

R-08-67

**Geovetenskapligt
undersökningsprogram
för utbyggnad av SFR**

Svensk Kärnbränslehantering AB

Juni 2008

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 250, SE-101 24 Stockholm
Tel +46 8 459 84 00



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-08-67

Geovetenskapligt undersökningsprogram för utbyggnad av SFR

Svensk Kärnbränslehantering AB

Juni 2008

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarens egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB:s.

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

Innehåll

1	Inledning	5
1.1	Denna rapport	5
1.2	SKB:s system för omhändertagande av kärnavfall	6
1.3	Slutförvar för radioaktivt driftavfall, SFR	7
1.4	Utbyggnad av SFR	8
1.5	Projekt SFR-utbyggnad	8
	1.5.1 Delprojekt undersökningar	9
	1.5.2 Översiktlig tidsplan	10
2	Förutsättningar	11
2.1	Kunskapsläge	11
2.2	Kravbild	12
	2.2.1 Myndighetskrav	12
	2.2.2 Projektspecifika krav	13
2.3	Platsen	13
2.4	Befintlig anläggning	14
2.5	Utbyggd anläggning	16
2.6	Kvalitetssäkring	16
2.7	Avgränsningar	17
3	Undersökningsstrategi	19
3.1	Mål	19
3.2	Prioriterat undersökningsområde	20
3.3	Alternativa områden	21
3.4	Nyckelfrågor för det prioriterade området	22
3.5	Detaljerad undersökningsstrategi för det prioriterade området	24
	3.5.1 Stegvisa undersökningar	24
	3.5.2 Tidsaspekter för undersökningar och modellering	25
3.6	Undersökningarnas påverkan på befintlig anläggning	25
4	Borrprogram	27
4.1	Inledning	27
4.2	Hammarborrning	28
4.3	Kärnborrning från markytan	30
4.4	Kärnborrning under jord	32
4.5	Kärnborrning till havs	33
5	Geologi	35
5.1	Inledning	35
5.2	Centrala frågeställningar	41
5.3	Undersökningsprogram	42
	5.3.1 Geologiska undersökningsmetoder	42
	5.3.2 Borrhålskartering	43
	5.3.3 Geologisk enhålstolkning	43
	5.3.4 Geofysiska undersökningar	43
	5.3.5 Övriga undersökningar	46
6	Bergmekanik	47
6.1	Inledning	47
6.2	Centrala frågeställningar	47
6.3	Undersökningsprogram	47

7	Hydrogeologi	49
7.1	Inledning	49
7.2	Centrala frågeställningar	50
7.3	Undersökningsprogram	51
7.3.1	Hydrogeologiska undersökningsmetoder	51
7.3.2	Metoder i samband med borrhning	53
7.3.3	Flödesloggning	53
7.3.4	Hydrauliska injektionstester	53
7.3.5	Hydrauliska interferenstester	53
7.3.6	Hydrogeologisk monitorering	54
8	Hydrogeokemiska undersökningar	55
8.1	Inledning	55
8.2	Centrala frågeställningar	56
8.3	Undersökningsprogram	56
8.3.1	Hydrogeokemiska undersökningsmetoder	58
9	Modellering	65
9.1	Bakgrund	65
9.2	Modellversion 0	65
9.2.1	Litologi och strukturgeologi	67
9.2.2	Bergmekanik	69
9.2.3	Hydrogeologi	71
9.2.4	Hydrogeokemi	73
9.3	Modellering efter version 0	76
9.3.1	Geologi	78
9.3.2	Bergmekanik	78
9.3.3	Hydrogeologi	78
9.3.4	Hydrogeokemi	79
10	Undersökningarnas miljöpåverkan och kontrollprogram	83
10.1	Miljöpåverkan	84
10.2	Kontrollprogram	84
	Referenser	87

1 Inledning

1.1 Denna rapport

Denna rapport beskriver det geovetenskapliga undersökningsprogram som ingår i planeringen för utbyggnad av SKB:s anläggning för slutförvaring av låg- och medelaktivt radioaktivt avfall – SFR (Slutförvar för Radioaktivt avfall). Anläggningen är belägen under havsytan nära Forsmarks kärnkraftverk inom Östhammars kommun i Uppsala län, se figur 1-1.

Rapporten beskriver inledningsvis SKB:s system för omhändertagande av radioaktivt avfall samt bakgrunden till beslutet att bygga ut den befintliga SFR-anläggningen (kapitel 1). Efter en redogörelse (i kapitel 2) för bl a de platsspecifika förutsättningarna för undersökningar och utbyggnad, samt de krav som ställs på den nya anläggningen från myndigheter och projektets beställare, följer en redogörelse för motiven bakom valet av det område som prioriterats för undersökningar och utbyggnad. Det redogörs även för strategiska överväganden och hänsyn vid utformningen av det geovetenskapliga undersökningsprogrammet (kapitel 3).

Den planerade datainsamlingen i fält beskrivs därefter med kapitelvis indelning efter de geovetenskapliga discipliner som involveras (kapitel 4–8). Primärdata och bearbetade undersökningsdata kommer att ligga till grund för ämnesvisa modeller (geologi, bergmekanik, hydrogeologi samt hydrogeokemi). Dessa kommer integrerat att utgöra det viktigaste underlaget för den beskrivning av platsen som ligger till grund för projektering av anläggningen samt för analys av dess långsiktiga säkerhet. Platsbeskrivningen ingår också som en väsentlig del i det underlag som krävs för ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken för den planerade utbyggnaden av SFR. Modelleringsprocessen beskrivs i ett eget kapitel (kapitel 9).



*Figur 1-1. SFR-anläggningens placering under havet i närheten av Forsmarks kärnkraftverk.
Foto: L Modin.*

Undersökningsprogrammet har föregåtts av en förstudie, där det omfattande dataunderlaget från tidigare undersökningar i området, dels i samband med förundersökningar och bygge av Forsmarks kärnkraftverk och den befintliga SFR-anläggningen, dels vid SKB:s nyligen avslutade platsundersökning avseende slutförvaring av använt kärnbränsle (i fortsättningen förkortat PLU) gått igenom och till vissa delar systematiserats. Förstudiearbetet beskrivs kortfattat i rapporten. Utifrån denna datagenomgång har en platsbeskrivande modell version 0 för geologi, bergmekanik, hydrogeologi och hydrogeokemi utarbetats. Denna modellversion beskrivs i kapitel 9 och tjänar som utgångspunkt för det fortsatta modelleringsarbetet.

Vissa undersökningar kommer att utföras även av de ytekologiska förhållandena på platsen. Hit hör exempelvis provtagning av havssediment i anslutning till den bergvolym som kommer att undersökas. Undersökningsprogrammet tar inte ställning till vilka eventuella undersökningar som skall genomföras. En utvärdering av arbetet med den förnyade säkerhetsredovisningen för SFR, SAR-08, som lämnades in för myndighetsprövning den sista april 2008, kommer att genomföras. Utvärderingen avser att identifiera eventuella tillkommande databehov. Utifrån dessa behov, samt eventuella behov identifierade av granskande myndighet kommer en plan för kompletterande undersökningar att tas fram.

SKB har i samband med platsundersökningarna för slutförvar av använt kärnbränsle (PLU) redovisat en serie undersökningsprogram /SKB 2001ab, SKB 2005b, SKB 2007b/. Dessa har tjänat som inspirationskälla även för föreliggande program vad avser undersökningsstrategi och -metodik. Erfarenhetsåterföring från den nu genomförda platsundersökningen i Forsmark utgör likaledes viktigt underlag för denna rapport, liksom lärdomar från undersökningarna i samband med byggandet av SFR på 1980-talet. Slutligen har drifterfarenheter från SFR-anläggningen varit ett viktigt stöd för utformningen av undersökningsprogrammet i allmänhet och i synnerhet för de delar som kommer att bedrivas under jord, från den befintliga anläggningen.

Rapporten, som även redovisar ett kontrollprogram för uppföljning av undersökningarnas påverkan på naturmiljön (kapitel 10), utgör förutom att vara det viktigaste styrande dokumentet vid undersökningsprogrammets genomförande, också det underlag som kommer att användas för de samråd om undersökningarnas genomförande som framgent kommer att hållas med kommun, länsstyrelse, övriga myndigheter och allmänhet.

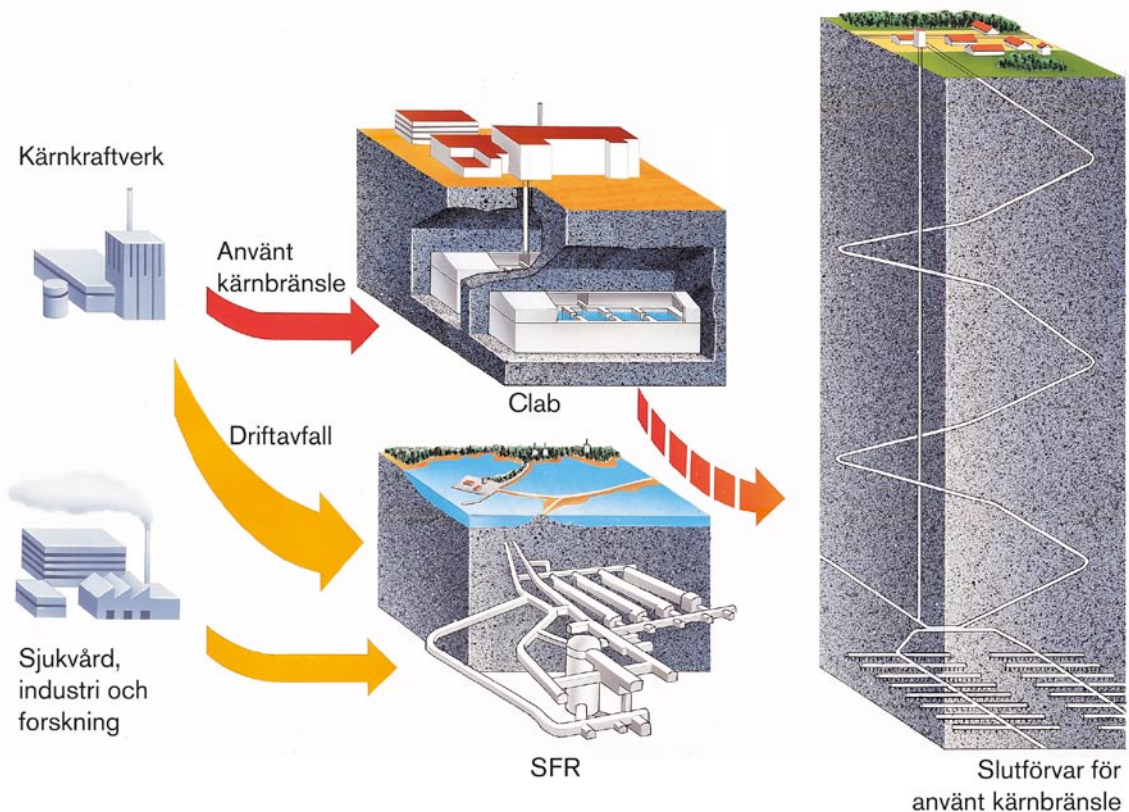
1.2 SKB:s system för omhändertagande av kärnavfall

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) ansvarar för att på ett långsiktigt säkert sätt ta hand om det kärnavfall som produceras i Sverige. Detta omfattar driftavfall och använt kärnbränsle från de svenska kärnkraftverken men även radioaktivt avfall från industri, sjukvård och forskning samt framöver även rivningsavfall från kärnkraftverken.

SKB:s system för omhändertagande av kärnavfall illustreras översiktligt i figur 1-2. Det använda kärnbränslet mellanlagras idag i ett centralt mellanlager i Oskarshamn, benämnt Clab, i väntan på att ett slutförvar för använt kärnbränsle ska färdigställas. Platsundersökningar för detta slutförvar har utförts i Forsmark och Oskarshamn och valet av plats beräknas ske i mitten av 2009, varefter SKB avser att ansöka om att få bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle på den plats som valts.

Driftavfall från kärnkraftverken och Clab samt radioaktivt avfall från industri, sjukvård och forskning slutförvaras i SFR-anläggningen. Där kommer även radioaktivt rivningsavfall från de svenska kärnkraftverken att slutförvaras.

Transporter av radioaktivt avfall från avfallsproducenterna till de nämnda anläggningarna sker med fartyget m/s Sigyn.



Figur 1-2. SKB:s system för omhändertagande av kärnavfall.

1.3 Slutförvar för radioaktivt driftavfall, SFR

SKB erhöi i juni 1983 regeringens tillstånd att anlägga och driva en anläggning för slutlig förvaring av låg- och medelaktivt driftavfall /Bostadsdepartementet 1983/. Ansökan om tillstånd omfattade förvaringsutrymmen på totalt 90 000 m³. Denna första utbyggnadsfas benämns SFR 1. I den preliminära säkerhetsrapporten som utgjorde underlag till ansökan redovisades även tänkbara framtida utbyggnader med förvaringsutrymmen för hårdkomponenter, SFR 2, och rivningsavfall i SFR 3. SFR 2 har idag utgått och täcks in av andra förvarsdelar. De tidigare benämningarna SFR 1 och SFR 3 för drift- respektive rivningsavfall har slopats, och anläggningen i sin helhet benämns numera SFR.

Den anläggning som tidigare benämndes SFR 1 planerades ursprungligen att byggas i två etapper. Detta var främst orsakat av osäkerheter i prognosunderlaget rörande avfallsmängder. Den första etappen planerades för den mängd avfall som prognostiserades bli deponerad fram till år 2000 och är dimensionerad för 63 000 m³ avfall, en volym som antogs ge marginal och flexibilitet för den första driftperioden. Hittills (t.o.m. april 2007) har endast ca hälften, 31 184 m³, av förvarets kapacitet utnyttjats. Anledningen till detta är att avfallsproducenterna har lyckats reducera mängderna avfall som behöver slutförvaras i SFR. Dagens förvar beräknas av därmed ha tillräcklig utnyttjad kapacitet för den volym driftavfall som beräknas uppkomma vid 40 års drifttid av kärnkraftverken. SKB har därför valt att inte ta det tillstånd som tillåter en utbyggnad av SFR 1 till 90 000 m³ i anspråk /Regeringsbeslut 2005/.

1.4 Utbyggnad av SFR

Kärnkraftsproducenterna har tagit beslut om 60 års drifttid för reaktorerna i Oskarshamn och 50 års drifttid för reaktorerna i Ringhals och Forsmark, vilket innebär ökade mängder driftavfall som kräver deponering i SFR /SKB 2007b/. I SFR ska även huvuddelen av rivningsavfallet från de svenska kärnkraftverken slutförvaras. De långlivade delarna av rivningsavfallet kommer dock att slutförvaras i SFL (Slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall). I ett första skede handlar det om rivningsavfall från de två avställda reaktorerna i Barsebäck samt från de sedan länge nedlagda reaktorerna i Studsvik och Ågesta. På längre sikt behövs även utrymme för slutförvar av rivningsavfall från övriga reaktorer (Ringhals, Oskarshamn och Forsmark). För att möjliggöra slutförvar av dels driftavfall orsakade av förlängda drifttider för kärnkraftverken, dels radioaktivt rivningsavfall från de svenska kärnkraftverken behöver SFR byggas ut.

Utbyggnaden av SFR planeras preliminärt ske i två steg. Det första omfattar de försvarsvolymer som krävs för rivningsavfallet från reaktorerna i Barsebäck, Ågesta och Studsvik samt driftavfall enligt dagens planer för kärnkraftverkens drifttider. Avfallsmängderna i detta skede beräknas bli ca 40 000 m³. Det andra steget omfattar försvarsvolymer för rivningsavfall från resterande kärnkraftverk och bedöms uppgå till ca 100 000 m³. De undersökningar som beskrivs i denna rapport syftar till att definiera och karakterisera en bergvolym som är tillräckligt stor för att möjliggöra slutförvaring av allt drift- och rivningsavfall, dvs ca 140 000 m³. Denna volym är idag föreslagen att fördelas på sex bergsalar av samma typ som den befintliga bergsalen för lågaktivt avfall, BLA. Salarnas dimensioner är ännu inte fastställda, men preliminärt antas de bli ca 250 m långa. SFR ska stå klart att ta emot rivningsavfall från Barsebäck, Ågesta och Studsvik senast 2020, medan rivningsavfall från övriga kärnkraftverk uppkommer långt senare. SKB har ännu inte tagit beslut om utbyggnaden av SFR i realiteten ska ske i etapper eller om hela utbyggnaden görs sammanhållet i ett projekt.

1.5 Projekt SFR-utbyggnad

Utbyggnaden av SFR ska föregås av en prövning enligt både kärntekniklagen och miljöbalken. Inför en ansökan enligt dessa lagar behöver olika typer av underlag tas fram. Det gäller bl a säkerhetsanalyser, anläggningsutformning och miljökonsekvensbeskrivning. Detta kräver i sin tur underökningar av platsen. Allt detta underlag kommer att tas fram inom ramen för Projekt SFR-utbyggnad.

Projektets mål är att:

- Allt underlag som krävs för ansökan om utbyggnad av SFR enligt kärntekniklagen och miljöbalken finns framme i projektets slutskede, så att ansökan för utbyggnad av SFR kan ske 2013.
- Att det övriga underlag som behövs för att projektera och bygga ut anläggningen tas fram enligt fastlagd tidsplan.

Som nämns i avsnitt 1.1 ingår vidare i projektet att utvärdera primärdata från undersökningarna och att upprätta platsbeskrivande modeller. Med bland annat dessa modeller som grund utformas utbyggnaden av SFR, med avseende på bland annat driftsäkerhet och långsiktig säkerhet. Parallellt med att underlag för ansökningar tas fram hålls inom ramen för Projekt SFR-utbyggnad samråd enligt miljöbalken 6 kapitlet om utbyggnaden av SFR. Projektet svarar även för lokal kommunikation och information samt för kontakter med kommun och länsstyrelse.

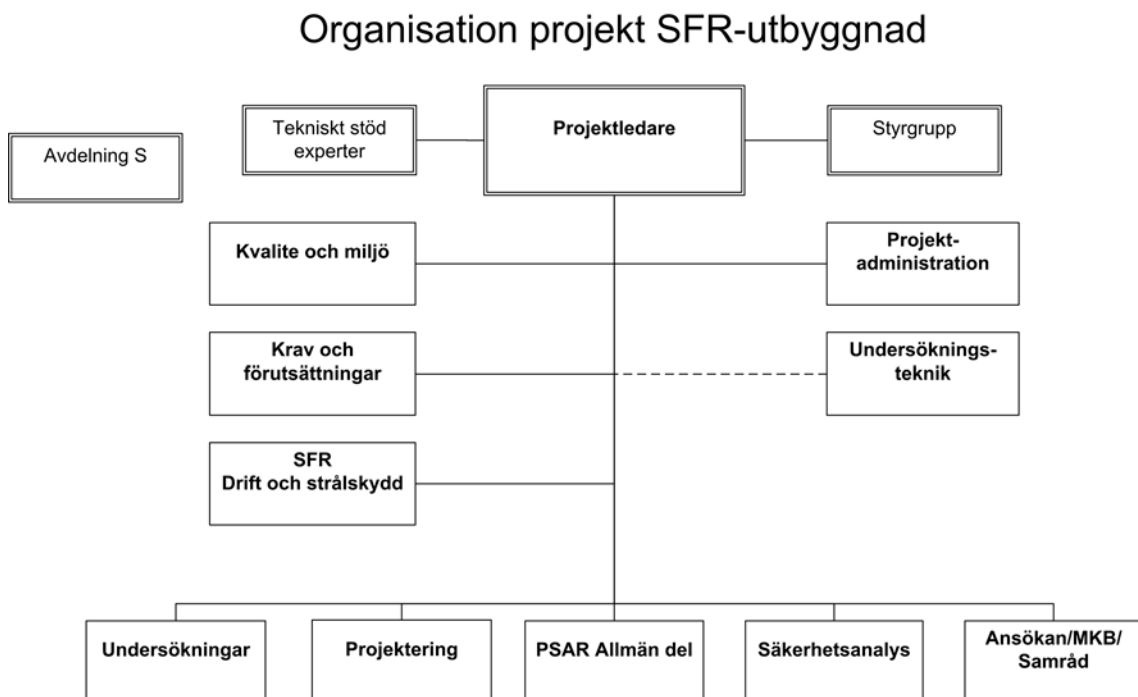
Projektorganisationen för Projekt SFR-utbyggnad framgår av figur 1-3. Projektet omfattar följande delar:

- **Undersökningar** – ansvarar för undersökning, utvärdering av data och modellering av aktuell bergvolym i anslutning till befintlig anläggning. Resultaten utgör underlag för bland annat projektering, säkerhetsanalys och MKB.
- **Projektering** – ansvarar för utformningen av anläggningen och planeringen för bygge och drift
- **Säkerhetsanalys** – ansvarar för säkerhetsredovisningar avseende såväl förvarets långsiktiga säkerhet som säkerheten under driftskedet.
- **MKB** – ansvarar för att beskriva miljökonsekvenser i samband med utbyggnaden, genomföra lagstadgade samråd samt ta fram den miljökonsekvensbeskrivning som ska åtfölja ansökningarna enligt miljöbalken och kärntekniklagen.
- **Driftsäkerhet** – ansvarar för den preliminära säkerhetsredovisning (Preliminary Safety Analysis Report) avseende anläggningsutformning och drift för SFR.

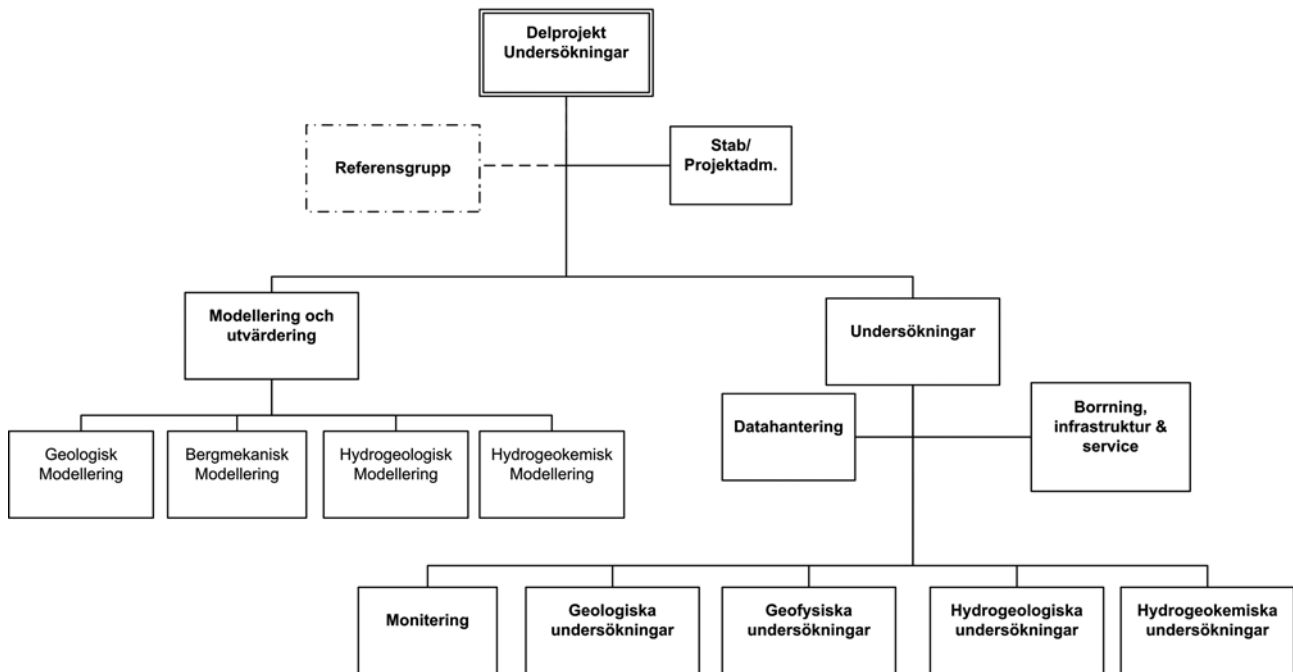
1.5.1 Delprojekt undersökningar

Delprojekt undersökningar ska leverera underlag till övriga delprojekt i form av data och beskrivande modeller. Arbetet sker i dialog med övriga delprojekt, främst projektering och säkerhetsanalys, för att undersökningarna ska kunna styras på ett effektivt sätt utifrån dessa användares behov. Delprojektets organisation framgår av figur 1-4.

Delprojekt undersökningar ansvarar både för framtagande och utvärdering av data och utarbetande av de beskrivande geologiska, bergmekaniska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska modeller som krävs. Genom att arbeta integrerat på detta sätt inom delprojektet tillvaratas erfarenheter från platsen och en effektiv styrning av undersökningsinsatserna kan uppnås utifrån de resultat, utvärderingar och modeller som successivt tas fram.



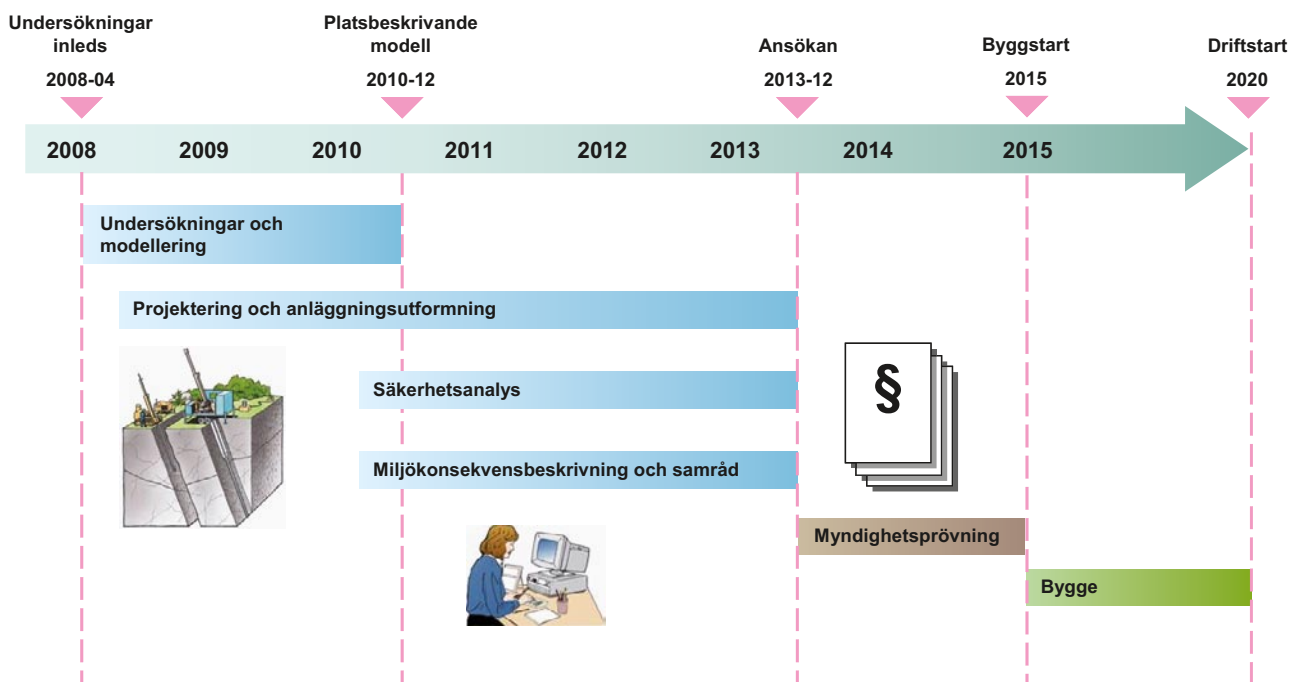
Figur 1-3. Projektorganisation Projekt SFR-utbyggnad.



Figur 1-4. Projektorganisation för Delprojekt undersökningar.

1.5.2 Översiktlig tidsplan

Undersökningarna inleds under våren 2008 och ansökan om att bygga ut SFR planeras ske i slutet av 2013. Därefter följer myndighetsprövning innan en utbyggnad kan inledas. Enligt SKB:s översiktliga tidsplan, se figur 1-5, beräknas utbyggnaden av SFR kunna tas i drift 2020.



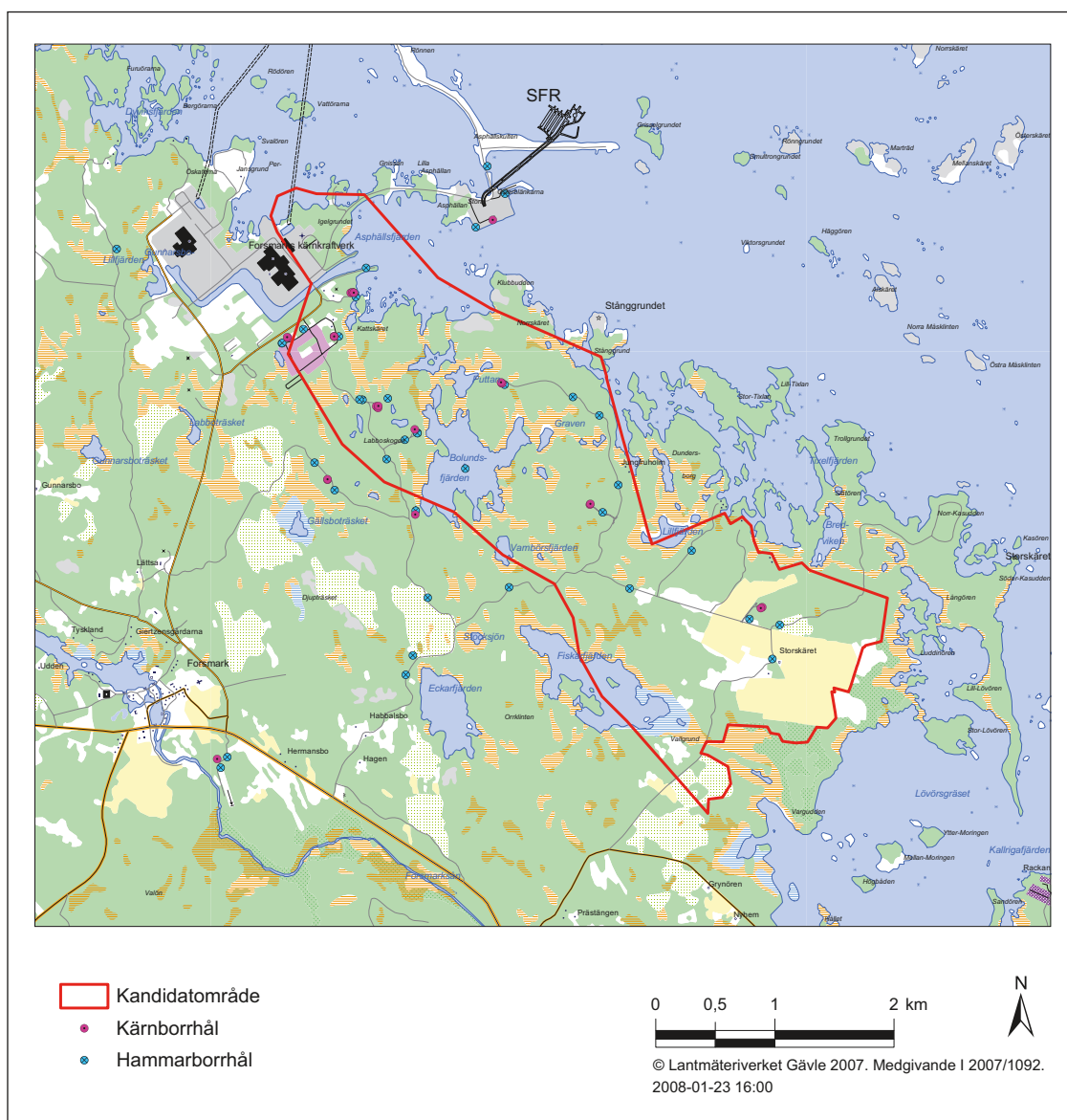
Figur 1-5. Översiktlig tidsplan över processen inom Projekt SFR-utbyggnad fram till driftstart.

2 Förutsättningar

2.1 Kunskapsläge

Den platsspecifika kunskapen om berggrunden i Forsmarksområdet och speciellt runt SFR är betydande. Platsundersökningar för SFR med efterföljande bergarbeten, ovan- och under mark har bedrivits i olika omgångar mellan 1972 och 1986 /Carlsson och Christiansson 2007/. Därtill kommer platsundersökningarna för slutförvar av använt kärnbränsle (PLU) under åren 2002 till 2007, vilka har skett i det direkta närområdet till SFR, se figur 2-1, se /Stephens et al. 2007/.

Bergvolymen vari SFR-anläggningen är placerad är relativt inhomogen med felsiska vulkaniter och pegmatitisk granit som dominerande bergarter. Omväxlande förekommer olika typer av granitoider samt gångbergarter med granitisk sammansättning, amfibolit och olika generationer av pegmatit, se vidare kapitel 5. Bergvolymen begränsas i väster av den branta regionala Singözonen som har VNV-OSO-lig strykning.



Figur 2-1. Kartan visar läget av SFR i förhållande till kandidatområdet för PLU. Även borrhål från PLU är markerade.

Bergtekniskt visar byggnationen av SFR på en stabil geologisk miljö. Som exempel kan nämnas att silotaket med en diameter på 30 m kunde byggas utan tillfälliga förstärkningsåtgärder /Carlsson och Christiansson 2007/. Anläggningen har fungerat bra och varit stabil under de 20 år den varit i drift.

Erfarenheterna från PLU visar att det inom delar av Forsmarksområdet förekommer flacka sprickor i det ytliga berget, vanligen ner till ca 40 meters djup men ibland djupare. Dessa sprickor (t ex så kallad bankningsplan) har ofta stor horisontell utsträckning och ibland hög hydraulisk transmissivitet. I området runt SFR-förvaret förekommer även ett antal brantstående deformationszoner vilkas hydrauliska egenskaper har undersökts med enhåls- och interferenstester. En flack deformationszon har också identifierats under SFR. Transmissiviteten för zonerna varierar mellan 10^{-8} och 10^{-5} m²/s /Axelsson och Hansen 1997/.

Grundvattenprover för analys av den kemiska sammansättningen har tagits regelbundet i borrhålen i SFR-anläggningen sedan slutet på 80-talet. Oavsett från vilken del av anläggningen som proverna härrör, innehåller grundvattnet en komponent med marint ursprung härrörande från Littorinahavet och/eller dagens Östersjön, men andelen varierar i olika delar av anläggningen. I regel är det marina inslaget betydligt mindre och andelen äldre vatten (blandning av glacialt smältvatten och salt djupvatten) högre i vattenförande sprickor i bergmassan mellan sprickzoner än i zonerna. Detta gäller särskilt borrhålen som når under förvaret. Här har dessutom vattensammansättningen varit mer stabil under den tid som provtagningen pågått.

I kapitel 9 redogörs mer utförligt för dagens kunskapsläge om SFR-området med regionala omgivningar, och på vilka rapporter som kunskapen baseras på. I kapitel 9 definieras den modellversion, version 0, som fortsatt geovetenskaplig modellering av SFR-området kommer att utgå ifrån.

2.2 Kravbild

2.2.1 Myndighetskrav

Följande myndighetskrav på planerade undersökningar samt utbyggnad av SFR har identifierats:

- Utbyggnad av SFR-anläggningen kräver tillstånd enligt miljöbalken och kärntekniklagen. Till dessa ansökningar ska en miljökonsekvensbeskrivning enligt miljöbalken kapitel 6 bifogas.
- Undersökningar av havsbotten inom allmänt vatten kräver tillstånd enligt Lag (1966:314) om kontinentalsockeln. Även denna ansökan skall åtföljas av en miljökonsekvensbeskrivning.
- Under undersökningarna kan det bli aktuellt med borrhning från plattform till havs. Sådan verksamhet är anmälningspliktig enligt förordningen (1998:1388) om vattenverksamhet. Om borrhning från plattform blir aktuellt, kommer det att anmälas till länsstyrelsen i Uppsala län.
- För att säkra elförsörjningen till den pir där en stor del av borrhningen ska genomföras (se t ex kapitel 3) kommer en elkabel att förläggas till havsbotten. Denna verksamhet är anmälningspliktig enligt §19 i förordningen (1998:1388) om vattenverksamhet. Anmälan har gjorts till länsstyrelsen i Uppsala län. Länsstyrelsen meddelade i ett beslut 2008-01-17 att den inte hade något att erinra mot verksamheten.
- Undersökningar eller annan verksamhet som kan ha påverkan på naturmiljön ska anmälas till länsstyrelsen för samråd enligt Miljöbalken 12 kapitlet. I samband med undersökningarna kommer borrhplatser att etableras och returvattnet från borrhning kommer att släppas ut i havet. Detta kan innebära begränsad påverkan på naturmiljön, och samråd med länsstyrelsen kommer att genomföras. Innan returvattnet från borrhningen släpps ut i havet kommer borrhkaxet att avskiljas i sedimentationscontainrar för att minska risken för grumling.
- Utbyggnaden får inte strida mot gällande detaljplan. Ändringar av detaljplanen för Forsmark, som bl a medger planerad utbyggnad av SFR, antogs av kommunfullmäktige i Östhammars kommun den 10 mars 2008 och vann laga kraft den 11 april 2008.

Utformning av och innehåll i en säkerhetsanalys, och framför allt de kriterier som ska användas för att bedöma förvarets säkerhet, anges i föreskrifter från SKI och SSI. Vad gäller den långsiktiga säkerheten för slutförvar för kärnavfall finns två mera detaljerade föreskrifter av särskild vikt:

- ”SSI:s föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall” (SSI FS 1998:1) samt allmänna råd till denna föreskrift (SSI FS 2005:5).
- ”SKI:s föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall” (SKIFS 2002:1).

Utöver dessa är även SKI:s föreskrift om säkerhet i kärntekniska anläggningar (SKIFS 2004:1) viktig att beakta vid genomförandet av undersökningarna i och i anslutning till SFR som är en kärnteknisk anläggning i drift.

Samråd har genomförts med SKI och SSI avseende den planerade utbyggnaden och de undersökningar som planeras för detta. En detaljerad redogörelse för hur säkerhetskraven i ovan nämnda föreskrifter kommer att beaktas skall redovisas i en separat anmälan till SKI i god tid innan undersökningar i befintlig anläggning påbörjas.

2.2.2 Projektspecifika krav

De projektspecifika krav som ställs på planerad utbyggnad av SFR kan kortfattat sammanfattas i följande punkter:

- Undersökning inför ansökan om byggande av bergrumsanläggning för rivningsavfall och ökade mängder driftavfall skall ske vid befintligt SFR.
- Undersökningar skall genomföras för att identifiera och karakterisera en bergvolym tillräckligt stor för utbyggnad av SFR med en volym av 140 000 m³.
- Anläggningen skall planeras så att den kan hantera ökade mängder driftavfall samt rivningsavfall.
- I planeringen skall sådan hänsyn tas att driften i SFR störs minimalt.
- I planeringen skall utbyggnaden integreras med nuvarande system i SFR.

2.3 Platsen

Slutförvaret för radioaktivt driftavfall, SFR, är lokaliserat till Forsmarks kraftverksområde drygt 5 km nordost om Forsmarks bruk inom Östhammars kommun i Uppsala län. Förvarsanläggningen är placerad i berggrunden, under havet nordost om kraftverksområdet, mellan öarna Stora Asphällan och Grisselgrundet (se t ex figur 4-2). Förutom undermarksanläggningen finns även anläggningar i marknivå. Dessa är förlagda i anslutning till Forsmarks hamn. Hamnen och SFR-anläggningen är belägna inom kraftverksområdet, och det är Forsmarks kraftgrupp, FKA, som är huvudsaklig markägare. SKB äger dock marken där ovanjordsanläggningen är placerad samt markområdet på piren ovanför befintlig anläggning. Två parallella bergtunnlar, vardera cirka en kilometer lång, leder från hamnområdet ner till undermarksanläggningen. Förvaret försörjs med bl a elkraft och vatten från anläggningar inom Forsmarksverket. Ledningar för detta ändamål är förlagda i anslutning till vägen som förbinder hamnområdet med kraftverket.

Anläggningen utgör ett industriområde som angränsar till kust och hav. I samband med byggandet av kärnkraftverken och SFR-anläggningen gjordes omfattande utfyllnadsarbeten kring SFR då öar, kobbar och skär fylldes ut och sammanbands för att möjliggöra vägbyggnation, anläggande av hamn och industritomter etc. Detta innebär att stora delar av den omgivande miljö utgörs av mark som skapats av människan. Ett exempel på detta är den pir som ligger ovanför befintlig undermarksanläggning och varifrån större delen av de planerade undersökningarna kommer att genomföras.

I närheten av SFR ligger den sk Biotestsjön där bland annat forskning om hur utsläpp av varmvatten påverkar havsmiljön bedrivs. Biotestsjön och närliggande öar och skär utgör viktiga fågelområden där en stor mängd flyttfåglar passerar och uppehåller sig under delar av året. Utanför SFR finns även ett antal fågelskyddsområden och Natura 2000-områden till skydd för naturmiljön och djurlivet.

Kustområdet utanför Forsmark utgör riksintresse för naturmiljö och rörligt friluftsliv. Området utgör även riksintresse för energiproduktion och slutförvar av kärnavfall.

2.4 Befintlig anläggning

SFR är byggt för att ta emot och efter förslutning utgöra ett passivt förvar för låg- och medelaktivt avfall. Efter förslutning kan förvaret lämnas utan att ytterligare åtgärder behöver vidtas för att upprätthålla förvarets funktion. Förvaret är utformat som en bergrumsanläggning under havet vilken nås via tillfartstunnlar från en anläggningsdel i markplanet. Förvaret är uppdelat i ett antal enheter, utformade med hänsyn till de krav som gäller för olika typer av avfall. Förvarsdelar avsedda för skilda aktivitetsnivåer hos avfallet och för olika förpackningstyper kan separeras. Därför består SFR av följande delar:

- Silo: Förvar avsett för i huvudsak medelaktivt kortlivat solidifierat avfall från reaktortorreningskretsar.
- BMA (Bergsal för medelaktivt avfall): Förvar avsett för i huvudsak medelaktivt kortlivat solidifierat avfall från kondensatorreningskretsar samt medelaktivt kortlivat fast avfall av typen sopor och skrot.
- BLA (Bergsal för lågaktivt avfall): Förvar avsett för lågaktivt fast avfall av kategorin sopor och skrot.
- BTF (Betongtankförvar): Förvar avsett främst för avvattnad jonbyttmassa från kondensatorreningskretsar.

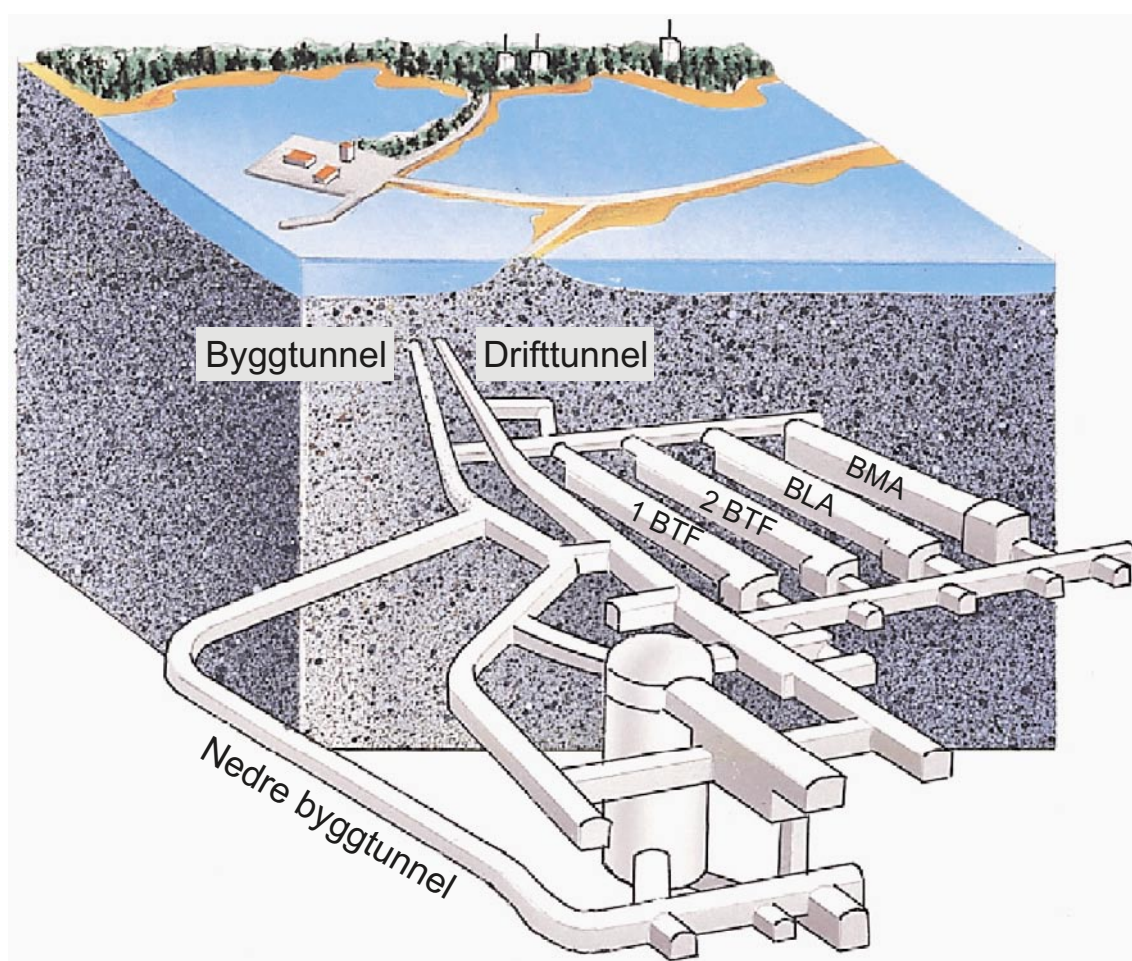
I siloförvaret och BMA sker hanteringen med fjärrmanövrerade traverser, medan deponering i BTF och BLA sker med strålskärmd truck.

Anläggningens utformning framgår av figur 2-2. Bergsalarna i befintlig anläggning är ca 160 m långa, mellan 10 och 20 m höga och mellan 14 och 20 m breda. Bergrummet som rymmer silon är ca 70 m högt och har en diameter på 30 m. Själva betongsilon är 50 m hög. Underjordsdelens tak ligger ca 60 m under havets botten och anläggningens djupaste del vid botten av silon och den nedre dränagebassängen är belägen ca 140 m under havsbotten. Den totala längden av bergrum och tunnlar uppgår till ca 4 500 m. Funktionaliteten hos anläggningen har varit god under de ca 20 år som den har varit i drift med god bergstabilitet och få tekniska problem hos installerade system som kännetecken.

Avfallet som idag deponeras och förvaras i SFR uppstår vid drift av kärnreaktorer och vid mellanlagring av använt kärnbränsle. Avfallet utgörs främst av använda, organiska jonbyttmassor från rening av reaktorvatten och kondensat samt avfall i form av sopor, skrot och mekaniska komponenter från underhållsarbete, etc. En mindre mängd likartat avfall från annan industriell och medicinsk verksamhet samt forskning slutförvaras också i SFR. Avfallet förpackas/behandlas vid kärnkraftverken till sin slutliga form före transport till SFR. För avfall från övrig industri samt medicinsk verksamhet och forskning sker behandlingen i Studsvik. I undantagsfall kan viss behandling (cementingjutning) ske vid SFR. Avfallet transporteras till och deponeras i SFR i främst följande förpackningstyper:

- Betongkokiller med cementingjutna jonbytarmassor, filterhjälpmedel, indunstarkoncentrat samt sopor och skrot.
- Plåtkokiller med cement- eller bitumeningjutna jonbytarmassor eller sopor och skrot.
- Plåtfat med cement- eller bitumeningjutna jonbytarmassor, filterhjälpmedel eller indunstarkoncentrat.
- Plåtfat innehållande aska från förbränning i Studsvik.
- Standardcontainrar med i huvudsak skrot och sopor.
- Betongtankar med avvattnade jonbytarmassor.

Utöver dessa kan vissa udda förpackningstyper förekomma. De ovan beskrivna förpackningstyperna skall kunna hanteras i den utbyggda anläggningen. När det gäller rivningsavfall är det dock främst frågan om standardcontainrar.



Figur 2-2. Den befintliga SFR-anläggning. Bergsalarna är från höger i bild räknat BMA, BLA, 2 BTF och 1 BTF. Silon är den stående cylindern i mitten av figuren. Tunneln längst till vänster på bilden benämns nedre byggtunnel varifrån vissa av de planerade undersökningarna kommer att utföras. Denna tunnel ligger utanför kontrollerat område, vilket underlättar undersökningarnas genomförande och minimerar störningar för SFR-anläggningens drift.

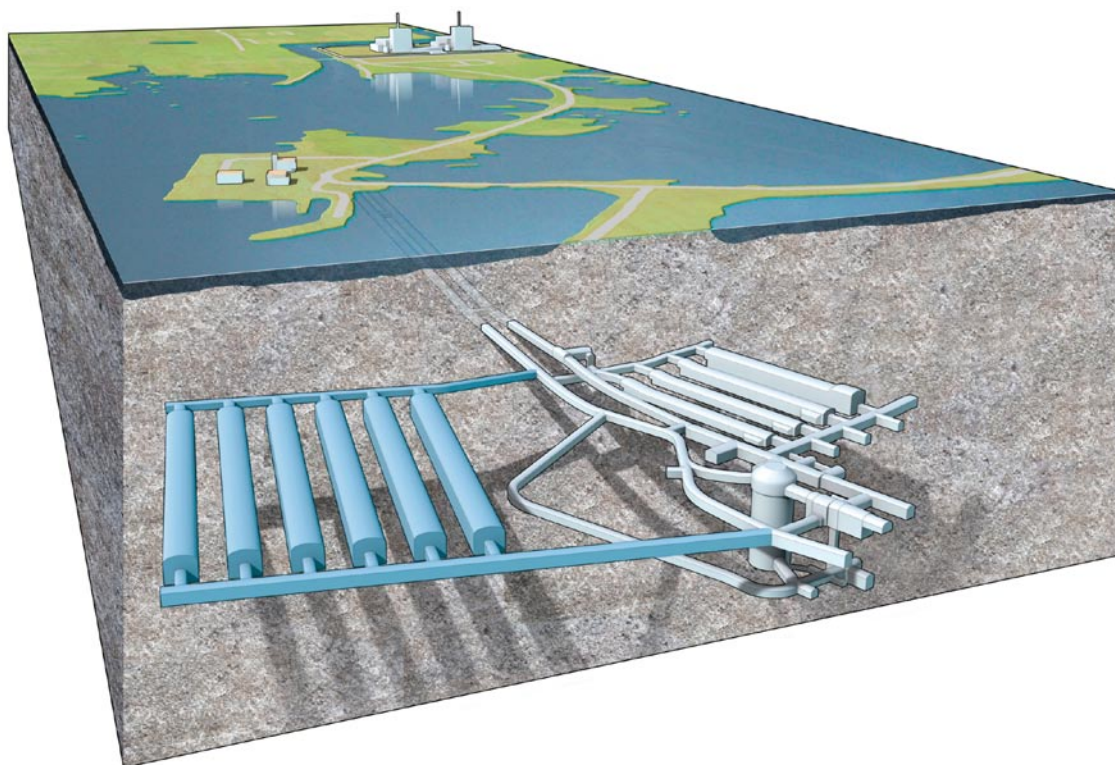
2.5 Utbyggd anläggning

Utbyggnaden ska ha utrymme för 140 000 m³ avfall, främst avsett för rivningsavfall från kärnkraftverken men även för ökade mängder driftavfall. Deponeringsutrymmena i den utbyggda delen utgörs huvudsakligen av bergsalar av BLA-typ för standardcontainrar men även av en mindre del av BMA-typ för avfall med högre aktivitetsinnehåll.

En referenslayout är framtagen för hur en utbyggnad skulle kunna se ut, se figur 2-3. I denna principutförning är ingen hänsyn tagen till bergtekniska förutsättningar så som t ex större sprickzoner mm. I referenslayouten byggs sex stycken, ca 250 meter långa bergsalar av BLA-typ med bredd ca 22,5 m och höjd ca 18,5 m och med 14 m anfangshöjd. En av dessa bergsalar antas utformas som BMA med förstärkta barriärer och utrustning för fjärrstyrd deponering. Denna bergsal kan komma att bli kortare än övriga salar. Utbyggnaden placeras så bergdränage kan ledas mot befintlig pumpanläggning. Utformningen i övrigt utförs på sådant sätt att den utbyggda delen i möjligaste mån kan integreras med befintliga system i dagens SFR. Inom ramen för verksamheten inom Delprojekt projektering kommer layouten att successivt preciseras vartefter undersökningsdata kommer att föreligga.

2.6 Kvalitetssäkring

Undersökningarna kommer att genomföras med höga krav på kvalitetssäkring av data, resultat och modeller. SKB har under årens lopp kontinuerligt utvecklat undersökningsmetoder och rutiner med fokus på kvalitetssäkring. Dessa erfarenheter och rutiner, inte minst från PLU-skedet i Kärnbränsleprogrammet, kommer att tillämpas i detta projekt. Fokus ligger på kvalitet i data och modeller, spårbarhet och dokumentation. Samtliga data ska vara kvalitetssäkrad och kontrollerad före användning i modellerings- eller andra syften.



Figur 2-3. Befintlig SFR-anläggning (ljusgrå) samt förslag till utbyggnad (blå). Den utbyggda delen ansluter till bygg- respektive driftsida i den befintliga anläggningen.

2.7 Avgränsningar

Undersökningsprogrammet omfattar inte de detaljerade undersökningar som krävs i samband med detaljprojektering och bygge. Programmet omfattar i dagsläget de geovetenskapliga undersökningar som krävs som underlag för framför allt projektering och säkerhetsanalyser och innefattar således inga undersökningar av ekosystem eller biota. Det finns dock en stor mängd biosfärsdata från tidigare undersökningar kring SFR och från PLU i Forsmark. En utvärdering av arbetet med den förnyade säkerhetsrapporten för SFR, SAR-08, som lämnades in till myndigheterna den sista april 2008, kommer att göras under våren och sommaren 2008. Vid denna utvärdering kommer eventuella tillkommande databehov att identifieras och utifrån dessa utarbetas en plan för kompletterande undersökningar.

3 Undersökningsstrategi

3.1 Mål

Det övergripande målet för Projekt SFR-utbyggnad, Delprojekt undersökningar är:

- Att under 2010 leverera underlag i form av primärdata och modeller till övriga delprojekt så att en ansökan om utbyggnad av SFR enligt miljöbalken och kärntekniklagen finns framme senast 2013.

Delprojektet skall leverera kvalitetssäkrade geovetenskapliga primärdata för den tilltänkta bergvolymen. Om behov föreligger, baserat på erfarenheterna från SAR-08, kommer även ekologiska primärdata samt data på överlagrande sediment och biosfär för den närmaste omgivningen att kompletteras. Utgående från primärdata, som vartefter de produceras inlagras i SKB:s primärdatabas Sicada, upprättas ämnesspecifika modeller av platsen (jfr kapitel 9). Baserat på den integrerade kunskapen från dessa modeller och övrig information från undersökningsskedet utformas en sammanfattande platsbeskrivning. Denna skall utgöra det underlag som krävs för projektering, säkerhetsanalys, driftsäkerhetsanalys, beskrivning av miljökonsekvenser samt för utvärdering och bedömning av områdets lämplighet för utbyggnad. Underlaget ska således vara tillräckligt omfattande för att möjliggöra:

- Bedömning av om aktuellt område uppfyller grundläggande säkerhetskrav.
- Bedömning av de byggtekniska förutsättningarna.
- Anpassning av anläggningen till områdets förutsättningar och egenskaper.
- Bedömning av utbyggnadens och anläggningens påverkan på miljön.

Valet av undersökningsstrategi styrs av främst följande faktorer:

- Det projektspecifika kravet att lokalisera den planerade utbyggda SFR-anläggningen i direkt anslutning till den befintliga anläggningen, om inte geologiska och/eller andra förhållandena visar sig uppenbart ogynnsamma.
- Erfarenheterna av den befintliga, stabila och väl fungerande SFR-anläggningen.
- Erfarenheterna från PLU-undersökningarna i omedelbar närhet till SFR-området.
- Att vid undersökningarna ta nödvändig hänsyn till driften i den befintliga SFR-anläggningen.
- Att i tid uppnå det övergripande målet med undersökningarna som anges ovan.

Upprättandet av undersökningsprogrammet har föregåtts av en förstudie bestående bl a av utvärdering och sammanfattning av befintlig geovetenskaplig kunskap om platsen, vilket i kapitel 9 sammanfattas som modellversion 0. Med denna utgångspunkt har en övergripande undersökningslogistik fastlagts där ett område i direkt anslutning till den befintliga SFR-anläggningen prioriterats. Motiveringen för val av detta område presenteras nedan. Om inledande undersökningar indikerar att det prioriterade området inte uppfyller de bergtekniska och övriga krav som måste ställas på anläggningen, flyttas undersökningarna till nytt undersökningsområde. Även alternativa undersökningsområden presenteras i föreliggande kapitel.

Undersökningsprogrammet beskriver detaljerade undersökningar enbart i det prioriterade området och förutsätter att detta område har sådana kvaliteter att hela undersökningsprogrammet genomförs. Skulle detta inte vara fallet, utan undersökningarna på denna plats av geovetenskapliga eller andra skäl måste avbrytas och flyttas till annat område, skall undersökningsprogrammet revideras. Motiv för val av prioriterat undersökningsområde.

3.2 Prioriterat undersökningsområde

I de projektspecifika kraven för utbyggnaden av SFR, se avsnitt 2.2.2, fastställs att utbyggnaden skall integreras med nuvarande anläggning, vilket innebär att en utbyggnad bör ske i direkt anslutning till denna. Utbyggnaden skall även planeras så att driften av anläggningen störs minimalt under byggtiden.

Av närområdena till befintlig SFR-anläggning bedöms, mot bakgrund av nuvarande kunskap om de geovetenskapliga förhållandena, området omedelbart sydost om SFR (se figur 3-1) som det mest optimala för planerad utbyggnad. Motiven till detta val är främst:

- Det prioriterade området är enligt berggrundskartan i figur 5-5 /SKB 2005a/ beläget i samma bergdomän som den befintliga anläggningen. Dock indikerar informationen från markmagnetiska mätningar utförda under PLU /Isaksson et al. 2007/, se figur 5-3, en något mer lågmagnetisk berggrund än i anslutning till befintlig anläggning, men utan tydliga tecken på storskaliga lineament. Mot nordost och nordväst däremot avgränsas SFR-området av två deformationszoner, benämnda Zon 8 respektive Zon 3 i tidigare SFR-rapporter, t ex /Christiansson 1986/ och /Axelsson och Hansen 1997/, och ZFMNW0805 respektive ZFMNE0869 i PLU-rapporter, t ex /Stephens et al. 2007/. Båda dessa zoner har genom-borrats från SFR-anläggningen. Zon 8, som enligt /Christiansson 1986/ har en strykning ca N40°V, konstaterades vara brantstående med stupning ca 80° mot NO, krossad och vittrad samt delvis kraftigt vattenförande (hydraulisk konduktivitet upp till ca 10⁻⁶ m/s). Zon 3, som har en något mer osäker orientering (enligt /Christiansson 1986/ brantstående med stupning mot öster och strykning ca N100–N300) uppvisar bl a mylonitisering och brecciering. Zon 3 har en hydraulisk konduktivitet på ca 10⁻⁶ m/s.

Sammanfattningsvis kan man därför förutsätta att en utbyggnad mot nordost och eventuellt även mot nordväst vid passage av dessa zoner kommer att kräva mer omfattande förstärkningsåtgärder (förinjektering, bultning etc) och eventuellt andra problem än en utbyggnad mot sydost.

- Bergkvaliteten i nedre byggtunneln, se figur 2-2, som är den tunnel som är belägen närmast det prioriterade området, är ur byggbarhetssynpunkt mycket god. Denna tunnel är belägen under delar av en möjlig placering av den första bergsalen för utbyggnaden.

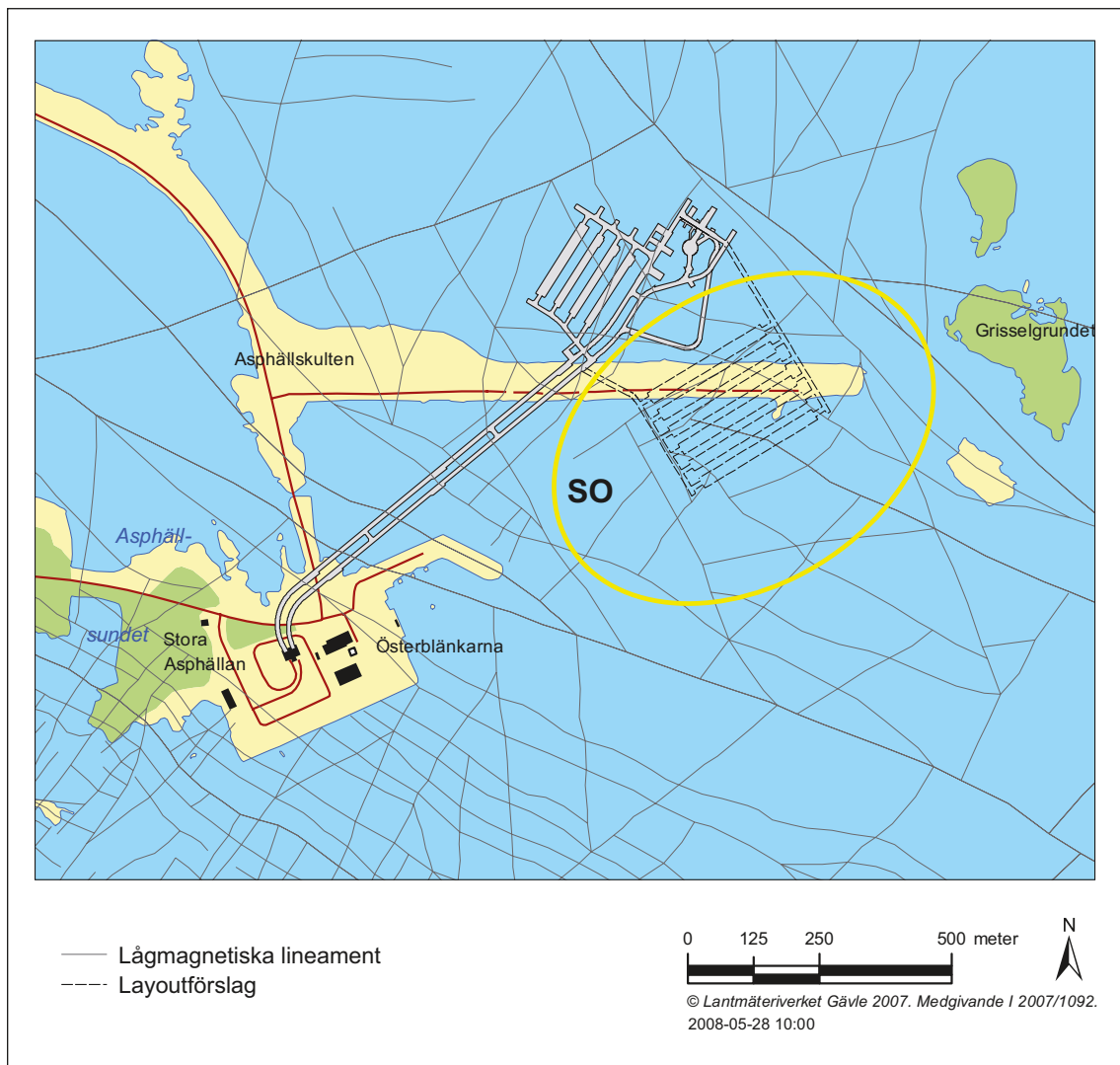
Till detta kommer motiv av praktisk-ekonomisk karaktär:

- En utbyggnad på denna sida av SFR stör driften minimalt då det mesta arbetet kan ske utanför kontrollerat område, figur 2-2.
- Vid förundersökningarna kan piren mellan Asphällskulten och Grisselgrundet utnyttjas för borrhning och borrhålsundersökningar medan undersökningar i andra riktningar kring SFR förutsätter resurskrävande borrhning och borrhålsundersökningar från plattform och från befintlig SFR-anläggning.

3.3 Alternativa områden

Om undersökningarna av det prioriterade området sydost om SFR indikerar geovetenskapliga förhållanden som innebär att området ter sig mindre lämpligt för utbyggnad, kan alternativa områden komma att undersökas. I första hand prövas dock möjligheterna att genom t ex justering eller omformning av anläggningslayouten anpassa utbyggnaden till rådande bergförhållanden i område sydost (figur 3-1).

Alternativa områden närmast befintlig SFR-anläggning utgörs av bergvolymen nordost, nordväst samt eventuellt under befintlig anläggning, se figur 3-2. I dagsläget finns ingen rangordning mellan de olika alternativen. Som framgår av avsnitt 3.2 begränsas områdena mot NO, NV och västerut av kända deformationszoner, Zon 8 (ZFMNW0805) i nordost och Zon 3 (ZFMNE0869) i väster (se t ex figur 3-1 och 9-4), vilket medför att vederbörlig anpassning av utbyggnads-layouten måste göras om dessa zoner skall undvikas, alternativt att förstärkningsåtgärder vidtas

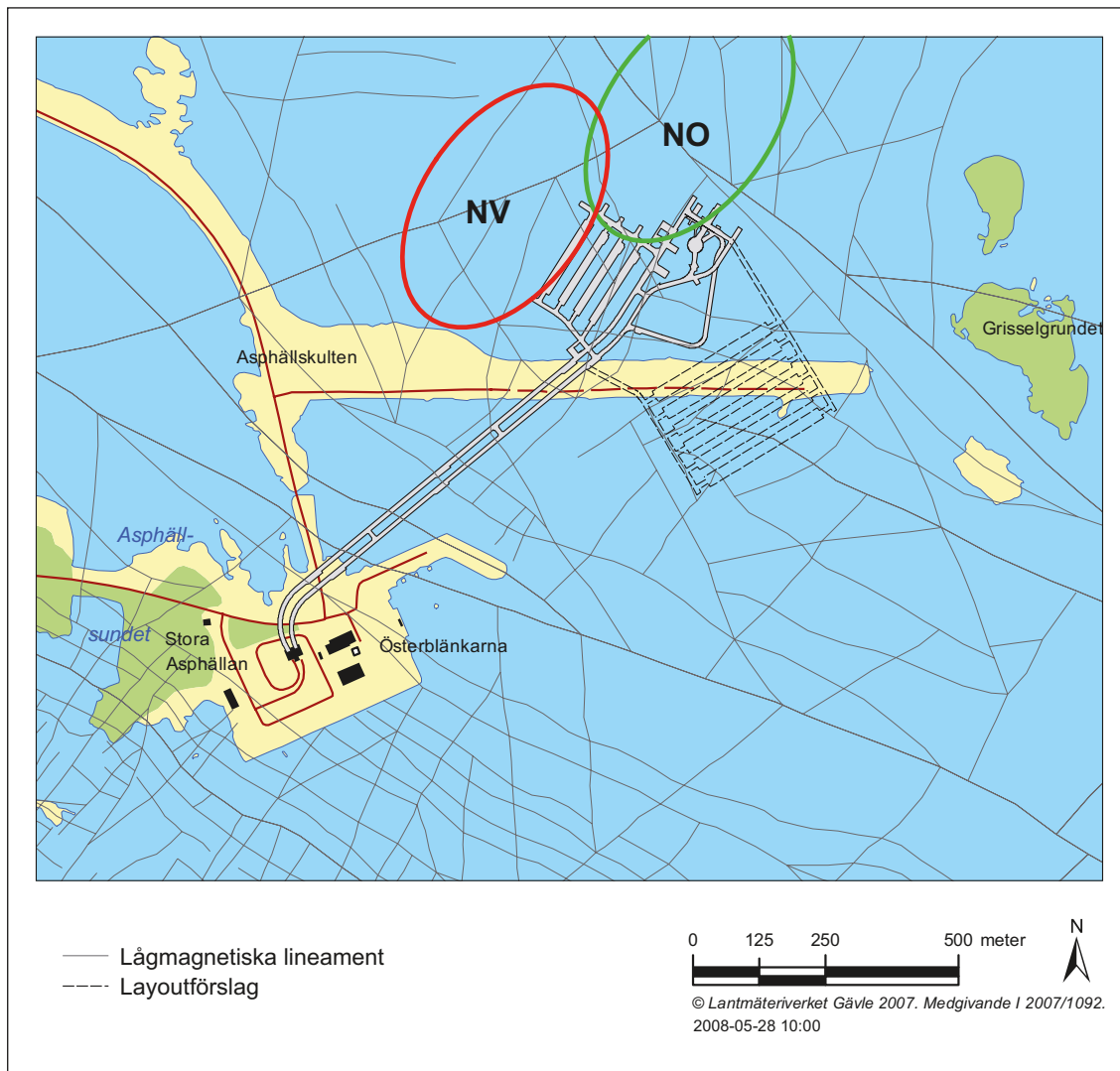


Figur 3-1. Karta över SFR med lineamentsmodellen i bakgrunden. Primärt undersökningsområde ligger inom den gula ringen sydost om befintlig anläggning. Ett layoutförslag till utbyggnad illustreras med streckade linjer.

om någon av zonerna måste passeras. Liksom vid undersökningarna i det prioriterade området måste särskilda undersökningsmetoder tillämpas för att kontrollera eventuell förekomst av flacka strukturer ovan eller i nivå med den planerade utbyggnaden.

Vid uppförandet av den befintliga SFR-anläggningen utfördes förberedande arbeten för en utbyggnad, dels i bergsalarnas norra förlängning, dels för en kompletterande parallell bergsal. De förberedande arbetena bestod bl a i uttag av nischer till tre nya bergsalar i nordostlig riktning.

Dataunderlaget för en eventuell utbyggnad under befintlig anläggning är för närvarande bristfälligt. Endast ett fåtal borrhål når de vertikaldjup som i det fallet måste undersökas. Beträffande brantstående strukturer kan dock en god geometrisk prognos göras utifrån befintlig strukturgeologisk 0-version. För exempelvis vattenförande sprickzoner kan vissa skillnader i karaktär mot djupet förväntas. Om det blir aktuellt att undersöka området under SFR måste en mer omfattande karaktärisering göras av den flacka zon som av /Christiansson 1986 och Axelsson och Hansen 1997/ benämns Zon H2 (ZFMNE0871 enligt PLU-benämning) och undersökningsinsatser sätts in för att kontrollera eventuell förekomst av med denna zon parallella, vattenförande strukturer på större djup.



Figur 3-2. Alternativa undersökningsområden i direkt anslutning till befintlig SFR-anläggning.

Om det visar sig att undersökningarna ska inriktas mot något av de alternativa områdena kommer dessa att ha samma principiella inriktning som det program som presenteras i detta dokument. För områdena mot NO, NV och västerut måste dock all ovanmarksborrning och borrhålsundersökningar ske från plattform.

Undersökningar för ett förvar under befintlig SFR-anläggning får däremot starkt fokus på borrning och undersökningar från den befintliga anläggningen och den ost-västliga piren mellan Asphällskulten och Grisselgrundet.

3.4 Nyckelfrågor för det prioriterade området

Dataunderlaget från SFR-området är omfattande, se t ex kapitel 9, men beträffande det prioriterade området finns i huvudsak endast indirekt geovetenskaplig information i form av flyg- och sjöbaserade geofysiska mätningar. Detaljerad geologisk information saknas därför. Ett antal

nyckelfrågor har identifierats vilka endast kan besvaras genom borrhning och borrhålsundersökningar, eventuellt kompletterat med ytterligare geofysiska undersökningar. Några av dessa centrala frågeställningar är:

- *Eventuell förekomsten av flackt stupande vattenförande sprickzoner eller subhorisontella diskreta sprickor, s k bankningsplan, i den del av det prioriterade området som kommer att täcka den nya SFR-anläggningen.*

Sannolikheten för förekomst av sådana strukturer är svårbedömd. En flackt stupande sprickzon (upp till ca 10 m mäktighet med ca 15° stupning mot söder), den ovan nämnda Zon H2, är känd från SFR-anläggningen, där den påträffas på ca 150 m vertikaldjup under silon i den östra delen av anläggningen /Christiansson 1986, Axelsson och Hansen 1997/. Ytligare parallellstrukturer kan inte uteslutas. Under PLU-undersökningarna har kraftigt vattenförande, ytligt belägna flacka sprickor inom den översta delen av berggrunden identifierats i den nordvästra delen av kandidatområdet /Olofsson et al. 2007/. Hammarborrhålet HFM33 beläget på sydväst om Singözonen har hydraulisk förbindelse med kandidatområdet nordvästra del. Hydraulisk kommunikation mot norr och nordost, tvärs Singözonen, har dock inte kunnat påvisas /Gokall-Norman och Ludvigson 2008/.

Flacka sprickzoner och sprickor är svåra att detektera och karaktärisera med konventionella geofysiska metoder. Under vissa betingelser kan markradar och reflektionsseismiska undersökningar vara effektiva i detta syfte, men i och med att det aktuella undersökningsområdet är havstäckt är markradarundersökningar uteslutna. Dessutom är det djupintervall som här avses, ca 0–150 m vertikaldjup, sannolikt för ytligt för att ett framgångsrikt resultat med reflektionsseismik ska uppnås. Föreslagen undersökningsmetodik är i stället borrhning, geologiska borrhålsundersökningar (där bl a information om sprickorienteringar är viktig) samt tryckregistrering i närliggande borrhål under borrhning.

- *Den geologiska betydelsen av de magnetiska lineament som identifierats.*

Vissa av dessa lineament eller deras förlängning genomskärs av tunnelsystemet i befintlig anläggning och har således kunnat karaktäriseras vid tunnel- eller borrhålskartering (se beskrivning och referenser i kapitel 9), varför deras karaktäristika inom undersökningsområdet kan prognostiseras utifrån befintligt faktaunderlag och med begränsad undersökningsinsats, medan andra, tidigare ej undersökta lineament behöver undersökas noggrant med hjälp av nya borrhål.

- *Den litologiska karaktären hos det prioriterade området jämfört med berget i anslutning till den befintliga SFR-anläggningen.*

Berggrundskartan, figur 5-5, indikerar att det prioriterade området utgörs av ungefär samma typer av dominerande bergarter som de som förekommer i anslutning till befintlig SFR-anläggning, se kapitel 5. Det är dock viktigt att ha i minnet att berggrundskartor över havstäckta områden inte kan hålla samma kvalitet och detaljeringsgrad som kartor över landområden med blottade berghällar, varför det inte kan uteslutas att berggrunden uppvisar en delvis annorlunda karaktär mot sydost.

- *Den hydrogeologiska karaktären hos den undersökta bergvolymen jämfört med berget i anslutning till befintlig SFR-anläggning?*

Denna fråga, som även har viss bäring på de hydrogeokemiska förhållandena, hänger samman med de tre föregående punkterna. Sprickzonernas karaktär i fråga om frekvens av öppna sprickor, omvandling, vittring och typ av sprickfyllnadsmaterial bestämmer de hydrauliska egenskaperna hos de storskaliga konduktiva strukturerna. Bergmassans hydrauliska egenskaper bestäms av sprickfrekvens och sprickkaraktär, som i sin tur styrs av bergartssammansättning, deformationsgrad, vittring och graden och karaktären hos sprickmineraliseringar.

3.5 Detaljerad undersökningsstrategi för det prioriterade området

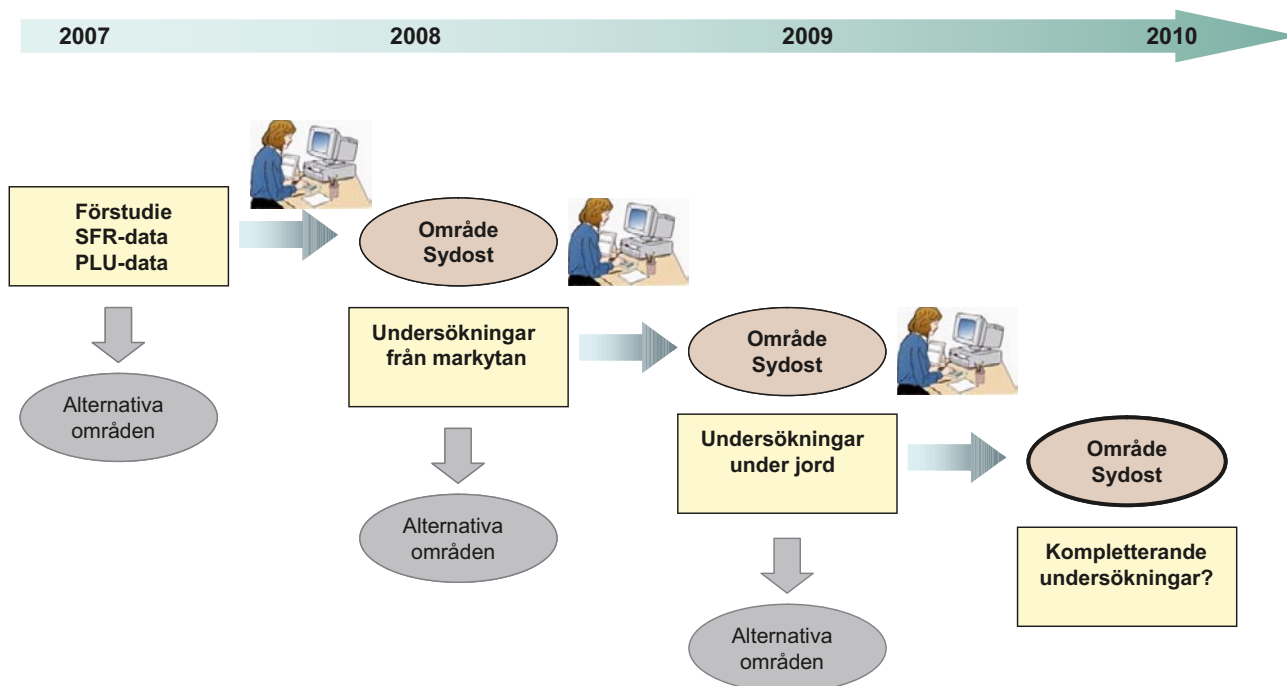
Mot bakgrund av befintlig kunskap framstår området sydost om SFR (se figur 3-1) som det mest fördelaktiga området för en utbyggnad (avsnitt 3.2). Möjligheten att identifiera en tillräckligt stor volym lämpligt berg i detta område anses med nuvarande kunskap som god.

Ur praktisk synvinkel förenklas borrhning/undersökningar, då delar av dessa aktiviteter kan utföras från piren som sträcker sig ut över delar av potentiell förvarsvolym. Även borrhning/undersökningar under jord förenklas då de kan utföras från ”byggsidan” av SFR-anläggningen utanför kontrollerat område (jfr figur 2-2). Detta innebär en minimal påverkan på deponeringsverksamheten i SFR. Det inledande borrhprogrammet kommer därför att inriktas mot området sydost om SFR. Planen är sedan att under ett relativt tidigt skede ta fram ett sådant underlag som antingen kan styrka eller avstyrka områdets lämplighet. Ett beslut tas därefter om inriktningen på de fortsatta undersökningarna, se figur 3-3.

3.5.1 Stegvisa undersökningar

Undersökningarna är planerade att utföras i ett antal steg med ett, i stort sett, standardiserat undersökningsprogram inom varje steg, se figur 3-3. Möjlighet skall dock finnas för vägval efter respektive undersökningssteg. Vägvalet kan avse dels eventuella justeringar av undersökningsområdets geografiska utsträckning, dels modifiering av undersökningsmetodiken. Exempelvis kan oväntade undersökningsresultat kräva extra borrhål eller speciella undersökningsmetoder.

1. Förstudien, som tar sin utgångspunkt i modellversion 0, se kapitel 9, startade under hösten 2007 med upprättande av transformationssamband mellan ett äldre lokalt och det nyare koordinatsystemet som tillämpats vid PLU och som ansluter till rikets nät, RT90.
2. Förstudien fortsatte med en generell kvalitetskontroll av befintligt dataunderlag från byggskedet av SFR. T ex genomfördes en omkartering av borrhkärnor från elva utvalda borrhål från SFR och omkartering av en sträcka av nedre byggtunneln, detta för att harmonisera äldre karteringsmetodik med den som tillämpats vid PLU.



Figur 3-3. Den stegvisa undersökningsstrategin. Förstudien pekar mot ett potentiellt lämpligt område. Borrhning från markytan styrker lämpligheten vilket resulterar i underjordsundersökningar. Indikerar även dessa att området är lämpligt undersöks inte alternativa undersökningsområden.

3. Undersökningsprogrammet inleds med borrhning från piren (kapitel 4). Borrprogrammet startar med hammarborrning, som bl a syftar till att ge tidig information om förekomst och utbredning av eventuella flacka sprickor (bankningsplan) och/eller flacka sprickzoner. Därefter följer kärnborrning från två borrhplatser på piren. Kärnborrhålen riktas mot lineament och deformationszoner runt den tänkta förvarsvolymen. Tillsammans med hammarborrhålen beräknas de ge en god information om bergvolymens lämplighet. Borrningarna utförs inledningsvis med restriktionen att potentiell förvarsvolym inte skall genomborras.
4. Vartefter hålen borras och borrhålsundersökningar genomförs planeras borrhålen att instrumenteras för tryckregistrering. Avsikten med detta är att nyttja hydrauliska störningar från borrhningen av efterföljande hål för att registrera eventuella tryckresponser i närliggande borrhål. Därigenom kan tidig information fås om geometri och hydraulisk karaktär hos eventuella flacka sprickzoner. Målsättningen är att merparten av alla ovanjordshål skall vara instrumenterade innan underjordsborrningen påbörjas. Genom att även borrhål i SFR-anläggningen har tryckregistrering via det sk HMS-systemet kan information erhållas även om brantstående hydrauliska förbindelser.
Efter att ett antal borrhål borrats genomförs ett standardiserat undersökningsprogram omfattande geologiska, geofysiska, bergmekaniska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska borrhålsundersökningar, (se kapitel 5–8).
5. Borrning under jord, från SFR, inleds med ett långt borrhål under hela den tänkta förvarsvolymen. Därefter fastläggs layouten och efterföljande borrhål placeras med hänsyn till denna. Underjordsborrningen skall därefter successivt öka detaljeringsgraden och minska osäkerheterna så att ett utförligt underlag för projektering kan tas fram. I detta steg placeras också borrhål i framtida tunnällagen.
Även de hål som borras från SFR-anläggningen undersöks med standardiserat undersökningsprogram. Eftersom dessa borrhål befinner sig under högt vattentryck har dock undersökningsprogrammet delvis annan utformning än programmet för hål borrade från markytan. Underjordsborrhålen kommer även att användas för bergmekaniska undersökningar, se kapitel 6.
6. Eventuella kvarstående osäkerheter undersöks i en sista insats som preliminärt bedöms omfatta ca 5 st borrhål. Dessa kan behöva borras såväl ovan jord som från SFR. Beträffande borrhning ovan jord kan det bli aktuellt med kompletterande borrhning och borrhålsundersökningar från plattform placerad i havet utanför SFR (se även kapitel 4).

Data från alla undersökningar inlagras i Sicada vartefter de produceras, och utgör underlaget för de metods specifika modelleringarna, se kapitel 9.

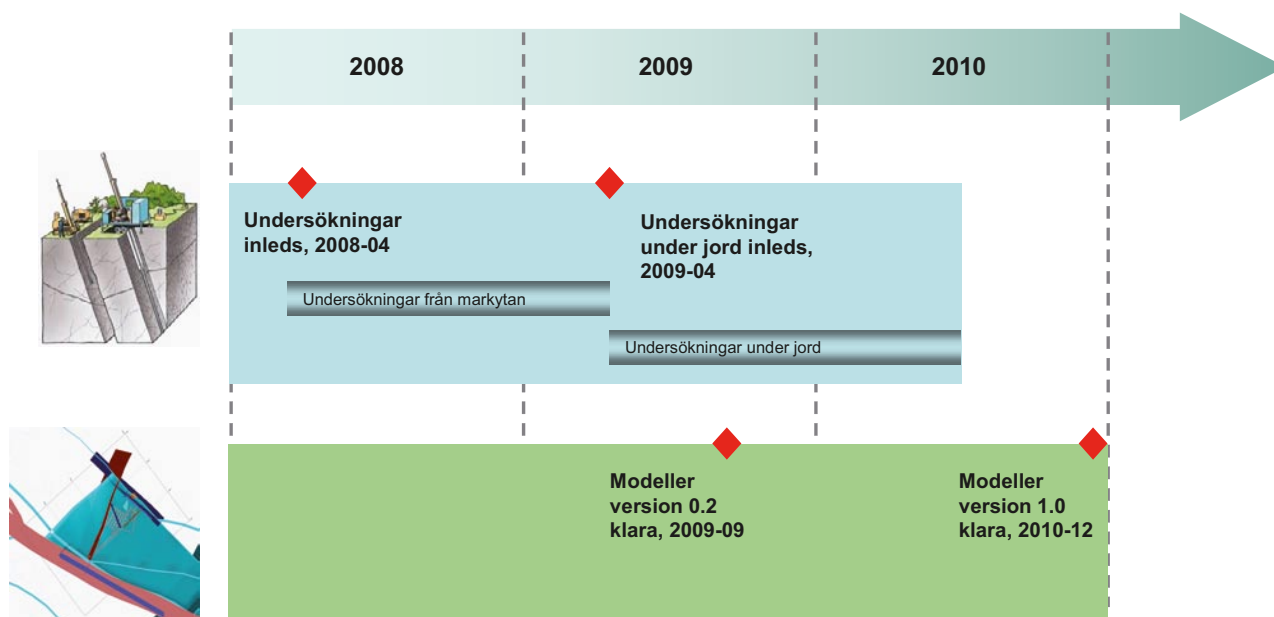
3.5.2 Tidsaspekter för undersökningar och modellering

De platsspecifika undersökningarna beräknas pågå i cirka två år, varefter ytterligare tid avsätts för färdigställande av modeller, figur 3-4. Målsättningen är att leverera slutligt underlag till projektering och säkerhetsanalys i slutet av 2010. Enligt den övergripande tidsplanen, figur 1-5, skall sedan ansökan för utbyggnad av SFR inlämnas 2013.

3.6 Undersökningarnas påverkan på befintlig anläggning

Borrprogrammet är utformat med tanke på att minimera påverkan på den befintliga SFR-anläggningen, både med avseende på säkerheten och med avseende på driftsstörningar under undersökningsskedet.

En grundläggande aspekt avseende borrhningsaktiviteterna är att potentiell förvarsvolym inte bör genomborras från markytan. Borrhålen kommer därför att riktas mot randområdena runt, och under den tänkta volymen. Borrhålen utgör artificiella dräneringsvägar i berget, och som ytterligare säkerhetsåtgärd kommer alla borrhål att i framtiden förslutas (pluggas). Avsikten i det sammanhanget är att ge borrhålet hydrauliska egenskaper i paritet med omgivande berg.



Figur 3-4. Översiktlig tidsplan för undersökningarna och framtagandet av modeller.

Borrhålen bedöms, efter pluggning, inte negativt påverka den långsiktiga säkerheten. Metodiken för pluggning av borrhål bygger på erfarenheter från det internationella Stripaprojektet samt från pluggning av borrhål i samband med bygget av SFR. Vid Äspölaboratoriet vidareutvecklar SKB idag tekniken för pluggning /Pusch och Ramqvist 2007/.

Potentiella risker med att från marknivå borra i närheten av befintlig underjordsanläggning är främst möjligheten att kortsluta/sammanbinda eventuellt dränerade strukturer med vattenförande, odränerade strukturer, och därigenom öka bergdränaget i anläggningen. Denna risk bedöms utifrån varje enskilt borrhål. I dagsläget är det endast två borrhål som från markytan kommer att borrar i omedelbar närhet av SFR, hammarborrhål HFR101 respektive kärnborrhål KFR104, se kapitel 4, figur 4-1. Planerat närmaste avstånd till SFR (byggtunneln) är ca 40 m och för det senare (även i det fallet byggtunneln) ca 80 m. Generellt kan borrhål dock avvika från anslagen riktning/lutning och därför kommer kontrollmätning att ske under borrhningen. Risken för ett ökat inläckage till SFR på grund av dessa två borrhål bedöms som liten till måttlig baserat på avståndet till byggtunneln samt på att det under byggskedet av SFR endast detekterades ett par sprickor med rinnande vatten i aktuellt tunnelavsnitt (5/750–5/800 m). Dessa ställen injekterades vilket resulterade i ett K-värde på 10^{-7} till 10^{-9} m/s /Christiansson och Bolvede 1987/. Ett ökat inläckage kan hanteras av befintligt bergdränagesystem.

Vid borrhning under jord kommer ett ökat bergdränage att vara ofrånkomligt. För att minimera och kontrollera detta monteras ventilpaket på varje borrhålspåslag för att möjliggöra avstängning av vatteninflödet under borrhningsuppehåll samt mellan mätningar. Det är svårt att på förhand uppskatta storleken på vatteninflödet. Utifrån erfarenheter från anläggningsuppförandet kan dock en grov uppskattning göras. En utförligare riskbedömning kommer att göras i den anmälan av undersökningar från befintlig anläggning som kommer att göras till SKI. Det underlaget beräknas vara klart i oktober 2008.

Borrhningsarbetena under jord planeras i nära samarbete med SFR:s driftledning i syfte att minimera störningar i deponeringsverksamheten, liksom omvänt, för att den senare inte i onödan skall fördröja och försvåra undersökningsverksamheten.

4 Borrprogram

4.1 Inledning

Borrning av hammar- och kärnborrhål utgör basen i undersökningsprogrammet. En väl fungerande, och innan borrhåstart etablerad, infrastruktur ger förutsättningar för effektiv och kvalitetssäker borrhåstart samtidigt som efterföljande mätinsatser och tekniska installationer i borrhålen underlättas. Mycket höga krav kommer att ställas på kvalitet och spårbarhet vid borrhåstartarna och efterföljande borrhålmätningar utförda både ovan och under jord. Hammar- och kärnborrhåstartningen följer i huvudsak de gällande instruktioner och metodbeskrivningar som togs fram inför PLU, se tabell 4.1. Vissa av dessa dokument måste dock uppdateras avseende undersökningar under jord.

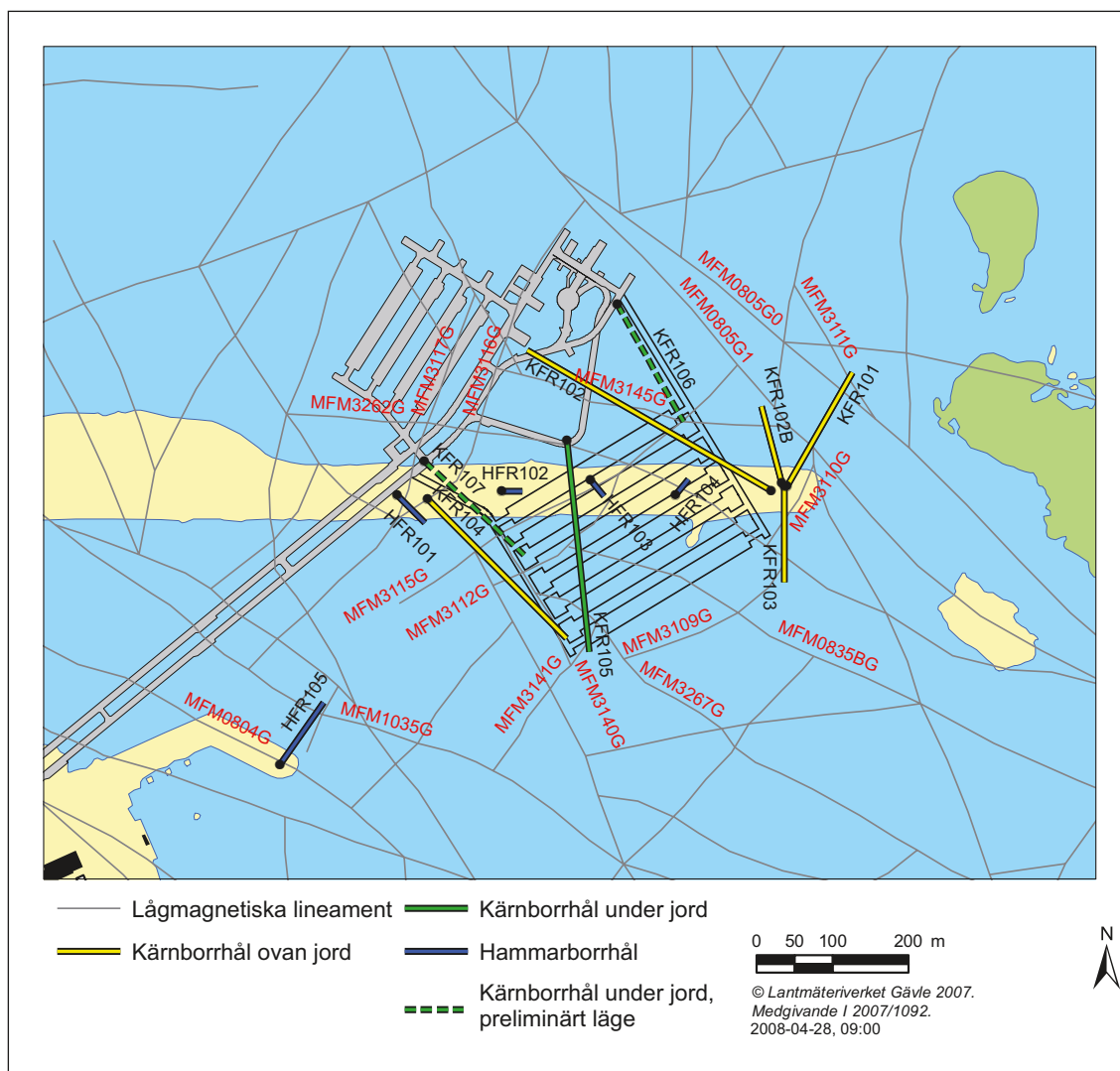
Undersökningarna för utbyggnaden av SFR inleds med hammarborrning under våren 2008 och följs av kärnborrhåstart från markytan under sommaren och hösten/vintern 2008. Under våren 2009 avslutas borrhåstartarna ovan jord varefter kärnborrhåstart under jord i den nedre byggtunneln inleds och kommer att pågå till början av 2010.

Uppbyggnaden av infrastruktur ovan jord påbörjas tidigt under våren 2008, framförallt med att bygga av transportväg och planering av markytan vid de platser på piren där borrhåstartplatserna skall anläggas, se figur 4-1. Dessa arbeten har anmälts för samråd till länsstyrelsen i Uppsala län. När de exakta borrhåstartlägena har fastställts och bygglov erhållits, gjuts cementplattor för de två borrhåstartplatserna ute på piren. Samtidigt dras el och fiber för datakommunikation till borrhåstartplatserna från SFR-hamnen. Spolvatten till borrhåstartmaskinen tas troligen från en SFR-byggnad (kranvatten) och transporteras i tank till borrhåstartplatsen, medan kylvatten till borrhåstartmaskinen hämtas från det närliggande havet, alternativt kan vatten från ett hammarborrhåstart komma att användas, detta under förutsättning att vattnet håller lämplig kvalitet.

Infrastrukturen under jord omfattas i huvudsak av framdragning av el, fiber och vatten till borrhåstartplatser i byggtunneln. Eftersom undersökningarna utförs i en kärnteknisk anläggning i drift får arbetena inte påverka anläggningens säkerhet. Denna aspekt är viktig att ta hänsyn till i planeringsarbetet, och speciella åtgärder kommer att vidtas avseende skydd mot brand, utsläpp av gaser, stora vatteninflöden mm.

Tabell 4-1. Metodbeskrivningar och metodinstruktioner för genomförande av aktiviteterna hammar- och kärnborrhåstart (interna SKB dokument).

Metodbeskrivningar	Beteckning
Metodbeskrivning för hammarborrning	SKB MD 610.003
Metodbeskrivning för kärnborrhåstart	SKB MD 620.003
Metodbeskrivning för registrering och provtagning av spolvattenparametrar samt borrhåstartkax under kärnborrhåstart	SKB MD 640.001
Metodbeskrivning för pumptest, tryckmätning och vattenprovtagning i samband med wireline-borrhåstart.	SKB MD 321.002
Krökningsmätning av hammar- och kärnborrhåstart	SKB MD 224.001
Metodinstruktioner	Beteckning
Rengöring av borrhåstartutrustning och viss markbaserad utrustning	SKB MD 600.004
Användning av kemiska produkter och material vid borrhåstart och undersökning	SKB MD 600.006
Analys av injektions- och enhållspumptester	SKB MD 320.004



Figur 4-1. Karta med borrhållsplatser för hammarborrhål, kärnborrhål ovan jord och kärnborrhål under jord samt horisontalkomponenter för de planerade borrhållen. Streckade borrhål avser pilothål för tunnlar och deras placering kan komma att ändras.

4.2 Hammarborrning

Under de inledande undersökningarna kommer hammarborrhål att borraras med två huvudsyften: dels för att generellt studera berggrundens vattengenomsläpplighet ned till cirka 150 m meters djup, dels för att undersöka frekvensen och karaktären av flacka sprickor/sprickzoner. Borrhållen kan även användas som pumpbrunnar vid interferenstester. Vid dessa borringar fås också information om bergartsfördelning, jorddjup och grundvattentryck. Hammarborrhållens lägen framgår av figur 4-1. I tabell 4-2 presenteras de planerade hammarborrhållen med avseende på beteckningar samt planerad längd och orientering samt syfte.

Tabell 4-2. Geometriska uppgifter för och syften med planerade hammarborrhål.

Borrhål	Längd (m)	Orientering (riktning/lutning, °)	Syfte
HFR101	150	135/60	Karakterisera ytberg m.a.p. eventuell förekomst av flacka vattenförande sprickor. Pumphål för att generera hydrauliska störningar.
HFR102	55	90/60	Karakterisera ytberg m.a.p. eventuell förekomst av flacka vattenförande sprickor.
HFR103	55	140/60	Karakterisera ytberg m.a.p. eventuell förekomst av flacka vattenförande sprickor.
HFR104	55	40/60	Karakterisera ytberg m.a.p. eventuell förekomst av flacka vattenförande sprickor.
HFR105	200	35/60	Karakterisera lineament MFM1035G* samt undersöka eventuell förekomst av flacka vattenförande sprickor.

* Lineamentsbeteckning från PLU, se t ex /SKB 2006/

Under PLU har metodbeskrivningen för hammarborrning tillämpats vid borring av hammarborrhål. Metodbeskrivningen har också uppdaterats under platsundersökningens gång. Samtidigt har anpassad kringutrustning tagits fram som kan återanvändas i detta projekt, se figur 4-2. En viktig skillnad jämfört med vid platsundersökningen är att det rostfria foderröret som borras genom jordlagret inte får drivas för långt ner i berggrunden, eftersom även egenskaperna hos den allra ytligaste berggrunden är viktiga att karaktärisera i SFR-projektet.

Under borringen mäts borrsjunkning och vatteninflöde för var 20 cm borring. Provtagning av borrkax utförs för varje meter, och en preliminär bergartsbedömning utförs direkt på borrplatsen. Efter avslutad borring genomförs ett basprogram för mätningar i hammarborrhål (kapitel 5–8), som till viss del liknar det program som genomförs i kärnborrhål, och som även tillämpats under PLU. Som avslutning kommer hydrogeologisk utrustning för övervakning av grundvattentryck och grundvattnets kemiska sammansättning att installeras i samtliga hammarborrhål, se kapitel 7.



Figur 4-2. Hammarborrning. I bilden till vänster har det rostfria foderröret ansatts för borras genom jordlagret. Under borrmaskinen finns en presenning och en fibermatta för att undvika jordlagerkontamination av olja mm som eventuellt kan läcka från borrmaskinen. Vid borring leds borrkax och vatten från avledarhuvudet till cyklonen där borrkax samlas upp, provtas och karteras översiktligt (bilden till höger). Borrsjunkning och flöde mäts manuellt och skrivs in i protokoll.

4.3 Kärnborrning från markytan

I undersökningsprogrammet för utbyggnaden av SFR planeras fem kärnborrhål att borrar från markytan. Preliminära lägen för dessa kärnborrhål, baserade på underlaget från förstudien, framgår av figur 4-1. I tabell 4-3 presenteras de planerade kärnborrhålen från markytan med avseende på beteckningar samt planerad längd och orientering samt syfte. Verklig längd styrs av bergförhållanden och graden av måluppfyllelse vid den planerade längden. Exempelvis kan ett uppsprucket parti i botten av borrhålet medföra att hålet förlängs. Som framgår av tabellen kommer borrhålen att luta mellan 50–60° för att övertvåra både branta och flacka sprickor och andra geologiska strukturer. För att minimera miljöpåverkan samt underlätta uppbyggnad av väderskydd, kommer flera kärnborrhål att borrar från samma borrhålsplats. Borrhålsplatserna ute på piren befinner sig i ett utsatt väderläge, speciellt under hösten/vintern, vilket medför att väderskyddet (tält) är till nytta både under borrning och under efterföljande borrhålsmätningar.

Vid kärnborrningen från markytan praktiseras i huvudsak samma metodik som tillämpats och delvis utvecklats inför och under PLU. Av de planerade fem kärnborrhålen är ett avsett att utföras som skemiprioriterat teleskopborrhål, medan resterande borrhål utförs som traditionella kärnborrhål. Syftet med teleskopborrhålet är att säkerställa att så ostörda grundvattenkemiska förhållanden som möjligt erhålls vid efterföljande grundvattenkemisk provtagning. För att få likformighet genom hela borrhålsprogrammet av tillfört spolvatten (vilket medför en viss störning av de grundvattenkemiska förhållandena) för både ovan- och underjordsborrhålen kommer kranvatten att användas. Kranvattnets kemiska sammansättning analyseras så att dess inverkan på grundvattenakvifären bättre kan bedömas. För borrningarna på piren körs vattnet ut till respektive borrhålsplats med tankvagn från SFR.

För kärntagning används sk ”triple tube teknik”, vilket ger en diameter på borrhålskärnan av ca 51 mm, dvs något mindre än vid konventionell kärntagning men med i regel mycket god kärnfångst. Uppbyggnaden av kärnröret illustreras i figur 4-3. I och med att det innersta röret, (splittröret) inte roterar, minimeras risken för skador på borrhålskärnan och urspolning av sprickmineral.

Till spolvattnet tillsätts det organiska färgspårämnet Uranin med en automatisk doserare, och med hjälp av kvävgasgenombubbling och kvävgasövertryck hålls syrehalten låg innan spolvattnet pumpas ner i borrhålet. Spol- och returvattenflöden registreras digitalt samt dokumenteras även manuellt. Vidare registreras spol- och returvattnets salthalt (elektriska konduktivitet, EC) och Uraninhalt. Om borrhålsmaskinen är utrustad med digitalt styrsystem lagras även aktivitet mot tid, borrhålsjunktastighet, matningstryck mm.

Tabell 4-3. Planerade kärnborrhål borrhållade från markytan.

Borrhål	Längd (m)	Orientering (riktning/lutning, °)	Syfte
KFR101	300	30/55	Karakterisering av zon 8 (ZFMNW0805), Beräknas även genomborra lineamentet MFM0805G1 samt eventuellt MFM3111G.
KFR102A	600	300/52	Teleskophål, fullständig hydrogeokemisk karakterisering, karakterisering av flacka zoner, NE/NNE lineament (MFM3115G' och MFM3145G') samt berget under befintlig anläggning.
KFR102B	180	345/55	B-hål för att täcka in teleskopdelen av KFR102A samt undersöka lineament MFM3145G'.
KFR103	220	180/55	Undersöka layoutens randområde i SO, passera randen på förvarsnivå, samt korsar lineament MFM3110G och MFM3262G0, samt eventuellt MFM3109G
KFR104	450	135/55	Karakterisering flacka zoner samt lineament MFM3115G, 3112G samt 3140G'. Karakterisering av rand i SSV.

* Lineamentsbeteckning från PLU, se text /SKB 2006/



Figur 4-3. Inom platsundersökningarna har trippelrör från två olika tillverkare av borrarutrustning använts, Hagby WL 76 och Corac N50/3. Uppbyggnaden av kärnröret är likartad för bägge systemen. Något av dessa system kommer att användas även vid SFR-borrningarna.

Det kemiprioriterade borrhålet KFR102A utförs med så kallad teleskopborrningsteknik, vilket bl a innebär att de översta 60–80 meterna (den s k teleskopdelen) utförs med större diameter, ca 200 mm, än resten av borrhålet som borraras med ca 76–77 mm diameter ner till 600 m längd. Teleskopdelen hammarborras, och för att erhålla kärnprover även från detta avsnitt av berggrunden (för geologisk karakterisering och för provtagning av sprickmineral) ska ett traditionellt kärnborrhål, KFR102B, borraras i omedelbar närhet av teleskopborrhålet. KFR102B hålet planeras att bli ca 180 m långt och är även avsett för undersökning av ett lineament, se tabell 4-3.

En av SKB:s s k wireline-sonder kommer att finnas på plats i Forsmark under borrhingsperioden. Med hjälp av den kan vattenprov tas så snart någon intressant vattenförande spricka påträffas under borrhningen (s k ”first-strike prov”). Dessutom kan hydraultester och tryckmätningar utföras med sonden.

Alla återstående tre kärnborrhål, KFR101, KFR103 och KFR104, utförs som s k traditionella borrhål, dvs kärnborrningsteknik tillämpas i stort sett direkt efter att jordlagren genomborrats. Också för dessa borrhål tillämpas kärntagning med ”triple-tube teknik”. Även spolvattenhanteringen är densamma som för teleskopborrhålet. Däremot kan konventionellt borrhade kärnborrhål inte som teleskopborrhål hållas under konstant hydrauliskt undertryck genom kontinuerlig pumpning under borrhningen, eftersom det inte finns utrymme i borrhålets övre del för pumputrustning. Borrkärnorna från alla kärnborrhade hål preliminärkarteras i direkt anslutning till borrhningen.

Eftersom hela hamnområdet och piren består av storblockiga sprängmassor, kommer en hammarborrmaskin att användas för foderrörsdrivning genom fyllnadsmassorna och ett kort stycke ner i berggrunden, då tekniken är effektiv i denna geologiska miljö. Arbetet kan utföras i samband med det ordinarie hammarborrprogrammet.

De borrhål som borraras nära någon av SFR-anläggningens tunnlar kan tänkas passera berggrundsavsnitt som är dränerade av tunnelsystemet, varför speciell uppmärksamhet under borrhningen kommer att ägnas åt att upptäcka sådana partier, främst genom kontroll av grundvattennivån i borrhålet.

4.4 Kärnborrning under jord

Kärnborrningen under jord utförs från den nedre byggtunneln, se figur 4-2. Programmet är planerat att omfatta ca 8 borrhål. Det första borrhålet är ca 280 m långt, två hål är 150 m långa och slås som pilotborrhål i lägena för de planerade tillfartstunnlarna till den nya delen av SFR-förvaret, medan de fem sista borrhålen, vilkas exakta lägen inte bestämts, är reserverade för mer detaljerade undersökningar, se tabell 4-4. Något eller några av dessa reservhål kan dock komma att borraras från markytan eller från plattform i havet.

Infrastrukturen under jord omfattas av framdragning av elström, fiber för datakommunikation, anordningar för spolvatten och dränage av utströmmande spol- och grundvatten (s k returvatten). Eftersom borrhålsarbetena kommer att utföras i en kärnteknisk anläggning i drift, kommer höga krav att ställas på borrhålsutformning så att undersökningarna minimerar påverkan på den befintliga anläggningen och dess driftverksamhet och den långsiktiga säkerheten. Till skillnad från borrhålsarbetena från markytan måste borrhålsmaskinen kraftförsörjas med nätel. Då det för närvarande inte finns el framdragen till byggtunneln måste detta planeras i god tid innan borrhålsstart. Därför är det nödvändigt att de exakta lägena för borrhålen under jord kan fastställas så tidigt som möjligt, eftersom tillstånd för el ofta kräver långa handläggningstider.

Även vid underjordsborrning monteras ett rostfritt foderrör i berget, nu ca 2 m långt, se figur 4-4. Vid borrhålsarbeten under jord (och under grundvattennivån) befinner sig borrhålet under hydrauliskt övertryck. Det innebär att grundvatten alltid flödar ur borrhålet om inte borrhålsmynningen sluts till. Flödet ökar dessutom allt eftersom vattenförande sprickor penetreras när borrhålsarbetena framskrider. Vid skiftbyte eller stillestånd måste vattenflödet kunna elimineras, varför man monterar en ventil på flänsen på det rostfria foderröret. För att motstå flöde och höga tryck måste ventilen och röret förankras väl i berget. Oftast används två metoder. Dels gjuts spalten mellan foderröret och borrhålsvägg igen med speciallim eller cement, dels förankras foderröret mekaniskt i bergväggen.

Att dokumentera vattenflöden in och ut ur borrhålen har hög prioritet. Om utflödet ur borrhålet inte kan pumpas ut direkt till markytan kommer det istället att hamna i pumpstationen längst nere i SFR-anläggningen. Dessa tillskott måste dokumenteras fullständigt. Om inläckage av mycket stora vattenflödena skulle inträffa vid passage av zoner med hög vattenföring kan speciella åtgärder behöva vidtas, dels för att snabbt åstadkomma avstängning av borrhålet, dels för bortdränering av läckagevattnet. Innan borrhålsarbetena under jord påbörjas kommer beredskapen för sådana situationer att utarbetas i detalj.

Tabell 4-4. Planerade kärnborrhål borrhålsarbetena under jord.

Borrhål	Längd (m)	Orientering (riktning/lutning,°)	Syfte
KFR105	280	175/5	Karakterisering av "byggvolymen" under förvaret. Korsa lineament MFM3115G, 3112G, 0835G, 3267G samt eventuellt 3141G.
KFR106	Ca 150	Bestäms utifrån layout	Undersöka tunnällägen.
KFR107	Ca 150	Bestäms utifrån layout	Undersöka tunnällägen.
KFR108–112	Bestäms senare	Bestäms senare	Detaljstudier (under eller över jord).



Figur 4-4. Borrning under jord. Det ca 2 m långa rostfria foderröret monteras i borrhålet, som är upprymt till större dimension i ett avsnitt längst ut mot tunneln, och gjuts fast (med lim eller cement). Foderröret bultas även fast i bergväggen. På flänsen fästs sedan ett ventilpaket som gör att vattenflödet från borrhålet kan stängas av helt.

4.5 Kärnborrning till havs

För närvarande finns ingen detaljerad planering för havsborrning utförd från plattform, eftersom det bedöms som relativt sannolikt att tillräcklig information kan inhämtas från borrhål utförda från piren vid SFR eller från befintlig underjordsanläggning. Programmet håller dock öppet för att havsborrning trots allt kan behöva utföras, t ex för att komplettera informationen från undersökningsområdets ränder mot söder och sydost. Havsborrning utfördes inför bygget av den befintliga SFR-anläggningen, varvid en plattform som förankrades i havsbotten användes som fundament för bormaskinsystemet liksom för efterföljande borrhålsundersökningar. Samma koncept kommer att tillämpas denna gång, om behovet skulle uppstå. I samband med havsborrning kommer även bottensedimenten att kunna mäktighetsbestämmas och provtas på den aktuella borrhålsplatsen.

Då havsborrningsutrustning är svårtillgänglig kräver sådana borrhålsinsatser lång framförhållning. Projektet kommer därför att försäkra sig om tillgänglighet av utrustning i förtid, dvs innan beslut om sådan borrning kan fattas.

5 Geologi

5.1 Inledning

Huvudsyftet med det planerade undersökningsprogrammet är att:

- geologiskt definiera och karaktärisera en tillräckligt stor bergvolym för den planerade utbyggnaden av SFR på den prioriterade platsen.

Delsyften med de detaljerade berggrundsgeologiska undersökningarna är att:

- tillhandahålla data så att en konceptuell förståelse av den kristallina berggrunden och de spröda deformationszonerna kan uppnås,
- tillhandahålla data så att konceptuella litologiska och strukturgeologiska modeller i regional och lokal skala kan upprättas, så att, i nästa steg, bergmekanik, hydrogeologi och hydrogeokemi kan åstadkomma ämnesspecifika modeller,
- tillhandahålla sådana geologiska data att ett tillförlitligt, platsspecifikt och detaljerat underlag kan utarbetas för framtagande av utbyggnadslayout. I detta ligger även att utifrån faktaunderlaget om bergarter och sprickor/sprickzoner vägleda ämnesområdet bergmekanik avseende t ex bergkvalitetsklassificering och provtagning av bergprover för hållfasthets- och andra parameterbestämningar.

Berggrundsgeologiska undersökningar ges det helt dominerande utrymmet i den geologiska delen av undersökningsprogrammet.

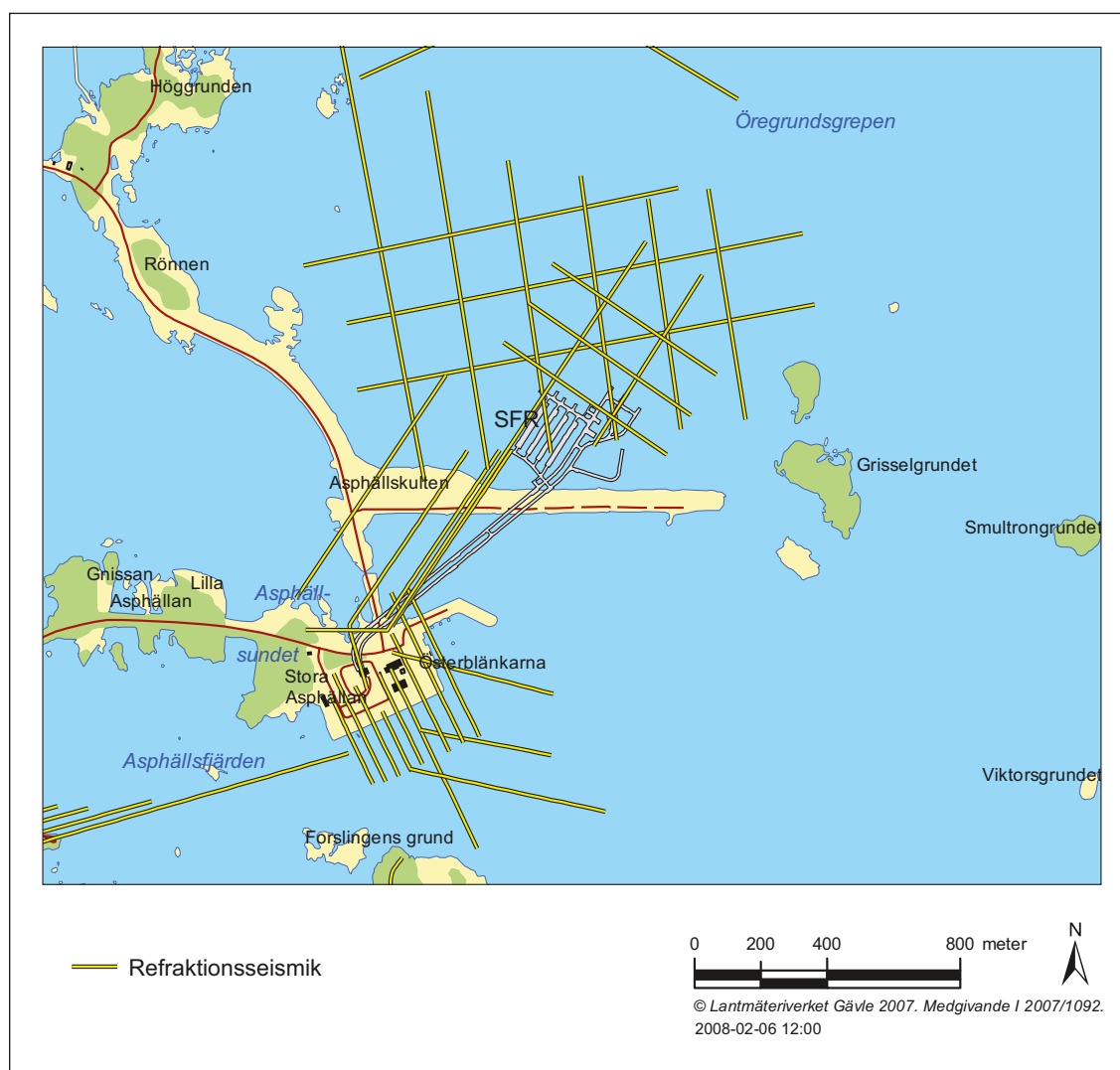
Metodik för berggrundsgeologiska undersökningar framtagen och utvecklad inför och under platsundersökningarna för slutförvar av använt kärnbränsle (PLU) kommer att tillämpas vid fältundersökningarna. De berggrundsgeologiska aktiviteterna inför utbyggnaden av SFR inleds med en förstudie, som bl a innefattade en grundlig genomgång av tidigare gjorda undersökningar och dokumentation av befintlig SFR-anläggning (se även kapitel 3 och avsnitt 5.3). Denna genomgång har resulterat i definitionen av vad som i kapitel 9 benämns modellversion 0 för geologiområdet, och som kommer att tjäna som utgångspunkt för det fortsatta modelleringsarbetet. De planerade berggrundsgeologiska undersökningarna kan indelas i två huvudmoment:

- 1) Geologiska undersökningar i anslutning till borrhningar från markytan med syfte att genomtvära lineament. Härmed avses primärt borrhning från den ost-västliga piren som löper från Asphällskulten nästan fram till Grisselgrundet, men som framgår av kapitel 4 kan även havsbaserad borrhning från plattform bli aktuell.
- 2) Geologiska undersökningar i anslutning till borrhningar under jord från den befintliga SFR-anläggningen för karaktärisering av bergmassa, sprickor och deformationszoner.

Beträffande kvartära avlagringar, dvs de havssediment som överlagrar berget på den prioriterade platsen, kommer dock systematisering och fördjupad analys av hittills utförda undersökningar (i samband med bygget av befintlig SFR-anläggning och under PLU) att utföras. Eventuellt kan även begränsade, kompletterande undersökningar komma att genomföras, exempelvis om havsborrning skulle aktualiseras, se kapitel 4. Syftet med kvartärgeologiska undersökningar/analyser är främst att bedöma sedimentens funktion i barriärhänseende i den händelse läckage av radionuklider i framtiden skulle äga rum från anläggningen. Det begränsade kvartärgeologiska programmet består dels av bedömningar och sammanställningar av tidigare utförda (främst i samband med PLU) kvartärgeologiska studier av havssedimenten i Öregrundsgrepen. I samband med eventuella havsborrningar kommer sedimentmaktighet att bestämmas och sedimentprover att tas på den eller de aktuella borrhplatserna. Det kan också bli aktuellt med geofysiska mätningar, i första hand sjöbaserade refraktionsseismiska mätningar, främst för bedömning av sedimentmaktighet över en större areal. Sådana mätningar har utförts även tidigare.

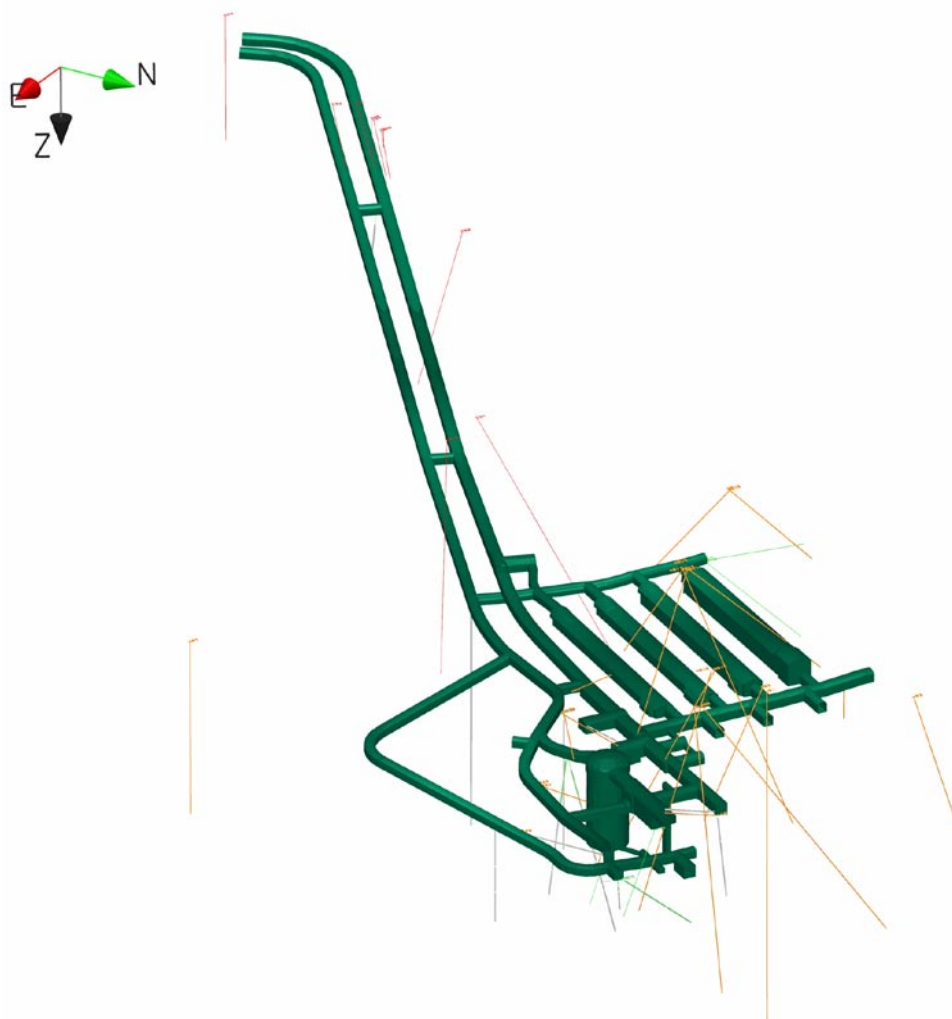
Inför etableringen av Forsmarks kärnkraftverk under 70-talet respektive SFR-anläggningen under första hälften av 80-talet utfördes sammanlagt ca 107 längdkilometer refraktionsseismik, varav 32 profiler med en total längd av sammanlagt ca 25 km är belägna i området runt SFR. En sammanställning och tolkning av tidigare utförda mätningar finns rapporterade av /Isaksson och Keisu 2005/. Profilernas lägen framgår av figur 5-1. Syftet var att bedöma ytbergets kvalitet, att detektera utgåendet i ytan av deformationszoner i berggrunden samt att bedöma sedimentmäktighet.

Generellt utgör geofysiska undersökningar ett viktigt stöd för de berggrunds- och jordartsgeologiska delarna av undersökningsprogrammet, samt i viss utsträckning för bergmekanik och projektering. I detta projekt kommer huvuddelen av de geofysiska undersökningarna att utgöras av geofysisk loggning av borrhål. De geofysiska borrhålsundersökningarna indikerar exempelvis förekomst av mineraliseringar, sprickor och sprickzoner, petrofysiska egenskaper hos bergmassan i den formation som omger borrhålet, salthaltsfördelning i borrhålsvätskan samt borrhålsgeometriska egenskaper. Resultaten används vid sk geologisk enhålstolkning av varje enskilt borrhål. I den mån mark- eller sjöbaserade geofysiska mätningar kommer att utföras kan de, som ovan nämns, t ex avse mätning av sedimentmäktighet men även t ex karaktärisering av bergkvalitet, se vidare avsnitt 5.3.

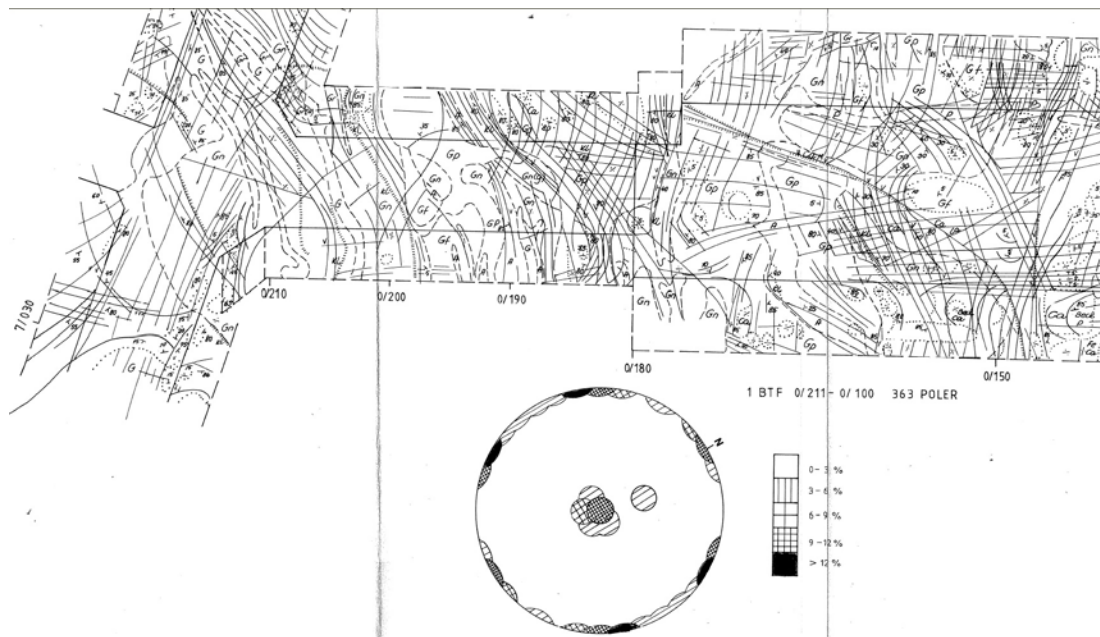


Figur 5-1. Profiler från refraktionsseismiska undersökningar utförda 1981 inför projekteringen av den befintliga SFR-anläggningen, bilden reproducerad efter /SKBF/KBS 1982/. Syftet med mätningarna var identifiering av deformationszoner och uppskattning av sedimentmäktighet.

Från platsundersökningen inför byggandet av SFR och den omfattande dokumentationen av uppförandet av anläggningen, finns ett mycket stort material i form av kärnkarteringar och detaljerad kartering av bergarter och sprickor i tunnlar, bergrum och silo. Platsundersökningar med efterföljande bergarbeten, både ovan- och under jord har bedrivits i olika omgångar mellan 1972 och 1986 /Carlsson och Christiansson 2007/. I samband med bergarbetena för anläggningen av kärnkraftverken och uppförandet av SFR, hanterades sammanlagt 1,2 miljoner kubikmeter berg, varav drygt hälften kom från undermarksaktiviteter. Dessutom borrades totalt ca 60 kärnborrhål i kraftverksområdet och vid SFR. De borrhål som borrats i anslutning till SFR visas i figur 5-2. De två kylvattentunnlar för kärnkraftverken samt SFR-anläggningen är byggda på mellan 50 och 140 meters djup under havsbotten. Den sammanlagda tunnellängden för dessa anläggningar är ca 11 km /Carlsson och Christiansson 2007/. Noggrann dokumentation av bergarter och sprickor utfördes i samband med drivningen av tunnlar och bergrum /Christiansson och Bolvede 1987/, se figur 5-3. Som nämnts definieras den samlade fakta-mängden från dessa tidigare undersökningar i kapitel 9 som modellversion 0 för ämnesområdet berggrundsgeologi, vilken består av en lokal och en regional litologisk modell samt av en lokal och regional strukturgeologisk modell.



Figur 5-2. Befintliga borrhål vid SFR borrade både ovan jord och från anläggningen.

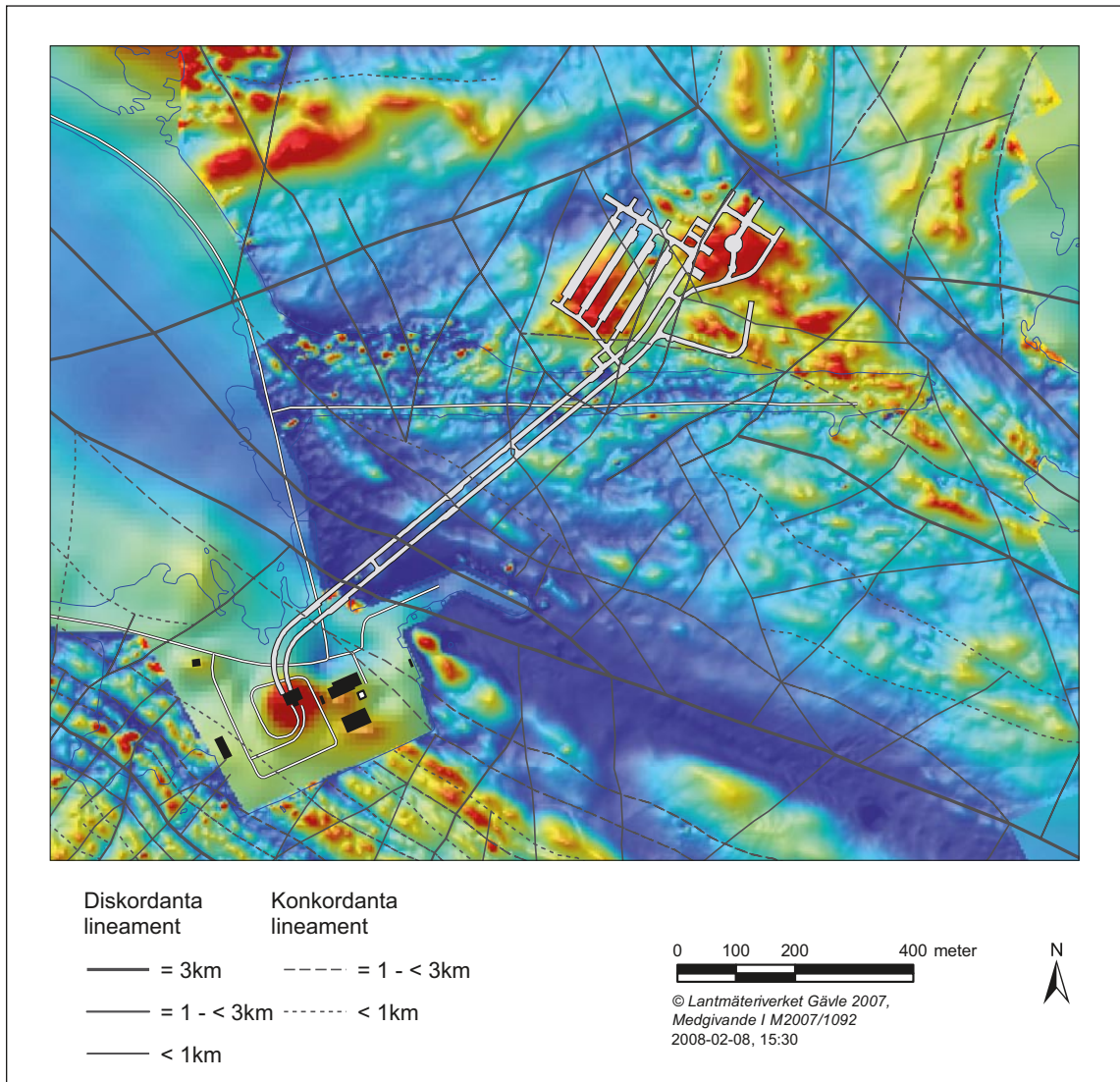


Figur 5-3. Figuren visar traditionell kartering av bergarter, sprickor och vattenföring från SFR, gjord på relationsritning. Tunneltaket syns i mitten med de utvikta tunnelväggarna på ömse sidor.

Mellan 2002 och 2007 genomförde SKB en omfattande platsundersökning (PLU) i två huvudetapper i Forsmark för lokalisering av ett slutförvar av använt kärnbränsle. Den första etappen omfattade ett 15 x 11 km stort undersökningsområde benämnt det regionala modellområdet /SKB 2001a/, inom vilket kartor av berggrunden och de lösa avlagringarna, inklusive havs-sedimenten, framställdes. Detaljerade undersökningar utfördes i ett ca 6 x 2 km stort delområde benämnt kandidatområdet, se figur 2-1. Den geologiska kartan tillsammans med undersökningar från ett antal kärn- och hammarborrhål låg till grund för regionala tredimensionella modeller av berggrunden inklusive de spröda deformationszonerna, vilket ingick i en heltäckande preliminär platsbeskrivning, benämnd version 1.2 /SKB 2005a/. På grundval av denna modell kunde ett prioriterat område (3,2 x 3,8 km) inom kandidatområdet väljas ut mot vilket de detaljerade undersökningar i den andra etappen inriktades /SKB 2005b/. En prioriterad uppgift var att öka kunskapen om de spröda deformationszonernas utsträckning och karaktär /Stephens et al. 2007/.

Under PLU utfördes flyg- och markgeofysiska mätningar över det 15 x 11 km stora undersökningsområdet. Av de undersökningsmetoder som tillämpats har de magnetometriska mätningarna varit av särskilt stor betydelse som underlag för lineamentstolkningar. I samband med en omfattande markmagnetisk mätkampanj under PLU utfördes under 2006 även detaljerade mätningar i ett 2,7 km² stort område i direkt anslutning till SFR-anläggningen /Isaksson et al. 2007/, se figur 5-4.

Förutom magnetometriska undersökningar, som ofta är en effektiv metod för detektering av brantstående deformationszoner, utnyttjades under PLU reflektionsseismisk metodik, som har betydande potential för att identifiera flacka strukturer (främst deformationszoner och bergartskontakter), speciellt på större djup (några hundra m till flera km). Reflektionsseismiska mätningar utfördes i två etapper, under 2002 respektive 2004. Mätningarna inom Etapp 2 /Juhlin och Palm 2005/ var inriktade på områden utanför kandidatområdet. Sammanlagd profillängd uppgick till 25 km under denna etapp, och mätningarna utfördes dels norr om kandidatområdet, via Forsmarksverket och SFR ända ut till Biotestsjön, dels söder och väster om kandidatområdet. Resultaten från etapp 2 är i huvudsak konsistenta med resultaten från etapp 1, och profilerna norr om Singözonen indikerar att övre krustan (ner till 1 500 m) är mycket reflektiv, och att de reflekterade strukturerna stupar flackt mot söder. Resultatet av dessa arbeten utförda under PLU kommer att utnyttjas i den strukturgeologiska modellen för

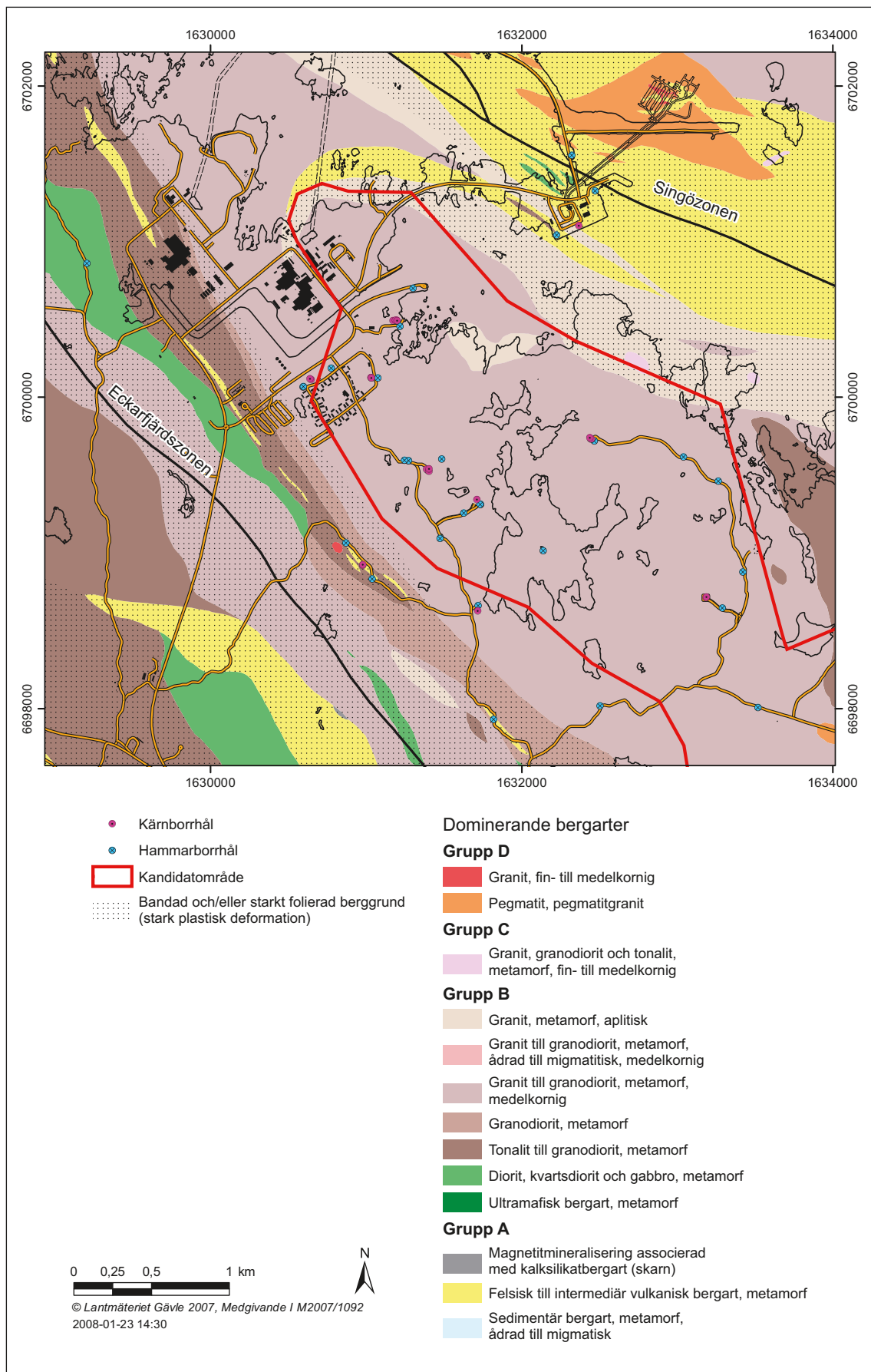


Figur 5-4. Lineamentmodell illustrerande lineament diskordanta och konkordanta till den tektoniska foliationen. Den magnetiska bakgrundskartan visar resultatet från detaljerade magnetiska mätningar från båt kompletterade med helikoptermätningar. Färgskalan går från rött till blått där rött indikerar högmagnetiska områden och blått representerar lågmagnetiska områden. Modifierad efter /Isaksson et al. 2007/.

Projekt SFR-utbyggnad-Delprojekt undersökningar och inarbetas i den första uppdateringen av modellversion 0. Den uppdaterade versionen kommer att benämnas modellversion 0.1.

Sammantaget finns stor mängd platsspecifika data och ämnesspecifika modeller från de platsundersökningar som i olika omgångar och med olika syften har genomförts i Forsmark. Därmed har en betydande konceptuell kunskap kunnat byggas upp om Forsmarksområdets geologiska utveckling avseende såväl de bergartsbildande processerna och omvandlingar som tillhör den ”varma” geologiska utvecklingen som bildandet av de spröda deformationszonerna, dvs områdets ”kalla” geologiska utveckling.

Bergvolymen vari SFR är placerat kännetecknas av starkt metamorft omvandlad och inhomogen berggrund med finkorniga felsiska bergarter tolkade som vulkaniter och pegmatitisk granit som dominerande bergarter. Omväxlande förekommer olika typer av metagranitoid samt gångbergarter med amfibolit, pegmatit och granit, se vidare figur 5-5. Alla bergarter utom pegmatit är påverkade av en typ av bergartsomvandling (metamorfof i amfibolitfacies) och visar utpräglat stark foliation och stänglighet som resultat av den starka plastiska deformation de har blivit utsatta för /Stephens et al. 2007/.



Figur 5-5. Berggrundskarta över SFR samt delar av PLU-området Från /SKB 2005a/.

Berggrundskartan i figur 5-5 baseras på de berggrundsgeologiska undersökningar som utförts fram till modellversion 2.2 i PLU-undersökningarna. Det är viktigt att hålla i minnet att geologiska kartor i havstäckta miljöer oftast inte kan baseras på samma datatäthet som kartor över landområden med blottad berggrund.

5.2 Centrala frågeställningar

Utgående från befintlig kunskap om de geologiska förhållandena i SFR-området och baserat på det övergripande målet med Projekt SFR-utbyggnad – Delprojekt undersökningar, se avsnitt 3.1, har ett antal centrala frågeställningar identifierats, som de geologiska undersökningarna bör besvara:

- *Förekomst och utsträckning av uppsprucket ytberg (t ex bankningsplan).*

Flacka och delvis subhorisontella deformationszoner har under PLU kunnat indikeras med stor tillförlitlighet med hjälp av reflektionsseismik vid större djup. Metoden är dock betydligt mindre tillförlitlig på de grunda djup, 0–150 m som här är aktuella. Eftersom det finns tydliga indikationer på förekomst av flacka och subhorisontella sprickor och sprickzoner i delar av Forsmarksområdet /Stephens et al. 2007/, föreligger ett behov av att undersöka den eventuella förekomsten av sådana i det prioriterade området för SFR-undersökningarna. På grund av det begränsade undersökningsdjupet kan alternativ till reflektionsseismiska undersökningar behöva tillämpas. Som tidigare nämnts kan registrering av hydrauliska tryckresponser i borrhål under samtidig borrhållning av närliggande borrhål tillsammans med geologiska borrhållundersökningar inklusive identifiering av sprickorienteringar vara en fruktbar metod för att upptäcka och karaktärisera subhorisontella och flackt stupande, diskreta vattenförande sprickor.

- *De tolkade lågmagnetiska lineamentens representativitet som indikatorer på deformationszoner.*

Erfarenheten från PLU är att lågmagnetiska lineament är en tillförlitlig källa för identifiering av vertikala till brant stupande spröda deformationszoner /Stephens et al. 2007/. Den magnetiska bilden ger även indikation på förekomst av bergarter med låg magnetisk susceptibilitet orsakad av oxidation av järnrika mineral /Stephens et al. 2007/. Två typer av lågmagnetiska lineament finns, dels lineament parallella med den tektoniska foliationen och som kan vara veckade, dels lineament som korsar foliationen. Tydligaste syns de lineament och spröda deformationszoner som korsar den tektoniska foliationen. Undantag finns främst i anslutning till gränsen av Forsmarks tektoniska lins, som i stort avgränsas av det tidigare nämnda kandidatområdet, se figur 2-1, där det förekommer lineament och deformationszoner som är parallella med den tektoniska foliationen, se figur 5-5.

- *Egenskaperna hos förekommande bergartskontakter, speciellt amfibolitkontakter, avseende exempelvis omvandling och vattenföring.*
- *Sprickeegenskaper hos olika bergarter påträffade inom det prioriterade området.*
- *Eventuell förekomst av lermineral i sprickor och sprickzoner och, i så fall, deras mineralogiska sammansättning, något som har bäring bl a på vattengenomsläppligheten.*

De sista tre punkterna har avgörande betydelse för den undersökta bergvolymens såväl bergmekaniska som hydrogeologiska och hydrogeokemiska egenskaper.

5.3 Undersökningsprogram

5.3.1 Geologiska undersökningsmetoder

Utförandet av de geologiska och geofysiska aktiviteterna inom undersökningsprogrammet kommer i huvudsak att följa de gällande instruktioner och metodbeskrivningar som togs fram inför och i viss utsträckning under PLU, se tabell 5-2.

Under den förstudie som bedrivits före initieringen av det undersökningsprogram som presenteras i denna rapport, har ett antal aktiviteter utförts för att kvalitetssäkra äldre data från SFR. Bland annat har en geologisk omkartering av elva befintliga borrhärlor från SFR utförts. Representativa borrhärlor som korsar deterministiskt modellerade sprickzoner i den befintliga modellen för SFR (modellversion 0) har valts ut. Arbetet har innefattat jämförelse av data från den ursprungliga karteringen inklusive resultat från borrhålsgeofysisk loggning (i den mån sådan finns) och data från den nya karteringen. Detta arbete har gjorts för att underlätta tolkningen av data från äldre karteringar av övriga borrhål. En anpassad geologisk enhålstolkning utförs för varje enskilt borrhål. Vidare har geologisk kartering av nedre byggtunneln i SFR utförts, vilken endast bitvis är täckt med betong. Syftet med detta är att samla in data rörande sprickspårens utbredning, orientering, gruppbildning och avslutning, samt att harmonisera karteringsmetodiken med tidigare tunnelkarteringar.

Arbetet som utförts under förstudien kommer i första hand att ligga till grund för geometrisk modellering av spröda deformationszoner, men även vara till god hjälp för den geometriska modelleringen av bergenheter (se även kapitel 9). Efter förstudien initieras borrhälsprogrammet. Nedan sammanfattas de viktigaste geologiska undersökningar som är planerade att genomföras i de nya borrhålen.

Tabell 5-2. Metodbeskrivningar och styrande dokument för genomförande av geologiska och geofysiska undersökningar (interna SKB-dokument).

Metodbeskrivningar	Beteckning
Berggrundskartering	SKB MD 132.001
Boremap-kartering	SKB MD 143.006
Sprickmineralanalys	SKB MD 144.001
Bergartsanalyser	SKB MD 160.001
Determining density and porosity of intact rock	SKB MD 160.002e
Geofysisk borrhålsloggning	SKB MD 221.002
Tolkning av geofysiska borrhålsdata	SKB MD 221.003
TV-loggning med BIPS	SKB MD 222.006
Mätning av bergarters petrofysiska egenskaper	SKB MD 230.001
Refraktionsseismik	SKB MD 242.001
Markradar	SKB MD 251.003
Borrhålsradar	SKB MD 252.020
Geologisk enhålstolkning	SKB MD 810.003
Metodinstruktioner	
Inmätning och avvägning av objekt	SKB MD 110.001
Regler för bergarters benämningar vid platsundersökningen i Forsmark	SKB MD 132.005
Hantering och provtagning av borrhärlor	SKB MD 143.007
Nomenklatur vid Boremap-kartering	SKB MD 143.008
Längdkalibrering vid undersökningar i kärnborrhål	SKB MD 620.010

5.3.2 Borrhålskartering

Borrhålskartering utförs som så kallad Boremapkartering, där borrhålskärnan, alternativt borrhålskax för hammarborrhål, karteras tillsammans med videobilder av borrhålsväggen, så kallade BIPS-bilder. Vid Boremapkarteringen dokumenteras framför allt bergarternas fördelning, deformations- och omvandlingsgrad samt orientering och karaktär hos öppna och läkta sprickor. Denna aktivitet utgör den mest tids- och resurskrävande aktiviteten inom det berggrundsgeologiska programmet.

5.3.3 Geologisk enhålstolkning

Geologisk enhålstolkning ska utföras av varje enskilt borrhål. Underlag till enhålstolkningen är data från kärnkartering (borrhålskax i samband med hammarborrhål), geofysisk borrhålsloggning (inklusive BIPS- och radarloggning) och tolkning. Syftet med enhålstolkningen är att genom integrering av befintliga mätdata fastställa läget i djupled av litologiska huvudenheter och deformationszoner, se figur 5-6. Enhålstolkningarna bildar underlag för den tredimensionella modelleringen av bergenheter och deformationszoner. De geologiska enhålstolkningarna kommer att utföras med i stort sett samma metodik som användes under PLU. En förändring blir dock att integrering med resultat från hydrogeologiska undersökningar görs efter att den geologiska enhålstolkningen är utförd.

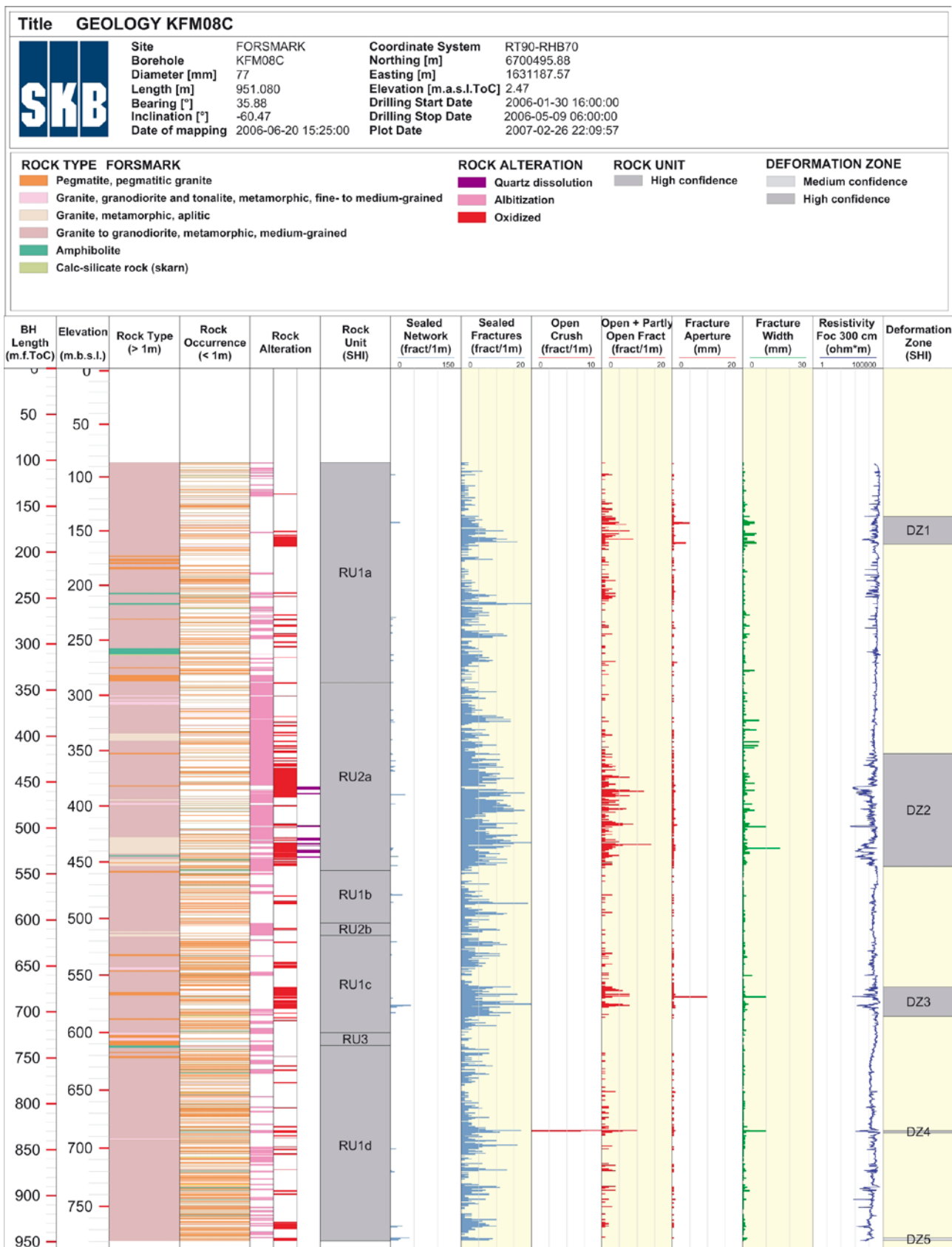
5.3.4 Geofysiska undersökningar

I alla hammar- och kärnborrhål utförs som standard TV-loggning med BIPS-systemet samt geofysisk borrhålsloggning. Tabell 5-3 sammanfattar de geofysiska metoder som planeras utföras i alla borrhål.

De geofysiska borrhålsloggningarna ligger till grund för en geofysisk tolkning som inkluderar filtrering och processering av mätdata. Den geofysiska tolkningen levererar bland annat uppskattade sprickfrekvenser av vattenförande sprickor och generaliserade bergartsdensitetsloggar, och utgör ett underlag till den geologiska enhålstolkningen.

Tabell 5-3. Planerade geofysiska loggningsmetoder i borrhål.

Metod	Kommentarer
BIPS	Videoinspelning av borrhålsväggen med BIPS och bearbetning av denna information tillsammans med kartering av borrhålskärnan är en av de viktigaste datakällorna för geologisk borrhålsdokumentation – dvs sprickorientering och bergartsbestämning. Metoden är även ett viktigt verktyg för dokumentation av borrhålsstatus avseende instabiliteter. BIPS-sonden består av en digital TV-kamera som filmar borrhålsväggen under långsam sänkning av kameran i borrhålet.
Caliper	Caliper1D (mekanisk arm) eller Caliper mean (medelvärde av Caliper3D data från Akustisk televiewer) ger borrhålets diameter.
Radiometriska metoder	Radiometriska metoder som naturlig gamma, gamma-gamma och neutron-neutron ger information om bergartsvariationer. Gamma-gamma sonden ger densiteten och neutron-sonden ger information om porositeten. Naturlig gamma är en litologisk logg som även används som hjälpmedel för längdjustering av samtliga geofysiska borrhålsloggningar.
Elektriska metoder	Elektriska loggningsmetoder ger främst information om förekomsten av öppna sprickor och sprickzoner samt borrhålsvattnets salthalt.
Magnetiska metoder	Magnetisk susceptibilitet ger information om bergartsvariationer och omvandling. Magnetisk susceptibilitet registrerar magnetiserbarheten i berget. Framförallt förekomsten av magnetit påverkar susceptibiliteten.
Temperatur	Temperaturmätningar ger information om temperaturfördelningen i berget och vattenflöden i sprickzoner.
Acoustic Televiewer	Acoustic televiewer ger information om borrhålets eventuella ovalitet på grund av borrhåls- tekniska skäl, samt om "breakouts" och andra spännings- och/eller strukturrelaterade utfall från borrhålsväggen. Metoden fungerar även som ett komplement till BIPS när det gäller sprickorientering i borrhål där BIPS-bilden är påverkad av smuts eller utfällningar.



Figur 5-6. Exempel från PLU på geologisk enhålstolkning (från teleskopborrhålet KFM08C) med utvalda parametrar och resultat.

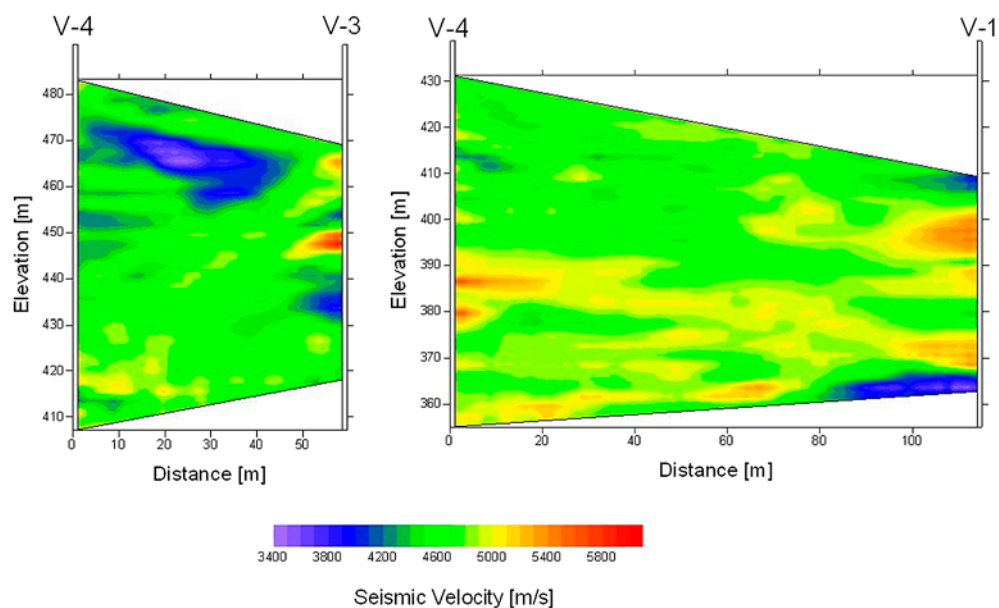
Markradarmätningar är planerade att utföras i tunneltak i syftet att identifiera eventuellt förekommande flackt stupande strukturer ca 5–15 m ovanför befintliga tunnlar. Mätningar på tunnelgolv är inte möjliga att utföra på grund av förekomst av saltvatten i fyllnadsmaterial vilket hindrar penetration av radarsignalen. I tunneltak däremot kan användbara resultat sannolikt förväntas.

Om behov visar sig föreligga kan andra geofysiska metoder bli aktuella. Dessa metoder är i första hand:

Borrhålsradar. Radarvågen reflekteras mot ytor med avvikande elektriska egenskaper, t ex sprickzoner och bergartskontakter och borrhålsradar med dipolantenn ger därmed information om större strukturer som finns i närheten av ett borrhål, eller penetreras av detta, samt deras lutning i förhållande till borrhålsaxeln. Borrhålsradar med riktantenn används för att beräkna strukturers absoluta orientering, dvs strykning och stupning. Metodens tillämpbarhet beror på saliniteten i borrhålsvätskan och i borrhålets närhet. Låg salthalt är generellt gynnsammare än hög salthalt.

Refraktionsseismiska mätningar i tunnlar kan bli aktuella för karakterisering av bergkvalitet och bergmekaniska parametrar (seismisk hastighet). Beslut om eventuellt utförande av refraktionsseismik fattas senare.

Seismisk tomografi med direktvågor är en dokumenterat användbar metod i lösa avlagringar och sedimentära bergarter. Tester i kristallint berg har visat goda resultat på borrhålsavstånd på upp till ca 120 meter. Figur 5-7 visar ett exempel på resultat (en två-dimensionell hastighetsmodell) för området mellan två borrhål.



Figur 5-7. Exempel på seismisk direktvågstomografi mellan borrhål. Resultaten kommer från tester i kristallint berg. Blå färg indikerar en subhorisontell låghastighetszon. Röda strimmor nära borrhål V-3 är artefakter.

5.3.5 Övriga undersökningar

Den detaljmagnetiska mätningen som utförts över området har tolkats med profil- och punktavstånd i 10 respektive 5 m /Isaksson et al. 2007/, se figur 5-4. Samtolkning av magnetiska data och observationer i tunnlar kommer att utföras i en mer detaljerad skala, där magnetiska data bland annat jämförs med kända observationer på deformationszoner och olika bergartsled. Tolkningen kommer att utföras integrerat med GIS/bildanalys teknik för bästa utvärdering av data.

Den stora mängden resultat och tolkningar från refraktionsseismiska mätningar som utfördes i samband med byggandet av SFR och kärnkraftverken har digitaliserats och lagrats in i Sicada under PLU-arbetena. Till detta kommer ett stort antal äldre grundläggande rapporter med redovisning i vertikalsektioner. Den digitaliserade datamängden omfattar bl a mätprofilernas läge i RT90 (X,Y,Z), mäktighet av lösa avlagringar, seismisk hastighet i lösa avlagringar, bergytans läge, seismisk hastighet i berg inklusive svaghetszoner samt även, i vissa fall, utbredning och mäktighet av rösberg. En sammanställning och utvärdering av befintliga refraktionsseismiska data kan ge värdefull information om förekomst och utbredning av potentiella brantstående spröda deformationszoner som innehåller öppna sprickor och områden med rösberg, bergytans topografi samt sedimenttjocklek. Seismiska data kommer att samtolkas med den befintliga magnetiska lineamentmodellen för att därigenom ytterligare stärka upp lägesbestämning på, och utbredning av, potentiella spröda deformationszoner i berget.

För att få information om regionala och lokala större sprickzoners karaktär och egenskaper, samt om sedimenttjocklek, kan det även bli aktuellt att utföra refraktionsseismik från is eller båt. Beslut om detta fattas senare.

6 Bergmekanik

6.1 Inledning

Den existerande, stabila SFR-anläggningen är väl dokumenterad och PLU-data motsäger inte tidigare kunskap från SFR. Kunskapsläget om de bergmekaniska förhållandena kan därför bedömas som gott. Även om det prioriterade området ligger i direkt anslutning till befintlig den SFR-anläggningen kan dock inte gradskillnader i geologiska och bergmekaniska egenskaper uteslutas. Med vägledning av de geologiska undersökningsresultaten kommer därför, i samråd med Delprojekt projektering, ett bergmekaniskt undersökningsprogram att utföras. Detta program specificeras i sina detaljer först efter att det föreligger geologisk information från den undersökta bergvolymen. Programmet förväntas dock få en standardiserad utformning, med inriktning på hållfasthets- och deformationsegenskaper hos dominerande bergarter, bergmekaniska sprickegenskaper samt bergmasseklassificering utifrån bergmekanisk enhålstolkning av borrhål.

6.2 Centrala frågeställningar

De centrala frågeställningar som de bergmekaniska undersökningarna bör besvara är:

- *Hållfasthets- och deformationsegenskaper hos de dominerande bergarterna inom det prioriterade området, samt om dessa skiljer sig jämfört med befintlig SFR-anläggning.*
- *Bergmekaniska sprickegenskaper inom det prioriterade området jämfört med befintlig SFR-anläggning.*
- *Bergmassekvalitet i det prioriterade området utifrån bergmekanisk enhålstolkning av borrhål.*
- *Bergspänningsförhållandena inom det prioriterade området.*
- *Förutsättningarna för stabila bergsalar inom det prioriterade området*

Bergsalarna för den nya anläggningen kan komma att få sin längdutsträckning i något modifierad riktning jämfört med bergsalarna i den befintliga anläggningen, se figur 2-3 och figur 4-2, och därmed även en modifierad riktning i förhållande till rådande spänningsfält. Dessutom kan tunnelgeometrin komma att avvika från den tidigare applicerade. Båda dessa förhållanden medför att de stabilitetsberäkningar som kommer att föregå tunneldrivning inom det prioriterade området har att utgå från andra premisser än som var rådande för den befintliga anläggningen.

6.3 Undersökningsprogram

Det bergmekaniska undersökningsprogrammet kommer, som nämnts, att utformas först i ett senare skede. Det kan dock förutsättas att programmet kommer att ha tre huvudkomponenter. Dessa är:

- 1) *Laboratorieundersökningar av borrhävar för bestämning av hållfasthets- och deformationsegenskaper.*

Bergartsprover representativa för de dominerande bergarterna, men eventuellt även underordnade bergarter (om sådan upptar en viss minimivolym av de undersökta borrhävarna) kommer att väljas ut för laboratorieprovningar. I första hand bestäms den enaxiella tryck- och draghållfastheten men eventuellt även treaxiell tryck- och draghållfasthet. Utifrån resultaten av tryck- och dragtesterna bestäms även deformationsparametrarna Youngs modul och Poissons tal.

- 2) *Laboratorieundersökningar av borrhävar för bestämning av bergmekaniska sprickegenskaper.*

De tester som i detta sammanhang kan vara aktuella är tilt-tester för bestämning av sprickors friktionsegenskaper samt direkta skjuvtester för bestämning av normalstyvhet och skjuvmotstånd. Skjuvtester kan utföras även på läkta sprickor.

- 3) *Bergmekanisk Enhålstolkning.*

Utifrån bergmekanisk enhålstolkning av de kärnborrade undersökningsborrhävarna kan bergmasseklassificering enligt något av systemen Q, RQD eller RMR utföras. Vidare kan exempelvis deformationsmodul och den kompetenta bergmassans ekvivalenta kohesion och friktionsvinkel bestämmas.

- 4) *Bergspänningsmätningar.*

Sent i undersökningsskedet, när utbyggnadsalternativ fastställts, kommer det tredimensionella spänningsförhållandet i bergmassan att uppmätas genom att bergspänningsmätning med överborrningsmetoden utförs från något eller några av de undersökningsborrhävar som borrar från byggtunneln.

För besvarande av eventuella speciella bergmekaniska frågeställningar finns flera andra undersökningsmetoder att tillgå.

7 Hydrogeologi

7.1 Inledning

Syftet med det hydrogeologiska programmet är i korthet att:

- ta fram dataunderlag så att en hydrogeologisk beskrivning (modell) i lokal och regional skala kan upprättas. Beskrivningen i lokal skala ska vara tillräckligt detaljerad för bedömning av platsens lämplighet för försvarsutbyggnad sett ur såväl projekteringen som säkerhetsanalysens behov. Den regionala modellen är nödvändig bl a för identifiering av den lokala modellens randvillkor liksom för den övergripande förståelsen av samspelet mellan det regionala och lokala strömningsmönstret och därmed det utbyggda förvarets omgivningspåverkan och långsiktiga säkerhet.

Detta innebär bland annat:

- att bergvolymens vattengenomsläpplighet i bergmatris och deformationszoner bestäms med tillräcklig datatäthet och mätnoggrannhet,
- att fördelningen mellan hydrauliskt konduktiva och icke konduktiva sprickor kan bestämmas med tillräcklig upplösning för att en hydrogeologisk deterministisk spricknätverksmodell (DFN-modell) ska kunna upprättas,
- att de hydrauliska förbindelserna inom det prioriterade undersökningsområdet, mellan detta och berget som omger den befintliga SFR-anläggningen liksom förbindelserna med närmast omgivande bergvolym kartläggs med hjälp av tryckregistrering vid interferenstester (t ex vid pumpning eller vatteninjektion, även i samband med borrhning).

Det hydrogeologiska dataunderlaget från Forsmarksområdet i stort är i dagsläget omfattande. Erfarenheter från förundersökningen och byggnationen av den befintliga SFR-anläggningen har resulterat i en god förståelse av de hydrauliska förhållandena i anslutning till SFR-anläggningen. Till detta har den hydrogeologiska delen av det bergkontrollprogram som upprättades vid anläggningens driftstart bidragit. Programmet, som består av tryckregistrering i 12 borrhål i SFR-anläggningen samt dokumentering av inläckage till bergrum och tunnlar, har resulterat i tidsserier som idag omfattar en period på ca 20 år. Dessa utgör ett mycket värdefullt dataunderlag för analys av bl a transienteffekter som en följd av utbrytningen av stora bergvolym, av hydrauliska responser till följd av dräneringar i olika delar av anläggningen etc. Denna kunskap från det lokala SFR-området kompletteras väl av resultat från Platsundersökning Forsmark (PLU), som bidragit med data som ökar förståelse av de hydrogeologiska förhållandena i ett större perspektiv.

Såväl de tidigare undersökningarna inför och under kraftverksbygget och etableringen av SFR-anläggningen som senare under PLU har i olika delar av Forsmarksområdet identifierat flackt stupande, ibland nästan horisontella avlastningssprickor, s k bankningsplan, i ytliga delar av berget, ner till ca 40 m djup. Dessa sprickor har ofta stor horisontell utsträckning och hög hydraulisk transmissivitet. I en del fall kan dock sprickorna vara helt eller delvis fyllda av sediment, vilket försämrar vattenledningsförmågan. Exempel på dessa sprickor illustreras i figur 7-1 som visar den norra sidan av kylvattenkanalen som leder från Östersjön in till Forsmarks kärnkraftverk.



Figur 7-1. Norra sidan av kylvattenkanalen in till Forsmarks kraftverk. Ytliga bankningsplan med storhorisontell utsträckning syns tydligt i bergskärningen. Bilden är reproducerad från /Carlsson och Christiansson 2007/. Foto: G Hansson.

Även ytligt belägna, flackt stupande vattenförande deformationszoner har identifierats inom delar av PLU-undersökningarnas kandidat område /Stephens et al. 2007/. En subhorisontell zon, Zon H2, har också identifierats under SFR, se figur 7-2 (jfr kapitel 3 och 5). Pump tester utförda inom ramen för PLU visar att hydraulisk kontakt i ytberget kan förekomma över kilometerlånga sträckor /Gokall-Norman och Ludvigson 2007/. Sannolikt är det dock i första hand förekomsten av de ytliga bankningsplanen i kombination med flacka deformationszoner som återspeglas i de hydrauliska responserna över stora avstånd.

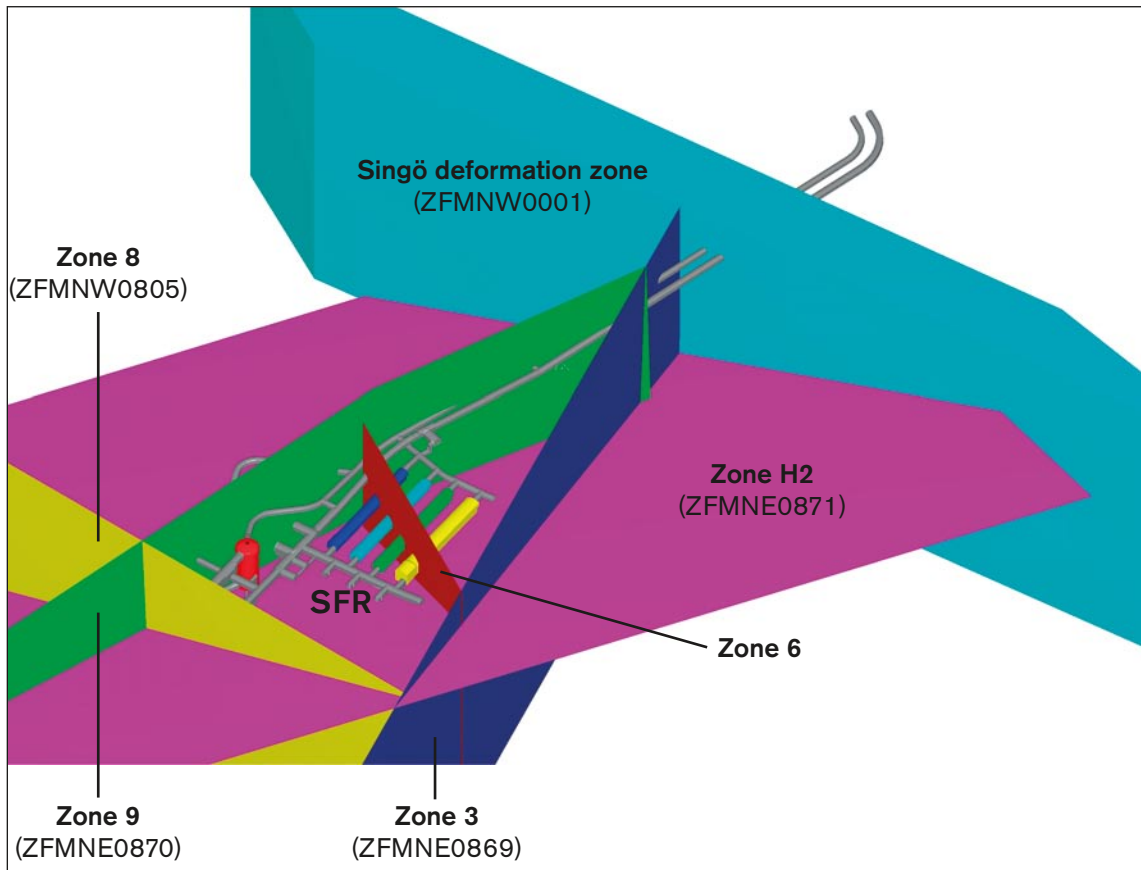
I området runt SFR förekommer även ett antal brantstående deformationszoner vilkas hydrauliska egenskaper har undersökts med enhåls- och interferenstester i ett stort antal borrhål i samband med förundersökningen och byggnationen av SFR. Transmissiviteten för zonerna varierar mellan 10^{-8} och 10^{-5} m²/s /Axelsson och Hansen 1997/. Interferens- och tryckuppbyggnads- jämte vatteninjektions- tester ligger till grund för beräknade hydrauliska egenskaper för såväl bergmatris som sprickzoner inom SFR-området.

Den i dagsläget gällande lokala hydrogeologiska modellen av SFR /Holmén och Stigsson 2001b/, som i föreliggande dokument benämns modellversion 0, baseras på en av /Axelsson och Hansen 1997/ uppdaterad strukturgeologisk modell som utgick från en ursprunglig strukturgeologisk modell utarbetad av /Carlsson et al. 1986, Christiansson 1986/. Modellen omfattar en handfull deformationszoner i lokalområdet runt SFR, se figur 7-2.

7.2 Centrala frågeställningar

Centrala frågeställningar som undersökningarna bör besvara är:

- *Utsträckning av och hydrauliska egenskaper hos eventuella flackt stupande avlastnings-sprickor och/eller deformationszoner inom prioriterad bergvolym.*
- *Hydrauliska egenskaper hos de tolkade lågmagnetiska lineamentet.*
- *Bergmassans hydrauliska egenskaper inom prioriterat område och egenskapernas variabilitet beroende på bergartsskillnader.*
- *Omfattningen och karaktären av hydrauliska förbindelser inom prioriterat område samt mellan detta och omgivande berg.*



Figur 7-2. *Strukturgeologisk modell av SFR och de deformationszoner som omger anläggningen /Holmén och Stigsson 2001/. Modellen har ett djupgående på 490 m från nivå 0 enligt RHB70, men zonernas vertikala utsträckning i figuren illustreras endast till en nivå strax ovan SFR-förvaret.*

7.3 Undersökningsprogram

7.3.1 Hydrogeologiska undersökningsmetoder

Hydrogeologiska undersökningar kommer att utföras i hammar- och kärnborrhål från markytan och från kärnborrhål under jord. Syftet med dessa är dels att beskriva bergmatrisens och eventuella deformationszoners hydrauliska egenskaper, men även att undersöka grundvattnets tryck- och salthaltsfördelning. Resultaten från undersökningarna ska till exempel också fungera som underlag till kalibrering av numeriska beräkningsmodeller.

I tabell 7-1 ges en översikt över de hydrogeologiska undersökningar som är planerade att genomföras i respektive borrhål.

Undersökningar och metodik följer i huvudsak de gällande instruktioner och metodbeskrivningar som togs fram inför och i viss mån under PLU, se tabell 7-2.

Tabell 7-1. Borrhålsöversikt med planerade hydrogeologiska undersökningar. De olika undersökningsmetoderna kommenteras i texten nedan.

Borrhål	WL-test ¹	HTHB-test ²	Diff.logg ³	Injektionstester	Monitering
HFR101		X			X ²
HFR102		X			X
HFR103		X			Enklare
HFR104		X			Enklare
HFR105		X			X
KFR101	X		X ⁴	X ⁴	X
KFR102A	X		X ⁴	X ⁴	X
KFR102B	X		X ⁴	X ⁴	X
KFR103	X		X ⁴	X ⁴	X
KFR104	X		X ⁴	X ⁴	X
KFR105			X ⁴	X ⁴	X
KFR106			X ⁴	X ⁴	X
KFR107			X ⁴	X ⁴	X
KFR-reserv			?	?	?

¹) WL-test = wireline test, ett test för bestämning av hydraulisk konduktivitet och grundvattenstryck som utförs under borrning.

²) HTHB-test = Hydraulisk Test i HammarBorrhål, en flödesloggningsmetod för hammarborrhål.

³) Differensflödesloggning = en flödesloggningsmetod för kärnborrhål som utförs såväl under naturliga flödesförhållanden som under pumpning.

⁴) Hålet kommer att karakteriseras med differensflödesloggning eller injektionstester. Borrhål under jord undersöks med differensflödesloggning eller tryckuppbyggnadstester.

⁵) HFR101 är avsett som pumpbrunn för att generera hydrauliska störningar och kommer eventuellt att instrumenteras i ett sent skede.

Tabell 7-2. Metodbeskrivningar och styrande dokument för genomförande av hydrogeologiska undersökningar (interna SKB dokument).

Metodbeskrivning	Beteckning
Vattenprovtagning, pumpstest och tryckmätning i samband med wireline-borrning	SKB MD 321.002
Hydrauliska enhåls-pumptester	SKB MD 321.003
Flödesloggning i hammarborrhål	SKB MD 322.009
Difference flow logging	SKB MD 322.010e
Hydrauliska injektionstester	SKB MD 323.001
Hydrauliska injektionstester – engelsk version	SKB MD 323.001e
Grundvattenmonitering	SKB MD 360.002
Tryckuppbyggnadstester i borrhål under jord	Under produktion
Metodinstruktion	Beteckning
Analys av injektions- och enhåls-pumptester	SKB MD 320.004

Nedan kommenteras de viktigaste planerade undersökningarna som kommer att genomföras i de nya borrhålen.

7.3.2 Metoder i samband med borrhning

Vid hammarborrning skattas regelbundet flödet ur borrhålet, returvattnets färg bedöms och grundvattnets elektriska konduktivitet (EC) mäts (se även avsnitt 4.2). Det sker även kontinuerlig dokumentation av borrsjunkningshastighet varigenom förekomsten av sprickor kan indikeras. Grundvattennivån kontrolleras vid borrstopp.

Under kärnborrning kommer tester med Wireline sond att utföras (SKB MD 321.004), se avsnitt 4.2. Detta planeras att ske i vid ett par tillfällen per borrhål i samband med genomborrning av vattenförande strukturer. Det primära syftet är vattenprovtagning i det senast genomborrade avsnittet för hydrogeokemiska analyser ("first strike"-prover). I samband med denna provtagning genomförs emellertid också en hydraulisk test med främsta syfte att bestämma provtagningssektionens vattenledande förmåga och i andra hand dess absoluttryck.

7.3.3 Flödesloggning

Flödesloggning används främst för att bestämma hydrauliska strukturers position och approximativa hydrauliska egenskaper. I hammarborrhål planeras SKB:s HTHB-utrustning (SKB MD 326.001–030, Hydro Tester i HammarBorrhål) att användas. I samband med flödesloggningen tas även vattenprov för hydrokemisk analys. I kärnborrhål planeras differensflödesloggning, PFL-loggning (Posiva Flow Log, se SKB MD 322.010e), att tillämpas. Metoden är utvecklad av Posiva, Finland. Vid båda flödesloggningssyftena pumpas borrhålet under loggningen, så att inströmning mot borrhålet åstadkoms. Vid differensflödesloggning utförs även en loggning under ostörda, icke pumpade, förhållanden. Detta ger möjligheten att bestämma transmissivitet och ostört tryck i testsektionen. Utvärderingsmetoden baseras på ett antagande om stationära förhållanden. Vid såväl differensflödesloggning som flödesloggning med HTHB mäts även vattnets temperatur och elektriska konduktivitet kontinuerligt.

7.3.4 Hydrauliska injektionstester

Hydrauliska injektionstester utförs i mätsektioner som avgränsas av två trycksatta gummi-manschetter. Testerna utförs i förutbestämda intervall längs ett borrhål. Sektionslängden kan i princip varieras valfritt men är normalt 5 eller 20 meter. Testerna utförs i allmänhet transient och utvärderas med modeller som tar hänsyn till ett transient förlopp. Injektionstester ger en möjlighet att utvärdera transmissivitetsfördelning längs borrhålet, flödesdimension i varje testsektion och den hydrauliska resistansen närmast borrhålet (vanligen kallat "skin" i den hydrogeologiska litteraturen). SKB:s PSS-utrustning (Pipe String System, SKB MD 323.001) planeras att användas i de fall injektionstester är aktuellt.

7.3.5 Hydrauliska interferenstester

Hydrauliska interferenstester ger information om hydrauliska strukturer och randvillkor. Testerna är också värdefulla för kalibrering av numeriska beräkningsmodeller.

Interferenspumptest utförs genom att en borrhålssektion avgränsad av två manschetter eller hela borrhålet pumpas och tryckresponser registreras i omgivande borrhålssektioner samt i den pumpade sektionen. Testerna utförs när ett flertal av omgivande borrhål manschetterats och testerna ger information om större strukturers egenskaper (framförallt den struktur som den pumpade sektionen omfattar) och hydrauliska förbindelser mellan större konduktiva sprickor och deformationszoner. Resultaten är viktiga för att i samråd med ämnesområdet geologi bygga upp den platspecifika strukturmodellen.

Antalet interferenstester och deras utformning bestäms under undersökningarnas gång och styrs av de resultat som successivt erhålls.

7.3.6 Hydrogeologisk monitoring

Hydrogeologisk monitoring ger underlag för beskrivning av grundvattnets tryck- och flödesfördelning i den undersökta bergvolymen. Syftet med korttidsmonitoring är främst att mäta tryckresponser i samband med pump- och interferenstester. Med monitoringssystemet kan även andra hydrauliska störningar från t ex borrhningen registreras, vilket i vissa fall kan ge ett kompletterande underlag för den hydrogeologiska modellen. Syftet med långtidsmonitoring, vilken förväntas att utföras även efter avslutade förundersökningar, är att skapa tidsserier för att öka kunskapen om de hydrauliska förhållandena i ett längre tidsperspektiv /SKB 2007a/.

Monitoringssystemet är mycket väsentligt vid interferenstester. Vid dessa anpassas mätfrekvensen till förväntat dynamiskt förlopp så att upplösningen i tid blir tillfredsställande för den efterföljande analysen. Resultaten från monitoringen ger också viktigt underlag till kalibrering av numeriska beräkningsmodeller.

I alla nyproducerade borrhål planeras installation av monitoringsutrustning. Omfattningen varierar dock och är beroende av de geologiska strukturer som påträffas i borrhålen. Kärnborrhål utan expanderad diameter (s k rymning) i den övre delen kan instrumenteras med maximalt tre observationssektioner, med rymning (dvs i teleskopborrhål, se avsnitt 4.3) ökar antalet möjliga sektioner till ca 10. Hammarborrhål instrumenteras med en till tre sektioner. Avsikten är att instrumentera borrhålen så snart alla vattenprovtagningar, borrhålsloggningar och hydrauliska tester har utförts.

I SFR:s kontrollprogram ingår tryckregistrering i 12 utvalda borrhål. Mätningarna har pågått i ca 20 år med manuell tryckavläsning på månadsbasis. I ett urval av hålen har även vattenprov för kemianalys samlats in, detta gjort ca en gång per år. Under förstudien i Projekt SFR utbyggnad har tryckmonitoringsutrustningen i de 12 borrhålen uppgraderats med ny borrhålsutrustning och kontinuerlig tryckregistrering. Anledningen till detta är främst att kunna nyttja eventuella tryckresponser från de hydrauliska störningar från t ex borrhning för att öka förståelsen av sprickor och zoners utbredning.

8 Hydrogeokemiska undersökningar

8.1 Inledning

Syftet med det hydrogeokemiska programmet är i korthet att:

- utifrån undersökningsdata upprätta en hydrogeokemisk beskrivning (modell) av grundvattnet i undersökningsområdet med avseende på kemisk sammansättning, ursprung, utveckling (kemiska reaktioner och processer) och uppehållstider,
- tillhandahålla tillförlitliga initialvärden på kemiska komponenter och parametrar som har betydelse ur säkerhetsanalytiska aspekter.

Den hydrogeokemiska beskrivningen ska ge underlag för säkerhetsanalyser och i någon mån för MKB och projektering. Den kommer bland annat att öka förståelsen för vilka kortsiktiga och långsiktiga förändringar i grundvattnets kemiska sammansättning som kan inträffa i ett utbyggt SFR och i omgivande berg. Beskrivningen ska även bidra till hydrogeologisk förståelse och ge stöd för den hydrogeologiska modellen. Omvänt utgör den hydrogeologiska modellen ett kraftfullt stöd för det hydrogeokemiska modelleringsarbetet.

Grundvattensammansättningen och dess utveckling över tiden i ett förvar och i omgivande berg påverkar transportmöjligheter för radionuklider och andra toxiska ämnen som härrör från avfallet. Egenskaper som redoxförhållanden, pH, jonstyrka samt koncentrationer av komplexbildare och kolloider är av särskild vikt. Mikrob- och gasinformation från undersökningsskedet förväntas vara av betydelse främst för den hydrogeokemiska förståelsen av platsen. Ett flertal processer, särskilt i ett kommande förvar men också i grundvattnet i omgivande berg, involverar gaser eller mikrobiell aktivitet. Både mikrob- och gasförekomst kan dessutom underlätta radionuklidtransport.

Tidigare undersökningar, som bidrar med kunskaper om hydrokemiska förhållanden i Forsmarksområdet, listas nedan:

- Hydrokemiska undersökningar i SFR åren 1984–1987, innan driftskedet.
- Hydrokemiskt kontrollprogram i SFR från 1989 och framåt.
- Platsundersökningar i Forsmark (PLU), 2002–2007.

Läget av kandidatområdet för djupförvaret (PLU) och SFR-förvaret presenteras i figur 2-1. De nyligen avslutade platsundersökningarna har gett ett mycket omfattande hydrokemiskt dataunderlag när det gäller kandidatområdet för PLU. Närheten till SFR-området medför att dessa resultat har ett stort intresse även för Projekt SFR-utbyggnad. Grundvattnet i ”PLU-borrhålen” utgörs av blandningar i olika proportioner av vatten med huvudsakligen fyra olika ursprung; 1) vatten av modernt eller relik meteoriskt ursprung, 2) vatten från Littorinahavet, 3) glacialt smältvatten och 4) djupt salt grundvatten /SKB 2008/. Av särskilt intresse för SFR-projektet är det faktum att grundvattensammansättningen verkar variera på ett sätt som relaterar till de strukturgeologiska enheter (deformationszoner och sprickdomäner, dvs i berget mellan zonerna) som har definierats för bergvolymen i djupförvarets kandidatområde /Olofsson et al. 2007/. Dessa samband kan kort sammanfattas i följande två punkter:

- Grundvatten med stor inblandning av vatten från Littorinahavet påträffas framförallt i flacka deformationszoner mellan ca 90 till ca 600 m djup.
- Grundvatten i sprickor i bergblock mellan deformationszoner på motsvarande djup innehåller liten eller ingen andel vatten av marint ursprung (Littorinahavet) och domineras av ett äldre vatten.

Det grundvattenkemiska kontrollprogrammet i SFR innebär årlig provtagning i fyra borrhålssektioner samt omfattande provtagning i samtliga vattenförande sektioner vart femte år. De tidiga och mer omfattande undersökningarna innan driftskedet inkluderade 11 valda borrhål och 25 borrhålssektioner. Hydrokemiska data från SFR-anläggningen visar dels hur vattensammansättningen varierar mellan olika borrhål och borrhålssektioner, dels var förändringar i vattenkemin inträffat sedan förvaret togs i drift /Laaksoharju och Gurban 2003/. Även här tyder kemidata på ett samband mellan strukturgeologiska egenskaper och vattensammansättning (A-C Nilsson, muntl.). Samtliga grundvattenprover från SFR-borrhålen innehåller vatten med marint ursprung (Littorina och/eller modernt havsvatten) men andelarna varierar i olika delar av anläggningen. I regel är det marina inslaget betydligt mindre och andelen glacialt smältvatten högre i vattenförande sprickor i berg mellan zoner än i deformationszoner. Detta gäller särskilt borrhålen som når under förvaret. Här har dessutom vattensammansättningen varit i stort sett stabil under det tjugotal år som provtagningarna har pågått. I många borrhålssektioner som representerar zoner sker däremot en långsam förskjutning mot Östersjövatten. Den största förändringen i vattensammansättningen har observerats i en borrhålssektion i KFR7A som representerar Zon H2 (jfr kapitel 3, 5 och 7) men som har kontakt med den vertikala Zon 8. Borrhålet KFR08 passerar zon 8 och är ett av de borrhål som har en relativt stabil vattensammansättning som liknar det bräckta havsvattnet utanför Forsmark, vilket tyder på kontakt med havet ovanför.

Redoxpotentialmätningar har utförts i tre borrhål/borrhålssektioner (KFR01, KFR10 och KFR7A) under år 1987 och upprepats under år 2000. Även om det finns viss osäkerhet rörande mätningarnas kvalitet tyder resultaten på att det har skett en förändring från klart negativa Eh-värden till en mer komplex jämviktssituation som försvårar mätningarna och resulterar i instabila värden nära noll eller låga positiva värden. En sannolik orsak är de ändrade grundvattenförhållanden som har uppkommit genom förvarets inverkan.

8.2 Centrala frågeställningar

Centrala frågeställningar som undersökningarna bör klargöra är:

- *Initial grundvattensammansättning med avseende på huvudkomponenter, isotoper, spårämnen, kolloider, lösta gaser och mikrober i valda borrhålssektioner inom aktuell bergvolym.*
- *Grundvattnets ursprung och utveckling och uppehållstider samt indikationer om flödesvägar.*
- *Eventuella samband mellan vattensammansättning och strukturgeologiska egenskaper hos berget.*
- *Redoxförhållanden i grundvattnet.*

8.3 Undersökningsprogram

Hydrokemisk provtagning planeras i hammarborrhål och kärnborrhål från markytan och i kärnborrhål under jord. Mer omfattande hydrogeokemiska undersökningar – kemiska karakteriseringar (KK) kommer att genomföras i två av kärnborrhålen från markytan och i tre kärnborrhål under jord. I båda fallen görs dessa undersökningar i borrhål som är instrumenterade med fasta manschetter som avgränsar intressanta vattenförande flödesanomalier/borrhålssektioner. Förutsättningarna att få representativa vattenprov utan alltför stor inblandning av spolvatten och borrhålskax från borrhålen bedöms vara bäst i borrhålen från byggtunneln under jord på grund av rådande tryckgradienter (vattentryck riktat in mot tunneln). Därför planeras redoxpotentialmätningar samt specialprovtagningar för gas, kolloider och mikrober i något/några av dessa borrhål. Planerade undersökningar i respektive borrhål presenteras i tabell 8-1.

Generellt planeras hydrogeokemiska undersökningar i två vattenförande borrhålssektioner per borrhål i de valda kärnborrhålen. Detta får ses som ett medeltal eftersom det kan visa sig befogat med fler eller färre sektioner i vissa borrhål när resultaten från flödesloggningarna som föregår de kemiska undersökningarna är tillgängliga.

Tabell 8-1. Planerade hydrogeokemiska undersökningar i respektive borrhål (två sektioner per kärnborrhål). Undersökningsmetoderna beskrivs i avsnitt 8.4.1.

Borrhål	Prov HTHB	Prov WL	Prov KK, yt-borrhål	Prov KK, tunnel-borrhål	a) Fältmätn. pH, EC, temp	b) Chemmac-mätn. (pH, Eh, EC, O ₂ , temp)	Löst gas	Kolloid	Mikrob
HFR10x	X				X				
KFR101		(X)	X		X				
KFR102A		(X)	X		X				
KFR103		X							
KFR104		X							
KFR105				X		X	X	X*	X*
KFR106				X		X	X	(X*)	(X*)
KFR107				X		X	X	(X*)	(X*)
KFR-reserv						(X)	(X)	(X*)	(X*)

* Sker i ett tunnelborrhål – borrhålsvalet beror på logistiska förutsättningar och förekomsten av intressanta flödesanomalier. Om det blir ett av de korta borrhålen görs bestämningar av löst gas även här.

HTHB = prov tagna med hydrotestutrustning för hammarborrhål.

WL = prov tagna med *Wire-Line* sond under borring.

KK = mer omfattande kemisk karakterisering.

Hur borrhålsaktiviteter genomförs har stor betydelse för de hydrogeokemiska undersökningarnas tillförlitlighet. Särskilt viktig är spolvattenhanteringen och att så lite spolvatten som möjligt blir kvar i borrhålen efter kärnboringen. Allt spolvatten som används vid borring märks med Uranin för att indikera kvarvarande spolvattenhalt i proven och ge möjlighet till korrigering av vattensammansättningen genom att räkna bort spolvattenblandningen. Provtagning och analys av spolvatten beskrivs i avsnitt 8.4.1, övriga spolvattenaspekter behandlas i borrogrammet i kapitel 4.

Undersökningar och metodik följer i huvudsak de gällande instruktioner och metodbeskrivningar som togs fram inför och i viss mån under PLU, se tabell 8-3.

Tabell 8-3. Metodbeskrivningar och andra styrande dokument för hydrogeokemiska undersökningar (interna SKB dokument).

Metod beskrivning	Beteckning
Metodbeskrivning för enkel vattenprovtagning i hammarborrhål och kärnborrhål	SKB MD 423.002
Metodbeskrivning för registrering och provtagning av spolvattenparametrar samt vägning av borrhålsax under kärnboring	SKB MD 640.001
Metodbeskrivning för pumptest, tryckmätning och vattenprovtagning i samband med wireline-borring	SKB MD 321.002
Metodbeskrivning för vattenprovtagning och on-line mätning i kärnborrhål	SKB MD 430.018
Metod instruktion	Beteckning
Rengöring av borrhålsutrustning och viss markbaserad utrustning	SKB MD 600.004
Användning av kemiska produkter och material vid borring och undersökning	SKB MD 600.006
Provtagning och analys, kemilaboratorium	SKB MD 452.001–019
Mätsystembeskrivning	Beteckning
Mätsystembeskrivning (MSB) – Handhavande del; System för hydrologisk och metrologisk datainsamling. Vattenprovtagning och utspädningsmätning i observationshål	SKB MD 368.010
Mätsystembeskrivning för Mobil Kemienhet, Chemmac mätsystem	SKB MD 434.007
MYC-vagnar	SKB MD 434.014
Dataapplikation	SKB MD 433.018

8.3.1 Hydrogeokemiska undersökningsmetoder

Undersökningarna/metoderna för att samla in hydrokemiska data består av:

- Metoder för **insamling av vattenprov och kemisk analys** inkluderande: vattenprovtagning i hammarborrhål, vattenprovtagning under kärnborrning (WL) och kemisk karakterisering (KK) i instrumenterade borrhål från markytan samt under jord. I borrhålen under jord används en mobil ytChemmac-enhet (MYC-vagn) för provtagning och mätningar on-line. Uttag av vattenprov och analysomfattning följer definierade kemiklasser /SKB 2001c/, se nedan.
- **Mätningar on line**
 - a) med fältinstrument av standardtyp i enkel mätcell (pH, EC och vattentemperatur).
 - b) med ytChemmac (pH, Eh, EC, löst syre, och vattentemperatur).
- Vattenprovtagning för bestämning av **löst gas** i tunnelborrhål.
- *Laser Induced Breakdown Colloid Detection* (LIBD) av **kolloider** i tunnelborrhål.
- **Mikrobundersökningar** i tunnelborrhål.

Kemiklasser

SKB har definierat ett antal kemiklasser för vattenprovtagning och analys, se tabell 8-2. I undersökningsprogrammet för SFR är det framförallt Klass 3 prov (tillval enligt *a* och *b*) samt ett mindre antal Klass 5 prov (tillval *c*, *d*, *f*, *g*, *h* och *l*) som är aktuella. Dessutom planeras specialanalyser av löst gas, bakterier och kolloider (tillval *i* och *j*) i ett fåtal borrhålssektioner i något/några tunnelborrhål. Bestämningar av humus- och fulvosyror är inte planerade att ingå i programmet.

I varje vattenprov analyseras, som framgår av tabell 8-2, många komponenter hos ett flertal laboratorier. Därför består varje vattenprov av flera provportioner/flaskor. Ett vattenprov definieras som det antal provportioner som tas ut i en och samma provpunkt vid samma tillfälle (i vissa fall under en dag). SFR-undersökningen kommer att tilldelas en unik provnummerserie för märkning av provflaskor. En översikt över provhanterings- och analysrutiner ges i /Nilsson 2005/. Tidskritiska analyser och mätningar som HCO_3 , lab-pH, NH_4 , Fe(tot) och Fe(+II) samt dessutom Uranin, lab-EC och klorid utförs i SKB:s regi i mobilt fältlaboratorium på plats. SKB är ackrediterat för dessa analyser med undantag av Uranin.

Samtliga hydrogeokemiska undersökningsmetoder beskrivs kortfattat i följande avsnitt. För mer ingående och detaljerad information hänvisas till metoddokumentation, se tabell 8-3.

Vattenprovtagning i hammarborrhål

I samband med hydrotester med HTHB-utrustning i hammarborrhål tas tre vattenprov under pumpperioden (i inledningen, mitt i pumpperioden och vid avslutningen av pumpningen, SKB MD 423.002). Provtagning och analyser görs för att ge kompletterande grundvattendata från ytterligare en provpunkt som kan bidra till kunskap om vattensammansättningens rumsliga variation i bergvolymen. Det är viktigt med en serie på minst tre prov för att avgöra om vattensammansättningen är stabil eller varierar under pumpningen.

Metoden bidrar med hydrokemidata enligt SKB Klass 3 och tillvalen a och b ingår för det tredje och sista provet i serien.

Tabell 8-2. SKB:s kemiklasser för vattenprovtagning och analys /SKB 2001c/. Aktuella kemiklasser och tillval i undersökningsprogrammet för SFR 3 är markerade med fet stil.

Klass	Beskrivning
Klass 1	Enkel provtagning för kontroll av tidsstabilitet – EC (Electrical Conductivity), pH, Uranin*, temperatur
Klass 2	Enkel provtagning för typklassning – EC (Electrical Conductivity), pH, Cl, HCO ₃ , Uranin*, temperatur Tillval: a, b – a = arkivering av frysprov – b = δ ² H, ³ H, δ ¹⁸ O
Klass 3	Enkel provtagning för bestämning av huvudkomponenter (ej redox) – EC (Electrical Conductivity), pH, Cl, HCO ₃ , SO ₄ , Br, Uranin*, temperatur, katjoner (utom Fe, Mn)** och SO ₄ analyserat som svavel med ICP-AES Tillval: a, b, c, d – a = arkivering av frysprov – b = δ ² H, ³ H, δ ¹⁸ O – c = δ ³⁴ S(i SO ₄), δ ³⁷ Cl, ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr, ¹⁰ B/ ¹¹ B – d = ¹⁴ C pmC (procent modernt kol), δ ¹³ C
Klass 4	Omfattande provtagning för fullständig kemikarakterisering – EC (Electrical Conductivity), pH, Cl, HCO ₃ , SO ₄ , Br, Uranin*, temperatur, katjoner ** och SO ₄ analyserat som svavel med ICP-AES – δ ² H, ³ H, δ ¹⁸ O – Fe(II), HS ⁻ , NH ₄ – Arkivering av surgjorda samt okonserverade frysprov Tillval: e – e = NO ₂ , NO ₃ och/eller NO ₂ +NO ₃ , PO ₄ , F ⁻ , I ⁻
Klass 5	Omfattande provtagning för fullständig kemikarakterisering – EC (Electrical Conductivity), pH, Cl, HCO ₃ , SO ₄ , Br, Uranin*, temperatur, katjoner ** och SO ₄ analyserat som svavel med ICP-AES – δ ² H, ³ H, δ ¹⁸ O – F ⁻ , I ⁻ – Fe(II), HS ⁻ , NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ och/eller NO ₂ +NO ₃ , PO ₄ , – Arkivering av surgjorda samt okonserverade frysprov Tillval: c, d, f, g, h, i, j, k, l – c = δ ³⁴ S(i SO ₄), δ ³⁷ Cl, ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr, ¹⁰ B/ ¹¹ B – d = ¹⁴ C pmC (procent modernt kol), δ ¹³ C – f = ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra och ²²² Rn – g = U och Th isotoper – h = spårmetaller inklusive sällsynta jordartsmetaller (ICP-MS) – i = löst gas, bakterier – j = kolloider – k = humus och fulvosyror – l = pH, Eh, EC, löst syre och temperatur on-line

* Bestäms endast där Uranin använts för att märka spolvatten.

** Katjoner: Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Li, Sr samt Si.

*** Spårmetaller: U, Th, lantanider, tungmetaller m fl.

Prov på spolvatten under kärnbronning

Ett spolvattenprov per kärnbronnhål analyseras enligt SKB Klass 3 inklusive TOC, tritium, deuterium och syre-18. Provet tas ut före tillsatsen av Uranin men ska analyseras även på Uranin (blank). Vanligt kranvatten kommer att användas som spolvattenkälla och vattensammansättningen bedöms vara i stort sett konstant under den tid som det tar att borra ett bronnhål. Spolvattnets sammansättning analyseras för att verifiera att kvaliteten är tillräckligt bra och för att ge möjlighet att bedöma effekten av kvarvarande spolvatten i kommande vattenprov från bronnhålet. Eventuellt går det att korrigera för denna effekt om spolvattnets sammansättning är känd.

Vidare analyseras Uranin regelbundet i spolvattnet och i returvattnet under borrning (SKB MD 640.001). Spolvattenproven tas ut nära bormaskinen för att inblandningen av Uranin ska bli så homogen som möjligt. För varje kärnborrhål beräknas en spolvattenbudget dvs volymen spolvatten in och ut. För att beräkningen ska bli tillförlitlig krävs täta Uraninanalyser. Ett riktmärke för provtagningsfrekvensen är ett spolvattenprov och ett returvattenprov per tremetersupptag.

Vattenprovtagning med WL-sond under kärnborrning

Syftet med vattenprovtagning i kärnborrhål från markytan under borrning är att komplettera datamängden för att få en uppfattning om vattensammansättningen i vattenförande sektioner även i de borrhål som inte undersöks på annat sätt. Utrustningen som används, den så kallade WL-sonden (SKB MD 321.002), medger uttag av vattenprov (volym 5,8 liter) från avgränsade borrhålssektioner under paus i borrhållningen men utan att lyfta borrhållsträngen, se även avsnitt 4.3.

De så kallade "first strike" prov ger dessutom information om grundvattensammansättningen innan borrhålets kortslutande effekt (kan ge omblandning av grundvatten från olika djup) har hunnit verka särskilt lång tid. Det är nödvändigt att ta vattenprov under borrning även i KFR101 och KFR102A trots att dessa kommer att undersökas mer ingående vid senare tillfälle. Om resultaten från två metoder kan jämföras, kan det underlätta bedömningen av de övriga "first strike" provens representativitet.

Metoden bidrar med hydrokemidata enligt SKB Klass 3 och tillvalen a och b ingår endast om spolvattenhalten understiger 10 %.

Vattenprovtagning (KK) i instrumenterade borrhål ovan jord

Syftet med hydrogeokemisk undersökning i utvalda instrumenterade kärnborrhål från markytan (KFR101 och KFR102A) är att åstadkomma en relativt fullständig bild av grundvattenkemin i enskilda sprickor och i vattenförande deformationszoner. Detta kräver representativa prov med hög kvalitet vilket indikeras av provserier med stabil vattensammansättning och att spolvattenhalten når under 5 %. Undersökningen i borrhålet KFR101 syftar främst till att undersöka vattensammansättningen efter passagen av zon 8. Borrhålet KFR102A kommer att passera eventuella flacka zoner i tillänt förvarsutrymme och dessutom sträcka sig ner en bit under förvaret. Här är det främst relativt djupt grundvatten från botten av borrhålet och grundvatten i flacka zoner som ska undersökas.

Teleskopborrhålet KFR102A kommer att utföras som ett kemiprioriterat teleskopborrhål enligt PLU-standard /SKB 2001c/. Förutsättningarna för att få representativa kemiprover utan alltför stor inblandning av spolvatten och borrhållsmedel bedöms som relativt gynnsamma, främst därför att borrhålets övre delar hålls under undertryck genom så kallad mammutpumpning under hela borrhållningsfasen. Därmed sker ett kontinuerligt utflöde av spolvatten och borrhållsmedel från borrhålet. Vattenprovtagningen utförs i de cirkulationssektioner (se figur 8-1) som installeras för att isolera eventuella intressanta flödesanomalier enligt den standardmetod som används för närvarande inom Platsprojekt Forsmark och monitoringsprogrammet, /SKB 2007a/ och /Berg och Nilsson 2007/.

I vart och ett av borrhållen tas en serie på minst fem prov enligt kemiklasserna 4 och 5.

Metoden bidrar med hydrokemidata i tidsserie under en dryg vecka enligt SKB Klass 4 och 5 inkluderande även fält-pH, fält-EC och vattentemperatur. Tillvalen i till 1 ingår ej. I stället för 1 görs mätningar av fält-pH, fält-EC och temperatur *on-line* med separata fältinstrument i en enkel flödescell. *On-line* mätningar beskrivs nedan.

Borrhålet KFR101 kommer att utföras som ett konventionellt kärnborrhål, vilket betyder att borrhållningen sker utan samtidig mammutpumpning. Problem med kvarvarande spolvatten- och borrhållsmedelinblandning kan förväntas. Vidare saknas möjligheten att installera cirkulationssektioner i borrhålet. Detta medför att det inte går att pumpa upp grundvattnet med en vanlig pump utan vattenprovtagningen kommer att ske genom att vatten trycks upp ur de provsektioner som



Figur 8-1. Sänkning av utrustning för pumpning av vatten i ett vattenståndsror från en installerad cirkulationssektion i ett kärnborrhål. Utrustningen består nerifrån räknat av filter, liten manschett och pump.

ska undersökas med hjälp av kvävgas. Denna teknik för att samla in vatten från provsektioner används i några få fall inom Platsprojekt Forsmark och monitoringsprogrammet, /SKB 2007a/ och /Berg och Nilsson 2007/.

Vattenprovtagning (KK) i instrumenterade tunnelborrhål

Förutsättningarna att få representativa kemiprover utan alltför stor inblandning av spolvatten bedöms som mest gynnsamma i tunnelborrhålen och det är här de största undersökningsinsatserna planeras. Grundvattnen i kärnborrhålet KFR105 som borrar från byggtunneln och i de två kärnborrhål som borrar i projekterade tunnellägen är därför aktuella för mer omfattande kemisk karakterisering (SKB MD 430.018). Syftet med hydrogeokemisk undersökning i de utvalda instrumenterade kärnborrhålen från byggtunneln är även här att uppnå en så fullständig bild som möjligt av grundvattenkemin i enskilda sprickor och sprickzoner. Representativa prov med hög kvalitet indikeras av provserier med stabil vattensammansättning och att spolvattenhalten understiger 5 %.

Provtagningsutrustningen består av någon av SKB:s mobila ytChemmac-enheter (MYC-vagnar) som placeras i byggtunneln och i anslutning till borrhålet. Utloppsslangen från den avgränsade provsektionen som ska undersökas förses med lämpliga ventiler och kopplingar och ansluts till ytChemmac-systemet för mätning, se nedan. I vart och ett av borrhålen tas en serie på minst fem prov enligt kemiklasserna 4 och 5.

Metoden bidrar med hydrokemidata enligt SKB Klass 4 och 5. Tillvalen i = löst gas och bakterier, j = kolloider samt l = mätningar on-line av pH, Eh, EC, löst syre och temperatur beskrivs under respektive rubrik.

Mätningar on-line

Elektrisk konduktivitet (EC), pH, syrehalt och vattentemperatur är standard och utgör basinformation i de flesta hydrokemiska undersökningar medan mätningen av tillförlitliga redoxpotentialer (Eh) enligt SKB-metodik är avancerad och kräver stor omsorg. Kunskap om redoxförhållanden är viktiga för den hydrogeokemiska förståelsen, men Eh-mätningen är extremt känslig bland annat för påverkan av syre.

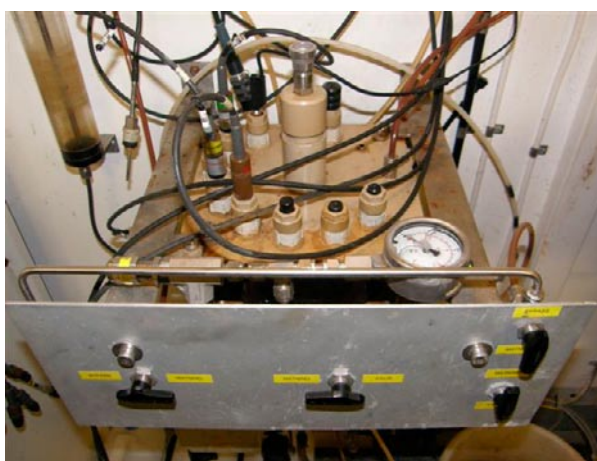
- a) I de två valda kärnbrorrhålen (KFR101 och KFR102A) från markytan planeras enklare on-line mätningar. Fält-EC, fält-pH och vattentemperatur mäts i en enkel uppställning/flödescell, se figur 8-2a.
- b) I kärnbrorrhålen under jord (KFR105, KFR107 och KFR108) görs kontinuerliga mätningar av redoxpotential, fält-EC, fält-pH, löst syre och vattentemperatur med ytChemmac systemet i en sk MYC-vagn (SKB MD 434.007). Mätkammaren i ytChemmac-systemet med elektroder och givare för mätning av fält-EC, fält-pH, redoxpotential, löst syre och vattentemperatur, se figur 8-2b, är placerad i ett termostatreglerat utrymme.

Metoderna ger data i form av fält-EC, fält-pH och vattentemperatur samt med ytChemmac även redoxpotential (Eh) och löst syre.

Vattenprovtagning för bestämning av löst gas i tunnelborrhål

Bestämningar av gasinnehåll och sammansättning i grundvattnet utförs i tre av kärnbrorrhålen under jord (eventuellt två borrhålssektioner per borrhål) i syfte att kartlägga grundvattnets innehåll av lösta gaser på de relativt små djup som det här är frågan om.

Gasanalyserna ger data i form av total gasvolym per liter vatten samt koncentrationerna av Ar, He, N₂, CO₂, CH₄, O₂, H₂, CO, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂ och C₃H₆. Kolisotopbestämningar ger ytterligare information om grundvattnets ålder och kan enkelt utföras på samma prov om det uppstår ett behov av detta.



Figur 8-2. a) Enkel flödescell för mätning av fält-EC, fält-pH och vattentemperatur on-line.
b) Mätkammare i ytChemmac systemet med elektroder och givare för mätning av fält-EC, fält-pH, redoxpotential, löst syre och vattentemperatur.

LIBD-bestämningar av kolloider i tunnelborrhål

Bestämningar av kolloidinnehåll i grundvattnet utförs med hjälp av LIBD (Laser Induced Breakdown Detection) i ett av borrhålen under jord (eventuellt två borrhålssektioner) i syfte att få en uppfattning om kolloidkoncentrationen i grundvatten från relativt begränsat djup i berget. Tidigare data från PLU kommer från större djup. Kolloider kan vara bärare av radionuklider, som annars inte skulle vara lösliga i grundvattnet. I SFR där transportvägarna är relativt korta förväntas kolloidförekomsten dock inte vara av avgörande betydelse för säkerhetsanalysen däremot bidrar de till en allmän hydrogeokemisk förståelse. Kolloidundersökningar med LIBD-teknik beskrivs i /Laaksoharju och Wold 2005, Hauser et al. 2002, Hauser et al. 2003ab/.

Resultaten omfattar kolloidernas diameter, koncentration ($\mu\text{g/L}$) och antal (antal/mL). Dessutom mäts pH, Eh, EC, löst syre och temperatur on-line för att möjliggöra bedömning av resultatens kvalitet och påverkan av eventuella artefakter.

Mikrobundersökningar i tunnelborrhål

Bestämningar av mikrober i grundvatten, antal och fysiologisk karakterisering utförs i ett av borrhålen under jord (två borrhålssektioner) i syfte att kartlägga vilka mikrober som förekommer och i hur stor mängd på det begränsade djup som det här är frågan om. Metoderna beskrivs i /Pedersen 2007, Haveman et al. 1999, Haveman och Pedersen 2002/. Förutom att mikroberna påverkar grundvattnets sammansättning och därmed är viktiga för förståelsen av de kemiska förhållandena, har de även viss betydelse i ett blivande förvarsutrymme /Pedersen 2001/. De grupper av mikrober som kan vara av speciellt intresse i SFR-miljö är sådana som producerar organiska komplexbildare, bryter ned bitumen eller cellulosa och α -D-isosaccharinate eller som kan orsaka korrosion av betong och metaller.

Resultaten av mikrobundersökningarna omfattar bland annat antal odlingsbara bakterier, totala antalet celler, antal autotrofa och heterotrofa acetogener och metanogener samt antal sulfat-, järn-, mangan- och nitratreducerande bakterier.

9 Modellering

9.1 Bakgrund

Det övergripande målet för Projekt SFR-utbyggnad är att en ansökan enligt miljöbalken och kärntekniklagen med erforderligt underlag för utbyggnad av SFR-anläggningen skall vara upprättad senast 2013. Utgående från primärdata, som vartefter de produceras inlagras i SKB:s primärdatabas Sicada, upprättas ämnesspecifika modeller av platsen. Baserat på den integrerade kunskapen från dessa modeller och övrig information från undersökningsskedet utformas en sammanfattande platsbeskrivning, som skall utgöra det underlag som krävs för projektering, säkerhetsanalys, driftsäkerhetsanalys, beskrivning av miljökonsekvenser samt för utvärdering och bedömning av områdets lämplighet för utbyggnad.

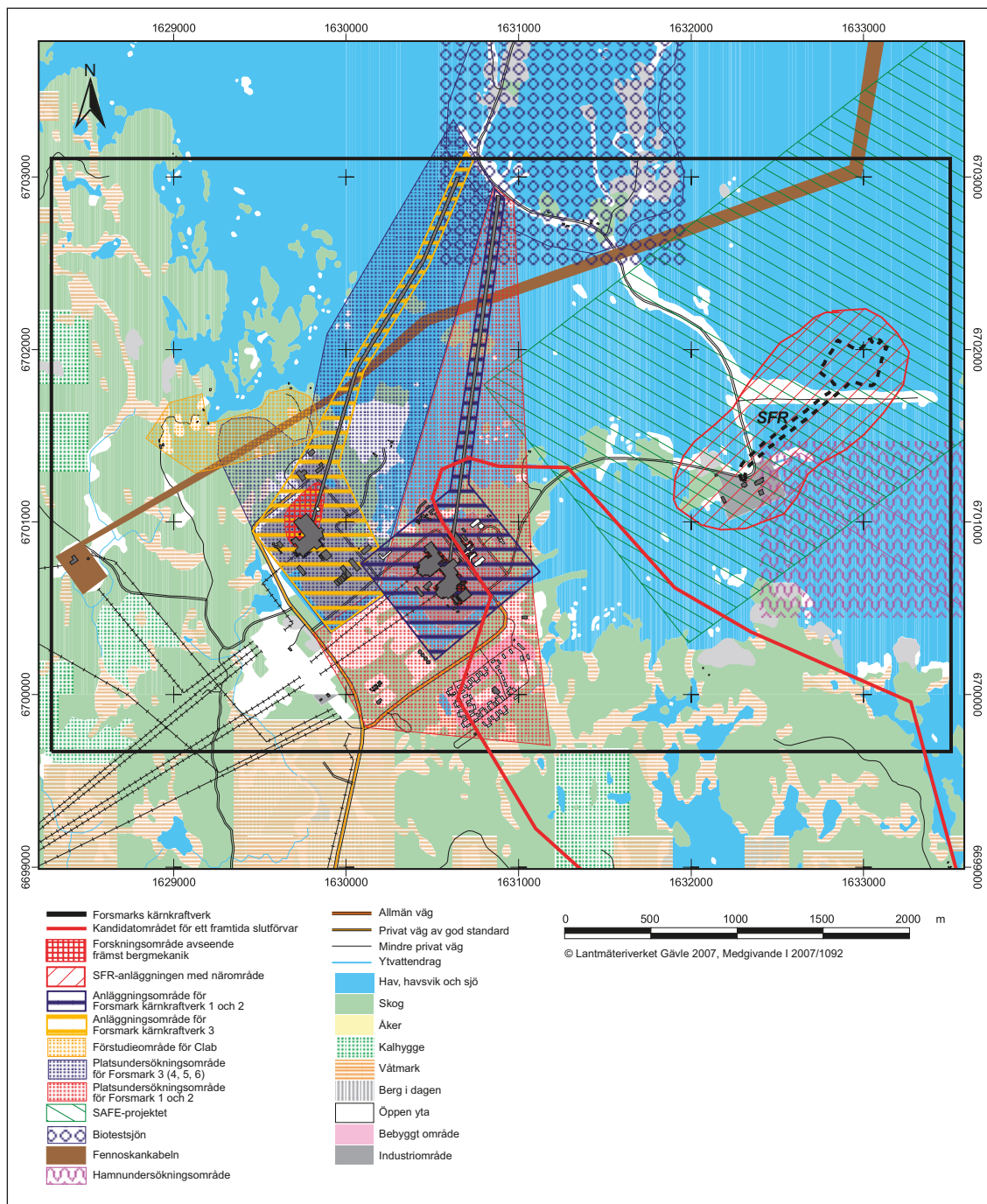
De fältundersökningar som beskrivs i detta program kommer att utgöra underlaget för nämnda beskrivning av den undersökta platsen. Platsbeskrivningen utgör en integrerad geovetenskaplig redogörelse för egenskaperna hos den undersökta bergvolymen och dess relation till den regionala omgivningen. Platsbeskrivningen omfattar såväl nuvarande tillstånd och egenskaper hos geosfären som pågående naturliga processer som kan förväntas påverka platsens utveckling över en längre tid. Platsbeskrivningen skall inkludera alla primärdata och tolkade data av betydelse för dels den övergripande geovetenskapliga förståelsen av området, dels den planerade anläggningens tekniska utformning, långsiktiga säkerhet och omgivningspåverkan.

Platsbeskrivningen kommer att bestå av en platsbeskrivande modell baserad på fyra ämnesspecifika modeller, för geologi, bergmekanik, hydrogeologi och hydrokemi kompletterad med ett dokument som beskriver modelleringsförutsättningar och andra omständigheter av betydelse för platsförståelsen. Den platsbeskrivande modellen innehåller tolkad information i sådan form att den kan användas i numeriska modeller för bedömning av geovetenskapliga och tekniska förhållanden, långsiktig säkerhet och miljöpåverkan. Ett viktigt steg i delprojektets arbetsflöde är därför att utifrån producerade, utvärderade och i SKB:s databaser inlagrade primärdata upprätta de ämnesspecifika geovetenskapliga modellerna. Dessa kommer att successivt uppdateras till nya versioner vartefter fältundersökningarna bidrar med nya data. Varje version kommer att användas för att styra efterföljande fältundersökningsinsatser.

9.2 Modellversion 0

I avsnitt 9.4 beskrivs det modelleringsarbete som planeras utföras inom Projekt SFR-utbyggnad – Delprojekt undersökningar samt illustreras de modellområden inom vilka modelleringen kommer att utföras. Utgångspunkten för modelleringsarbetet är en modellversion som här benämns 0, och som baseras på den samlade kunskapen från förundersökningarna inför byggnationen av Forsmarks kärnkraftanläggningar och befintlig SFR-anläggning samt de geovetenskapliga erfarenheterna från anläggningsarbetena, se karta över undersökningsområden i figur 9-1. Denna kunskap, som finns dokumenterad i ett antal rapporter, har tidigare använts för att upprätta numeriska modeller för de geologiska och hydrogeologiska förhållandena. Ytterligare geologiska undersökningar, dock begränsade till ytkarteringar, utfördes vid de s k förstudier som föregick platsundersökningarna för ett djupförvar /Bergman et al. 1996, 1998/.

Den geologiska informationen från förstudierna är dock begränsad för SFR-området på grund av havsläget och det begränsade antalet bergblottningar som stod till förfogande.



Figur 9-1. Översiktskarta över Forsmarks kraftverksområde och SFR-anläggningen. Områden inom vilka geovetenskapliga undersökningar utförts är markerade med olika raster. Från /Carlsson och Christiansson 2007/.

Även en hydrokemisk modell har producerats vilken baseras på denna äldre kunskap men också på det kontrollprogram med systematisk vattenprovtagning/-analys som bedrivits alltifrån det att SFR-anläggningen togs i drift /Laaksoharju och Gurban 2003/. Beträffande bergmekanik finns ingen numerisk modell upprättad, men däremot rapporter som i text och med illustrationer beskriver bergmekaniska förhållanden, varför en god konceptuell förståelse har uppnåtts även för de bergmekaniska förhållandena /SKB 2002/. Även när det gäller övriga discipliner finns en stor mängd kompletterande information i rapporter, ritningar och andra dokument.

De ämnesspecifika modellerna med kringinformation definieras här sammantaget som modellversion 0 för SFR. Nedan kommenteras denna modellversion kortfattat per ämnesområde. Tidigare modellområden avviker till sin utsträckning och form i viss mån från dem som är aktuella i Projekt SFR-utbyggnad, vilket framgår av nedanstående beskrivning. För lokalområdet runt själva SFR-anläggningen är dock skillnaderna små. Den hydrogeologiska modell som nedan definieras som version 0 baserades på ett rektangulärt, regionalt modellområde medan planerad hydrogeologisk modellering för Projekt SFR-utbyggnad utförs inom ett regionalområde som avgränsats efter den regionala vattendelaren, se figur 9-10. Områdena har dock ungefär samma areal.

9.2.1 Litologi och strukturgeologi

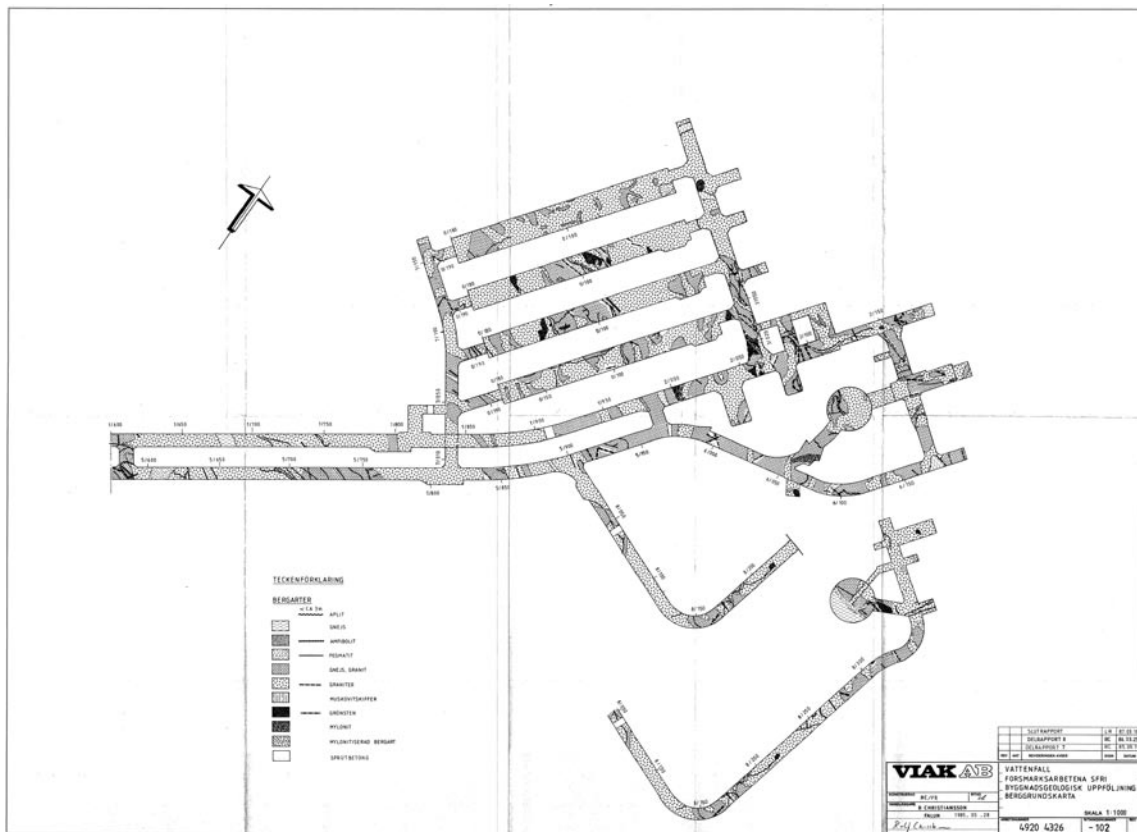
Forsmarksområdets geologi har regionalt beskrivits av /Hansen 1989, Stålhös 1989ab, 1991, Bergman et al. 1996, 1998, Bergman och Isaksson 1996/. Under de första två åren (2002–03) av platsundersökningen för ett djupförvar (PLU) utfördes ytgeologisk kartering i Forsmarksområdet med bl a noggrann kontroll av berghällar i kustbandet. Äldre och nyare kunskap sammanfattades i den berggrundsgeologiska kartan över området som visas i figur 5-5 /SKB 2005a/. I föreliggande program för de fortsatta SFR-undersökningarna definieras denna berggrundskarta som den litologiska 0-versionen, från vilken den fortsatta modelleringen tar sin utgångspunkt.

Den strukturgeologiska modellen som den presenterad av /Axelsson och Hansen 1997/, se figur 9-4, och som används av /Holmén och Stigsson 2001a/ definierar version 0 i det fortsatta modelleringsarbetet inom SFR-undersökningarna. Anledningen till att inte den nyare modellversionen presenterad i /Stephens et al. 2007/ får representera version 0 är att hydrogeologiska modelleringsövningar med ny programvara genomförs på 0 versionen för att jämföra med tidigare resultat från /Holmén och Stigsson 2001a/. Skillnaderna mellan /Axelsson och Hansen 1997/ och /Stephens et al. 2007/ i områden runt SFR är små, dock kommer dessa att analyseras i det fortsatta modelleringsarbetet.

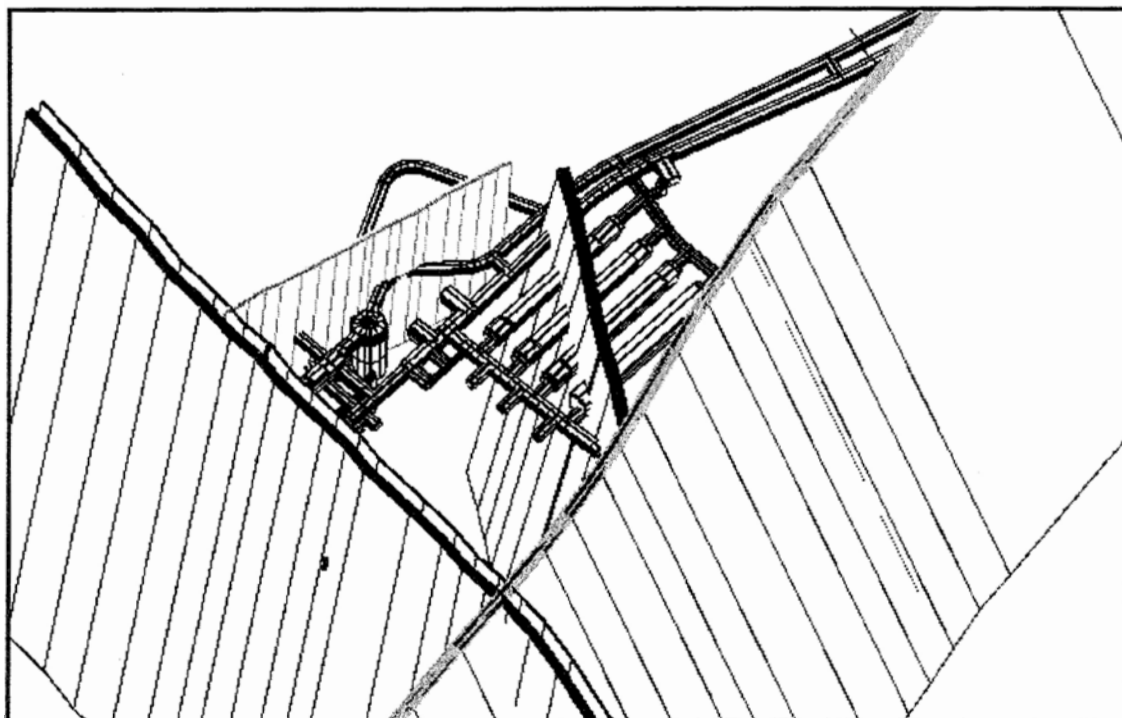
Geologisk borrhålsinformation finns i närområdet runt SFR-anläggningen, i begränsad mängd, ner till ca 250 m djup (RHB70) men sett i en större skala är djupinformationen begränsad, om man bortser från borrhålsinformationen från PLU som i huvudsak ligger på andra sidan Singözonen, i en annan bergdomän. Den regionala 0-versionen inom litologi och strukturgeologi har visserligen samma djupgående som det modellområde som framdeles kommer att utnyttjas, ca 1 100 m, se avsnitt 9.3, men osäkerheten mot djupet i version 0 är stor.

Förundersökningarna för den ursprungliga SFR-anläggningen startade 1980 och anläggningsarbetena pågick från hösten 1983 till juni 1986. Under denna period utfördes en rad geovetenskapliga undersökningar som kom att utgöra underlaget för litologisk-strukturgeologisk modellering. De berggrundsgeologiska undersökningarna utgjordes av undersökningar av borrhämnor samt, då anläggningsarbetena påbörjats, av tunnelkartering. Det som i detta program definieras som litologisk modellversion 0 sammanfattas i /Christiansson och Bolvede 1987/ i en serie ritningar av vilka en illustreras i figur 9-2.

En tidig lokal strukturgeologisk modell över förvarsområdet utarbetades av /Carlsson et al. 1986 och Christiansson 1986/. Det lokala modellområde man fokuserade på avgränsas av de brantstående zonerna 3, 6, 8 och 9 och mot djupet av den flackt stupande Zon H2, se figur 9-3. Denna modell användes även för den hydrogeologiska modellering som utgjorde ett av de viktigaste underlagen för den säkerhetsbedömning av SFR-förvaret som presenterades i /SKB 1987/. Med säkerhetsanalysen som ett av underlagen formulerades driftansökan för SFR-förvaret vilken godkändes av myndigheterna, dock med vissa restriktioner. Bl a skulle ett kontrollprogram utformas. Då detta godkännts togs anläggningen i bruk 1988.



Figur 9-2. Resultat av berggrundsgeologisk tunnelkartering i SFR-anläggningen. Urval av en serie ritningar av samma typ från /Christiansson och Bolvede 1987/ som tillsammans definieras som litologisk modell version 0 för Projekt SFR-utbyggnad.



Figur 9-3. Tidig lokal strukturgeologisk modell över SFR-anläggningen. Bilden illustrerar tunnlar, bergsalar och silo samt de deformationszoner som identifierats i närområdet. Från /SKB 1993/.

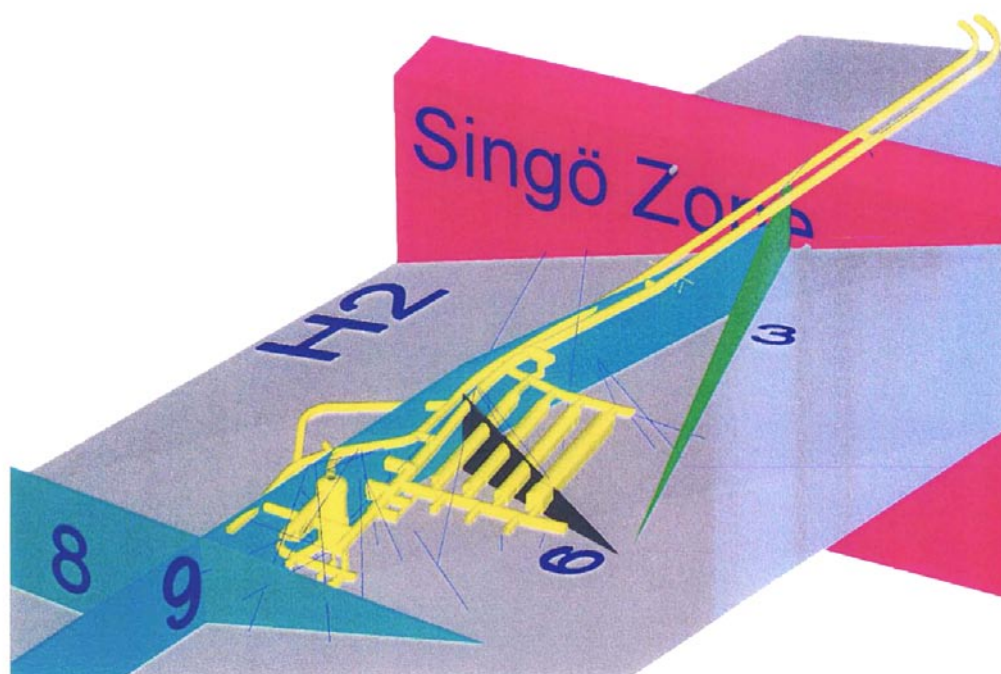
Senare gjordes en uppdaterad säkerhetsbedömning /SKB 1993/. Denna föregicks emellertid inte av någon formell revision av den strukturgeologiska modellen. Dock hade en mindre översyn gjorts /Axelsson et al. 2002/, som indikerade vissa osäkerheter i den officiella strukturgeologiska modellen och att vissa alternativa tolkningar var möjliga. Av denna anledning utfördes en mer övergripande revision av /Axelsson och Hansen 1997/ som omfattade följande punkter:

- 1) Den flackt stupande Zon H2 förlängdes bortom zonerna 3, 6, 8 och 9 och dess utträde i markytan prognostiserades.
- 2) Zon 9 förlängdes till Zon 3 i drifttunneln.
- 3) Zon 6 avslutades nedåt mot Zon H2 mellan drifttunnel och byggtunneln.
- 4) Zon 8 reducerades i storlek avseende såväl djup som längd mot NV (avslutades vid Zon 3) och mot SO.

Figur 9-4 sammanfattar den uppdaterade strukturgeologiska modellen. Denna definieras här som strukturgeologisk modellversion 0. Den bergvolym som illustreras inryms i den grön-röda rektangeln i figur 9-8, dvs det lokala modellområdet för fortsatt modellering. Viss djupinformation från området sydväst om SFR-anläggningen har tillkommit under platsundersökning Forsmark, men den inarbetas först i nästa modellversion.

9.2.2 Bergmekanik

I /SKB 2002/ beskrivs modellversion 0 för olika geovetenskapliga discipliner inför PLU. Även en bergmekanisk modellversion 0 presenteras. Det lokala modellområdet för platsundersökningen är beläget i närheten av det lokala modellområdet för SFR-anläggningen, men eftersom områdena inte är identiska är det generellt sett inte relevant att applicera 0-versionen från /SKB 2002/ på SFR-undersökningarna. När det gäller de bergmekaniska förhållandena kan detta emellertid motiveras. Det viktigaste skälet till detta är att de data som den bergmekaniska



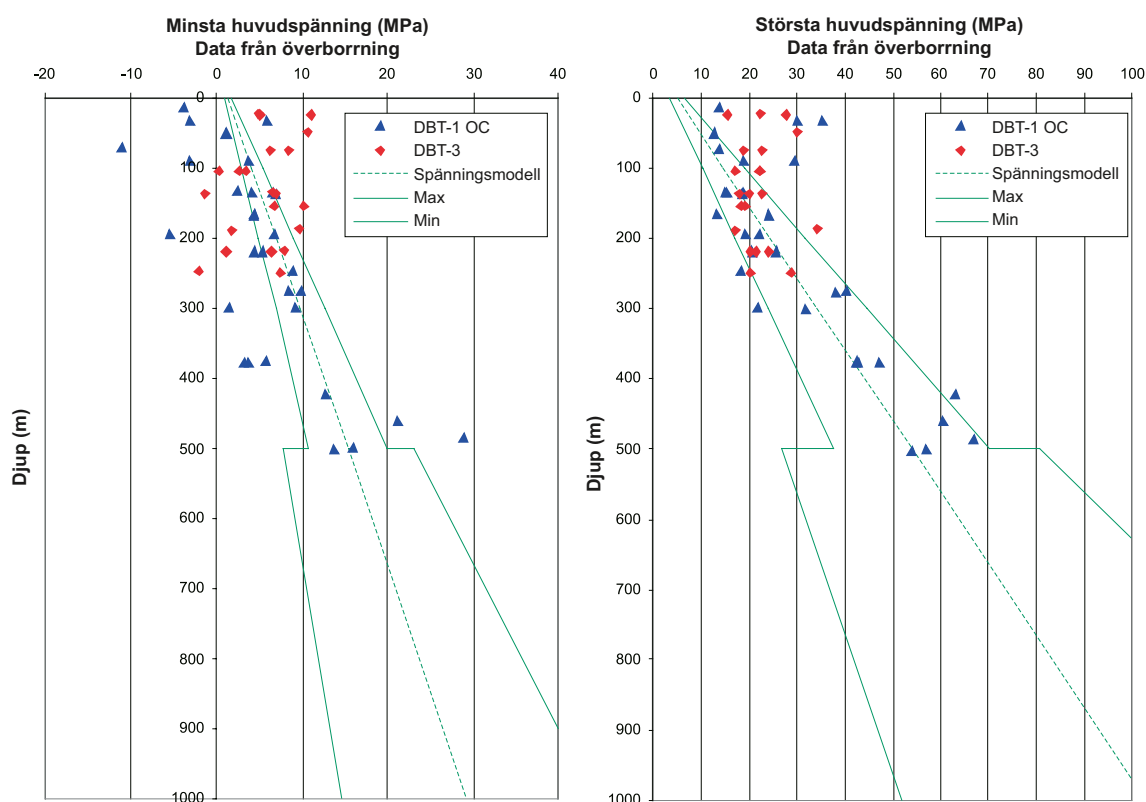
Figur 9-4. Uppdaterad lokal strukturgeologisk modell över SFR-anläggningen med tunnlar, bergsalar, silo samt de deformationszoner som identifierats i närområdet. Figuren är en 3D-illustration av den strukturgeologiska modellversionen 0. Från /Axelsson och Hansen 1997/. Modellen har ett djupgående på 490 m från nivå 0 enligt RHB70, men zonernas vertikala utsträckning i figuren illustreras endast till en nivå strax ovan SFR-förvaret.

beskrivningen i /SKB 2002/ baseras på till största delen utgörs av material från dels Forsmarks kraftverksområde, dels från SFR, eftersom dessa var de enda bergmekaniska data som tagits fram från Forsmarksområdet före PLU.

Under PLU har däremot en mycket stor mängd bergmekaniska data, såväl hållfasthetsdata som bergspänningsdata, tillkommit från Forsmarksområdet. Dessa härrör dock från den tektoniska linsen söder om SFR-området, som är belägen i en annan litologisk-strukturgeologisk domän, varför det inte är självklart att denna datamängd är applicerbara på SFR-området. Slutlig utvärdering och modellering av bergmekaniska förhållanden i djupförvarsområdet pågår dessutom, varför det även av detta skäl är för tidigt att inkludera dessa data i en 0-version för SFR-området. I den mån detta senare visar sig motiverat, integreras nämnda data i kommande modellversioner för Projekt SFR-utbyggnad. Definitionen av den bergmekaniska modellen, version 0, är därför i detta program identisk med den definition som ges i /SKB 2002/. Modellområdet är inte definierat på samma sätt som för geologi- och hydrogeologiområdena utan kan sägas representera Forsmarksområdet i stort. Inte heller görs någon åtskillnad mellan lokalt och regionalt modellområde.

En bergmekanisk beskrivning eller modell av en viss bergvolym inkluderar två komponenter, dels bergspänningarna, dels bergets hållfasthets- och deformationsegenskaper. Kombinationen av spänningsfältets karaktär och bergets hållfasthets- och deformationsegenskaper bestämmer stabiliteten hos berganläggningar som lokaliseras till den aktuella bergvolymen.

Den modell för bergspänningarna inom Forsmarksområdet som presenteras i /SKB 2002/ bygger på mätningar med såväl hydraulisk metodik som överborrningsteknik. I figur 9-5 illustreras den modell som definierats för magnituden på minsta och största huvudspänning liksom av orienteringen av den största huvudspänningen.



Figur 9-5. Bergspänningsmodell, version 0 för Forsmarksområdet. Efter /SKB 2002/.

Beträffande hållfasthets- och övriga egenskaper hos bergmassan av betydelse ur byggbarhetssynpunkt finns omfattande erfarenheter från anläggningsarbetena vid kraftverksområdet och SFR. /Larsson och Leijon 1996/ kommer till slutsatsen att en bergmasseklassificering för Forsmarksområdet i stort skulle falla inom intervallet ”god” till ”mycket god” men att kvaliteten lokalt kan vara sämre.

Även om exempelvis /Stille et al. 1986/ presenterade resultat från hållfasthetsprovningar på borrkärnor från SFR är datatillgången i modellversion 0 låg. Den modell som presenteras i /SKB 2002/ är därför i hög grad baserad på expertbedömningar. I tabell 9-1 presenteras parameterintervall för modellversion 0.

9.2.3 Hydrogeologi

Förundersökningarna inför byggandet av den befintliga SFR-anläggningen samt anläggningsarbetena i sig genererade en stor mängd hydrogeologiska data som sedermera har analyserats och använts för numerisk modellering av SFR-området i flera steg. I tabell 9-2 sammanfattas de rapporter som presenterar testresultat och modelleringar som utförts vid SFR under perioden 1977–2001.

Tabell 9-1. Bedömda bergmekaniska egenskaper för SFR-området. Gråstrerade områden representerar parametrar som förväntas bestämmas i ett senare skede. När fler laboratedata finns tillgängliga från SFR-området kan de bergmekaniska egenskaperna för olika bergarter differentieras. Observera att laboratoriebestämningar på borrkärnor från platsundersökning Forsmark inte ingår i tabellens parametervärden. Från /SKB 2002/.

Parameter för intakt berg	Alla bergarter	Bergartstyp I	Bergartstyp II	Bergartstyp III
Youngs modul	40–85 GPa			
Poissons tal	0,20–0,30			
Enaxlig hållfasthet	150–300 MPa			
Dragspänning	5–20 MPa			
Parameter för bergmassan***	Bergmassan Alla djup 30x30x30 m skala	Bergmassan Vissa djupintervall	Sprickzoner Alla djupintervall	Sprickzoner Vissa djupintervall
Youngs modul*	30–75 GPa		10–40 GPa	
Poissons tal*	0,20–0,30		0,20–0,26	
Enaxlig hållfasthet*	100–160 MPa		55–85 MPa	
Friktionsvinkel**	35–50°		25–40°	
Kohesion**	10–30 MPa		5–20 MPa	

* Begränsande spänningsmagnitud 10 MPa.

** Linjär modell mellan 10 och 20 MPa begränsande spänningsmagnitud.

*** Se /Andersson et al. 2002/.

Tabell 9-2. Sammanställning av dokumentationen av hydrogeologisk datatolkning och matematisk modellering utförd i samband med konstruktion och drifttagande av SFR-anläggningen. Från /SKB 2002/.

Referens	Typ av rapport	Modelleringskod
/Carlsson och Olsson 1977/	Datatolkning	
/Axelsson och Carlsson 1981/	Modellering	GEOFEM-G
/Carlsson och Olsson 1981/	Datatolkning	
/Carlsson et al. 1985/	Datatolkning	
/Axelsson 1986/	Modellering	SLAEM
/Carlsson et al. 1986/	Datatolkning	
/Christiansson 1986/	Datatolkning	
/Carlsson och Christiansson 1987/	Datatolkning	
/Carlsson et al. 1987/	Modellering	GWHRT
/Axelsson 1997/	Datatolkning	
/Axelsson och Hansen 1997/	Datatolkning	
/Stigsson et al. 1999/	Modellering	SUTRA
/Holmén och Stigsson 2001a/	Modellering	GEOAN
/Axelsson et al. 2002/	Datatolkning	

Den senaste modelleringen utfördes av /Holmén och Stigsson 2001a/ (med ett addendum /Holmén och Stigsson 2001b/). Syftet var att uppskatta det framtida flödet genom SFR-förvaret och att producera indata till den kvantitativa säkerhetsanalysen av SFR. Studien baserades på en systemanalytisk metod, där det studerade systemet är grundvattenflödet i tunnlarna och bergmassa vid SFR. De upprättade modellerna är tredimensionella, tidsberoende matematiska beskrivningar av detta system. Modellerna representerar tunnelsystemet vid SFR och omgivande bergmassa med regionala och lokala sprickzoner. Det studerade området representeras i olika skalor med olika upplösning. De lokala och detaljerade modellerna omfattar en detaljerad redogörelse för tunnelsystemet med omgivande bergmassa och sprickzoner vid SFR. Dessutom innehåller den detaljerade modellen en beskrivning av de olika strukturer som förekommer inuti förvarstunnlarna. På grund av landhöjningen kommer strandlinjen att dra sig tillbaka vid det studerade området. Denna process är inkluderad i modelleringen. Den studerade perioden börjar vid 2 000 AD och fortsätter tills stationärliknande förhållanden erhålls för området kring SFR, vid ca 6 000 AD.

Modelleringsresultatet indikerar att så länge SFR är havstäckt, kommer både det regionala grundvattenflödet och tunnelflödena att vara små. Emellertid kommer havet att dra sig tillbaka på grund av fortsatt landhöjning, och därför kommer den generella flödesriktningen för grundvattnet vid SFR att förändras, från att ha varit riktat nästan vertikalt uppåt till att bli mer horisontellt. Vidare kommer storleken på grundvattenflödet att öka liksom inläckaget till tunnlarna tills dess att stationärliknande förhållanden inträder. För närvarande består SFR av fem förvarstunnlar SILO, BMA, BLA, 1 BTF och 2 BTF. Modellen predikterar att flödet för exempelvis BLA ökar från 10 till 40 m³/år och för BTF från 2 till 8 m³/år. För avfallsdomänerna i SILO och BMA kommer flödet att vara mindre än 0,3 m³/år.

Modellen förutsäger också att så länge som havet täcker SFR kommer flödesvägarna från förvaret att vara korta och nästan vertikala, från förvarstunnlarna upp till havsbotten. När den generella flödesriktningen för grundvattnet vid SFR förändras till ett mer horisontellt flöde, förändras också flödesvägarna som då blir längre och mer komplicerade. Medelvärdet för flödesvägarnas längd ökar från att ha varit kortare än 100 m (minimum är ca 66 m) till att bli flera hundra meter. Med avseende på flödesvägarna från förvarstunnlarna, varierar genombrottsiderna mellan några tiotals år till flera hundra år, men längs de långsammaste flödesvägarna kan flödestiden bli mer än 1 000 år. De kortaste genombrottsiderna erhålls vid ca. 3 000 AD–4 000 AD. Under denna period är grundvattenflödet större än vid 2 000 AD, och flödesvägarna är fortfarande korta.

I /Holmén och Stigsson 2001ab/ behandlas även flera andra aspekter på de hydrogeologiska förhållandena vid SFR, t ex utströmningsområden för flödesvägarna från SFR och utspädningen i dessa områden, hydraulisk interaktion mellan tunnlår, tunnelvattnets ursprung mm och redovisar även dataosäkerheter.

Studien i /Holmén och Stigsson 2001ab/ kan ses som utgångspunkten för fortsatt hydrogeologisk modellering vid SFR, dvs utgör modellversion 0. Modellområdena vid den fortsatta modelleringen kommer dock inte att vara identiska med modellområdena i /Holmén och Stigsson 2001ab/, jfr figur 9-10. Det lokala område som kommer att modelleras vid Projekt SFR-utbyggnad överensstämmer dock ganska väl med det detaljerade området hos /Holmén och Stigsson 2001ab/.

Modelleringsarbetet i Projekt SFR utbyggnad startar under våren 2008 med implementering av befintlig kunskap i en uppdaterad beräkningsmodell, version 0.0, i programvaran Darcy Tools. Därefter kommer ett antal övningar att genomföras för att jämföra modellen med tidigare övningar i programvaran GEOAN /Holmén och Stigsson 2001a/.

9.2.4 Hydrogeokemi

Hydrokemiska undersökningar av grundvattnet i borrhål i anslutning till SFR-anläggningen utfördes innan förvaret togs i drift. Därefter har vattenprovtagning skett inom ett program för bergkontroll som pågått sedan 1989. Resultat från dessa studier återfinns bl a hos /Nilsson 2002, Holmén och Stigsson 2001ab, Jerling et al. 2001, Karlsson et al. 2001, Kautsky 2001, Kumblad 1999, 2001, Lindgren et al. 2001, Moreno et al. 2001, Riggare och Johansson 2001, Stigsson et al. 1999, Andersson et al. 1998ab, Axelsson och Hansen 1997/.

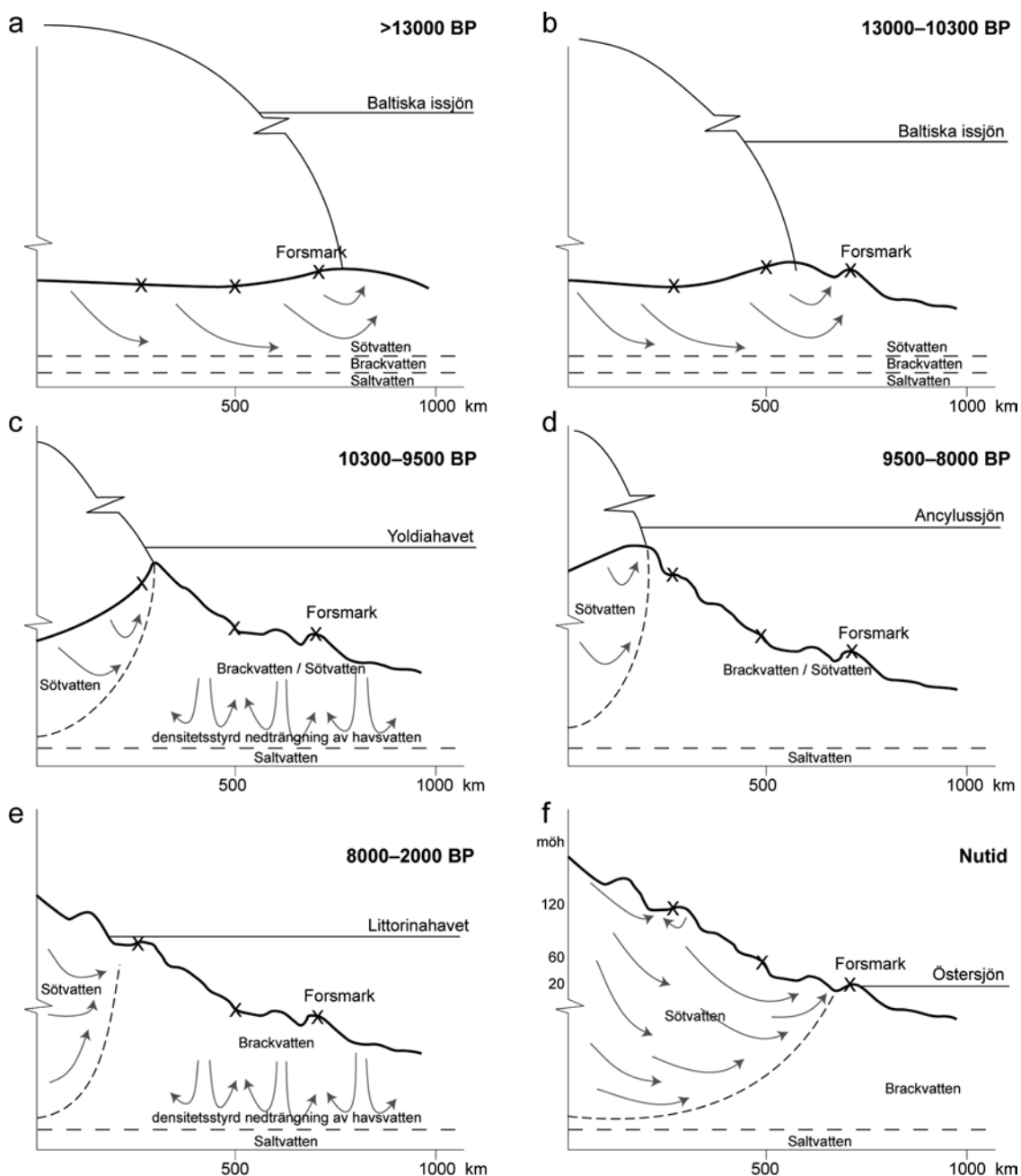
En utvärdering av grundvattenförhållandena vid SFR, främst med avseende på förändringar och trender som orsakats av ändrade hydrauliska förhållanden på grund av SFR-anläggningen, har gjorts av /Laaksuharju och Gurban 2003/. Denna modelleringsövning, som inte gör anspråk på att vara en fullständig kemisk karakterisering av platsen, är den senast utförda för SFR-området och utgör modellversion 0 för den planerade hydrokemiska modelleringen inom Projekt SFR-utbyggnad. Modellversion 0 tar inte hänsyn till nya kunskaper och erfarenheter som erhållits under PLU.

Det första steget i modelleringsarbetet var att konstruera en glacial/postglacial scenariomodell baserad på kända paleogeologiska händelser. Värde av en scenariomodell ligger i att den identifierar och begränsar de olika grundvattentyper som kan tänkas förekomma i olika proportioner i dagens grundvatten. De glaciala/postglaciala händelser som enligt rapporten har påverkat området i anslutning till SFR-anläggningen beskrivs kortfattat nedan samt illustreras i figur 9-6, se även /Björck 1995/ och /Laaksuharju et al. 1999/.

- När inlandsisen bildades för ca 100 000 år sedan trängde permafrosten ner till flera hundra meters djup under markytan. Detta medförde att grundvattnets sammansättning koncentrerades genom frysning. Grundvattnet fick därmed en högre densitet och sjönk i akvifären, till en nivå där det befintliga grundvattnet (gammalt salt grundvatten inneslutet i berggrundens sprickor och porer, s k brine) hade motsvarande salthalt och densitet (figur 9-6 a).
- När inlandsisen sedan smälte (> 13 000 BP) och isfronten drog sig tillbaka (figur 9-6 a och b), pressades glacialt smältvatten ner i berggrunden under avsevärt övertryck. Det exakta penetrationsdjupet är alltså okänt, men resultat från hydrogeologisk modellering indikerar djup på minst flera hundra meter /Svensson 1996/.
- När inlandsisen lämnat området kom under perioden 13 000–2 000 BP flera sötvatten- och brackvattenstadier att täcka SFR-området. Av dessa hade endast Yoldiahavet och Littorinahavet vatten av tillräckligt hög densitet för att det skulle kunna tränga ner i berggrunden och påverka grundvattensammansättningen, speciellt i mer högkonduktiva partier (figur 9-6 b–e). Relationen mellan densiteten hos det inträngande havsvattnet och grundvattnets densitet bestämde havsvattnets penetrationsdjup. Littorinahavet (8 000–4 000 BP) hade det saltaste vattnet (ca dubbelt så hög salthalt som dagens Östersjövatten) och därför nådde vattnet från detta hav djupast. Vid inträngningsprocessen kom således det då befintliga grundvattnet, dvs brine och glacialt grundvatten, att påverkas av marint brackvatten.

- I de landområden som så småningom höjde sig ur havet, utbildades på grund av densitetskillnaderna, en sötvattenkudde bestående av meteoriskt grundvatten ovanpå det salta grundvattnet. Genom fortsatt landhöjning ökade den hydrauliska gradienten, så att grundvattnet i berggrundens övre delar gradvis började sköljas bort av meteoriskt vatten. Eftersom SFR-området som helhet fortfarande befinner sig i en strandzon, som endast delvis höjt sig ur havet, berörs området alltså endast delvis av denna urskölningsprocess, men med fortsatt landhöjning kommer den att bli alltmer påtaglig (figur 9-6 f).

Många av de händelser som beskrivs och illustreras ovan kommer att repeteras under förvarets livstid som omfattar flera hundra år. Detta kommer att leda till att grundvatten av meteoriskt-, marint-, glacialt- och av brine-ursprung kommer att blandas enligt nya komplexa mönster på olika djup i berggrunden, beroende bl a på karaktären hos hydrauliskt konduktiva sprickor och zoner, densitetskillnader hos olika grundvatten och artificiella åtgärder som tunnelbrytning, storskalig pumpning etc i SFR-området.

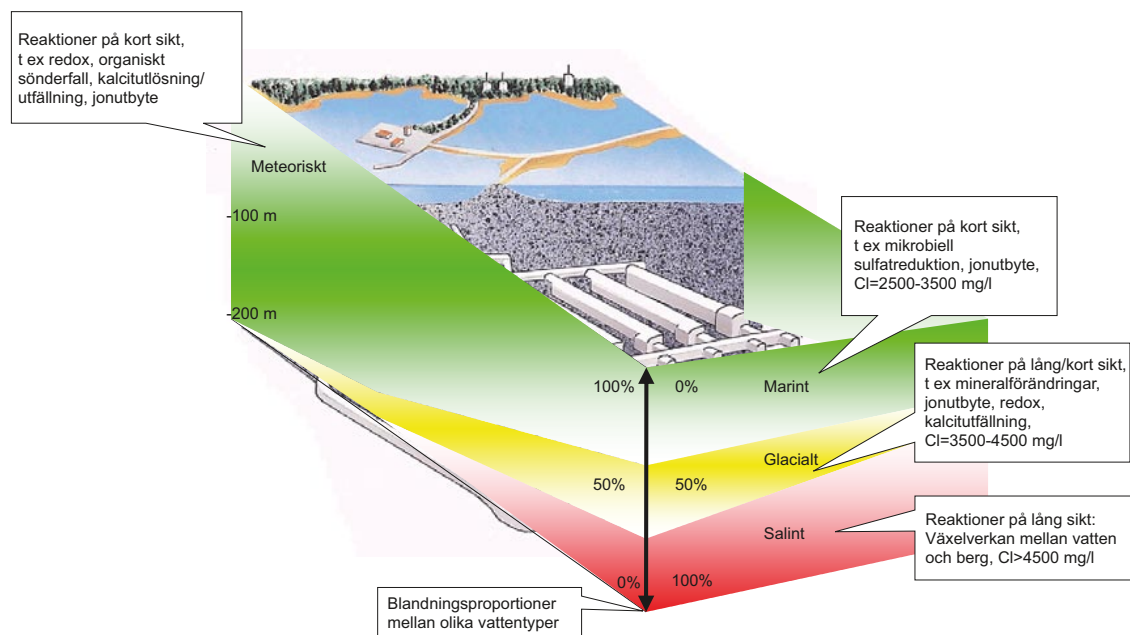


Figur 9-6. Konceptuell scenariomodell för Forsmark-/SFR-området. För förklaring, se text ovan. Efter /Laaksuharju och Gurban 2003/.

Utgående från den ovan beskrivna glaciala/postglaciala scenariomodellen utförde /Laaksuharju och Gurban 2003/ en hydrogeokemisk modellering av grundvattenförhållandena i SFR-förvaret i syfte att beskriva grundvattnets ursprung, blandningsförhållanden och reaktionsmönster. Efter en inledande utvärdering av olika grundvattenvariabler och egenskaper utfördes massbalansberäkningar och speciering baserat på termodynamiska data vilket bland annat ger information om dominerande kemiska reaktioner. Vidare utfördes blandningsberäkningar, s k M3-modellering (Multivariate Mixing and Mass-balance calculations), se /Laaksuharju och Skårman 1995/. M3-modellering baseras på antagandet att grundvattnets sammansättning alltid är ett resultat av blandning och ständigt pågående kemiska reaktioner. De beräknade blandningsproportionerna beskriver ursprung och indikerar flödesvägar. Skillnader i blandade och verkliga vattensammansättningar påvisar dominerande reaktionsprocesser.

Resultatet av modelleringsarbetet sammanfattades i en schematisk platsbeskrivande hydrogeokemisk modell som illustreras i figur 9-7. Figuren visar den ungefärliga rumsliga fördelningen av de viktigaste identifierade grundvattentyperna, indikerar blandningsförhållandena och beskriver de viktigaste kemiska reaktionerna. De senaste kunskaperna och erfarenheterna från PLU har dock inte applicerats på denna modellversion 0. Några exempel på förändrade synsätt som uppstått under modelleringen för PLU och som är relevanta även för den fortsatta hydrokemiska modelleringen inom Projekt SFR-utbyggnad, listas nedan:

- Mindre förändringar i den glaciala/postglaciala scenariomodellen, se /SKB 2008/.
- Observationer inom kandidatområdet för PLU visar att grundvattnets sammansättning/ursprung skiljer sig beroende på om vattnet kommer från deformationszoner eller enskilda sprickor i bergmatrisen mellan deformationszoner. Sättet att presentera den rumsliga fördelningen av olika grundvattentyper har därför förändrats, se /SKB 2008, figur 6-1 och 6-2/. SFR-data indikerar att liknande samband råder även i SFR-förvaret vilket inte framgår av figur 9-7.
- Tidigare har modeller för grundvattnets utveckling begränsats till tiden efter sista glaciationen. Hydrogeokemin i Forsmarksområdet går dock inte att förklara utan att införa en mycket gammal grundvattenkomponent (minimum 1,5 miljoner år). Det är dock troligt att den komponenten inte kan spåras på de begränsade djup som undersöks inför utbyggnaden av SFR.

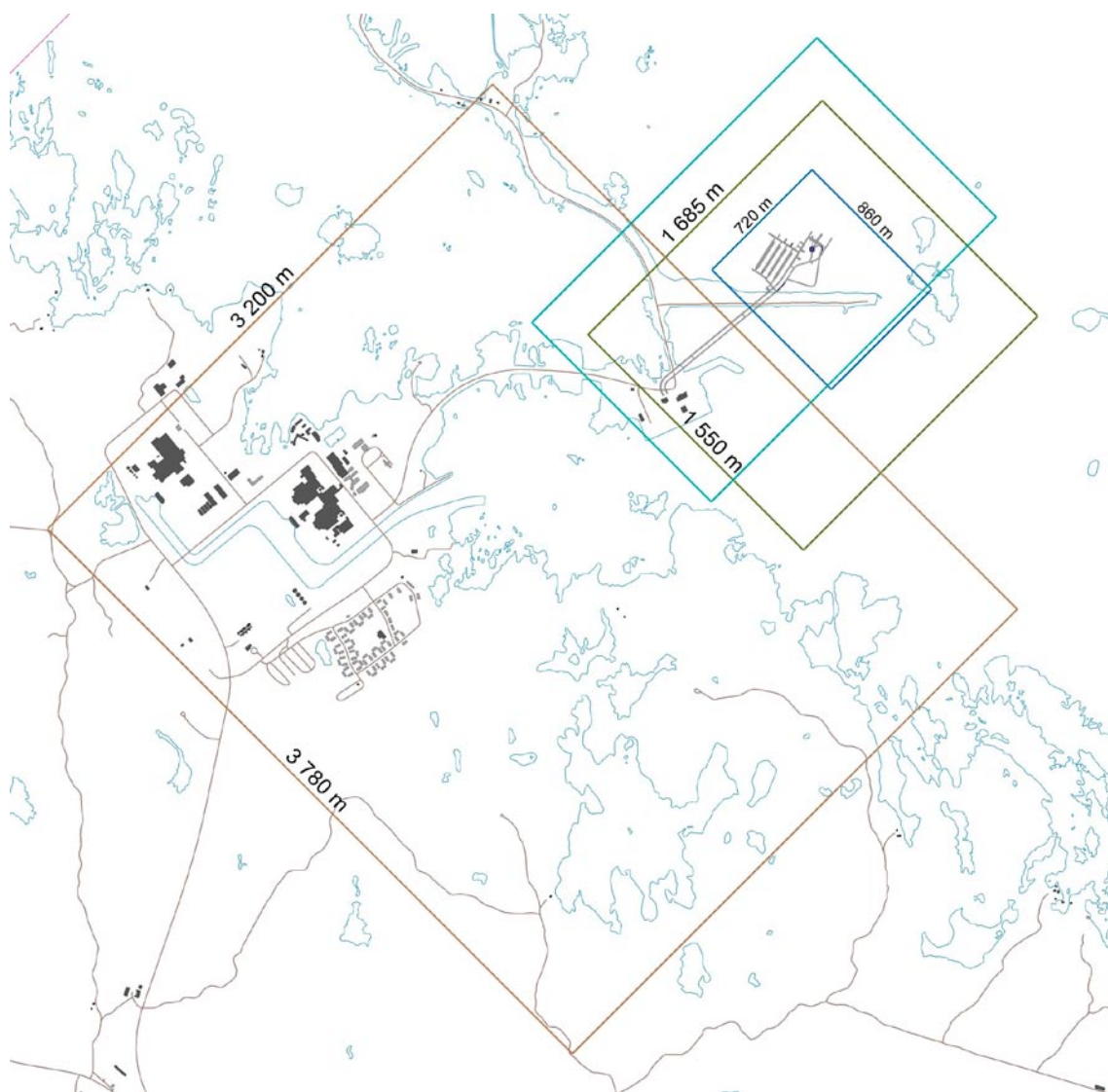


Figur 9-7. Schematisk platsbeskrivande hydrogeokemisk modell för SFR. Dominerande vattentyper, blandningsförhållanden och de viktigaste reaktionerna indikeras. De dominerande grundvattentyperna är vatten av: 1) meteorisk typ, (HCO_3 -rikt vatten), 2) marin typ (Na-Cl rikt vatten), 3) glacial typ (Na-Ca-Cl -rikt vatten med lågt Syre_{18} -innehåll) och 4) salin typ (Na-Ca-Cl -rikt vatten med högt Syre_{18} -innehåll). Efter /Laaksuharju och Gurban 2003/.

9.3 Modellering efter version 0

I figur 9-8 illustreras de områden som omger den befintliga och den planerade SFR-anläggningen inom vilka litologisk-strukturgeologisk modellering kommer att utföras i anslutning till de planerade geovetenskapliga undersökningarna. I figuren anges även modelleringsdjupen. Det geometriska ramverket för den geologiska modellen kommer att användas även av övriga discipliner. Modelleringen inom hydrogeologi är dock även beroende av ett betydligt större regionalområde, vilket illustreras i figur 9-10.

Kunskapen om platsen kommer att växa fram successivt under undersökningen och läggas till nuvarande kunskap, varför de olika analyserna av platsen kommer att utföras stegvis. Resultaten av tidiga analyser kommer att användas för att rikta in efterföljande undersökningsinsatser. Utgångspunkten för den kommande platsmodelleringen är kvalitetssäkrade primärdata från undersökningarna, vilka lagras i databaserna Sicada och GIS. Verktyget för tredimensionell modellering, RVS, är kopplat till Sicada för bearbetning och processering av data. Modelleringen utförs integrerat mellan de olika ämnesområdena så att därmed konceptuellt överensstämmande beskrivningar av bergets sprickgeometri och övriga geologiska/bergmekaniska karaktär och av de hydrauliska och hydrogeokemiska egenskaperna kan erhållas.



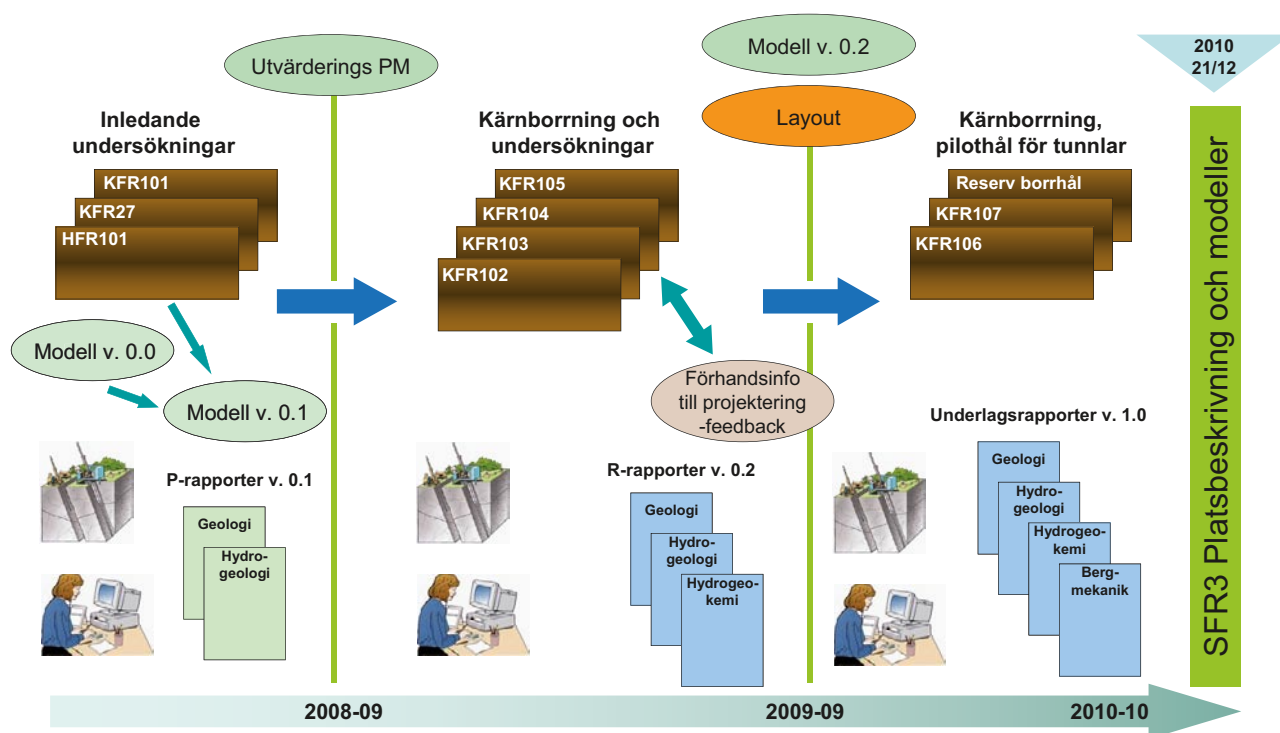
Figur 9-8. Föreslagna modellområden för geovetenskaplig modellering under Projekt SFR-utbyggnad. Liten blå ruta = det lokala modellområdet (720×860 m), grön rektangel = regionalt modellområde (1 685×1 550 m), stor brun rektangel = det lokala modellområdet vid PLU (visas som jämförelse). Modelldjupen är föreslagna att bli 300 m för lokalmodellen och 1 100 m för regionalmodellen

De ämnesspecifika modellerna tas fram genom utvärdering av primärdata. Den analysmetodik som fortlöpande utvecklats under PLU förväntas i stor utsträckning vara användbar även i samband med platsundersökningen inom Projekt SFR-utbyggnad.

I figur 9-9 visas sambandet mellan de olika stegen i undersökningarna tillsammans med etapper för redovisning av analys och modelleringsresultat. Tabell 9-3 redovisar övergripande milstolpar för modelleringsarbetet, med tillgängliga datamängder.

Tabell 9-3. Tidpunkter för avstämning, tillgängliga datamängder och planerade resultatrapporter.

Tidpunkter för avstämning	Tillgängliga data	Utvärdering/modellering
Våren 2008	Uppdaterad information avseende: magnetisk lineamentsmodell, transformationssamband (TU- > RT90)	P-rapport geologimodell v 0.1
Hösten 2008	Undersökningsdata från borrhål: HFR101–105 KFR101	P-rapport hydromodell v 0.1 Utvärderings PM (platsval)
Våren 2009	Undersökningsdata från borrhål: KFR102A, KFR102B, KFR103 och KFR104	Sammanfattande P-rapport Kemi
Hösten 2009	Undersökningsdata från borrhål: KFR105 (under jord)	Förhandsinformation till Projektering R-rapport geologimodell v 0.2 R-rapport hydromodell v 0.2 Layout från Projektering
Våren 2010	Undersökningsdata från borrhål: KFR106 och KFR107 (under jord)	R-rapport kemimodell v 0.2 (begränsad modelleringsinsats, ej data från KFR106–107)
Hösten/vintern 2010	Undersökningsdata från reservborrhål	Underlagsrapporter till platsbeskrivande modell SFR 3 Geologimodell v 1.0 Hydromodell v 1.0 Kemimodell v 1.0 (sent 2010)



Figur 9-9. Samband mellan undersökningar, analys och modellering.

9.3.1 Geologi

Den geologiska modelleringen omfattar två delmodeller; en geometrisk modell för bergenheter och en deterministisk deformationszonsmodell. Arbetet utförs enligt den metodik som SKB har utarbetat under lång tid och som redovisas i bl a /Munier et al. 2003/. Metodiken har tillämpats och utvecklats under modelleringarbetet vid PLU.

Under de inledande aktiviteterna kommer en geometrisk deformationszonsmodell, version 0.1, att tas fram med stöd av befintliga SFR-data och en ny tolkning av lågmagnetiska lineament från den under PLU utförda detaljerade magnetometermätningen /Isaksson et al. 2007/. Dessutom kommer de uppdateringar som gjorts i /Stephens et al. 2007/ att utvärderas. Deformationszonsmodellen kommer att användas för att prediktera läget av deformationszoner i borrhål och av den hydrauliska störning som orsakas av borrhågen. Förutsägelse jämförs med utfallet efter att borrhålet är borrarat, och en bedömning görs om utfallet ligger inom osäkerhetsintervallet för modellen. Vartefter nya data från Projekt SFR-utbyggnad blir tillgängliga uppdateras modellen till ny version.

Den slutliga geologiska modellen, version 1.0, ska ge det underlag Delprojekt projektering behöver för att producera layouter för anläggningsutformningen samt det underlag Delprojekt säkerhetsanalys är i behov av för att genomföra det kommande säkerhetsanalysprojektet.

9.3.2 Bergmekanik

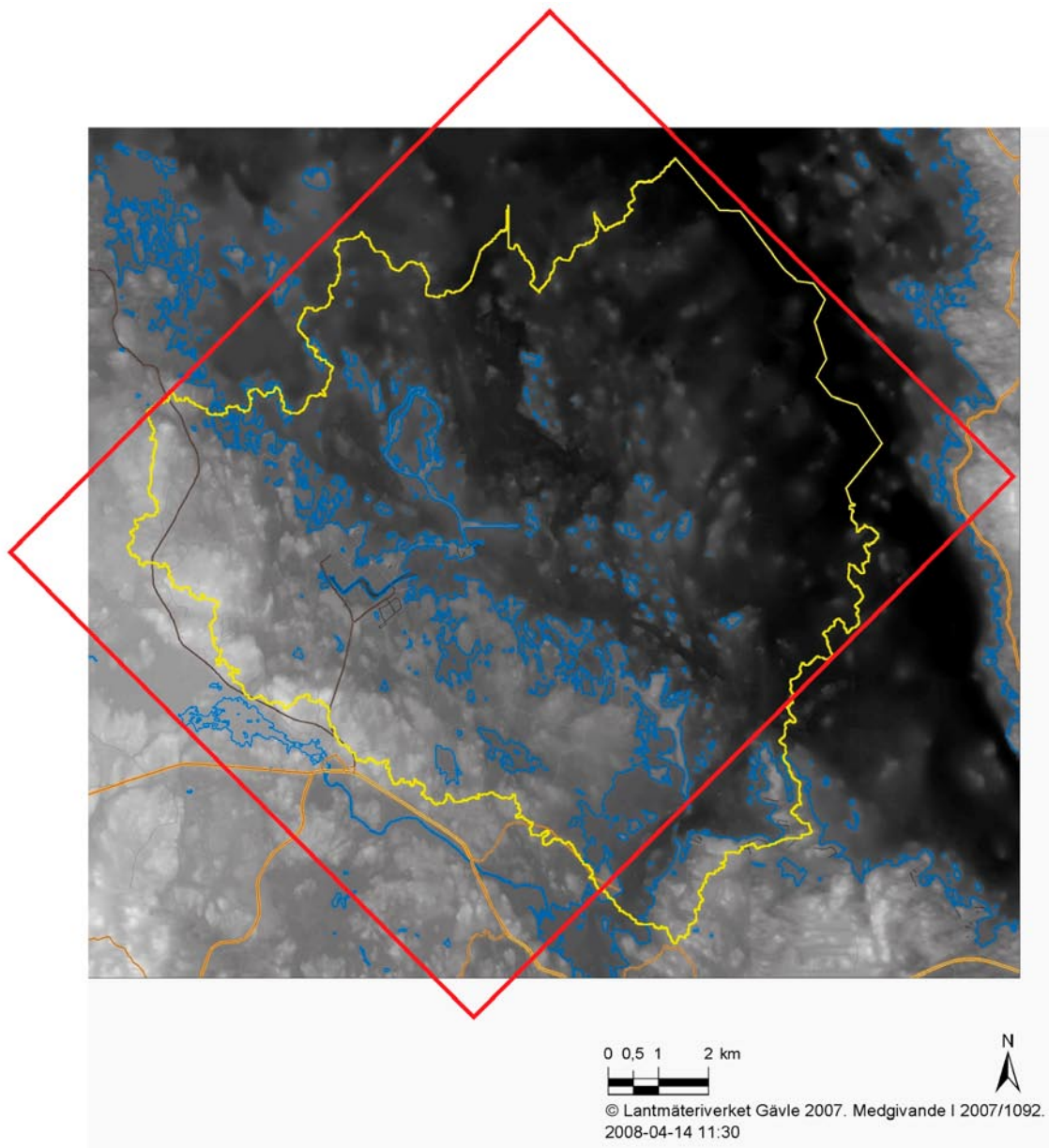
Den existerande SFR-anläggningen är väl dokumenterad. Med stöd av kunskapsläget om de bergmekaniska förhållandena i denna och utifrån det faktum att PLU-data inte motsäger tidigare kunskap från SFR, bedöms det tillräckligt att först under senare skede, i samråd med Delprojekt projektering, komplettera dataunderlaget med verifierande bergmekaniska undersökningar. Den förväntade omfattningen av ett bergmekaniskt undersökningsprogram beskrivs i kapitel 6.

Befintlig bergmekanisk kunskap kommer att uppdateras med nya undersökningsresultat. Det är dock ovisst om det är motiverat att upprätta någon numerisk bergmekanisk modell, då tillgänglig information från den befintliga anläggningen och förundersökningarna från Projekt SFR-utbyggnad kan vara tillräcklig för att bedöma byggbarheten. Däremot kommer olika geologiska domäner att tillskrivas specifika bergmekaniska egenskaper, information som utnyttjas vid framtagande av bergrummens geometrier och dimensionering av förstärkningsåtgärder. Enklare bergmekaniska beräkningar (2D) planeras att genomföras efter att en preliminär layout tagits fram av Delprojekt projektering. Därefter, i ett senare skede, görs bekräftande beräkningar/analyser av geometrier och föreslagna förstärkningslösningar.

Sammanfattningsvis kan konstateras att erfarenheterna från den befintliga SFR-anläggningen visar att det, ur bergmekanisk synpunkt, går utmärkt att bygga tunnlar och bergrum i varierande geometrier i det aktuella området. De planerade nya tunnarna kommer att anläggas i direkt anslutning till befintlig anläggning och med ungefär motsvarande geometrier som tidigare. Byggbarheten även för den planerade anläggningen förväntas därför vara god.

9.3.3 Hydrogeologi

Ämnesområdet hydrogeologi utarbetar en beskrivning av de hydrogeologiska förhållandena i berget inom den planerade undersökningsvolymen. Arbetet är planerat att, utgående från modellversion 0, följa en uppdaterad version av den metodik för hydrogeologisk modellering som presenteras av /Rhén et al. 2003/. Den hydrogeologiska modelleringen omfattar konceptuell modellering, tredimensionell modellering av deformationszoner, modellering av spricknätverk (DFN) samt kalibrering med hjälp av bl a genomförda interferenstester. Det regionala modellområdet, se figur 9-10, är avgränsat efter den regionala vattendelaren och bedöms ha en sådan areal att randvillkoren kan beskrivas tillfredsställande.



Figur 9-10. Det gula, oregelbundna området visar det planerade regionala modellområdet för hydrogeologisk modellering inom Projekt SFR-utbyggnad. Den röda rutan visar läget av det regionala modellområdet i /Holmén och Stigsson 2001a/.

Vartefter nya data från Projekt SFR-utbyggnad kommer in, uppdateras sedan modellen till nya versioner. Detta sker både genom implementering av en ny version av den geologiska modellen (version 0.1) och genom uppdatering av parametrar för berg- och sprickdomäner.

Den slutliga hydrogeologiska modellen, version 1.0, ska tillhandahålla det underlag som Delprojekt projektering behöver för att kunna ta fram layouter för den planerade anläggningen, samt det underlag som behövs för att genomföra den kommande säkerhetsanalysen.

9.3.4 Hydrogeokemi

Den fortsatta hydrogeokemiska modelleringen har M3-modellering i modellversion 0 (se avsnitt 9.2.4) som utgångspunkt. Modelleringen ska resultera i en övergripande beskrivning av grundvattnet i undersökt bergvolym med avseende på kemisk sammansättning, ursprung, utveckling (kemiska reaktioner och processer) och uppehållstider. Nya data från

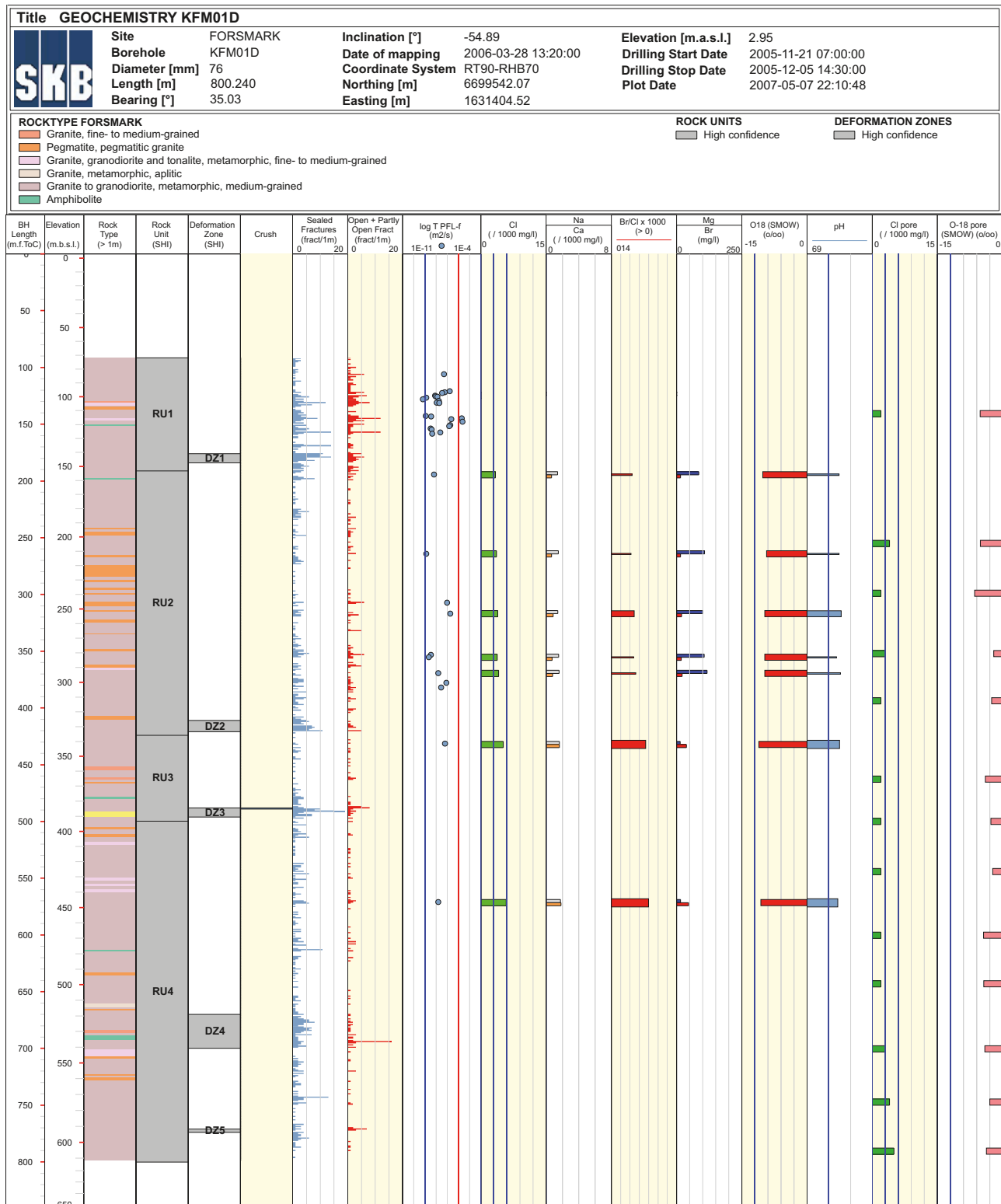
SFR 3-undersökningen förmodas verifiera och eventuellt förfina existerande palaeohydrogeokemiska modell från PLU i Forsmark /SKB 2008/. För säkerhetsanalysens ändamål behövs dels vissa parameterdata som används för beräkningsändamål, dels en god konceptuell förståelse av de hydrogeokemiska förhållandena. Det senare är nödvändigt för att ge möjlighet att förutse kortsiktiga och långsiktiga förändringar i grundvattnets kemiska sammansättning som kan inträffa i ett utbyggt SFR och i omgivande berg. Modelleringsarbetet kommer i tillämpliga delar att följa den tidigare PLU-metodiken för hydrogeokemisk modellering /Smellie et al. 2002/.

Den egentliga modelleringen föregås av några utvärderingssteg enligt följande; 1) värdering av vattenprovens och mätningarnas representativitet, 2) två- och tredimensionell presentation av hydrokemiska data (djupberoenden, borrhålspresentationer i WellCad diagram, RVS-presentationer etc) samt 3) en orienterande genomgång och utvärdering/tolkning av data med hjälp av bland annat punktdiagram för att gruppera data och avslöja trender samt jämförelser med andra platser/undersökningar som t ex PLU. Ett exempel på WellCad diagram med hydrokemiska data ges i figur 9-11.

Modelleringen kommer att resultera i en beskrivning av olika reaktions- och blandningsmönster och hur dessa har förändrats med tiden. Information från mikrobiella undersökningar kan bidra till att kvantifiera och förstå processer som förändrar och påverkar vattenkemin. Information om bergets hydrauliska egenskaper samt flödesriktningar från hydrogeologiska mätningar och modelleringar är viktiga underlag för den hydrogeokemiska modelleringen. Visualisering av uppmätta och/eller modellerade värden är ett användbart redskap för att förstå rumslig variabilitet och sambandet med de hydrogeologiska tolkningarna. En preliminär kemimodell v 0.2 som baserar sig på data från ytborrhål samt det första borrhålet under jord (KFR105) presenteras våren 2010. Efter komplettering och eventuell revidering, när hydrogeokemiska data från samtliga tunnelborrhål finns tillgängliga, redovisas en slutlig kemimodell v 1.0 vid årsskiftet 2010–2011.

För utvärdering, modellering och visualisering används bland annat följande datorprogram:

- AquaChem = kemiutvärderingsprogram med standardplottar
- Statgraphics = allmänt statistiskt program
- PHREEQC = program för kemiska jämviktsberäkningar
- M3 = program för blandningsberäkningar kopplade till kemiska reaktioner /Laaksoharju et al. 1999/ (Multivariate Mixing and Mass balance calculation)
- TECPLOT = visualiserings/animerings program
- OpenDX = 3D visualisering



Figur 9-11. Exempel på hydrokemisk borrhålspresentation i WellCad-diagram. Förutom hydrokemidata presenteras valda geologiska och hydrogeologiska egenskaper av betydelse för de hydrogeokemiska förhållandena.

10 Undersökningarnas miljöpåverkan och kontrollprogram

I detta kapitel redovisas den miljöpåverkan som undersökningarna kan ge upphov till samt de åtgärder som planeras för att begränsa denna påverkan. Erfarenheter från miljöstyrning av platsundersökningen för slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark som genomförts mellan 2002 och 2007 utgör ett viktigt underlag för det fortsatta arbetet med miljöstyrning av undersökningarna. En viktig skillnad är att undersökningarna för SFR kommer att genomföras i ett område med väsentligt lägre naturvärden och inte lika känsliga områden.

Eftersom undersökningarna kommer att genomföras från en anlagd pir, se figur 10-1 eller under jord från befintlig anläggning bedöms påverkan på naturmiljön i samband med etablering av borrhåll och borrhålling bli mycket liten. De undersökningar som planeras omfattar till största delen undersökningar i borrhåll vilket innebär att ingen ytterligare påverkan på naturmiljön sker.

Kontroll mot SKB:s tillgänglighetskarta samt fältkontroll av naturvärden på piren i anslutning till planerade borrhåll har genomförts i planeringen av projektet och inga känsliga eller skyddsvärda arter eller biotoper identifierades.



Figur 10-1. Piren utgörs av sprängstensmassor från byggandet av kärnkraftverken och SFR och är bevuxen med lövsly och havtorn. Foto på pirens södra sida. Foto: N Heneryd.

10.1 Miljöpåverkan

Det är främst etablering av infrastruktur i form av vägar och borrhplatser samt borrhning som bedöms ge upphov till påverkan på naturmiljön. Etablering av borrhplatser och infrastruktur omfattar dels grävning, vilket innebär ianspråktagande av mark, och dels användande av entreprenadmaskiner vilket ger upphov till buller och utsläpp till luft. I samband med grävning, borrhning och transport av utrustning finns även risk för läckage och spill av olja eller drivmedel.

I samband med borrhning används vatten för kylning av borrhkronan samt uppföring av borrhkax. Returvattnet från borrhningen innehåller uppslammat borrhkax och kan även ha förhöjd salthalt jämfört med recipienten, vilken i det här fallet är Östersjön. Viss grumling kan uppstå kring utsläppspunkten men påverkan är av mindre omfattning eftersom utspädningen är mycket stor. Större delen av borrhkaxet skiljs dessutom av innan vattnet släpps ut i havet. I samband med hydrogeologiska borrhålsundersökningar kommer vatten att pumpas ur borrhålen. Detta vatten kommer att avledas direkt till havet och bedöms inte ge upphov till någon miljöpåverkan i form av grumling eller förorening.

Planerade borrhplatser på markytan är lokaliserade till den anlagda piren som finns ovanför befintlig anläggning. Piren utgörs av sprängstensmassor från byggandet av kärnkraftverken och SFR och är bevuxen med lövsly och havtorn. Grävning och etablering av borrhplatser på piren bedöms inte ge upphov till negativ påverkan på naturmiljön.

Under platsundersökningen i Forsmark utfördes under 2004 bullermätningar under pågående borrhning /Zetterling 2005/. Utifrån dessa resultat gör SKB bedömningen att risken för bullerstörning på friluftsliv samt närliggande fågelskyddsområden är liten.

Elförsörjning till borrhning och undersökningar på piren kommer dels att ske med dieseldrivet elaggregat för borrhmaskinens högre effektbehov (400 V/250 A) och dels med en elkabel från SFR (400 V/63 A) för kring- och undersökningsutrustning. För att minska behovet av grävning kommer denna elkabel att läggas på havsbotten. Vid landfästena kommer kabeln att förankras vilket innebär att grävning kommer att ske inom ett område om några kvadratmeter vid varje strand. I samband med grävningen finns risk för grumling.

För att begränsa miljöpåverkan av utsläpp till luft kommer drivmedel av högsta miljöklass att användas i samband med borrhning.

Undersökningar i borrhål bedöms inte ge upphov till påverkan på naturmiljön.

10.2 Kontrollprogram

SKB har god erfarenhet av miljöstyrning av de undersökningar som planeras. Genom att ställa långtgående krav och föra en dialog med de entreprenörer som arbetar med undersökningarna kan miljöpåverkan begränsas.

Under undersökningarna kommer följande åtgärder att vidtas:

- Alla som jobbar med undersökningarna ska genomgå en introduktionsutbildning.
- På borrhälsplatser och i arbetsfordon ska det finnas utrustning för uppsamling av spill.
- Maskiner för kärnbörning placeras på gjuten platta med kant vilket förhindrar markförorening och möjliggör uppsamling i händelse av läckage.
- Maskiner för hammarbörning placeras på vätsketät geotextilduk för att förhindra markförorening och möjliggöra uppsamling av spill.
- Borrentreprenören ska genomföra regelbundna kontroller av slangar och kopplingar för att förebygga läckage.
- Drivmedelscisterner ska vara invallade och försedda med regnkrag.
- Uppfordrat returvatten kommer att ledas genom sedimentationscontainrar för avskiljning av borrhax innan det avleds till Östersjön.
- Mätning av mängd, pH och konduktivitet ska göras på returvattnet.

Under börning kommer grundvattennivåerna i omgivande berg att övervakas inom ramen för SKB:s HMS (Hydro Monitoring System).

Vid börning under jord kommer returvatten från börningen, efter att det har passerat genom sedimentationscontainrarna, att ledas till befintlig dränagebassäng. Därifrån pumpas vattnet upp till ytan och släpps ut i Östersjön. Innan börning under jord inleds ska ett förslag till övervakning och mätning av detta vatten tas fram och redovisas för länsstyrelsen i Uppsala län.

Vid börning och undersökningar under jord placeras bormaskinen på vätsketät geotextil för att möjliggöra uppsamling av spill.

Referenser

Andersson J, Riggare P, Skagius K (ed), 1998a. Project Safe. Update of the SFR-1 safety assessment – Phase 1. SKB R-98-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson J, Riggare P, Skagius K (ed), 1998b. Project Safe. Update of the SFR-1 safety assessment – Phase 1. Appendices. SKB R-98-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson J, Christiansson C, Hudson J, 2002. Site Investigations – Strategy for Development of a Rock Mechanics Site Descriptive Model. SKB TR-02-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Axelsson C-L, Carlsson L, 1981. Model calculations of the groundwater conditions along a profile at Forsmark. SFR Slutförvar för Reaktoravfall. Arbetsrapport SFR 81-11, Svensk Kärnbränslehantering AB. (In Swedish).

Axelsson C-L, 1986. Modeling of groundwater flow with salt-water interface at the final repository for reactor waste (SFR). SSI P 311.85.

Axelsson C-L, 1997. Data for calibration and validation of numerical models at SFR nuclear waste repository. SKB R-98-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Axelsson C-L, Hansen L, 1997. Update of structural models at SFR nuclear waste repository, Forsmark, Sweden. SKB R-98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Axelsson C-L, 1998. Data for calibration and validation of numerical models at SFR Nuclear Waste Repository. SKB R-98-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Axelsson C-L, Ekstav A, Lindblad-Påsse A, 2002. SFR – Utvärdering av hydrogeologi. SKB R-02-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Berg C, Nilsson A-C, 2007. Forsmark site investigation. Hydrochemical monitoring of percussion- and core drilled boreholes. Results from water sampling and analyses during 2006. SKB P-07-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bergman T, Isaksson H, 1996. Förstudie Östhammar. Sammanställning av befintlig geoinformation vid Forsmarksverket. SKB PR D-96-025, del 2, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bergman S, Isaksson H, Johansson R, Lindén A, Persson C, Stephens M, 1996. Förstudie Östhammar. Jordarter, bergarter och deformationszoner. SKB PR D-96-016, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bergman S, Bergman T, Johansson R, Stephens M, Isaksson H, 1998. Förstudie Östhammar. Delprojekt jordarter, bergarter och deformationszoner. Kompletterande arbeten 1998. Del 1: Fältkontroll av berggrunden inom Forsmarks- och Hargshamns. SKB R-98-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Björck S, 1995. A review of the history of the Baltic Sea, 13.0–8.0 Ka BP. In: Quaternary International, Vol. 27, Elsevier Science Ltd. 1040-6182/95, pp.19–40.

Bostadsdepartementet, 1983. Regeringsbeslut 23, 1983-06-22. Tillstånd enligt byggnadslagen till anläggning för slutlig förvaring av låg- och medelaktivt radioaktivt driftsavfall vid Forsmark, Östhammars kommun, Uppsala län.

Carlsson A, Olsson T, 1977. Water leakage in the Forsmark tunnel, Uppland, Sweden. SGU C 734. Stockholm.

Carlsson A, Olsson T, 1981. Hydraulic properties of a fractured granitic rock mass at Forsmark, Sweden. SGU C 783. Uppsala.

- Carlsson L, Carlsten S, Sigurdsson T, Winberg A, 1985.** Hydraulic modeling of the final repository for reactor waste (SFR). Compilation and conceptualization of available geological and hydrogeological data. Edition 1. SKB Progress Report SFR 85-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carlsson L, Winberg A, Arnefors J, 1986.** Hydraulic modelling of the final repository for reactor waste (SFR). "Compilation and conceptualization of available geological and hydrological data" SKB PR SFR 86-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carlsson L, Winberg A, Grundfelt B, 1987.** Hydraulic modelling of the final repository for reactor waste (SFR). Evaluation of the groundwater flow situation at SFR. SKB Progress Report 86-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carlsson A, Christiansson R, 1987.** Geology and Tectonics of Forsmark. SKB Progress Report SFR 87-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carlsson A, Christiansson R, 2007.** Construction experiences from underground works at Forsmark. Compilation Report. SKB R-07-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Christiansson R, 1986.** Geologisk beskrivning av zoner kring slutförvaret. SKB, Arbetsrapport SFR 86-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Christiansson R, Bolvede P, 1987.** Byggnadsgeologisk uppföljning – Slutrapport. SKB SFR 87-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gokall-Norman K, Ludvigson J-E, 2007.** Forsmark site investigation. Hydraulic interference test in borehole HFM14. SKB P-06-196, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gokall-Norman K, Ludvigson J-E, 2008.** Large scale hydraulic interference test with borehole HFM33 as pumping hole. SKB P-07-229, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hansen L, 1989.** Bedrock of the Forsmark area. Technical Report, Swedish State Power Board, Stockholm.
- Hauser W, Geckeis H, Kim J I, Fierz Th, 2002.** A mobile laser-induced breakdown detection system and its application for the in situ-monitoring of colloid migration, Coll. Surf. 203, 2002, 37–45.
- Hauser W, Geckeis H, Götz R, 2003a.** In situ determination of natural ground water colloids in granite shear zones along the Äspö HRL Tunnel by LIBD, 27th Int. conf. on Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Kalmar, S, June 15– 18, 2003.
- Hauser W, Götz R, Geckeis H, Kienzler B, 2003b.** In-situ colloid detection in granite groundwater along the Äspö Hard Rock Laboratory access tunnel, In Laaksoharju, M. Äspö Hard Rock Laboratory, Status report of the Colloid investigation conducted at the Äspö HRL during the years 2000–2003. SKB International Progress Report IPR-03-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Haveman S H, Pedersen K, Routsalainen P, 1999.** Distribution and metabolic diversity of microorganisms in deep igneous rock aquifers of Finland. Geomicrobiol J 16, 277–294.
- Haveman S A, Pedersen K, 2002.** Distribution of culturable anaerobic microorganisms in Fennoscandian Shield groundwater. FEMS Microbiol Ecol 39, 129–137.
- Holmén J, Stigsson M, 2001a.** Details of predicted flow in deposition tunnels at SFR, Forsmark. SKB R-01-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Holmén J, Stigsson M, 2001b.** Modelling of future hydrogeological conditions at SFR, SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Isaksson H, Keisu M, 2005.** Interpretation of airborne geophysics and integration with topography Stage 2 (2002–2004). An integration of bathymetry, topography, refraction seismics and airborne geophysics. SKB P-04-282, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Isaksson H, Thunehed H, Pitkänen T, Keisu M, 2007.** Detailed ground magnetic survey and lineament interpretation in the Forsmark area, 2006–2007. SKB R-07-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jerling L, Isaeus M, Lanneck J, Lindborg T, Schüldt R, 2001.** The terrestrial biosphere in the SFR region. SKB R-01-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Juhlin C, Palm H, 2005.** Forsmark site investigation. Reflection seismic studies in the Forsmark area, 2004: Stage 2. SKB R-05-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karlsson S, Bergström U, Meili M, 2001.** Models for dose assessments. Models adapted to the SFR-area, Sweden. SKB TR-01-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kautsky U (ed), 2001.** The biosphere today and tomorrow in the SFR area. SKB R-01-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kumblad L, 1999.** A carbon budget for the aquatic ecosystem above SFR in Öresundsgrepen. SKB R-99-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kumblad L, 2001.** A transport and fate model of C-14 in a bay of the Baltic Sea at SFR. Today and in future, SKB TR-01-15 Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Skårman C, 1995.** Groundwater sampling and chemical characterisation of the HRL tunnel at Äspö, Sweden. SKB Progress Report PR 25-95-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Skårman C, Skårman E, 1999.** Multivariate Mixing and Massbalance calculations: A new tool for decoding hydrogeochemical information. Applied Geochemistry Vol. 14, # 7, 1999, Elsevier Science Ltd. pp 861–871.
- Laaksoharju M, Gurban I, 2003.** Groundwater chemical changes at SFR in Forsmark. SKB R-03-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Wold S, 2005.** The colloid investigations conducted at the Äspö Hard Rock Laboratory during 2000–2004. SKB TR-05-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Larsson H, Leijon B, 1996.** Bergtekniska erfarenheter i regionen. Bergman I T, Ekman L, Isaksson H, Larsson H, Leijon B: Förstudie Östhammar. Samlingsrapport avseende bergtekniska erfarenheter i regionen, sammanställning av geoinformation vid Forsmarksverket och data från kärnborrhål KFO01 vid Forsmark. SKB PR D-96-025, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindgren M, Pettersson M, Karlsson S, Moreno L, 2001.** Project SAFE Radionuclide release and dose from the SFR repository. SKB R-01-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moreno L, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, 2001.** Project Safe Gas related processes in SFR. SKB R-01-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Stenberg L, Stanfors R, Milnes, A G, Hermanson J, Triumpf C-A, 2003.** Geological Site Descriptive Model. A strategy for the model development during site investigations. SKB R-03-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nilsson A-C, 2002.** Grundvattenkemi i SFR, Resultat av provtagnings- och analyskampanj under år 2000. SKB R-02-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nilsson A-C, 2005.** Platsundersökningar i Forsmark och Oskarshamn. Översikt över provhantlings- och analysrutiner för vattenprov. SKB P-05-198, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Olofsson I, Simeonov A, Stigsson M, Stephens M, Follin S, Nilsson A-C, Röshoff K, Lindberg U, Lanaro F, Fredriksson L, 2007.** Site descriptive modelling Forsmark, stage 2.2. A fracture domain concept as a basis for the statistical modelling of fractures and minor deformation zones, and interdisciplinary coordination. SKB R-07-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pedersen K, 2001.** Project SAFE. Microbial features, events and processes in the Swedish final repository for low and intermediate-level radioactive waste. SKB R-01-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pedersen K, 2007.** Forsmark site investigation. Microorganisms in groundwater from boreholes KFM10A, KFM11A and KFM08D – numbers, viability, and metabolic diversity. SKB P-07-198, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Ramqvist G, 2007.** Borehole project – Final report of Phase 3. SKB R-07-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Regeringsbeslut, 2005.** Miljö- och samhällsbyggnadsdepartementet. Redovisning enligt beslut om tillstånd enligt 136 a § byggnadslagen (1947:385) till anläggning för slutlig förvaring av låg- och medelaktivt radioaktivt driftsavfall vid Forsmark, Östhammars kommun. Regeringsbeslut 22, 2005-03-17.
- Rhén I, Follin S, Hermanson J, 2003.** Hydrological Site Descriptive Model – a strategy for its development during Site Investigations. SKB R-03-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Riggare P, Johansson C, 2001.** Project SAFE Low and intermediate level waste in SFR-1. Reference Waste Inventory. SKB R-01-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1987.** SKB Slutförvar för reaktoravfall-SFR. Slutlig säkerhetsrapport SFR1. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1993.** Slutförvar för radioaktivt driftavfall – SFR2. Slutlig säkerhetsrapport. Reviderad utgåva – Maj 1993, (SKB Final repository for radioactive waste – SFR1. Final safety report. Revised edition – May 1993) Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2001a.** Platsundersökningar. Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram. SKB R-01-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2001b.** Geovetenskapligt program för platsundersökning vid Forsmark. SKB R-01-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2001c.** Site investigations. Investigation methods and general execution programme. SKB TR-01-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2002.** Forsmark-site descriptive model version 0. SKB R-02-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2005a.** Preliminary site description. Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2005b.** Program för fortsatta undersökningar av geosfär och biosfär. Platsundersökning Forsmark. SKB R-04-75, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006.** Site descriptive modelling Forsmark stage 2.1. Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering. SKB R-06-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2007a.** Programme for long-term observations of geosphere and biosphere after completed site investigations. SKB R-07-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- SKB, 2007b.** FUD-program 2007. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008.** Hydrochemistry Forsmark. Site descriptive modeling. SDM-Site Forsmark. SKB R-08-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKBF/KBS, 1982.** Geologiska undersökningar och utvärderingar för lokalisering av SFR till Forsmark, del 2. Arbetsrapport SFR 81-13. Hagconsult AB.
- Smellie J, Laaksoharju M, Tullborg E-L, 2002.** Hydrogeochemical site descriptive model – a strategy for the model development during site investigations. SKB R-02-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephens M B, Fox A, La Pointe P, Simeonov A, Isaksson H, Hermanson J, Öhman J, 2007.** Geology Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stigsson M, Follin S, Andersson J, 1999.** On the simulation of variable density flow at SFR, Sweden. SKB R-99-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stille H, Fredriksson A, Larsson H, 1986.** Large silo for waste material in Forsmark, Sweden. Proc. Int. Symp. ON ROCK STRESS MEASUREMENTS, Stockholm, 1-3 sep 1986, Centek Publishers, Luleå, Sweden.
- Stålhös G, 1989a.** Berggrundskartan 12I Östhammar NO. Sveriges geologiska undersökning, Af 169.
- Stålhös G, 1989b.** Berggrundskartan 12I Östhammar SO. Sveriges geologiska undersökning, Af 172.
- Stålhös G, 1991.** Beskrivning till berggrundskartorna Östhammar NV, NO, SV, SO. Sveriges geologiska undersökning Af 161, 166, 169 och 172.
- Svensson U, 1996.** SKB Palaeohydrogeological programme. Regional groundwater flow due to advancing and retreating glacier-scoping calculations. In: SKB Project Report U 96-35, Stockholm, Sweden.
- Zetterling T, 2005.** Mätning av ljudnivåer kring Forsmark under perioden 25 februari till 6 oktober 2004. Platsundersökning Forsmark. SKB P-04-303, Svensk Kärnbränslehantering AB.