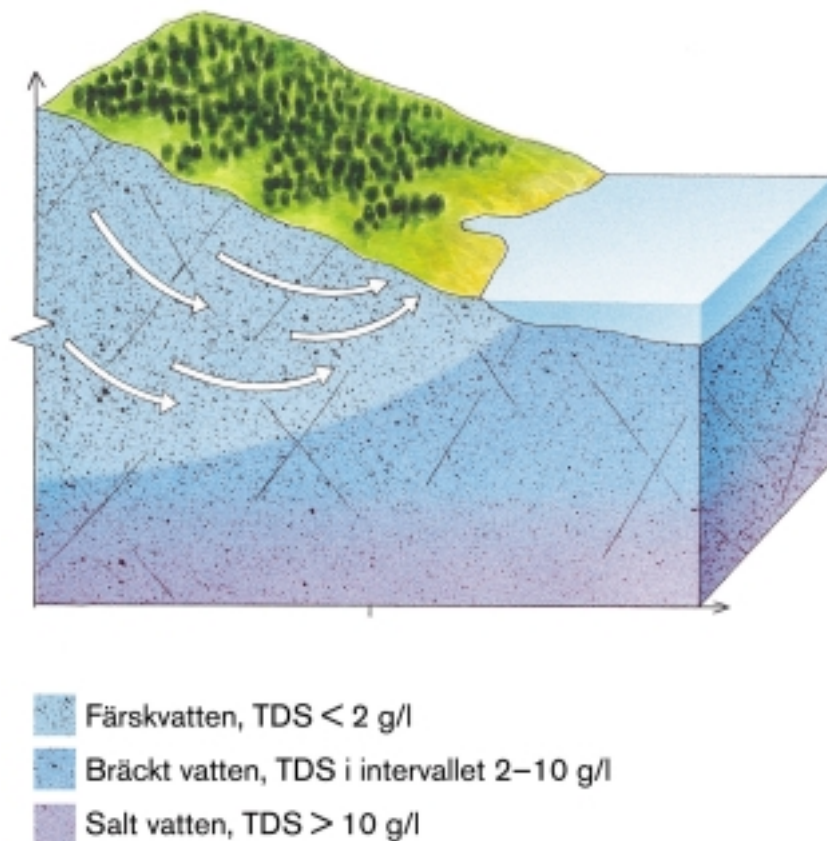
8.4 Total salthalt (TDS)

8.4.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Den totala salthalten (TDS dvs "Total Dissolved Solids") påverkar främst bentonitens stabilitet och sorptionen av radionuklider. Om salthalten är mycket hög minskar bentonitens svällande förmåga (Karnland /1997/) och vid halter högre än 100 g/l kan buffertens svälltryck ha minskat med mer än hälften för en bentonit med en densitet på 2 000 kg/m³. Höga salthalter innebär också att sorptionsförmågan i berget minskar för flera radionuklider (Carbol och Engqvist /1997/. För mycket höga salthalter (TDS>200 g/l) i kombination med mycket lågt pH (pH<3) påverkas även stabiliteten hos koppar (SR 97 Huvudrapporten avsnitt 8.9 /SKB, 1999a/). Så låga pH kan dock inte förekomma på förvarsdjup på grund av reaktionen mellan mineral och vatten /Stumm och Morgan, 1996/.

8.4.2 Krav och önskemål

Det är ett krav att TDS <100 g/l i deponeringsområdet (figur 8-2). Noggranna utredningar krävs för att klarlägga om bentoniten klarar högre halter med bibehållen svällningsförmåga.



Figur 8-2. Den totala salthalten måste understiga 100 g/l i deponeringsområdet.

8.4.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Mätdata från djupa grundvatten i Sverige visar att ned till 1 000 m djup ligger TDS inom intervallet 0–35 g/l. För större djup förekommer ännu högre halter. Halter upp till 100g/l har mätts upp på 1 700 m djup /Laaksoharju m fl, 1993 och Laaksoharju m fl, 1998/. I inlandet är djupet till grundvatten med höga salthalter i regel större. I Finland har TDS på 70 g/l mätts upp på djup under 800 m /Pitkänen m fl, 1998/.

Olika översiktsstudier eller förstudier tillför ingen ny kunskap om TDS eller innehåll av väsentliga joner jämfört med den generella kunskap som redan finns. Den väsentliga platspecifika informationen om parametrarna erhålls i prover/mätningar från de djupa borrhål som borrar i samband med platsundersökningar. Detaljundersökningar tillför eventuell kunskap om TDS i den del av berget som har mycket låg vattengenomsläpplighet.

8.4.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

TDS på förvarsnivå är en användbar lämplighetsindikator.

Inga meningsfulla kriterier kan ställas upp innan platsundersökningarna är genomförda. Erfarenhetsmässigt kan man dock bara förvänta sig förhöjd TDS i lägen som ligger relativt nära kusten och i relativt flack terräng.

Vid platsundersökningarna ska samtliga kvalitetsgodkända TDS uppmätta på tilltänt förvarsdjup uppfylla krav enligt ovan. Enstaka högre värden kan accepteras om det kan visas att vattnet ligger i områden som kan undvikas och att vattnet inte kommer att kunna strömma till förvarsområdet.

8.5 Organiska ämnen och övriga komponenter i grundvattnet

8.5.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

DOC står för "Dissolved Organic Carbon" och betecknar mängden löst organiskt kol som uppmätts i grundvattnet. Därmed är DOC ett mått på mängden organiskt material mätt som total mängd organiskt kol i lösning. Tillgången på organiskt material påverkar t ex den bakteriella omvandlingen av sulfat till sulfid, som i sin tur påverkar kapselkorrosionen (SR 97 Processrapporten avsnitt 4.7.10 /SKB, 1999b/, /Pedersen och Karlsson, 1995/).

Sulfidhalterna i svenska grundvatten i allmänhet begränsas av att sulfid faller ut som fasta mineral då sulfidhalterna blir tillräckligt höga. De fasta mineralen bildas framför allt genom reaktion med järn. Dessutom begränsar bufferten transporten av sulfid fram till kapseln. Beräkningar visar att det skulle ta längre tid än 10 miljoner år att korrodera en kopparkapsel 1 cm, även om halten av sulfid ligger kring 1 mg/l /SKB, 1999b/.

Höga halter av kväve- och fosforföreningar är oönskade eftersom de stimulerar bakterietillväxt. Höga halter av kväveföreningar kan orsaka spänningskorrosion i koppar /Benjamin m fl, 1988; SR 97 Processrapporten 3.7.6, SKB, 1999b; Saario m fl, 1999/.

Det är nödvändigt att känna till mängder och sorter av näringsämnen som finns kvar i berget då förvaret stängs. Om dessa mängder är acceptabla vid stängning finns det inga processer i berget som på sikt kan leda till att mängden ökar och når en oacceptabel nivå.

Bentonitens stabilitet påverkas av Na^+ , Ca^+ och Mg^+ -halter. Låga halter kan försämra bentonitgelens stabilitet, och ur den skapa kolloidala partiklar som kan föras bort av grundvattnet /Laaksoharju m fl, 1995/.

Förekomst av kolloider, humussyror och fulvosyror, fri gas (som H_2 , N_2 , CH_4 , CO_2 , He och Ar) och bakterier påverkar förutsättningarna för radionuklidtransport. Till exempel kan sorberande radionuklider transporteras med vattnet om de fastnar på kolloidala partiklar i grundvattnet. Transportprocessen är dock helt försumbar vid de kolloidhalter som normalt förekommer i djupa grundvatten /SKB, 1999a; Allard m fl, 1991/. Även gasbubblor och bakterier kan på motsvarande sätt vara ”bärare” av radionuklider. Komplexbildning med humus- och fulvosyror kan sänka sorptionen för en del av radionukliderna.

Halten av Ra och Rn påverkar vilka åtgärder som behövs för arbetarskydd under förvarsutbyggnaden. Halterna är kopplade till halt av U och Th i berggrunden och kan således bedömas utifrån kunskap om bergart (se 4.4).

Vid analys av grundvattnets sammansättning mäts dessutom ett stort antal andra komponenter i vattnet. Detta behövs för den kemiska förståelsen, men inga övriga komponenter är direkt kopplade till krav eller önskemål.

8.5.2 Krav och önskemål

Det finns ingen grund för krav på organiska ämnen eller övriga komponenter i grundvattnet.

Ytnära vatten (0–100 m) bör innehålla mer än 10 mg/l DOC för att säkerställa reduktion av löst syre i infiltrerande grundvatten /Banwart (ed) 1995/. På förvarsdjup är det önskvärt med lägre halter, ju lägre desto bättre.

Det är önskvärt med låga värden av ammonium (NH_4^+), men utredning pågår hur låga värden som är önskvärda.

Det är en fördel om halterna av $[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] > 4$ mg/l på förvarsdjup (SR 97 Huvudrapporten avsnitt 8.9.3 /SKB, 1999a/, /Laaksoharju m fl, 1995/). Det är dock ingen ytterligare fördel med högre värden.

Det är önskvärt med låga halter av kolloider (<0,5 mg/l) och ingen förekomst av fri gas (gasbubblor) på förvarsnivå, eftersom dessa parametrar kan påverka transporten av radionuklider i geosfären. Förekomst av löst H_2 eller CH_4 indikerar å andra sidan reducerande förhållanden och är fördelaktigt ur djupförvarssynpunkt.

För arbetsmiljön är det önskvärt med låga halter av Ra och Rn, men lämpliga skyddsåtgärder (ventilation) kan alltid vidtagas om halterna blir för höga.

8.5.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Mätdata från djupa grundvatten i Sverige och Finland visar att på tänkbart förvaringsdjup är DOC i regel mindre än 10 mg/l. Betydligt högre halter kan förekomma under och strax efter byggfasen, men dessa kommer snabbt ner till lägre nivåer eftersom det organiska materialet reagerar med det instängda syret /Puigdomenech m fl, 1999/.

De högsta sulfidkoncentrationer som uppmätts i svenska grundvatten ligger kring 1 mg/l. I bergvolymen under havssediment där omfattande sulfatreduktion förekommer har sulfidhalter på 5–10 mg/l uppmätts.

Mätdata från djupa grundvatten i Sverige och Finland visar att på tänkbart förvaringsdjup ligger halterna av $[Ca^{2+}]$ och $[Mg^{2+}]$ inom det önskade områdena. $[Ca]$ ligger i intervallet 21–1 890 mg/l och $[Mg]$ i intervallet 1–110 mg/l (Laaksoharju m fl, 1993, och Laaksoharju m fl, 1998).

Medianhalten av kolloider i grundvattnet på tilltänkta förvaringsdjup är mindre än 0,05 mg/l /Laaksoharju m fl, 1995/. Betydligt högre halter kan förekomma under byggfasen.

Olika översiktsstudier eller förstudier tillför ingen ny kunskap om DOC eller övriga kemiska parametrar på förvaringsdjup jämfört med den generella kunskap som redan finns. Den väsentliga platspecifika informationen om parametrarna erhålls i vattenprover från de djupa borrhål som borrar i samband med platsundersökningar. Detaljundersökningar tillför ny kunskap om förhållandena i det lågpermeabla berget på förvaringsnivå, men det finns risk för tillfälliga störningar under byggtiden på grund av blandningsprocesser.

8.5.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Inga av de angivna önskemålen är tillräckligt väsentliga för att utgöra grund för lämplighetsindikatorer. Halterna är väsentliga att känna till eftersom de utgör viktigt information om platsens kemiska och hydrogeologiska utveckling. God kunskap om dessa förhållanden leder till bättre förståelse och minskar därmed den icke kvantifierbara osäkerheten om platsens egenskaper och framtida utveckling.

Det finns ingen möjlighet att formulera kriterier för de övriga parametrarna enbart baserat på den kunskap som föreligger under en förstudie. Uppmärksamhet och speciell utredning om betydelse kan dock behövas om uppmätta halter under en platsundersökning avviker från önskemål.

8.6 Sammanfattning lämplighetsindikatorer – kemi

Tabell 8-1 ger en sammanställning av de lämplighetsindikatorer som preliminärt identifierats för grundvattenkemisk sammansättning. Den kompletta redovisningen av arbetet återfinns i tabell A-5 i bilaga A och tabell B-5 i bilaga B.

**Tabell 8-1. Lämplighetsindikatorer för grundvattenkemisk sammansättning.
(Den kompletta redovisningen återfinns i bilaga A och B.)**

Parametrar - gruppvis	Krav eller önskemål	Kriterier under förstudie (FS) och under platsundersökning (PLU)
Löst syre	Krav: Frånvaro av löst syre på förvarsnivå (indikeras av negativa Eh, förekomst av Fe(II), eller förekomst av sulfid).	FS: Inga kriterier (inga data finns) men ingen anledning finns att tro att kravet ej kan uppfyllas. PLU: Minst någon av indikatorerna Eh, Fe ²⁺ , HS ⁻ måste vara uppfyllt.
pH	Önskemål: Ostört grundvatten på förvarsnivå bör ha ett pH i intervallet 6–10.	FS: Inga kriterier (ingen koppling till ytvatten). PLU: under nivån –100 m bör kvalitetsgodkända värden ligga i intervallet 6–10.
Total salthalt (TDS)	Krav: TDS<100 g/l	FS: Inga kriterier PLU: Kvalitetsgodkända uppmätt TDS på förvarsnivå måste uppfylla detta krav. Enstaka högre värden kan accepteras om det kan visas att vattnet ligger i områden som kan undvikas.
Övriga kemiska parametrar	Önskemål: [DOC]<20 mg/l, kolloidhalt <0,5 mg/l, låga ammoniumhalter, [Ca ²⁺]+[Mg ²⁺]>4 mg/l på förvarsdjup, låga halter Rn, Ra.	FS: – PLU: Uppmärksamhet om uppmätta halter avviker från önskemål.

9 Bergets transportegenskaper

9.1 Påverkan på djupförvarets funktion

Djupförvarets fördröjande funktion beror till stor del av bergets transportegenskaper men transportegenskaperna har även viss inverkan på djupförvarets isolerande funktion, bilaga A-6 sammanfattar hur bergets transportegenskaper påverkar dessa funktioner. Transportprocesserna i berget, och främst radionuklidtransport, analyseras ingående i SR 97 (Huvudrapporten, kap 9 /SKB, 1999a/).

9.1.1 Inverkan på kapselns och buffertens integritet

För att säkerställa lämplig kemisk miljö för kapseln och buffert bör grundvatten med olämplig kemisk sammansättning inte kunna transporteras till förvarsområdet annat än under kortare tid. Den stabila kemiska miljön i berget (se kapitel 8) visar dock att inga specifika krav behöver ställas på berget i detta hänseende.

9.1.2 Inverkan på geosfärens fördröjande förmåga

Betydelsen av en viss fördröjning beror i hög grad på hur stor fördröjningen är i förhållande till de olika radionuklidernas halveringstider. Generellt gäller att en fördröjning kan minska utsläppet av relativt sett kortlivade nuklider eftersom dessa hinner sönderfalla, medan relativt sett långlivade nuklider kan förbli i stort sett opåverkade. Fördröjningens storlek kan variera kraftigt mellan olika nuklider (olika sorptionsegenskaper) och kan variera kraftigt med olika förhållanden i berget. Grundvattenströmningens storlek är ofta av avgörande betydelse.

Övergången mellan buffert och berg kan innebära en betydande fördröjning av utsläppta radionuklider. Fördröjningen i övergången beror på grundvattenomsättningen (eller darcyastigheten) i deponeringshålskala och geometrin för de sprickor som skär deponeringshålet /Moreno och Gylling, 1998/. Beräkningar inom SR 97 (Huvudrapporten, avsnitt 9.11 /SKB, 1999a/) visar att övergången buffert/berg har betydelse för att fördröja flera nuklider och förhållanden som leder till stor fördröjning är givetvis önskvärda. Det finns, å andra sidan, ingen grund för krav eftersom beräkningarna också visar att utsläppet till biosfären kan hållas under nivåer satta i SSI:s föreskrifter /SSI, 1998/ även om fördröjningen i övergången försummas.

Fördröjningen i själva berget (geosfären) bestäms i huvudsak av "transportmotståndet" i geosfären ("F-parametern") som beror på grundvattenflöde, flödesvägar och flödesvättan (se t ex /Andersson m fl, 1998b/), av bergmatrisens egenskaper matrisdiffusivitet och matrisporositet och av radionuklidernas förmåga att sorbera på bergmatrisen.

Olika ämnens förmåga till sorption bestäms till stor del av deras "speciering", vilken i sin tur beror på grundvattnets sammansättning. Konsekvensberäkningar inom SR 97 (SKB, 1999, Huvudrapporten, avsnitt 9.11 /SKB, 1999a/) demonstrerar att "transportmotståndet" har mycket stor inverkan på fördröjningen. Transportmotståndet påverkar

även tiden för genombrott för nuklider med liten sorption, men mycket långvariga utsläpp av nuklider, som har lång halveringstid och försumbar sorption, påverkas dock inte alls av fördröjningen i berget. Det är givetvis önskvärt med stora transportmotstånd i geosfären, men det är inte möjligt att ange ett mer preciserat krav än att den samlade barriärfunktionen ska räcka för att ge fullgod säkerhet. Utsläppet till biosfären kan hållas under nivåer satta i SSI:s föreskrifter /SSI, 1998/ även om inte alla transportvägar från förvar till biosfär har ett stort transportmotstånd.

9.2 Flödesparametrar i deponeringshållsskala

9.2.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

För ett förvar av KBS-3 typ gäller att grundvattenströmning och sprickapertur påverkar fördröjningen av radionuklider mellan buffert och berg (Moreno och Gylling, 1998). Inverkan är dock relativt begränsad, och beräkningar som genomförts inom ramen för SR 97 (Huvudrapporten, avsnitt 9.11 /SKB, 1999a/), visar att för högre värden på grundvattnets darcyhastighet än cirka 0,01 m/år beror inte fördröjningen längre på grundvattenströmningen. Betydelsen av fördröjningen i övergången buffert/berg beror vidare på vilka nuklider som betraktas (se 9.1.2) och om det finns andra hinder för transport i närområdet. Om utsläppet begränsas av ett litet hål i kapseln har övergången buffert/berg liten betydelse. Dessa olika förhållanden gör att det egentligen inte går att ange något speciellt önskvärt högsta värde på grundvattenströmningen i deponeringshållsskala (även om det ungefärligt går att ange en övre gräns där grundvattenströmningen påverkar utsläppet från närområdet).

Extremt stora grundvattenflöden eller sprickaperturer skulle kunna skada bufferten genom att de ger förutsättningar för mekanisk erosion av denna (SR 97 Processrapporten /SKB, 1999b/. Sådana höga flöden kan, om de alls förekommer, dock alltid undvikas genom lämpligt val av deponeringshåll.

9.2.2 Krav och önskemål

Ur transportsynpunkt finns det ingen anledning att ställa krav på grundvattenomsättning eller aperturer i deponeringshållsskala. Så länge bufferten finns på plats ger denna, tillsammans med löslighetsbegränsningarna, en väsentlig fördröjning av utsläppet från en skadad kapsel. Det är däremot ett krav att flödet och aperturerna inte är så stora att bufferten skadas. Bufferten skadas dock först om det finns spricköppningar av centimeterstorlek. Kravet att undvika sprickor med sådana öppningar kan alltid tillgodoses genom lämpligt val av deponeringshåll.

Ur transportsynpunkt finns önskemål om låg vattenomsättning och små aperturer. Det går därför inte att ange någon specifik övre gräns för önskvärd darcyhastighet (eller hydraulisk konduktivitet), men det är önskvärt att det i en stor del av berget går att finna kapselpositioner som i kapselhållsskala har lägre darcyhastighet än 0,01 m/år eftersom lägre flöden innebär att fördröjningen ökar. Under alla förhållanden behöver dock en slutgiltig bedömning av om närområdesegenskaperna är tillräckligt bra göras inom ramen för en integrerad säkerhetsanalys.

9.2.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Darcyhastigheten i deponeringshållsskala är en beräknad parameter. Den uppvisar betydlig rumslig variation. I SKB 91 /SKB, 1992/ beräknades darcyhastigheten i Finnsjön ligga i intervallet 10^{-5} – 0,1 m/år. För de olika platser (Äspö, Finnsjön, Gideå) som analyserats inom ramen för SR 97 ligger det beräknade intervallet av darcyhastigheter inom samma intervall (/Walker och Gylling, 1998/, /Walker och Gylling, 1999/, /Gylling m fl, 1999/). Den rumsliga variationen inom respektive plats är betydande, men värdena ligger typiskt en faktor 100 gånger lägre för Gideå jämfört med de andra platserna.

Olika regionala studier eller förstudier tillför ingen ny kunskap om grundvattenomsättning eller sprickaperturer på förvaringsdjup jämfört med den generella kunskap som redan finns.

Vid en platsundersökning kan grundvattenströmningen beräknas med modellering utifrån den vattengenomsläpplighet som kan uppskattas från hydrauliska test i borrhål. Modellresultaten ger statistisk information, som kan användas för att bedöma den rumsliga variationen av darcyhastigheten i deponeringshållsskala. Det finns även metoder för att direkt mäta grundvattenomsättningen i en del av ett borrhål /t ex Rouhianen, 1993/. Metoderna är användbara men ger även de bara information i ett antal punkter som kan användas som ett statistiskt underlag. Det är först vid detaljundersökningar eller senare som det finns möjlighet att bedöma enskilda kapselpositioner.

9.2.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Grundvattenomsättning (darcyhastighet) i deponeringshållsskala borde vara en användbar lämplighetsindikator under en platsundersökning. Önskemålet har dock inte så stor vikt. Vid formulering av kriterier är det också nödvändigt att ta hänsyn till osäkerheterna i uppskattningen av grundvattenströmningens rumsliga variation.

Uteslutande av deponeringshål med så stor grundvattenomsättning och så stora aperturer att buffertfunktionen kan skadas kan behöva tillämpas vid val av enskilda kapselpositioner, men påverkar inte lokalisering i stort eftersom dessa förhållanden enbart kan gälla enstaka, mycket lokala, områden i berget. Sådana aktiva val kan dock först genomföras under detaljundersökning eller vid ett förvaringsskede.

Sprickaperturer i deponeringshållsskala är endast av begränsad betydelse som lämplighetsindikatorer eftersom de i regel har begränsad betydelse för funktionen.

Under förstudier finns ingen information om grundvattenflödet i deponeringshållsskala.

Under platsundersökningen bedöms det som en uppenbar fördel om den uppskattade darcyhastigheten i deponeringshållsskala är lägre än 0,01 m/år för ett stort antal (i statistisk mening) positioner i berget. Vare sig säkerheten eller ens fördröjningen i berget behöver dock vara hotat om kriteriet inte uppfylls. Under alla förhållanden behöver dock en slutgiltig bedömning av närområdesegenskaperna göras inom ramen för en integrerad säkerhetsanalys.

9.3 Egenskaper strömningsvägar

9.3.1 Beskrivning av parametrar och deras inverkan på funktioner

Ansatzerna för modelleringen av transport i berget kan komma att utvecklas under kommande år, varför de parameterbeteckningar som här används kan komma att förändras. De principiella resonemang som här förs kommer dock sannolikt inte att behöva förändras, även om det kan visa sig att de metoder som idag används för att beskriva transporten underskattar fördröjningen och därmed överdriver vilka önskemål som bör ställas på berget ur transportsynpunkt.

Transporten av radionuklider genom berget sker främst genom advektion i de öppna sprickorna. Om ämnena som är lösta i vattnet inte samverkar med omgivningen bestäms transporttiden av vattnets "gångtid" (t_w) vilken kan uttryckas som transportvägens längd (L) dividerad med kvoten mellan darcyhastighet (q) och flödesporositet (ϵ_f). Om ämnena dessutom kan diffundera in i bergmatrisen och även sorbera där kommer detta att ge upphov till en betydande fördröjning och den resulterande "transporthastigheten" bestäms då väsentligen av darcyhastigheten och sprickornas geometri samt av matrisens diffusions- och sorptionsegenskaper. Flödesporositeten är i detta fall av underordnad betydelse.

Vid antagande om en förenklad flödesgeometri, t ex flöde genom rektangulära kanaler, kan de styrande grupperna av parametrar för matrisdiffusionen uttryckas som produkten mellan det s k "transportmotståndet" eller "F-parametern" och en grupp av parametrar innehållande sorptionskoefficient (K_d -värde), diffusionskoefficient samt matrisporositet. F-parametern kan uttryckas på olika sätt, t ex

$$F = a_r L / q = (a_w / \epsilon_f) L / q = a_w t_w$$

där a_r är den flödesväta ytan per volym berg och a_w den flödesväta ytan per volym strömmande vatten (se t ex /Andersson m fl, 1998b/). Den senare formuleringen används i modellen FARF31 som används i SR 97. Ju större transportmotstånd, desto större blir fördröjningen. Man bör notera att a_w och t_w är starkt och omvänt korrelerade via det linjära beroendet av flödesporositeten, men att produkten F inte direkt beror på flödesporositeten.

Förutom spridningen med advektion tillkommer omblandningar och hastighetskillnader i grundvattnet. Denna restterm brukar kallas hydrodynamisk dispersion. Vid de grundvattenberäkningar som görs som underlag till säkerhetsanalysen beskrivs dock det advektiva flödesfältet relativt detaljerat. Olika deponeringshål kommer att vara förbundna med olika transportvägar. De olika transportvägarna kan ha drastiskt olika grundvattenflöden. Den explicita modelleringen av dessa hastighetsvariationer gör att det något problematiska konceptet dispersion kan minimeras till småskaliga hastighetsvariationer. Dispersionen kommer därmed bara att ha underordnad betydelse för radionuklidtransporten. Dispersionen representeras med ett s k Peclet-tal där stora Peclet-tal innebär att dispersionen är liten jämfört med advektionen.

Betydelsen av en viss fördröjning är nuklidspecifik. Sorptionskoefficienter (K_d -värden) och matrisdiffusivitet är ämnesspecifika (se avsnitt 9.4). Vidare gäller att om fördröjningen är stor i förhållande till ämnets halveringstid kommer ämnet att hinna sönderfalla innan det passerat genom geosfären, om fördröjningen är liten i förhållande till halve-

ringstiden har den försumbar inverkan. Dessa olika förhållanden gör att det egentligen inte går att ange något speciellt önskvärt lägsta värde på transportmotståndet (F-parametern). Från beräkningarna i SR 97, där flera olika värden på F-parametern studerades i olika beräkningsfall (Huvudrapporten, avsnitt 9.11 /SKB, 1999a/), kan man ändå göra den översiktliga bedömningen att, geosfären har en betydande kapacitet till fördröjning av viktiga radionuklider om $F > 10^4$ år/m. För lägre värden avtar betydelsen av geosfärens fördröjning snabbt. Denna semikvalitativa bedömning överensstämmer också med slutsatser som kan dras från SKI:s säkerhetsanalys SITE-94 /SKI, 1996/ eller de olika finska säkerhetsanalyserna (t ex TILA-99 /Vieno och Nordman, 1999/).

9.3.2 Krav och önskemål

Det finns ingen grund för krav på F-parametern eller andra flödesrelaterade transportparametrar. Utsläppet till biosfären kan hållas under nivåer satta i SSI:s föreskrifter även om inte alla transportvägar från förvar till biosfär har ett stort transportmotstånd.

Det är ett önskemål att det sker en väsentlig fördröjning av viktiga radionuklider i geosfären (figur 9-1). Ett kvantitativt önskemål kan uttryckas i form av transportmotståndet (F-parametern) där darcyhastighet, flödesfördelning och våta ytan per volym berg (eller motsvarande parametrar) är sådana att en stor del av alla strömningsvägar har $F > 10^4$ år/m. (För rimliga värden på a_r ($1,0 \text{ m}^{-1}$) och L (100 m) ger detta önskemålet $q < 0,01$ m/år men hänsyn måste tas till att q och a_r varierar och kan vara korrelerade, se också avsnitt 7.2.2.) Under alla förhållanden behöver dock en slutgiltig bedömning göras inom ramen för en integrerad säkerhetsanalys.

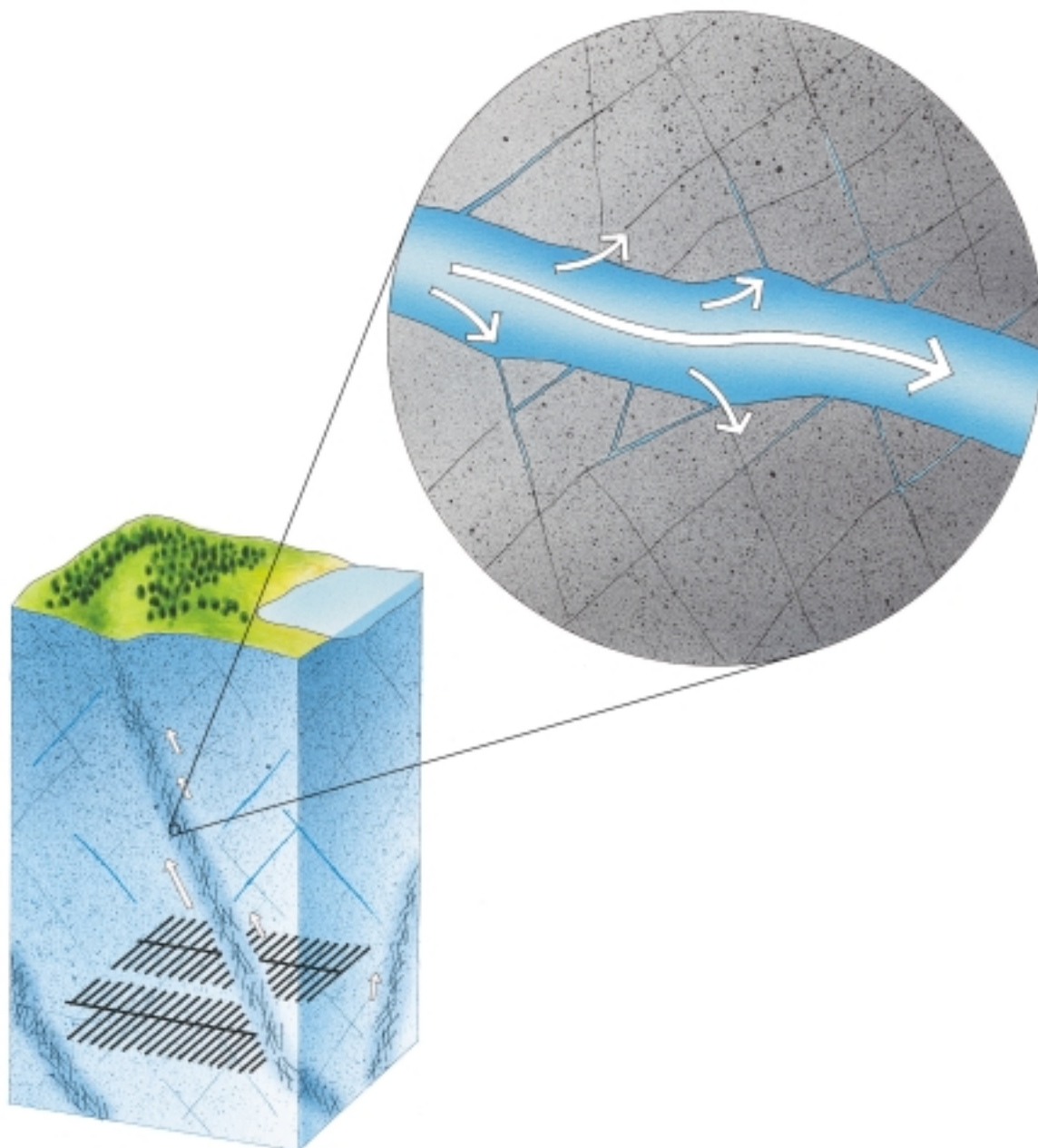
Det finns ingen anledning att ställa speciella önskemål på flödesporositet eller hydrodynamisk dispersion.

9.3.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

De beräknade värdena på F-parametern /Andersson, 1999/ som används i SR 97 baseras på resultat av grundvattenströmningsberäkningarna (/Walker och Gylling, 1998/, /Walker och Gylling, 1999/, /Gylling m fl, 1999/) kombinerat med uppskattning av flödesvätta ytan per volym berg /Andersson m fl, 1998b/. Värdena framgår av tabell 9-1. Det är uppenbart att samtliga platser innehåller ett stort antal kapselpositioner förbundna med transportvägar med F-parametern inom det önskade värdeområdet. Vid Äspö och Finnsjön finns också flera vägar som ligger utanför det värdeönskade området. Trots detta emotsäger SR 97 inte att säkra slutförvar kan byggas dessa platser. Fördröjningen skulle dessutom avsevärt kunna förbättras om det vore möjligt att bara placera kapslar förbundna med transportvägar med högt (stort) transportmotstånd. I SR 97 /SKB, 1999a/ har ingen hänsyn tagits till denna möjlighet till starkt förbättrad utformning av förvaret.

Beträffande värden för övriga parametrar hänvisas till Datarapporten för SR 97 /Andersson, 1999/.

Vid förstudier tillkommer kunskap om topografi och en uppskattning av den storskaliga grundvattenbildningen, vilket ger viss information om grundvattenflöde och transportvägar. Eftersom data om hydrauliska parametrar i övrigt saknas i detta skede kan ingen detaljerad bild av grundvattenförhållandena erhållas vid en förstudie.



Figur 9-1. Det är önskvärt med ett stort transportmotstånd (liten grundvattenströmning och stor tillgänglighet till bergmatrisen).

Tabell 9-1. Beräknade värden på F (år/m) för olika strömningsvägar i SR 97 (från Andersson, 1999).

Andel strömningsvägar med högre F-faktor	Äspö F >	Finnsjön F >	Gideå F >
50 %	10^5	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$
95 %	$8 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^5$

Vid platsundersökningar tillkommer väsentlig kunskap om bergets hydrologi. Men det är oklart om det kommer att gå att uppskatta transportmotståndet (F) för olika transportvägar med hög precision. Det kan troligen inte mätas direkt utan måste uppskattas genom modellering /Andersson m fl, 1998b/. Resultatet blir en statistisk fördelning som beskriver den rumsliga variationen och osäkerheterna.

Detaljundersökningar kan ge möjlighet att välja ut kapselpositioner som är förbundna med transportvägar med högt transportmotstånd.

9.3.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Transportmotståndet F är en användbar lämplighetsindikator under platsundersökningen eftersom fördröjningen i berget är en viktig (om än inte avgörande) barriär. Hänsyn måste dock tas till osäkerhet i uppskattningen och den rumsliga fördelningen. Det bör noteras att endast önskemål, inte krav, gäller för transportmotståndet.

Vare sig flödesporositet eller dispersion är användbara lämplighetsindikatorer eftersom de inte har väsentlig betydelse för retentionen.

Inga meningsfulla kriterier kan formuleras utifrån den information som kan erhållas från en förstudie eller översiktsstudie.

Under platsundersökningen bör det gå att visa att en stor andel av den skattade statistiska fördelningen av flödesvägarna har ett transportmotstånd $F > 10^4$ år/m. Uppfylls inte detta kriterium kan säkerhetsmarginalen sannolikt ökas om det går att göra troligt att de olämpliga flödesvägarna senare (vid förvarsutbyggnaden) kan undvikas genom lämplig förvarsutformning och val av kapselpositioner. Under alla förhållanden behöver dock en slutgiltig bedömning göras inom ramen för en integrerad säkerhetsanalys.

9.4 Egenskaper för bergmatrisen längs strömvägar

9.4.1 Beskrivning av parameter och dess inverkan på funktioner

Sorption kan förekomma på ytor på mikrosprickor inne i bergmatrisen, dvs kombinerat med matrisdiffusion och på större sprickyor i direkt kontakt med det strömmande vattnet. Förekomsten av dessa mekanismer är en förutsättning för att berget ska ge meningsfull fördröjning av radionuklider som släppts ut från kapslar med bruten isolering. I SKB:s migrationsmodeller (FARF31) behandlas främst sorption i matrisen medan sorptionen direkt på makrosprickorna försummas. För att kunna bestämma betydelsen av sorptionen i bergmatrisen behövs därmed information om sorptionen samt diffusivitet och porositet hos bergmatrisen.

I säkerhetsanalysens migrationsmodeller beskrivs sorptionen av radionuklider lösta i grundvattnet med sorptionskoefficienten K_d , som anger fördelningen av radionuklider mellan vattnet och berget. K_d -värdena är nuklid- (eller snarare element-) specifika och beror dessutom på grundvattenkemin. I princip beror de även på bergartssammansättningen, men erfarenhet visar att detta beroende i stort sett kan försummas /Carbol och Engkvist, 1997/. K_d -värdena är därmed bara indirekt platsspecifika, via grundvattnets sammansättning, och behandlas därför inte vidare här eftersom önskemål på grundvattnets sammansättning ur denna aspekt redan har diskuterats i kapitel 8.

Matrisdiffusionen bestäms också av bergmatrisens egenskaper (diffusivitet och porositet). Dessa kan dessutom antas avta ett visst avstånd från sprickan varför modeller i regel också innehåller ett angivet maximalt "penetrationsdjup", som är en konservativ uppskattning av hur mycket av bergmatrisen som är tillgängligt för diffusion. Av symmetriskäl kan penetrationsdjupet inte bli större än avståndet mellan olika sprickor, men för sorberande nuklider blir den verkliga penetrationen mycket kortare. För sorberande nuklider har ett begränsat tillgängligt penetrationsdjup försumbar inverkan under förutsättning att det uppgår till minst några centimeter (se t ex SKI Projekt 90 /SKI, 1991/), medan tillgänglighet till större djup kan vara viktig för kortlivade icke-sorberande nuklider.

Densiteten för bergmatrisen påverkar inte sorptionen. Densiteten förekommer visserligen i formeln för transportberäkningarna, men anledningen till detta är att sorptionsdata redovisas per kg. Den naturliga variationsbredden är dessutom liten.

9.4.2 Krav och önskemål

Det finns inga direkta krav på bergets diffusivitet D_e eller matrisporositet ϵ_r .

Det finns ett önskemål att de flesta tänkbara transportvägar med grundvattnet från förvaret ger ett väsentligt bidrag till fördröjningen. Det är därvid lämpligt att matrisdiffusivitet och matrisporositet inte är mycket lägre (faktor 100 eller mer) än de värdeområden som analyserats inom SR 97 /se Ohlsson och Neretnieks, 1997/. Det maximalt tillgängliga penetrationsdjupet bör åtminstone överstiga någon centimeter. Mindre avvikelser från dessa värden är dock av liten betydelse. Om diffusivitet och porositet är noll sker dock ingen retention.

9.4.3 Generell kunskap och kunskap som erhålls vid olika skeden

Värdeområden för K_d och matrisdiffusivitet är ämnesspecifika och beror på grundvattenkemin (se Carbol och Engkvist, 1997 för K_d och Ohlsson och Neretnieks, 1997 för diffusiviteter och porositeter).

Förstudier ger inget ytterligare bidrag till den generella kunskapen om diffusivitet och porositet. Vid platsundersökningar kan matrisdiffusivitet och matrisporositet bestämmas genom laboratorieförsök på borrhävar och eventuellt även in-situ från borrhål.

9.4.4 Lämplighetsindikatorer och kriterier

Matrisdiffusivitet och matrisporositet förväntas inte variera väsentligt mellan olika platser. Parametrarna är därför bara meningsfulla som lämplighetsindikatorer om det, mot all förmodan, skulle visa sig att matrisdiffusivitet och matrisporositet är mycket låga (se ovan). Parametrarna är viktiga att känna till eftersom de ingår i retentionsberäkningar.

Inga meningsfulla kriterier kan formuleras baserat på information som finns tillgänglig under förstudier.

Uppmätta värden på matrisporositet/diffusivitet bör inte väsentligt understiga de värden som normalt gäller i den svenska kristallina berggrunden (Ohlsson och Neretnieks, 1997). Understigs dessa värden med mer än en faktor hundra krävs speciell uppmärksamhet vid den kommande integrerade säkerhetsanalysen.

9.5 Sammanfattning lämplighetsindikatorer – bergets transportegenskaper

Föregående avsnitt har redovisat vilka lämplighetsindikatorer avseende transportegenskaper som kan komma i fråga i olika skeden av lokaliseringsarbetet. Den kompletta redovisningen av arbetet återfinns i tabell A-6 i bilaga A och tabell B-6 i bilaga B. Tabell 9-2 ger en sammanställning av de lämplighetsindikatorer som preliminärt identifierats för bergets transportegenskaper.

Tabell 9-2. Lämplighetsindikatorer för bergets transportegenskaper (den kompletta redovisningen återfinns i bilaga A och B).

Parametrar – gruppvis	Krav eller önskemål	Kriterier under förstudie (FS) och under platsundersökning (PLU)
Flödesparametrar i deponeringshålskala	Önskemål om låga (och jämna) flöden i deponeringshålskala. Stor andel med grundvattenflöde (darcy-hastighet) $q < 0,01 \text{ m/år}^2$. Utvärderas inom ramen för samlad säkerhetsanalys.	FS: – PLU: Fördel om den uppskattade darcy-hastigheten (i skala 10 m^2) är lägre än $0,01 \text{ m/år}$ för ett stort antal positioner i berget. Slutgiltig bedömning görs inom ramen för en säkerhetsanalys.
Flödesrelaterade transportparametrar (q , a_r , $a_r L/q$, m , m)	Önskemål om höga F . Stor andel flödesvägar med $F > 10^4 \text{ år/m}^3$. Dispersion och flödesporositet av begränsad betydelse. Utvärderas inom ramen för samlad säkerhetsanalys.	FS: – PLU: Fördel om stor andel av skattade statistiska fördelningen av flödesvägar har ett transportmotstånd $F > 10^4 \text{ år/m}$. Eventuellt kan dock olämpliga flödesvägarna senare undvikas genom lämplig förvarsutformning och val av kapselpositioner. Slutgiltig bedömning görs inom ramen för en säkerhetsanalys.
Egenskaper "bergmatris" diffusivitet D_e och matrisporositet ϵ_r	Olämpligt om mycket låg diffusivitet och matrisporositet (men sådan förväntan finns inte). Utvärderas inom ramen för samlad säkerhetsanalys.	FS: – PLU: Uppmätta värden bör inte väsentligt faktor 100 understiga de värden som normalt gäller i den svenska kristallina berggrunden. Annars krävs speciell uppmärksamhet vid den kommande säkerhetsanalysen.

²⁾ $0,01 \text{ m/år}$ motsvarar cirka $3 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

³⁾ 10^4 år/m motsvarar cirka $3 \cdot 10^{11} \text{ s/m}$

10 Slutsatser

Rapporten presenterar vilka krav som ställs på berget, vilka förhållanden i berget som är fördelaktiga (önskemål) och hur man ska bedöma uppfyllelsen (kriterier) av krav och önskemål vid val av plats för platsundersökningar och under en platsundersökning. Rapportens slutsatser och resultat baseras på den kunskap och erfarenhet som kommit fram under SKB:s mångåriga forsknings- och utvecklingsarbete. Speciellt utnyttjas de kunskaper som kommit fram vid SKB:s senast genomförda säkerhetsanalys, SR 97 /SKB, 1999a/. De redovisade kraven, önskemålen och kriterierna kommer att användas i SKB:s fortsatta arbete med platsval och platsundersökningar. De i inledningen angivna målen med arbetet har därmed uppnåtts.

Resultaten, och speciellt kriterierna, gäller ett förvar för använt kärnbränsle av typ KBS-3, dvs ett förvar där bränslet förvaras i kopparkapslar inbäddade i lera på 400–700 m djup i det svenska kristallina urberget. Om förvarskonceptet förändras eller om det görs nya tekniska/vetenskapliga landvinningar kan vissa krav, önskemål eller kriterier behöva anpassas. Det bör betonas att arbetet därför inte direkt kan användas som underlag för lokalisering av andra typer av förvar eller i andra geologiska miljöer.

10.1 Resultat

10.1.1 Vilka krav ställer vi på berget?

Det finns en stor mängd förhållanden som behöver bestämmas vid en platsundersökning. Det är dock bara vissa som har direkt betydelse för om platsen är lämplig för ett förvar eller har betydelse för hur förvaret bör utformas på den undersökta platsen.

Följande krav ställs på berget eller på hur djupförvaret ska placeras i berget:

- Bergarterna inom förvarets deponeringsområde får inte ha malmpotential dvs utgöras av så värdefulla mineral att det skulle kunna motivera brytning på hundratals meters djup.
- Regionala plastiska skjuvzoner ska undvikas om det inte kan visas att zonens egenskaper inte avviker från berget i övrigt. I närheten av regionala plastiska skjuvzoner kan det dock finnas så tekniska linser, där berggrunden är homogen och relativt opåverkad.
- Det måste vara möjligt att inplacera förvaret med hänsyn till sprickzonerna på platsen. Deponeringstunnlar och deponeringshål för kapslar får inte passera genom eller placeras för nära regionala och lokala större sprickzoner. Deponeringshål får inte korsa identifierade lokala mindre sprickzoner.
- Bergets hållfasthet, sprickgeometri och initiala bergspänningar får inte vara sådana att det uppstår omfattande stabilitetsproblem kring tunnlar eller deponeringshål inom deponeringsområdet. Detta kontrolleras genom en mekanisk analys där ingångsvärdena utgörs av tunnlarnas geometri, det intakta bergets hållfasthet och deformationsegenskaper, spricksystemets geometri och de initiala bergspänningarna.

- Grundvattnet på försvarsnivå får inte innehålla löst syre. Frånvaro av löst syre indikeras av negativa Eh, förekomst av Fe(II), eller förekomst av sulfid.
- Den totala salthalten (TDS) i grundvattnet måste understiga 100 g/l på försvarsnivå.

Förutom ovanstående krav finns det en större mängd önskemål, dvs förhållanden som är önskvärda och som man bör ta hänsyn till när förvaret placeras i berget:

- Eftersom det kan vara svårt att förutspå vilken användning olika bergarter kan ha i framtiden är det önskvärt att ett djupförvar lokaliseras till vanligt förekommande bergarter.
- Det är önskvärt med måttlig sprickdensitet (sprickyta per volym) av sprickor och av lokala mindre sprickzoner.
- Det är generellt en fördel om de initiala bergspänningarna på tänkt förläggningsdjup inte avviker från vad som är normalt i svensk kristallin berggrund.
- Det är önskvärt med för svensk berggrund normala hållfasthets- och deformations-egenskaper hos det intakta berget eftersom det erfarenhetsmässigt har visat sig vara möjligt att utföra bergarbeten med goda resultat i sådan berggrund.
- Det är önskvärt att temperaturutvidgningskoefficienten har normala värden för svensk berggrund (dvs inom intervallet 10^{-6} till 10^{-5} K^{-1}) och att den inte skiljer sig markant mellan de bergarter som finns i försvarsområdet.
- Berget bör ha högre värmeledningsförmåga än $2,5 \text{ W/(m,K)}$. Områden med stor potential för geotermisk energiutvinning bör undvikas. Den ostörda temperaturen på försvarsdjup bör understiga $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Det är en fördel om en stor del av bergmassan i deponeringsområdet har en vattengenomsläpplighet (K) som är mindre än 10^{-8} m/s .
- Sprickzoner som behöver passeras under bygge bör ha så låg vattengenomsläpplighet att passage kan ske utan stora problem vilket innebär att zonerna bör ha en transmissivitet (T) som är lägre än $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och att de dessutom inte är byggnadstekniskt besvärliga.
- Det är en fördel om den lokala hydrauliska gradienten är lägre än 1 % på försvarsnivå, men det är ingen ytterligare fördel med ännu lägre värden.
- Ostört grundvatten på försvarsnivå bör ha ett pH i intervallet 6–10, ha en låg halt av organiska ämnen ($[\text{DOC}] < 20 \text{ mg/l}$), låg kolloidhalt (lägre än $0,5 \text{ mg/l}$), låga ammoniumhalter, visst innehåll av kalcium och magnesium ($[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] > 4 \text{ mg/l}$) och låga halter av radon och radium.
- Det är önskvärt att det i en stor del av berget går att finna kapselpositioner med som i kapselhålsskala har lägre darcyhastighet än $0,01 \text{ m/år}$ eftersom lägre flöden innebär att fördröjningen av viktiga radionuklider ökar.
- Det är ett önskemål att det sker en väsentlig fördröjning av viktiga radionuklider i geosfären. Ett kvantitativt önskemål kan uttryckas i form av transportmotståndet (F-parametern) där darcyhastighet, flödesfördelning och våta ytan per volym berg (eller motsvarande parametrar) är sådana att en stor del av alla strömningsvägar har F större än 10^4 år/m .

- Det är lämpligt att matrisdiffusivitet och matrisporositet inte är mycket lägre (en faktor 100 eller mer) än de värdeområden som analyserats inom säkerhetsanalysen SR 97. Det maximalt tillgängliga diffusionsdjupet bör åtminstone överstiga någon centimeter.
- Områden där biologisk mångfald och skyddsvärda arter kan hotas och områden som är eller kan bli en betydande vattentäkt, jordtäkt eller odlingsmark bör undvikas för djupförvarets ovanjordsanläggningar. (I lag skyddade områden undviks.)

Allmänt gäller att uppfyllda önskemål leder till större säkerhetsmarginaler, lägre kostnader, enklare undersökningar eller enklare konstruktion av förvaret. Samtliga önskemål behöver inte vara uppfyllda för att en plats ska kunna godkännas för ett djupförvar. Det kan mycket väl vara så att "sämre" värden för vissa parametrar kompenseras av "bättre" värden för andra. För att bedöma säkerhet och funktion behövs därför alltid en integrerad säkerhetsanalys och en bygganalys.

Förutom ovanstående önskemål som direkt har att göra med bergets egenskaper finns det önskemål som underlättar karakteriseringen av platsen. Speciellt gäller:

- Det är önskvärt att det finns en hög andel berg i dagen och i övrigt måttligt jorddjup (helst mindre än cirka 10 m) eftersom detta underlättar möjligheten att från markytan kartlägga de litologiska och strukturgeologiska förhållanden i den underliggande berggrunden.
- Det är önskvärt att berggrunden är homogen med få bergarter och med regelbunden uppsprickning. En småskalig variation i mineralsammansättning, exempelvis en gnejs, är dock ingen nackdel.

Även om kraven och önskemålen formulerats utifrån olika säkerhetssynpunkter och anläggningssynpunkter kan man konstatera att det knappast finns något exempel på att olika krav eller önskemål står i konflikt med varandra. Allmänt gäller att förhållanden som leder till god långsiktig säkerhet i regel också är fördelaktiga ur anläggningssynpunkt.

10.1.2 Val av områden för platsundersökning

Krav och önskemål på berget ska givetvis så långt som möjligt användas för att formulera kriterier för val av platser för platsundersökningarna. Efter en genomförd förstudie finns vanligen en bra kunskap om förhållandena på markytan medan kunskapen om förhållandena i det djupa berget är mycket begränsad. Kriterier kan därför normalt bara formuleras för följande lämplighetsindikatorer:

- Efter genomförd förstudie görs fortsatta studier och undersökningar enbart av områden som inte bedömts ha potential för förekomst av malm eller värdefulla industri-mineral och som bedömts vara homogena och bestå av vanligt förekommande bergarter.
- Under förstudien väljs och anpassas undersökningsområdet så att ett djupförvar med god marginal kan inplaceras med hänsyn till regionala plastiska skjuvzoner och de vid förstudien tolkade regionala sprickzonerna.

- I lag skyddade områden undviks och områden för fortsatta undersökningar väljs så att de har få konkurrerande intressen (exempelvis en vattentäkt) och så att ovanjordsdelen kan anpassas med liten påverkan på det ytnära ekosystemet.
- Områden med olämpligt hög topografisk gradient i regional skala (större än 1 %) väljs bort.

Förstudierna identifierar således områden med potential för lämpliga förhållanden. Men det krävs platsundersökningar (undersökningar från borrhål) för att kontrollera detta. Samtidigt visar rapportens genomgång av den generella kunskapen om den svenska kristallina berggrunden att det bör finnas goda förutsättningar att finna platser som uppfyller alla krav och de flesta av de väsentliga önskemålen i Sverige.

10.1.3 Vad kan göra att platsundersökningen bör avbrytas?

Vid den sammanvägda bedömningen av om en plats är lämplig utgör en samlad säkerhetsanalys och en samlad bygganalys väsentliga underlag. Platsen accepteras bara om det i säkerhetsanalysen går att visa att ett säkert djupförvar kan uppföras. Under en platsundersökning, då mätvärden erhållits från förvarsdjup, men innan den samlade analysen har genomförts, används kriterier för att kontrollera om ovanstående krav och önskemål kan vara uppfyllda. Kriterierna ger vägledning om hur analyserna kommer att utfalla och kan därför också användas som hjälpmedel för den som vill granska en säkerhetsanalys.

Följande kriterier är så skarpa att platsundersökningen bör avbrytas och annan plats väljas om de inte kan tillgodoses:

- Om omfattande förekomst av malmförande mineral eller värdefulla industrimineral påträffas inom förvarsområdet bör platsen överges.
- Under platsundersökningen anpassas förvaret mer noggrant till de då identifierade deformationszonerna. Lämpliga respektavstånd till identifierade regionala och lokala större sprickzoner kan bara bestämmas platsspecifikt men antas utgöra åtminstone flera tiotals meter till lokala större zoner och minst 100 meter till regionala zoner. Om förvaret inte kan inplaceras på ett rimligt sätt (om det skulle behöva delas upp i ett mycket stort antal delar) i förhållande till regionala plastiska skjuvzoner, regionala sprickzoner eller lokala större sprickzoner är platsen inte lämplig för ett djupförvar.
- Om förvaret inte rimligen kan utformas på ett sådant sätt att omfattande och allmänna stabilitetsproblem kan undvikas är platsen olämplig och bör överges. Omfattande problem med "core discing" av borrhävar bör direkt leda till misstankar om att det kan uppstå sådana problem.
- Minst någon av indikatorerna negativa Eh-värden, förekomst av Fe(II) eller förekomst av sulfid måste vara uppfylld för resultaten av mätningarna av grundvattnets sammansättning på förvarsdjup. Om ingen av indikatorerna tydligt kan påvisa frånvaro av löst syre krävs en fördjupad kemisk bedömning. Om inte ens dessa vidare studier kan påvisa syrefria förhållanden måste platsen överges.
- Uppmätta totala salthalter (TDS) på förvarsnivå måste vara lägre än 100 g/l. Enstaka högre värden kan accepteras om det kan visas att vattnet ligger i områden som kan undvikas och att vattnet inte kommer att kunna strömma till förvarsområdet.

Förutom dessa direkt diskvalificerande kriterier kan platsens lämplighet ifrågasättas om en stor del av bergmassan mellan sprickzoner har en vattengenomsläpplighet som är större än 10^{-8} m/s. Vid hög vattengenomsläpplighet finns behov av lokal detaljanpassning av förvaret om säkerhetsmarginalen ska bibehållas.

10.2 Erfarenheter från projektarbetet

För ett få struktur på arbetet har det varit nödvändigt att införa en tämligen komplicerad begreppsapparat. Skälet till detta är att det är centralt att kunna skilja mellan funktioner och egenskaper, att kunna skilja mellan krav och önskemål, att kunna skilja mellan bergets faktiska egenskaper och vad som kan bestämmas i olika skeden av en undersökning. Den strikta nomenklaturen som införts har varit nödvändig eftersom dessa frågor inte alltid har hållits isär i tidigare diskussioner eller dokument.

Arbetet täcker ett stort antal olika ämnesområden. Bergets egenskaper kan inverka på flera olika funktioner. Det har därför varit nödvändigt att arbeta i flera steg och att strukturerat gå igenom faktamaterialet med ett stort antal återkopplingar till olika ämnesexperter. Den strukturerade genomgången kan möjligen skylta det faktum att endast få av bergets enskilda egenskaper har stor betydelse för djupförvarets funktion. Den strukturerade och omfattande genomgången har dock varit nödvändig för att se till att viktiga frågor och aspekter inte glömts bort.

Projektet har strävat efter att beskriva funktioner och parametrar inom olika ämnesområden på ett någorlunda enhetligt och begripligt sätt. Ett problem är att nomenklatur och begreppsvärld skiljer sig något mellan olika discipliner. Materialet har dock granskats och kommenterats av både interna och externa ämnesspecialister. Denna återkommande granskning har varit helt nödvändig.

När det gäller beskrivningen av respektive ämnesområde kan detaljrikedomen variera. Det är också nödvändigt att begränsa detaljerna i ett gränsöverskridande arbete som detta. Förhoppningsvis hjälper våra referenser till att göra beskrivningen fullständig.

Med tanke på komplexiteten med arbetet har det också bedömts vara nödvändigt att lägga ner stor möda på att nå intern och extern förankring kring arbetet och dess resultat. Krav, önskemål och kriterier får inte onödigtvis hindra flexibiliteten i det fortsatta utvecklings- och lokaliseringsarbetet, men måste å andra sidan vara så konkreta att det verkligen ger vägledning till det fortsatta arbetet.

11 Referenser

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

Ahonen L, 1999. Effect of saline water on metallic copper, Posiva Working Report 99-58.

Allard B, Karlsson F, Neretnieks I, 1991. Concentrations of particulate matter and humic substances in deep groundwaters and estimated effects on the adsorption and transport of radionuclides, SKB Technical Report TR 91-50.

Andersson J-E, Nordqvist R, Nyberg G, Smellie J, Tirén S, 1991. Hydrogeological conditions in the Finnsjön area. Compilation of data and conceptual model. SKB Technical Report TR 91-24. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

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

Andersson J, Almén K-E, Ericsson L O, Fredriksson A, Karlsson F, Stanfors R, Ström A, 1998a. Parameters of importance to determine during geoscientific site investigation, SKB Technical Report TR 98-02. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Andersson J, Elert M, Hermanson J, Moreno L, Gylling B, Selroos J-O, 1998b. Derivation and treatment of the flow wetted surface and other geosphere parameters in the transport models FARF31 and COMP23 for use in safety assessment. SKB Report R-98-60. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

Andersson J, 1999. SR 97: Data and Data Uncertainties, Compilation of Data and Evaluation of Data Uncertainties for Radio-nuclide Transport Calculations, SKB, TR-99-09, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 1999.

Banwart (ed), 1995. The Äspö redox investigations in block scale. Project summary and implications for repository performance assessment, SKB TR 95-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Barton N, Lien R, Lunde J, 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, Vol 6, pp 189–236.

Barton N, Bandis S, Bakhtar K, 1985. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. IJRM, Vol 22, No 3, pp 121–140.

Benjamin L A, Hardie D, Parkins R N, 1988. Stress corrosion resistance of pure coppers in ground waters and sodium nitrite solutions. Br Corros J 88 (1988) 89–95.

- Bergman T R, Johansson A H, Lindén L, Rudmark C-H, Wahlgren S, Follin H, Isaksson H, Lindroos R, Stanfors, 1999.** Förstudie Oskarshamn. Erfarenheter från geovetenskapliga undersökningar i nordöstra delen av kommunen, SKB Rapport R-99-04. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Bjurström H, 1997.** Värmeöverföring i en spalt. SKB Arbetsrapport D-97-07. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Brady B, Brown E T, 1993.** Rock Mechanics for Underground Mining. Second edition, Chapman & Hall, London.
- Bruno J, Cera E, De Pablo J, Duro L, Jordana S, Savage D, 1997.** Determination of radionuclide solubility limits to be used in SR 97. Uncertainties associated to calculated solubilities. SKB Technical Report TR 97-33. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Börgesson L, 1992.** Interaction between rock, bentonite, buffer and canister. FEM calculations of some mechanical effects on the canister in different disposal concepts. SKB Technical Report TR 92-30. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Börgesson L, Johannesson L-E, Sanden T, Hernelind J, 1995.** Modelling of the physical behavior of water saturated clay barriers, Laboratory tests, material models and finite element application. SKB Technical Report TR 95-20, Stockholm. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Börgesson L, Hernelind J, 1998.** Kapselpåverkan vid inhomogena svälltryck från bufferten. FEM-beräkningar av effekten av ojämn vattentillgång i berget. SKB Projekt Inkapsling Projekt PM 98-3420-33. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Carbol P, Engkvist I, 1997.** Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment, SKB Report R-97-13. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Cvetcovic V och Selroos J-O, 1999.** Geosphere Performance Indices. Comparative Measures for site selection and safety assessment of deep waste repositories, SKB Report R-99-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Dershowitz W, Follin S, Andersson J, Eiben T, 1999.** SR 97 Alternative Models Project. Discrete fracture modelling for performance assessment of Aberg. SKB Report R-99-43. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- Ericsson L O, 1985.** Värmeutbyte mellan berggrund och borrhål vid bergvärmesystem. Chalmers tekniska högskola, Geologiska institutionen, Doktorsavhandling Publ. A 52, Göteborg.
- Follin S, 1995.** Geohydrological simulation of a deep coastal repository. SKB Technical Report TR 95-33. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Follin S, Årebäck M, Jacks G, 1996.** Förstudie Östhammar, Grundvattnets rörelse, kemi och långsiktiga förändringar, SKB Djupförvar Projekt Rapport, PR D-96-017, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Freeze A och Cherry J, 1979.** Groundwater, Prentice Hall, Engelwood Cliffs, N J.

Gylling B, Walker D och Hartely L, 1999. Site Scale Groundwater Flow Modelling of Beberg. SKB Technical Report TR-99-18. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

Hakami E, Olofsson S-O, Hakami H, Israelsson J, 1998. Global thermo-mechanical effects from a KBS-3 type repository. Summary report SKB TR 98-01, Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

Hansson H, Stephansson O, Shen B, 1995. SITE-94. Far-field Rock Mechanics Modelling for Nuclear Waste Disposal. SKI Report 95:4, Stockholm.

Hartley L, Boghammar A, Grundfelt, B, 1998. Investigations of the large scale regional hydrogeological situation at Beberg, SKB TR-98-24, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm.

Hermanson J, Hansen L M, Follin S, 1997. Update of the geological models of the Gideå study site. SKB Report R 97-05. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

Hermanson J, Stigsson M, Pringle A, 1999. Prototype repository DFN Model No 1, Äspö Hard Rock Laboratory, International Progress Report IPR-99-09, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Hoek E, Brown E T, 1980. Underground excavations in rock, London Institute of Min. Metall.

Hökmark H, 1996. Canister Positioning. Stage 1 Thermomechanical Nearfield Rock Analysis. SKB AR D-96-014, Stockholm.

IAEA, 1994. Siting of Geological Disposal Facilities: A Safety Guide. Safety Series No 111-G-4.1, STI/PUB/952 (32 pp).

Kärnland O, 1997. Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions. Correlation between model calculation and experimentally determined data. SKB Technical Report TR 97-31.

KBS-3, 1983. Final Storage of Spent Nuclear Fuel, KBS-3, SKBF/KBS, Svensk kärnbränsleförsörjning AB.

Laaksoharju M, Smellie J, Routsalainen P, Snellman M, 1993. An approach to quality classification of deep groundwaters in Sweden and Finland, SKBB TR 93-27.

Laaksoharju M, Degueldre C, Skårman C, 1995. Studies of colloids and their importance for repository performance assessment, SKB TR 95-24 Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Laaksoharju M, Gurban I och Skårman C, 1998. Summary of hydrochemical Conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. SKB Technical Report TR-98-03. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

La Pointe P R, Cladouhos T, Follin S, 1999. Calculation of displacements on fractures intersecting canisters induced by earthquakes, 1999, SKB TR-99-03. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

- Larsson S Å, Tullborg E L, 1993.** Tectonic regimes in the Baltic Shield during the last 1200 Ma – A review, SKB TR 94-05. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Leijon B, 1993.** Mechanical properties of fracture zones. SKB TR 93-19. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Leijon B, 1998.** Nord-Syd/Kust-Inland. Generella skillnader i förutsättningar för lokalisering av djupförvar mellan olika delar av Sverige. SKB Rapport R-98-16. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Ljunggren C, Chang Y och Andersson J, 1998.** Bergspänningsmätningars representativitet. Mätnoggrannhet och naturliga variationer vid hydraulisk spräckning och överborrning, SveBeFo rapport, 37, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning.
- Martin D, 1994.** TVO & SKB Workshop on Brittle Rock Strength. SKB AR 94-59. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Martin C D, Kaiser P K, McCreath D R, 1999.** Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. Canadian Geotechnical Journal, Volume 36, No 1, pp 1–16.
- Moreno L, Gylling B, 1998.** Equivalent flow rate concept in near field transport model COMP23, SKB Report R-98-53. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- Munier R, Sandstedt H, Niland L, 1997.** Förslag till principiella förvarsutformningar av förvar enligt KBS-3 för Aberg, Beberg och Ceberg, SKB report R-97-09. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Neuman S P, 1987.** Stochastic continuum representation of fractured rock permeability as an alternativ to the REV and fracture network concepts, In: Farmer I W m fl (eds) Proc. 28th US Symp. Rock. Mech. 533–561, Balkema, Rotterdam.
- Norman S, Kjellbert N, 1990.** FARF31 – A far field radionuclide migration code for use with the PROPER package. SKB Technical Report TR 90-01. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- Norman S, 1992.** HYDRASTAR – a code for stochastic simulation of groundwater flow, SKB Technical Report TR 92-12. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- Ohlsson Y, Neretnieks I, 1997.** Diffusion data in granite. Recommended values. SKB Technical Report TR 97-20. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- Pitkänen P, Lukkonen A, Ruotsalainen P, Leino-Forsman H, Vourinen U, 1998.** Geochemical modelling of groundwater evolution and residence time at Olkiluoto site, Posiva report 98-10, Posiva Oy, Helsinki.
- Pedersen K, Karlsson F, 1995.** Investigations of subterranean microorganisms – Their importance for performance assessment of radioactive waste disposal. SKB Technical Report 95-10. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Probert T, Claesson J, 1997.** Temperature field due to time-dependent heat sources in a larger rectangular grid. Application for the KBS-3 repository, SKB TR 97-27.

- Puigdomenech I, Banwart S A, Bateman K, Griffault L, Gustafsson E, Hama K, Kotelnikova S, Lartigue J-E, Michaud V, Milodowski A E, Morosini M, Pedersen K, Rivas Perez J, Trotignon L, Tullborg E-L, West J M, Yoshida H, 1999.** Äspö Hard Rock Laboratory, Redox experiment in detailed scale (REX): First Project Status Report. SKB ICR 99-01. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Pusch R, Börgesson L, 1992.** PASS – Project on alternative systems study. Performance assessment of bentonite clay barrier in three repository concepts: VDH, KBS-3 and VLH. SKB Technical Report TR 92-40. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Pusch R, 1996.** JADE, Jämförelse av bergmekaniska funktionssätt hos KBS3-V, KBS3-H och MLH. Underlagsrapport för konceptjämförelse. Clay Technology AB, Lund.
- Pusch R, Hökmark H, 1993.** Mechanisms and consequences of creep in the nearfield rock of a KBS3 repository, SKB TR 93-10. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Reed D T, van Konynenburg R A, 1991a.** Effect of ionizing radiation on the waste package environment. High Level Waste Management II, American Nuclear Society, La Grange Park, IL, 1396–1403.
- Reed D T, van Konynenburg R A, 1991b.** Progress in evaluating the corrosion of candidate HLW container metals in irradiated air-steam mixtures. Proceedings Nuclear Waste Packaging, Focus '91, American Nuclear Society, La Grange Park, IL, 185–192.
- Rhén I (ed), Svensson U (ed), Andersson J-E, Andersson P, Eriksson C-O, Gustafsson E, Ittner T, Nordqvist R, 1992.** Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation of the combined longterm pumping and tracer test (LPT2) in borehole KAS06, SKB TR 92-32. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Rhén Ingvar (ed) 1), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997.** Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995, SKB TR 97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Romero L, 1995.** The near-field transport in a repository for high-level nuclear waste, PhD Thesis, TRITA-KET R21, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Rouhiainen P, 1993.** TVO-Flowmeter. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies. Report YJT-93-01.
- Rutqvist J, Follin S, Khair K, Nguyen S, Wilcock P, 1996.** Experimental investigation and mathematical simulation of a borehole injection test in deformable rocks, in Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media (ed O Stephansson, L Jing, C F Tsang), Developments in Geotechnical Engineering, Vol 79, Elsevier Science B V.
- Saksa P och Nummela J, 1998.** Geological-Structural Models Used In SR 97. Uncertainty analysis. SKB Technical Report TR 98-12. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- Saario T, Laitinen T, Mäkelä K, Bojinov M, 1999.** Literature survey on stress corrosion cracking of Cu in presence of nitrites, ammonia, carbonates and acetates, Posiva Working Report 99-57.

- Scholz C H, 1990.** The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press, Cambridge.
- Smellie J A T, Laaksoharju M, 1992.** The Äspö Hard Rock Laboratory. Final evaluation of the hydrogeochemical pre-investigations in relation to existing geologic and hydraulic conditions. SKB Technical Report TR 92-31.
- SFS, 1975.** Lagen om uppgiftsskyldighet vid grundvattentäktsundersökning och brunnborrning, Svensk Författningssamling, SFS 1975:425.
- SKB, 1992.** SKB-91. Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety. SKB Technical report TR 92-20. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 1994.** FUD-Program 92. Kompletterande redovisning. Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring. Komplettering till 1992 års program sammanställd med anledning av regeringsbeslut 1993-12-16, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 1995a.** FUD-program 95. Kärnavfallets behandling och slutförvaring. Program för inkapsling, geologisk djupförvaring samt forskning, utveckling och demonstration. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 1995b.** Översiktstudie 95. Lokalisering av djupförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 1997.** Förstudie Östhammar, Preliminär slutrapport, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm
- SKB, 1998.** FUD-program 98. Kärnavfallets behandling och slutförvaring. Program för forskning samt utveckling och demonstration av inkapsling och geologisk djupförvaring. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 1999a.** SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Djupförvar för använt kärnbränsle. Huvudrapport (två volymer), Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 1999b.** SR 97 Processer i förvarets utveckling, Underlagsrapport till SR 97, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 1999c.** SR 97 Avfall, förvarsutformning och platser, Underlagsrapport till SR 97, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKI, 1991.** SKI Project 90, SKI Technical Report 91:23, Statens kärnkraftinspektion, Stockholm.
- SKI, 1996.** The SKI Deep Repository Performance Assessment Research Project SITE-94. SKI Report 96:36. Statens kärnkraftinspektion, Stockholm.
- SKI, 1999.** SKIs utvärdering av SKB:s FUD-program 98. Sammanfattning och slutsatser. SKI Rapport 99:15, Statens kärnkraftinspektion, Stockholm.
- SSI, 1998.** Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall, SSI FS 1998:1, Statens strålskyddsinstitut, Stockholm.
- Stephens M, Johansson R (Antal I, Bergman S, Gierup J, Persson C, Thunholm B), 1999a.** Översiktstudie av Kalmar län. Geologiska förutsättningar, SKB Rapport R-98-24, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

- Stephens M, Johansson R (Antal I, Bergman S, Gierup J, Persson C, Thunholm B), 1999b.** Översiktsstudie av Uppsala län. Geologiska förutsättningar, SKB Rapport R-98-32, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Stille H, Nord G, 1990.** Kompendium i bergmekanik. Institutionen för jord- och bergmekanik, KTH.
- Stille H, Olsson P, 1996.** Summary of rock mechanical results from the construction of Äspö Hard Rock Laboratory. Äspölaboratoriet Progress Report HRL -96-07, SKB, Stockholm.
- Ström A, Almén K E, Andersson J, Ericsson L O, Svemar C, 1998.** Geovetenskapliga värderingsfaktorer och kriterier för lokalisering och platsutvärdering. Lägesredovisning, 1998, SKB Rapport R-98-20. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Stumm & Morgan, 1996.** Aquatic chemistry-Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters-3rd ed, 1996.
- Sundberg J, 1988.** Thermal Properties of Soils and Rocks. Chalmers tekniska högskola, Geologiska institutionen, Doktorsavhandling Publ. A 57, Göteborg.
- Sundberg J, 1995.** Termiska egenskaper för kristallint berg i Sverige. Kartor över värmekonduktivitet, värmeflöde och temperatur på 500 m djup. SKB Projekt Rapport D-95-018, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, 1999.** Subglacial groundwater flow at Äspö as governed by basal melting and ice tunnels, SKB R-99-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thunvik R, Braester C, 1980.** Hydrothermal conditions around a radioactive waste repository, SKBF/KBS Technical Report TR 80-19.
- Thunvik R, Braester C, 1991.** Heat propagation from a radioactive waste repository. SKB Technical Report TR 91-61. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Turcotte D, 1992.** Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press, Great Britain.
- Vieno T och Nordman H, 1999.** Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99, Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- Voss C I, Andersson J, 1993.** Regional flow in the Baltic shield during holocene costal regression. In: Groundwater, Vol 31, 6, 989–1006, 1993.
- Vägverket, 1999. Tunnel 99, VV publ. 1999:138, Vägverket, Borlänge.
- Walker D, Rhén I, Gurban I, 1997.** Summary of hydrogeological conditions at Aberg, Beberg, Ceberg. SKB Technical Report TR 97-23. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- Walker D, Gylling B, 1998.** Site Scale Groundwater Flow Modelling of Aberg. SKB Technical Report TR 98-23. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- Walker D, Gylling B, 1999.** Site Scale Groundwater Flow Modelling of Ceberg. SKB Technical Report TR 99-13. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

Werme L, Sellin P, Kjellbert N, 1992. Copper canisters for nuclear high level waste disposal. Corrosion aspects. SKB Technical Report TR 92-26. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

Werme L, 1998. Design premises for canister for spent nuclear fuel. SKB Technical Report TR-98-08. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

Wersin P, Bruno J, Laaksoharju M, 1994. The implication of soil acidification on a future HLW repository. SKB Technical Report TR 94-31. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Winberg A, 1996. Förläggning av ett förvar för använt kärnbränsle på 700–2 000 m djup – Sammanställning av för och nackdelar. SKB Djupförvar PR D-96-002. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Winberg (ed), 1996. First TRUE stage – Tracer Retention Understanding Experiments. Descriptive structural-hydraulic models on block and detailed scales of the TRU-1 site. Report prepared by SKB TRUE Project Team, PNC/Golder Team, USDOE/LBNL Team; SKB HRL International Cooperation Report ICR 96-04. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Yu J-W, Neretnieks I, 1997. Diffusion and sorption properties of radionuclides in compacted bentonite. SKB Technical Report TR 97-12. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co, Stockholm.

Funktionstabeller

Tabell A-1. Geologiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion	128
Tabell A-2. Bergmekaniska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion	129
Tabell A-3. Termiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion	131
Tabell A-4. Hydrogeologiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion	132
Tabell A-5. Kemiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion	134
Tabell A-6. Transportförhållanden som påverkar djupförvarets funktion	136

Tabell A-1. Geologiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion

Berörd funktion	Geologiska förhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referens
Inverkan på kapselns integritet	Geologisk stabilitet: läge för regionala och lokala sprickzoner Se vidare avsnitt om mekanik, termik, hydraulik, kemi	Krav ställs i bergmekanik och hydrologi.	Kapseln placeras i stabil miljö	Geologisk strukturmodell med osäkerheter. (Vilket innebär att predikterbarhet och homogenitet blir viktigt)	
Inverkan på buffertens isolerande förmåga	Se ovan	Se ovan		Se ovan	
Inverkan på bergets fördröjande förmåga	Se ovan Malmpotential	Se ovan Avfallet ska vara skyddat mot oavsiktliga intrång i samband med prospektering	Se ovan	Se ovan Geologisk (litologisk) modell (malmpotential, industrimineral, ovanlig bergart) Bedömning av konkurrerande intressen.	
Anläggningsfrågor	Geologisk modell (bergarter och sprickzoner)	Säker arbetsmiljö Miljöpåverkan från undersökningar och från anläggningsbygget ska begränsas och hållas inom acceptabla nivåer. Anläggningsbygget ska enbart ge begränsad och övergående påverkan på djupförvarets säkerhetsfunktioner och bygge och deponering ska kunna pågå parallellt.	Önskemål om att deponeringsområdet inte behöver delas upp i ett mycket stort antal delområden och att det är möjligt att placera deponeringstunnlar på ett flexibelt sätt i djupled för att nå en bra detaljutformning av förvaret. Anläggningsarbetena kan utföras med få avbrott och med liten insats av extraordinära förstärknings- och tätningsinsatser (god byggbarhet).	Bergmekanisk, hydrogeologisk och termisk analys av geologisk modell (sprickzoner, bergartsfördelning, bergartsgångar, bergartskontakter). Förvarets utformning styrs till stor del av den geologiska informationen. Deponeringstunnlarna undviker större deformationszoner i berget.	

Tabell A-2. Bergmekaniska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion

Berörd funktion	Bergmekaniska förhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referens
Inverkan på kapselns integritet	Deformation av deponeringshål	Deformation får ej innebära att kapseln skadas. Innebär att momentan deformation av kapselhål <100 mm.		Bergmekanisk analysmodell i lokalskala (utformning av deponeringshål, sprickzoner, mekaniska egenskaper, för dessa och intakt berg, densitet och termiska egenskaper, spänningsfördelning, kommande laster (bergmekanisk modell i större skala). Seismisk analys. Statistik på seismiska händelser. Egenskaper på spricknätverk geometri. Analys av konsekvenser.	Börgesson, 1992. SKB, 1999a.
	Seismiska händelser		Konsekvenser av seismiska händelser analyseras i säkerhetsanalysen och ingår i riskuppskattningen.		LaPointe m fl, 1999
	Litostatisk tryck	Kapseln får inte skadas om deponeringshålet deformeras pga kryp			Funktionsanalys av kryp ingår i säkerhetsanalysen, men utgör ingen grund för krav på berget.
Inverkan på buffertens isolerande och fördröjande förmåga	Deformation av deponeringshål	Deformation får ej innebära att bentoniten skadas allvaligt		Bergmekanisk analysmodell (se ovanstående). Speciellt analys av risk för förkastningar (bergmekanisk analys i större skala) för olika scenarier	Pusch och Börgesson, 1992
	Blockutfall	Vid omfattande blockutfall blir deponeringshål ej användbart	Få eller inga blockutfall		
	Sprickbildning/hålrum kan påverka bentoniterosion	Hålrum ej så stora att bentonitfunktion försvinner			Analys av största tillåtna spricka (kombination med hydrologisk analys). Krav sannolikt uppfyllt om deformationskrav enligt ovan är uppfyllda.
Inverkan på bergets fördröjande förmåga	Deformation av bergmassa och sprickzoner leder till förändringar av vattengenomsläppligheten.		Försumbara förändringar i förhållande till övriga osäkerheter.	Bergmekanisk modell och analys av THM-konsekvenser	Hakami m fl, 1998

Forts tabell A-2

Berörd funktion	Bergmekaniska förhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referens
Anläggningsfrågor	Bergutfall Stabilitet i tunnlar Byggkostnader, förstärkningsbehov, stilleståndstider Val av utförandemetoder m m.	Omfattande stabilitetsproblem i deponeringsområdet kan ej accepteras	Minimera mängden bergutfall Rimliga byggkostnader och tider	Bergmekanisk analys för gjord layout Bergmekanisk analys för gjord layout. Bestäms i detaljundersökningsskedet	

Tabell A-3. Termiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion

Berörd funktion	Termiska förhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referens
Inverkan på kapselns integritet	Temperatur på kapselyta påverkar kemisk miljö och därmed kapselns funktion.	Krav på högsta temperatur på kapselytan $T < 100$ C. Layout bestäms så att temperaturkrav uppfylls.		Layout bestäms så att temperaturkrav uppfylls. Temperatur i närområdet bestäms av layout, värmeledningsförmåga, värmekapacitet, termiska randvillkor, bentonitens vattenmättnad.	Werme, 1998. SR97 Basscenariot.
Inverkan på buffertens isolerande och fördröjande förmåga	Temperatur hos bentonit påverkar kemisk miljö	Krav på högsta temperatur, $T < 100$ C. Detta krav är dock automatiskt uppfyllt om kapselkravet klaras.		Se ovanstående	Se ovan och Bjurström, 1997
Inverkan på bergets isolerande och fördröjande förmåga	Termomekanisk påverkan – se mekaniktabellen Potential för geotermisk energi kan påverka sannolikhet för oavsiktligt intrång Termisk konvektion. I regel är termiska drivkraften försumbar jämfört med den topografiska.		Platsen bör inte ha speciella förutsättningar för uttag av geotermisk energi eller lagring av sådan eller annan energi. Termisk konvektion får inte bli betydande drivkraft för grundvattenströmning – se hydrologi. Detta önskemål leder inte till några krav/önskemål på bergets termiska egenskaper. (Frågan är framförallt av design/layout karaktär)	Bedömning utifrån temperatur berg och grundvatten samt termiska randvillkor och gradient. Kopplad termo-hydraulisk grundvattenmodell (värmeledningsförmåga, värmekapacitet, termiska randvillkor, grundvattenmodell med densitetsberoende strömning (se hydrogeologi).	Översiktsstudie 95. Thunvik och Braester, 1980. Thunvik och Breaster, 1991.
Biosfärsfrågor	Avfallens restvärme påverkar mark-temperaturen			Gjorda analyser visar att påverkan är försumbar.	SR 97 (Basscenariot)
Anläggningsfrågor	Temperatur i förvarsskala	Layout bestäms så att temperaturkrav (enligt ovan) uppfylls	Önskemål om kapslar inte behöver spridas ut över stora volymer för att klara temperaturkrav.	Temperatur i närområdet (layout, värmeledningsförmåga, värmekapacitet, termiska randvillkor).	

Tabell A-4. Hydrogeologiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion

Berörd funktion	Hydrogeologiska förhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referens
Inverkan på kapselns integritet	Inverkan av grundvattenströmningen på grundvattenkemi		Vatten med olämplig sammansättning bör inte kunna strömma till deponeringsområdet. (För vissa scenarier kan detta accepteras kortare tid)	Modell av regional grundvattenströmning (regional hydrologi, stora sprickzoner, bergmassans vatten-genomsläpplighet, topografi ...). Identifikation av vatten med olämplig sammansättning (se kemi).	Svensson, 1999
	Tillförsel av korrodanter (grundvattenströmning i deponeringshålskala)		Önskemål om låg grundvattenströmning i kapselskala (kan dock enkelt ersättas av konservativt antagande i SA)	Modell av lokal grundvattenströmning (vattengenomsläpplighet, regional grundvattenströmning)	Inom SR 97 görs överslagberäkningar av kapselkorrosion.
	Grundvattentryck	Kapseln får inte kollapsa på grund av höga hydrostatiska tryck		Hydrostatiskt bestäms av förvarsdjup och kommande scenarior. Kapseln klarar utan vidare ett istäcke av 3 000 m mäktighet.	Werme, 1998. Börgesson och Hernelind, 1998. SR 97
Inverkan på buffertens isolerande och fördröjande förmåga	Strömning i närzonen påverkar uppvätning och svällning. Svällning kan påverka kapseln.	Inga krav. Analys av Werme, 1998 och SR 97 (Börgesson och Hernelind, 1998) visar att kapseln klarar mycket ojämn svällning.	Det är en fördel med jämt fördelade flöden	Modell av lokal grundvattenströmning (vattengenomsläpplighet, regional grundvattenströmning). Modell för bentonituppvätning, utformning av kapsel och förvar.	Werme, 1998 Börgesson och Hernelind, 1998
	Strömning i berg påverkar bentonitens vattenmättnad		Bentonitens vattenmättnad bör vara tillräcklig annars är värmeledningsförmågan inte tillräcklig vilket leder till att förvarets utformning måste ändras	Se ovanstående. Önskemålet skulle kunna innebära önskemål om lägsta vattenföring i deponeringshålen, men eventuella problem kan lösas artificiellt.	Börgesson, 1992, SR 97 basscenariot sid 137
	Strömning i närzonen påverkar uppvätning och svällning.		Bentonit ska fungera som diffusionsspärr	Se ovanstående	

Forts tabell A-4

Berörd funktion	Hydrogeologiska förhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referens
Inverkan på bergets fördröjande förmåga	Grundvattenströmningen kring deponeringshållet påverkar fördröjningen i övergång bentonit/berg Grundvattenströmningen påverkar bergets retentionsförmåga		Önskemål om stort motstånd (låga grundvattenflöden)	Modell av lokal grundvattenströmning (se ovan) och transportmodell	Moreno och Gylling, 1998
			Inga absoluta krav men tillräckligt för att ge barriärfunktion – ska åtminstone räcka för att ge säkerhet i total SA	Vattengenomsläpplighet, flödesvägar och vätta ytan.	Andersson m fl, 1998b
Biosfärsfrågor	Påverkan på ekosystem	Undvik i lag skyddade områden	Mycket liten påverkan på ekosystem under bygge, drift och slutförvaring	Regional grundvattenströmning, påverkan från injektering, grundvattenavsäkning. Beskrivning av ekosystem m m. Kartläggning av naturresurser m m.	
	Naturresurser		Undvik värdefulla naturresurser		
Anläggningsfrågor	Vatteninläckning och injekteringsbehov		Måttlig vatteninläckning eller att områden med för stor inläckning kan tätas med rimliga injekteringsinsatser(injekteringsbehov) eftersom detta påverkar kostnader och byggtider. Se ovan	Beräknade flöden för given (eller alternativa) förvarsutformning (Grundvattenmodell enligt ovan). Utformning styrs så att grundvattenflöde i deponeringsområdet blir lågt genom att regionala och lokala större sprickzoner undviks. Se ovan	
	Se ovan	Injekteringsbehoven får inte vara så omfattande att det finns risk för allvarlig miljöpåverkan eller negativ inverkan på grundvattnets sammansättning i djupförvaret.			
	Se ovan		Ur arbetarskyddssynpunkt måste sannolikheten för kraftig vatteninläckning/ras vara liten, men problem kan dock alltid hanteras med ökade kostnader som följd	Se ovan	

Tabell A-5. Kemiska förhållanden som påverkar djupförvarets funktion

Berörd funktion	Kemiska förhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referens
Inverkan på kapselns integritet	Redoxförhållanden och närvaro av ämnen som påverkar kapselkorrosion	Inget löst syre får finnas i grundvattnet. (Indikeras av Eh < 0, Fe ²⁺ eller HS ⁻ i vattnet).	Önskvärt med låga halter av ämnen som påverkar kopparkorrosionen som sulfid, ammonium, nitrit, nitrat och total salthalt	<ul style="list-style-type: none"> • Geokemisk modell (vattenprover, mineralogi, regional gv-strömning). • Bedömning risk för transport av vatten med olämplig sammansättning (se transport och hydrogeologi) • (Modeller för kapselkorrosion antas vara utvecklade utanför platsutvärderingen) • Bedömning av biologisk aktivitet (omvandling av sulfat till sulfid). Parametrar: Eh, Fe ²⁺ , HS ⁻ , Cl ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , (pH, SO ₄ ²⁻ , DOC, lösta gaser (dvs H ₂ och CH ₄ , HPO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , bakterier)	Kopparkorrosion diskuteras i SKB TR 92-26, Werme m fl, 1992, Wersin m fl, 1994, SR 97 Basscenariot, Saario m fl, 1999. Ahonen, 1999.
Inverkan på buffertens isolerande och fördröjande funktion	Närvaro av ämnen som påverkar bentonitstabiliteten, olika joner samt total salthalt.	Buffertens svälltryck bevaras ([TDS]<100 g/l).	Visa att lergelen inte eroderar och bildar kolloider. [Ca ²⁺]+[Mg ²⁺]>4 mg/l	Funktionsanalyser, se ovanstående. Parametrar: Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , TDS, (pH, Al ³⁺ , SiO ₃ ²⁻).	För [TDS] se Karnland (1997) och SR 97 Huvrapporten avsnitt 8.9.3. För Ca ²⁺ och Mg ²⁺ se dessutom Laaksoharju m fl, 1995.
Inverkan på nuklidernas frigörelse till grundvattnet	Grundvattnets sammansättning påverkar bränsleomvandling Grundvattnets sammansättning påverkar nuklidernas löslighet		Modellen för bränsleupplösning förutsätter reducerande förhållanden Önskemål på sammansättningen sätts utifrån att lösligheterna inte ska vara avsevärt högre än vad som använts i säkerhetsanalysen SR 97.	Se SR 97 Kapseldefekts scenariot Löslighetsberäkningar med "jämviktscoder". Termodynamiska data, grundvattnets sammansättning	SR 97 Kapseldefekts scenariot Bruno m fl, 1997. SR 97

Forts tabell A-5

Berörd funktion	Kemiska förhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referens
Inverkan på fördröjningen i geosfären	Kolloider, bakterier, lösta gaser, redoxförhållanden, pH, komplexbildare, mineralogi		God sorptionsförmåga, liten komplexbildning och försumbar kolloidtransport. Inte avsevärt sämre förhållanden än de som använts i SR 97.	Sorptionsvärden bestäms av grundvattenkemin. Parametrar: främst pH, Eh, TDS m fl.	Carbol och Engqvist, 1997. SR 97.
Biosfärsfrågor	Ytnära grundvattenkemi			För att beskriva de ytnära ekosystemen behövs kunskap om det ytnära grundvattnets sammansättning. Kunskapen är också viktig för att kunna påvisa om senare upptäckta förändringar orsakas av förvaret eller är en följd av den "naturliga" utvecklingen.	
Anläggningsfrågor	Arbetsmiljö Miljöpåverkan från bygget	Det är ett krav på begränsad miljö-påverkan från under-sökningar och från anläggningsbygget.	Ämnen som är farliga ur arbetarskyddssynpunkt (t ex radon) måste hållas till halter som understiger gränsvärden. (Detta kan dock i regel alltid åstadkommas med lämpliga åtgärder som t ex god ventilation). Det är önskvärt att små eller inga projekterings- eller utformningsåtgärder behövs för att säkerställa en kemiskt god arbetsmiljö.	Om önskemål ej kan uppfyllas behövs funktionsanalyser enligt ovan. Krav och önskemål kan dock så gott som alltid uppfyllas med lämplig utformning och placering av förvaret.	

Tabell A-6. Transportförhållanden som påverkar djupförvarets funktion

Berörd funktion	Transportförhållanden som påverkar funktion	Krav	Önskemål	Funktionsanalys och berörda parametrar	Referenser
Inverkan på kapselns och buffertens integritet	Tillförsel av syre och andra korrodanter. Tillförsel av ämnen som kan påverka buffert	Ingen kontinuerlig tillförsel av vatten med löst syre. Begränsad tillförsel under kort tid acceptabel.	Begränsad tillförsel av korrodanter	<p>Analys av masstransport och korrosionsförlopp. (Se även hydrologi och kemi)</p> <p>Modell av lokal grundvattenströmning (se hydrologi, kemi och sprickapertur i deponeringshål.)</p> <p>Analys av retentionsegenskaper för strömvägar från områden med olämplig vattenkemi (strömvägar, gv-flöde, flödesvätt yta, bergmatrisegenskaper). Se även hydrologi och kemi</p>	SR 97 Guimera m fl, 1999, SR 97 glaciationsscenario
Inverkan på geosfärens fördröjande förmåga	Fördröjning i övergång bentonit/berg och tunnel/berg		Önskemål om fördröjning i övergången buffert/berg.	Analys av närområdestransport i berg (grundvattenomsättning och lokal sprickgeometri)	Se speciellt bergbeskrivningen i närzonstransport modellen COMP23. (Moreno och Gylling, 1998)
	Retentionsförmåga för fjärrberg		Stort transportmotstånd i geosfären ($F > 10^4$ år/m).	Transportmotståndet ("F-parametern") som beror på grundvattenflöde, flödesvägar och vätt yta. Sorptionsdata, matrisdiffusivitet och matrisporositet.	Vätta ytan: Andersson m fl, 1998b SR 97, 1999 kapseldefektscenariot Se även hydrologi. och Carbol och Engqvist, 1997

Parametertabeller

Tabell B-1. Lämplighetsindikatorer för geologi	138
Tabell B-2. Lämplighetsindikatorer för bergmekanik	140
Tabell B-3. Lämplighetsindikatorer för termiska egenskaper	142
Tabell B-4. Lämplighetsindikatorer för hydrogeologi	143
Tabell B-5. Lämplighetsindikatorer för kemi (grundvattnets sammansättning)	146
Tabell B-6. Lämplighetsindikatorer för bergets transportegenskaper	148

Tabell B-1. Lämplighetsindikatorer för geologi

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighetsindikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Regional topografisk gradient	Fördröjning, berg		Viktigt grundinformation	FUD-Program 95 (SKB, 1995a): Inom intervallet 0,1–1 % i regional skala	Nej, inte direkt	–
Jordarter	Finns inte, parametern påverkar predikterbarhet		Önskemål om liten mäktighet och stor andel berg i dagen	Varierar	Nej, inga specifika krav eller önskemål	FS: – PLU: Ej relevant efter platsundersökning
Bergarter	Fördröjning, berg Isolering, intrång, arbetarskydd	Att bergarterna inom deponeringsområdet inte är malmpotentiella eller utgör så värdefulla mineral att det skulle kunna motivera brytning på hundratals meters djup.	Önskemål om att värdefull nyttosten eller industrimineral ej förekommer. Önskemål om vanlig bergart (Indirekta krav/önskemål från bergmekanik och hydrogeologi). Undvik bergarter som avger mycket radon	Varierar i Sverige	Ja	FS: Undvik kända malmpotentiella områden och heterogen eller ovanlig berggrund PLU: Lokal anpassning av förvaret med hänsyn till indikatorn. Om omfattande förekomst av malmförande mineral påträffas bör platsen överges
Plastiska skjuvzoner	Isolering kapsel, bentonit och berg Fördröjning, berg	Regionala plastiska skjuvzoner undviks, om det inte kan visas att zonens egenskaper inte avviker från berget i övrigt. I närheten av regionala plastiska skjuvzoner kan det dock finnas så k tekniska linser som kan vara lämpliga för ett djupförvar.		– Se regionala översiktsstudier	Ja, om tillräcklig förvarsvolym inte kan erhållas är platsen olämplig	FS: Undvik kända regionala plastiska skjuvzoner. Om tillräcklig förvarsvolym ej kan erhållas måste annat område väljas. PLU: Revidera utformning efter ny kunskap. Om förvaret ej kan inplaceras på ett rimligt sätt (skulle behöva delas upp i ett mycket stort antal delar) måste annan plats väljas.

Forts tabell B-1

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighetsindikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Sprickzoner	Isolering kapsel, bentonit och berg Fördröjning, berg	Deponeringstunnlar och deponeringshål får inte passera eller vara i närheten av regionala och lokala större sprickzoner. Ansatta respektavstånd kommer att användas i samband med den stegvisa platsundersökningen och projekteringen. Men de verkliga avstånd som behövs fastställs genom en platsspecifik funktionsanalys.	Deponeringshål bör inte korsa lokala mindre sprickzoner. Måttliga frekvenser (sprickyta per volym) av sprickor och av lokala mindre sprickzoner.	Se regionala översiktsstudier.	Ja, om tillräcklig förvarsvolym inte kan erhållas är platsen olämplig	<p>FS: Välj område för fortsatta studier så att ett djupförvar med god marginal kan inplaceras med hänsyn till de sprickzoner som identifierats vid förstudien. Om förvaret trots anpassning ej kan inplaceras på ett rimligt sätt måste annat område väljas.</p> <p>PLU: Lämpliga respektavstånd till identifierade regionala och lokala större sprickzoner kan bara bestämmas platsspecifikt men antas utgöra åtminstone flera tiotals meter till lokala större zoner och minst 100 meter till regionala zoner. Om förvaret ej kan inplaceras på ett rimligt sätt (skulle behöva delas upp i ett mycket stort antal delar) i förhållande till plastiska skjuvzoner, regionala sprickzoner eller lokala större sprickzoner är platsen inte lämplig för ett djupförvar.</p>

Tabell B-2. Lämplighetsindikatorer för bergmekanik

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighetsindikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Initiala bergspänningar	Projektering layout Projektering bygganalys Isolering, berg Fördröjning, berg Projektering arbetsmiljö	Omfattande smällberg eller annat omfattande bergutfall får inte förekomma inom en stor del av deponeeringsområdet. Funktionen kontrolleras med en platsspecifik analys.	Normala (väsentligt lägre än 70 MPa) på valt förläggningsdjup.	Vertikalspänningen beror lineärt med djupet (14 MPa på nivå 500 m). Största horisontalspänningen på detta djup är normalt större och ligger i intervallet 10–70 MPa.	Ja	FS: Inga kriterier. PLU: Beräknad spänningssituation i berget närmast tunnlar och den resulterande bergstabiliteten under och efter byggfasen används främst för att anpassa förläggningsdjupet och utformningen. Om förvaret inte rimligen kan utformas på ett sådant sätt att omfattande och allmänna stabilitetsproblem kan undvikas är platsen olämplig och bör överges. Omfattande problem med "core discing" bör direkt leda till misstankar om att det kan uppstå problem med smällberg under tunnelbygget.
Intakt berg (E, v, tryckhållfasthet m m)	Isolering, kapsel och berg projektering	Omfattande smällberg eller annat omfattande bergutfall får inte förekomma inom en stor del av deponeeringsområdet.	Det är önskvärt med för svensk berggrund normala hållfasthets- och deformationsegenskaper hos det intakta berget.	E: 5–100 GPa v: 0,15–0,3 Tryckhållfasthet 50–250 MPa Draghållfasthet 2–10 MPa (Stille och Nord, 1990)	Ja (tryckhållfasthet) fast parametern kan inte användas isolerat utan ingår i en mekanisk analys (se kriterier).	FS: Bedömning utifrån en preliminär bergartsprognos ska inte indikera ogynnsamma förhållanden. PLU: Speciell uppmärksamhet om bergarternas hållfasthet starkt avviker från de normala i svensk berggrund. Se för övrigt initiala bergspänningar.
Sprickor och sprickzoner	Isolering/kapsel Fördröjning berg Projektering	För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi	För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi. Tunnelutformning/placering väljs utifrån spänningar och sprickriktningar. Lämpligt med stor friktionsvinkel.	Stille och Nord (1990)	Ja (geometri)	FS: För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi. PLU: För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi Bergmekanisk analys av funktion.

Forts tabell B-2

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighets-indikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Bergmassan hållfasthet	Projektering layout Projektering bygganalys		Egenskaper som minst motsvarar normala förhållanden för svensk berggrund.	Normalt god byggbarhet	Ja	FS: Inga kriterier. PLU: Den prognos av bergmassans egenskaper som görs i samband med platsundersökningen utnyttjas för försvarsutformning och för byggbarhetsprognosen. Byggbarhetsprognosen ingår i det totala jämförelsematerialet mellan platser men har ingen direkt säkerhetsrelaterad betydelse. God byggbarhet är givetvis fördelaktigt.
Temperaturutvidgningskoefficienten α	Isolering, berg Fördröjning, berg		Normala värden för svensk berggrund. Ej för inhomogent.	$3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ $< \alpha < 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	Inte primärt, men behöver bestämmas	FS: Inga kriterier. PLU: Bedömning av inhomogeniteter – om mycket inhomogent behövs i första hand utökad analys av konsekvenser. Val av deponeringshål görs först vid försvarsutbyggnad.
Kommande laster (seismicitet, glaciation...)	Isolering, berg Fördröjning, berg			Se SR 97	Nej	Kommande laster analyseras inom ramen för scenarioanalysen i en säkerhetsanalys. Ingen grund för platsspecifika skillnader.

Tabell B-3. Lämplighetsindikatorer för termiska egenskaper

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighetsindikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Bergmassans värmeledningsförmåga λ och bergmassans värmekapacitet c	Isolering, berg Fördröjning, berg		God värmeledningsförmåga (påverkar förvarsutformning, förvarsstorlek). $\lambda > 2,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Basiska bergarter: $1,7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} < \lambda < 3,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Bergarter med intermediär sammansättning: $2,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} < \lambda < 4,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Granitoida bergarter: $2,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} < \lambda < 5,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. SGU: Sundberg, 1995 och Sundberg, 1988	Ja	FS: Om det görs en bedömning (från bergarter) att värmeledningsförmågan understiger den önskade, påverkas storleken på det område som måste studeras. PLU: Detaljerad kunskap om bergarter och värmeledningsförmåga används för att anpassa förvarsutformning. Värmeledningsförmågan behöver dock främst bara beaktas om det finns risk att den understiger önskemålet ($2,5 \text{ Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$).
Omgivande temperatur (initial, yttemperatur, geotermisk gradient)	Isolering, berg Fördröjning, berg	Områden med potential för geotermisk energiutvidgning (mycket hög geotermisk gradient) bör undvikas.	Temperatur på förvarsdjup $< 25^\circ\text{C}$	På 500 m djup: Initialvillkor: $7^\circ\text{C} < T_{500} < 18^\circ\text{C}$ Termiska gradienten: $10\text{--}15 \text{ Kkm}^{-1}$ Sundberg, 1995	Ja	FS: Undvik områden med bedömd stor potential för geotermisk energiutvidgning. Om den initiala temperaturen bedöms överstiga den maximalt önskade måste den beaktas i vid val av hur stort område som behöver undersökas. PLU: Som FS. Vid förvarsutformningen måste man ta hänsyn till den initiala temperaturen om den ligger över eller nära den maximalt önskade.

Tabell B-4. Lämplighetsindikatorer för hydrogeologi

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighets-indikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Vattengenomsläpplighet för sprickzoner och sprickor	Isolering, bentonit Fördröjning, bentonit Isolering, berg Fördröjning, berg	För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi	Det är en fördel om en stor del av bergmassan i deponeringsområdet har $K < 10^{-8}$ m/s (i deponeringshålskalan). Samlad funktionsanalys behövs. Zoner som behöver passeras under bygge bör ha så låg vattengenomsläpplighet att passage kan ske utan stora problem. (Zoner med $T < 10^{-5}$ m ² /s eller zoner som inte är byggnadstekniskt besvärliga).	Transmissivitet för sprickzoner: $1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s – $2 \cdot 10^{-10}$ m/s. Hydraulisk konduktivitet för bergmassan (i skalan 30 m) 10^{-6} m/s och 10^{-12} m/s Walker m fl, 1997.	Nej, inte när det gäller regionala och lokala sprickzoner (ska ändå undvikas). Ja, när det gäller den del av berget som innehåller lokala mindre sprickzoner och diskreta sprickor.	FS: Inga kriterier. För anpassning till sprickzoners och sprickors geometri – se geologi PLU: Stor del av tolkade K i bergmassan på förvaringsnivå bör ha $K < 10^{-8}$ m/s. (Annars behov av lokal detaljanpassning om säkerhetsmarginalen ska bibehållas.) Sprickzoner som behöver passeras vid bygge bör ha en tolkad transmissivitet $T < 10^{-5}$ m ² /s och sakna lerfyllnad. (Annars ökande uppmärksamhet på injektering och övrig bygganalys.)
Flödesporositet och magasincoeffcient			Nej, eftersom parametrarna inte påverkar fördröjning av sorberande ämnen eller långlivade icke sorberande ämnen (se transport).		Nej, har liten betydelse för funktion	
Flödesporositet ϵ_f	Isolering, berg Fördröjning, berg			$10^{-3} < \epsilon_f < 10^{-2}$ Rhén (ed), 1992, Winberg (ed), 1996, samt Rhén (ed), 1997	Nej	
Magasinkoefficient S_s	Förståelse			$10^{-7} \text{ m}^{-1} < S_s < 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ Rhén (ed), 1992, Winberg (ed), 1996, samt Rhén (ed), 1997	Nej	

Forts tabell B-4

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighets-indikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Grundvattnets egenskaper			Bör kännas till och beaktas vid grundvattenmodellering			
Densitet ρ	Isolering, berg Fördröjning, berg			ρ bestäms av rådande temperatur och salinitet TDS samt av grundläggande egenskaper för vatten. Rhen (ed), 1997, Probert och Claeson, 1997.	Nej, dock är parametern mycket viktig att känna till	
Viskositet ν	Isolering, berg Fördröjning, berg			ν bestäms av rådande temperatur och salinitet TDS samt av grundläggande egenskaper för vatten. Rhen (ed), 1997, Probert och Claeson, 1997.	Nej	
Ytnära ekosystem	Biosfär	Inga geovetenskapliga krav. I lag skyddade områden undviks. Förvarets isolerande och fördröjande funktion skall under alla förhållanden vara så bra att fullgod säkerhet kan nå oavsett vilka markförhållanden som råder.	Undvik områden för djupförvarets ovanjordsanläggningar där biologisk mångfald och skyddsvärda arter kan hotas och områden som är eller kan bli betydande vattentäkt, jordtäkt eller odlingsmark. Data över de marknära ekosystemen är i första hand värdefulla för att kunna bygga upp en trovärdig modellbeskrivning. God tillgång på sådana data av hög kvalitet ökar med andra ord trovärdigheten hos gjord modellering.	Ej applicerbart	Ja	FS: I lag skyddade områden ska undvikas. Det är ett önskemål att intressanta områden för platsundersökningar har få konkurrerande intressen och att ovanjordsdelen kan preliminärt anpassas så att liten påverkan sker på det ytnära ekosystemet. PLU: Kriterier som ovan.

Forts tabell B-4

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighets-indikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Randvillkor och stödjande data					Data behövs i första hand för att bygga upp trovärdiga system-beskrivningar	
Hydraulisk gradient (och tryck)	Isolering kapsel Fördröjning, berg		Lokala gradienten <1 % på försvarsnivå (ingen fördel med ännu lägre). Beakta salinitet	0,05 % till 0,6 % för platserna som analyserades i SR 97	Data är inte i första hand användbara som lämplighets-indikatorer utan behövs för att bygga upp trovärdiga grundvattenmodeller. Se gradient	FS: Områden med olämpligt hög gradient tas bort PLU: Gradient kan användas vid bestämning av randvillkor i modellering.
In/utströmning	Fördröjning, berg		Fördel om långt avstånd till utströmningsområde (fördröjning bestäms dock främst av bergets egenskaper)			FS: – PLU: Bedömning av läget ingår i säkerhetsanalys
Strandförskjutning	Fördröjning, berg		Inga önskemål, men måste beaktas vid modellering		Se gradient	

Tabell B-5. Lämplighetsindikatorer för kemi (grundvattnets sammansättning)

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighetsindikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Förekomst av löst syre	Isolering, kapsel Fördröjning, bränsle Fördröjning, bentonit Fördröjning, berg	Frånvaro av löst syre på förvarsnivå (indikeras t ex av negativa Eh, förekomst av Fe(II), eller förekomst av sulfid)		På förvarsdjup är Eh-värden negativa, [Fe ²⁺] 5 µg/l – 10 mg/l sulfidhalt: 0,01 – 5 mg/l. (Laaksoharju m fl, 1993, 1998)	Ja	FS: Inga kriterier (inga data finns) men ingen anledning finns att tro att kravet ej kan uppfyllas. PLU: Minst någon av indikatorerna Eh, Fe ²⁺ , HS-måste vara uppfylld.
pH	Isolering, kapsel Isolering, bentonit Fördröjning, bränsle Fördröjning, bentonit Fördröjning, berg		Ostört grundvatten på förvarsnivå bör ha ett pH i intervallet 6<pH<10.	Under djup på 100 m är i regel 6<pH<10 men avvikelser (t ex Stripa) förekommer. (Laaksoharju m fl, 1993, 1998) Över 100 m är det förväntade intervallet större.	Ja	FS: Inga kriterier (ingen koppling till ytvatten). PLU: Under nivån –100 m bör kvalitetsgodkända värden ligga i intervallet 6<pH<10 (annars speciell analys).
TDS (Total Dissolved Solids)	Isolering, kapsel Isolering, bentonit Fördröjning, bentonit Recipient	TDS<100 g/l		Ner mot 1 000 m djup 0–35 g/l. Upp mot 100 g/l har uppmätts på 1 700 m djup (Laxemar). Djupet till höga TDS i regel större i inlands lägen. (Laaksoharju m fl, 1993, 1998)	Ja	FS: Inga kriterier PLU: Kvalitetsgodkända uppmätta TDS på förvarsnivå måste uppfylla krav. Enstaka högre värden kan accepteras om det kan visas att vattnet ligger i områden som kan undvikas.
DOC (Dissolved Organic Carbons)	Isolering, kapsel Isolering, bentonit Fördröjning, bränsle Fördröjning, bentonit Fördröjning, berg			I regel är [DOC]<10 mg/l på förvarsdjup. Högre värden kan tillfälligt förekomma under byggtiden	Nej	FS: Inga kriterier PLU: Uppmärksamhet om mycket höga halter mäts upp.

Forts tabell B-5

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighetsindikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
NH ₄ (ammonium)	Isolering kapsel		Låga halter		Nej	FS: Inga kriterier PLU: Uppmärksamhet om mycket höga halter mäts upp.
Ca och Mg	Isolering, bentonit Fördröjning, bentonit Fördröjning, berg		[Ca ²⁺]+[Mg ²⁺]>4 mg/l på försvarsdjup för att säkerställa att bentoniten gelar stabilt och inte skapar kolloider (Laaksoharju m fl, 1995). Ingen fördel med högre värden.	[Ca] i intervallet 21–1 890 mg/l och [Mg] i intervallet 1–110 mg/l (Laaksoharju m fl, 1993, 1998). (Dvs önskemålet alltid uppfyllt)	Ja	FS: Inga kriterier PLU: Om uppmätta halter avviker från önskemål behövs speciell utredning.
Kolloider	Fördröjning, berg		Låga halter <0,5 mg/l	Medianhalten av kolloider i grundvattnet är mindre än 0,05 mg/l (Laaksoharju m fl, 1995).	Tveksamt (önskemålet har liten tyngd).	FS: Inga kriterier PLU: Uppmärksamhet om mycket höga halter (se önskemål) mäts upp.
Fri gas	Isolering, kapsel Fördröjning, berg		Ej fri gasform på försvarsdjup	Finns i regel inte	Nej	FS: Nej PLU: Uppmärksamhet om mycket höga halter mäts upp.
Ra, Rn	Arbetsmiljö		Låga halter		Nej, höga halter kan hanteras med ventilation m m.	
Övriga komponenter	Förståelse					

Tabell B-6. Lämplighetsindikatorer för bergets transportegenskaper

Geovetenskaplig parameter	Referens till funktion i funktionstabell	Krav på parameter	Önskemål på parameter	Värdeområde i svensk kristallin berggrund	Tänkbar lämplighetsindikator	Kriterier efter förstudie (FS) och efter platsundersökning (PLU)
Grundvattenomsättningen (Darcyhastigheten) i kapselskala och den totala sprickaperturen	Isolering, bentonit Fördröjning, bentonit	Flödet och aperturerna inte är så stora att bentoniten skadas. (Kan knappast förekomma och kan alltid undvikas).	Låg vattenomsättning och små aperturer (Darcyhastighet i deponeringshålskala lägre än 0,01 m/år). Slutlig bedömning i säkerhetsanalys.	Darcyhastiget inom 10^{-5} m/år – 10^{-1} m/år.	Ja	FS: – PLU: Fördel om den skattade darcyhastigheten (i skala 10 m) är lägre än 0,01 m/år för ett stort antal positioner (i statistisk mening) i berget. Vare sig säkerheten eller ens fördröjningen i berget behöver dock vara hotat om kriteriet inte uppfylls. Slutgiltig bedömning görs inom ramen för en säkerhetsanalys.
Transportmotstånd F F = $a_r \cdot L / q$ där a_r = flödesvätt area per volym berg L = strömrörs längd q = darcyhastigheten	Fördröjning, berg		Fördel om väsentlig fördröjning. Detta uppnås i strömningsvägar där $F > 10^4$ år/m	$< 8 \cdot 10^2$ år/m $< F < 2 \cdot 10^6$ år/m Andersson, 1999	Ja	FS: – PLU: Fördel om stor andel av skattade statistiska fördelningen av flödesvägar har ett transportmotstånd $F > 10^4$ år/m. Eventuellt kan dock olämpliga flödesvägarna senare undvikas genom lämplig förvarsutformning och val av kapselpositioner. Slutgiltig bedömning görs inom ramen för en säkerhetsanalys.
Bergmassan sorptionskoefficient K_d , matrisdiffusivitet D_e och matrisporositet ϵ_r	Fördröjning, berg		Det är lämpligt att matrisdiffusivitet och matrisporositet inte är mycket lägre än de värdeområden som analyserats inom SR 97 (se Ohlsson och Neretnieks, 1997). Det tillgängliga penetrationsdjupet bör åtminstone överstiga någon centimeter.	Bergmassans sorptionskoefficient K_d och matrisdiffusivitet är ämnes specifika och beror på grundvattenkemi (se Carbol och Engkvist, 1997 för K_d och Ohlsson och Neretnieks, 1997 för diffusiviteter och porositeter).	Ja	FS: – PLU: Uppmätta värden bör inte väsentligt (faktor 100) understiga de värden som normalt gäller i den svenska kristallina berggrunden. Annars krävs speciell uppmärksamhet vid den kommande säkerhetsanalysen.