

**R-01-10**

# **Platsundersökningar**

## **Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram**

Svensk Kärnbränslehantering AB

Januari 2001

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Swedish Nuclear Fuel  
and Waste Management Co  
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00

+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19

+46 8 661 57 19



ISSN 1402-3091  
SKB Rapport R-01-10

# **Platsundersökningar**

## **Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram**

Svensk Kärnbränslehantering AB

Januari 2001

# Förord

Arbetet med att ta fram underlag för att lokalisera djupförvaret för använt kärnbränsle sker i två huvudsteg, förstudier och platsundersökningar. Förstudieskedet håller på att slutföras och SKB har i en "Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet" nyligen presenterat de områden på vilka man önskar genomföra platsundersökningar. Målet med platsundersökningsskedet är att få de tillstånd som erfordras för att lokalisera och bygga djupförvaret. Resultaten från de undersökningar, den projekteringsverksamhet och de säkerhetsanalyser som kommer att genomföras för de undersökta platserna kommer att utgöra underlag till SKB:s tillståndsansökan.

SKB har i en tidigare rapport R-00-30 presenterat huvuddragen i hur undersökning och utvärdering av platser kommer att bedrivas. Föreliggande rapport kompletterar denna rapport på så sätt att den ger en fördjupad och detaljerad beskrivning av hur undersökningarna av platsernas geosfär och biosfär kan genomföras. I denna beskrivning ingår precisering av vad som ska eller kan mätas om behov finnes, vilka metoder som ska användas och hur platsbeskrivande modeller ska upprättas. Båda dessa rapporter är generiska, dvs de beskriver hur verksamheten under platsundersökningsskedet kan genomföras utan direkt anpassning till platser som ska undersökas. När innehåll och omfattning av de olika etappernas delsteg anpassas till de olika platserna kan det dock visa sig att vissa undersökningsmoment måste tillföras, medan andra här redovisade är onödiga och därför kan utgå. Ordningföljden mellan olika undersökningsmoment kan också behöva modifieras. Det väsentliga är att den platsspecifika informationen inhämtas när den behövs och att den slutligen är tillräcklig för den platsbeskrivande redovisningen efter genomförd platsundersökning.

För var och en av de valda områdena vidtar nu arbetet med att upprätta platsspecifika genomförandeprogram vilka kommer att anpassas till de valda områdenas förhållanden och speciella frågeställningar. Dessa platsspecifika program, som huvudsakligen kommer att behandla de inledande undersökningarna kommer att presenteras under 2001, varefter inriktningen är att kunna inleda platsundersökningarna i början av 2002.

Föreliggande programrapport med sk ämnesprogram för platsundersökningar har upprättats av en projektgrupp bestående av Roy Stanfors, Leif Stenberg, Ingvar Rhén, Mansueto Morosini, Rolf Christiansson, Anders Fredriksson, Peter Wikberg, Anna Säfvestad, Ann-Chatrin Nilsson, Anders Ström, Peter Andersson, Ulrik Kautsky, Tobias Lindborg, Lennart Ekman, Erik Thurner, Johan Andersson samt undertecknad.

Karl-Erik Almén  
Projektledare

# Sammanfattning

SKB planerar att inleda platsundersökningar år 2002. Ett generellt undersöknings- och utvärderingsprogram har redan presenterats. Det generella programmet anger mål för platsundersökningsskedet och beskriver samordningen mellan huvudaktiviteterna undersökning, projektering och säkerhetsanalys.

Föreliggande rapport är en utvidgning av det generella programmet och beskriver undersökningarnas genomförande i s k ämnesspecifika program för ämnena *geologi, bergmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, hydrogeokemi, bergets transportegenskaper* och *ytnära ekosystem*. Dessutom beskrivs olika tekniska aspekter på borrhning, som utgör en betydande del av undersökningarna. Programmen är generiska, dvs inte anpassade till de specifika förutsättningar som kommer att råda på respektive plats. Utifrån detta möjliga program kommer senare platsspecifika program att upprättas och anpassas efter de platsspecifika frågeställningarna och förhållandena på respektive kandidat område. När innehåll och omfattning av de olika etappernas delsteg anpassas till de olika platserna kan det visa sig att vissa undersökningsmoment måste tillföras, medan andra här redovisade är onödiga och därför kan utgå. Ordningsföljden mellan olika undersökningsmoment kan också behöva modifieras. Det väsentliga är att den platsspecifika informationen inhämtas när den behövs och att den slutligen är tillräcklig för den platsbeskrivande redovisningen efter genomförd platsundersökning.

## Vad ska bestämmas?

I det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet anges vilka parametrar som behöver bestämmas för att bedöma om de krav och önskemål som ställs på berget är uppfyllda. Förutom dessa parametrar behöver ytterligare parametrar bestämmas för att beskriva de ytnära ekosystemen och för att nå en god förståelse av platsen. Ytterligare information om markförhållanden m m behövs för projekteringen av förvarets ovanjordsanläggningar och för att, till exempel, ge byggtekniskt underlag för placering av tillfartstunnlar utanför det egentliga förvarsområdet. De parametrar som kommer att bestämmas framgår av tabeller som redovisas i respektive ämneskapitel i rapporten.

Undersökningarnas huvudprodukt är en *platsbeskrivning*. Dokumentet presenterar en sammanvägd beskrivning av platsen (geosfär och biosfär) och dess regionala omgivning med avseende på nuvarande tillstånd och naturligt pågående processer. I beskrivningen redovisas alla insamlade data och tolkade parametrar, som är av betydelse dels för den samlade vetenskapliga förståelsen av platsen, dels för de analyser och bedömningar som görs av *projektering* och *säkerhetsanalys* med avseende på djupförvarets utformning och byggande samt långsiktiga funktion och radiologiska säkerhet.

## Etappindelning

Platsundersökningsskedet är av sådan omfattning i tid, rum och innehåll att en indelning i etapper är nödvändig för ett rationellt genomförande av alla undersökningar och analyser.

Under etappen *inledande platsundersökningar* undersöks varje kandidatområde för att:

- ge ett första underlag för förståelse av berget och de ytnära ekosystemen i regional skala,
- ge underlag för att välja en prioriterad plats för fortsatta undersökningar, och
- med hjälp av djupundersökningar i ett begränsat antal borrhål på prioriterad plats ta fram information som gör det möjligt att bedöma om den prioriterade platsen är lämplig för kompletta platsundersökningar.

Vid de inledande undersökningarna ska dessutom sådana parametrar som kräver ostörda förhållanden bestämmas och monitorering av sådana parametrar där långa tidsserier är väsentliga inledas.

Under förutsättning att den inledande platsundersökningen visar att den prioriterade platsen är fortsatt lämplig, påbörjas kompletta platsundersökningar. Under etappen *kompletta platsundersökningar* syftar undersökningarna till att:

- fullborda den geovetenskapliga karakteriseringen av den prioriterade platsen och dess omgivning så att, om platsens befinns vara lämplig, projektering och säkerhetsanalys kan ta fram det underlag som behövs för en lokaliseringsansökan,
- sammanställa och presentera all information i platsspecifika databaser och beskrivande modeller om platsens geosfärs- och biosfärförhållanden.

Under den kompletta platsundersökningen bestäms de parametrar som är av betydelse för att ta reda på om den undersökta platsen uppfyller de grundläggande krav som ställs på berget och i vilken utsträckning platsen uppfyller ställda önskemål.

## **Stegvisa undersökningar och integrering mellan ämnesområden**

För att verksamheten ska kunna producera erforderlig information av tillräcklig precision, detaljeringsgrad och noggrannhet, samt med effektivt utnyttjande av resurser, krävs ett logiskt och väl strukturerat undersökningsprogram. Integrationen mellan ämnesområden är framförallt av avgörande betydelse vid genomförandet i fält för att på bästa sätt utnyttja såväl borrhål som tid och resurser och vid framtagandet av den platsbeskrivande modellen.

För genomförandet av undersökningarna bryts därför huvudetapperna inledande, respektive komplett platsundersökning ner i mindre steg. Stegindelningen ger bättre möjligheter för en platsanpassad undersökningsmetodik och effektivare återkoppling från utvärderingen. Generellt sett består varje nytt steg av att bekräfta eller förkasta föregående stegs huvudresultat, svara på uppkomna frågeställningar samt att uppnå de mål som satts för den aktuella etappen. Varje steg bygger vidare på den beskrivning som framkom i föregående undersökningssteg. I varje steg samverkar alla ämnesområden i planeringen av undersökningarna vid och utvärderingen av resultat.

## **Platsbeskrivande modeller**

Resultatet av gjorda mätningar måste analyseras och tolkas för att kunna ge en beskrivning av platsen som kan användas för projektering och säkerhetsanalys. Primära undersökningsdata lagras i SKB:s databas SICADA. Databasens primärdata representerar huvudsakligen parametervärden för enskilda mätpunkter eller begränsade mätobjekt.

Primärdata analyseras och tolkas såväl ämnesspecifikt som integrerat över ämnesområden, dels för att kunna dela in platsen i lämpliga geometriska *enheter* och dels för att åsätta ämnesspecifika egenskaper för dessa geometriska enheter. På detta sätt byggs en tredimensionell, i huvudsak geovetenskaplig, platsbeskrivande modell (avbildning) av berg och mark. Den platsbeskrivande modellen representeras dels med hjälp av geografiska informationssystem (GIS) och framförallt med SKB:s CAD-baserade datorverktyg Rock Visualisation System (RVS). RVS används också som ett aktivt instrument vid tolkningen av information, speciellt för att kunna bedöma inbördes lägen för olika deformationszoner.

Vid tolkning av mätdata är huvudsyftet att ta fram värden för de olika parametrarna i den beskrivande modellen. Samtidigt görs en värdering av osäkerheterna både i enskilda parametervärden och en bedömning om den geometriska indelningen är rimlig. Ett viktigt sätt att hantera osäkerheter och alternativa tolkningar är att ta fram alternativa geometriska indelningar eller alternativa värden på modellernas parametrar.

Under platsundersökningen upprättas en detaljerad beskrivande modell, en *lokal modell*, för det område inom vilket förvaret förväntas bli inplacerat, inklusive tillfarter och den närmaste omgivningen. Utöver beskrivning i lokal skala upprättas även en beskrivning över ett mycket större område, en *regional modell*, för att ge randvillkor och för att sätta in den lokala modellen i sitt sammanhang. Den platsbeskrivande modellen upprättas och uppdateras stegvis under de pågående platsundersökningarna. Modellversioner upprättas i takt med att ny information blir tillgänglig.

## Undersökningar inför val av prioriterad plats

Undersökningarna i det första delsteget av den inledande platsundersökningen utgår från förstudierresultat, omfattar inledningsvis hela kandidatområdet och avslutas när prioriterad plats valts. Ett begränsat hammarborrningsprogram på 10–20 hammarborrhål genomförs för att svara på specifika frågeställningar som att t ex bekräfta och preliminärt karakterisera de regionala och lokala sprickzoner som identifierats med hjälp av geologiska och geofysiska undersökningar. Mängden hammarborrhål som här angavs är en preliminär uppskattning liksom de flesta andra mängduppgifter i detta generella program. Säkrare mängduppgifter kan ges i de platsanpassade genomförandeprogrammen men kan inte läsas förrän under själva genomförandet.

För att säkerställa ostörda förhållanden måste karakteriseringen av de ytnära ekosystemen påbörjas tidigt och koncentreras därför till den inledande platsundersökningen, även om uppföljande mätningar och monitorering görs under senare skeden. De geologiska undersökningarna fokuseras på att skapa en regional förståelse vad gäller utbredning och karaktär av jord- och bergarter samt större sprickzoner. De hydrogeologiska undersökningarna inriktas främst mot att preliminärt definiera det område som måste ingå i den regionala hydrogeologiska modellen och syftar till att inom det regionala området översiktligt beskriva de hydrogeologiska egenskaperna i bergets ytnära delar (regionala sprickzoner och ytnära bergmassa) samt att översiktligt beskriva de hydrauliska randvillkoren och grundvattennivåns naturliga variation. Den hydrogeokemiska verksamheten omfattar framförallt undersökning av ytnära grundvatten, sjöar och vattendrag, provtagning i hammarborrhål efter borring, start av långtidsmonitorering av kemiska parametrar i utvalda provtagningspunkter.

Inga egentliga undersökningsinsatser genomförs inom ämnesområdena bergmekanik, termiska egenskaper eller bergets transportegenskaper. Tillgänglig geologisk information utvärderas dock och används för en första modelltolkning och som underlag för planering av fortsatta undersökningsinsatser.

## Inledande undersökningar av prioriterad plats

När den prioriterade platsen har valts fokuseras undersökningarna på att karakterisera förhållandena mot djupet. I första hand gäller det att identifiera eventuella förhållanden mot djupet som inte kan accepteras eller är klart olämpliga för djupförvaret. Ett borrhå- och undersökningsprogram omfattande ett fåtal (2 till 3) djupa kärnborrhål och några ytterligare hammarborrhål genomförs. Det första kärnborrhålet planeras vara ett sk kemiprioriterat borrhål, som utförs med speciella kvalitets- och renhetskrav. Ett till två kärnborrhål används för bergspänningsmätningar.

Arbetet inom yttnära ekosystem koncentreras från den tidigare regionala skalan till en lokal insamling på prioriterat område. Mätserier och monitoringspunkter som har inletts regionalt kommer att fortgå för att ge en bild av den naturliga variationen och årscyklar. Ett urval av monitoringspunkter kommer att fungera som referenspunkter till undersökningarna på prioriterad plats.

De geologiska undersökningarna fokuserar på sprickor och sprickzoner. Framförallt är det viktigt att undersöka huruvida någon större flack sprickzon förekommer på för anläggningen olämpligt djup. Undersökningarna i detta skede fokuseras på reflektionsseismik och på att tolka resultaten från de första djupa undersökningsborrningarna.

De bergmekaniska undersökningarna kommer att vara inriktade på att få en översiktlig bild av de initiala bergspänningarna och bergmassans kvalitet på en tänkt förvarsnivå inom vald plats. Bergspänningar mäts i något eller några av kärnborrhålen. En första bedömning om det finns risk för allvarliga stabilitetsproblem på förvarsnivå görs. För det termiska programmet kontrolleras om eventuella olämpliga förhållanden såsom hög termisk gradient, hög initialtemperatur på förvarsdjupet eller inhomogena termiska egenskaper, utifrån temperaturmätningar och bergartsammansättning på borrhålen.

De inledande hydrogeologiska undersökningarna av den prioriterade platsen syftar främst till att översiktligt redovisa bergets vattenförande egenskaper från markytan ned till cirka 1 000 m djup (storlek och variabilitet såväl i egenskaper som rumsligt). Ett ytterligare syfte är att förbättra beskrivningen av randvillkoren genom att inom det regionala området fortsätta och utöka monitoringsprogrammet. Olika pump- och flödestester genomförs i de borrade hålen. Det begränsade antal hål som borraras under detta skede tillåter ingen fullständig bestämning av vattengenomsläpplighetens variation inom den prioriterade platsen, men ger en uppfattning om förhållandena mot djupet.

Syftet med den hydrogeokemiska karakteriseringen i det inledande skedet är dels att genom noggrann kartläggning av ett djupt kemiprioriterat kärnborrhål få en god uppfattning om grundvattnets sammansättning innan denna har störts av annan provtagning och dels, genom provtagning i alla borrhål, undersöka om platsen har lämpliga hydrogeokemiska egenskaper.

Den hydrogeokemiska verksamheten samlas under följande huvudaktiviteter: provtagning i samtliga hammarborrhål efter borrning, provtagning under borrning av kärnborrhål, hydrokemisk loggning i samtliga kärnborrhål, fullständig kemisk karakterisering av minst ett djupt kemiprioriterat kärnborrhål, start av långtidsmonitoring av kemiska parametrar i nya utvalda provtagningspunkter. Sprickmineralundersökningar initieras under slutfasen av den inledande platsundersökningen.

Bergets transportegenskaper uppskattas främst utifrån den hydrogeologiska och hydrogeokemiska beskrivningen, kombinerat med generisk, icke platsspecifik, information. I något av de första djupa borrhålen görs dessutom kompletterande mätningar av grundvattenflöde. I de fall mineralogi och/eller grundvattenkemi väsentligt avviker från den generiska databasen kommer vissa tidskrävande laboratorieundersökningar såsom genomdiffusionsmätningar att initieras.

## **Kompleta platsundersökningar**

Huvudsyftet med komplett platsundersökning är att genomföra undersökningar på den prioriterade platsen och dess regionala omgivning för att ge tillräckligt underlag för att kunna slutföra projektering och säkerhetsanalys och därvid kunna avgöra platsens lämplighet för djupförvaret kan avgöras. Borrhålsprogrammet genomförs i ett antal delsteg om 2 till 4 kärnborrhål. Undersökningarna under dessa delsteg kommer att vara likartade men fokuseras alltmer mot aktuellt förvaringsdjup för att detaljera kunskapen inom de områden där projektering placerat tänkbara deponeringsområden. Ytterligare hammarborrhål kommer också att borraras.

Inom yt nära ekosystem fortsätter uppföljningen av säsongsvariationer som startades under den inledande platsundersökningen. Dessutom kompletteras de prioriterade områdets befintliga data med kvantitativa inventeringar av fauna och flora på land och i vatten. Långtidsmonitoreringen fortsätter.

De geologiska undersökningarna kommer att domineras av borrhålsundersökningar och undersökningar av borrhåll. Även kartläggning och mätningar på markytan förekommer under den kompletta platsundersökningen, dock i mindre omfattning än tidigare och med färre antal metoder, främst i syfte att komplettera tidigare undersökningar och att besvara specifika frågeställningar från tidigare undersökningssteg. Huvudfaktorer gällande bergets egenskaper som i första hand kommer att beaktas är, detaljerad kunskap om olika bergarters egenskaper och deras fördelning, utökad kännedom om regionala och lokala större sprickzoner som är bestämmande för djupförvarets huvudlayout, samt utökad kännedom om mindre sprickzoner och sprickors frekvens och egenskaper.

En bergmekanisk karakterisering (bergspänningsmätningar, analyser av borrhåll m m) av bergmassan i det centrala undersökningsområdet vid prioriterad plats genomförs för att ge underlag till att i projekteringen kunna påvisa genomförbarheten att bygga föreslagen djupförvaringsanläggning. En termisk karakterisering av bergmassan inom och runt förvaringsanläggningen genomförs. Den beskrivande termiska modellen bygger på bergartsmodellen som tas fram inom det geologiska programmet.

Arbetet inom de hydrogeologiska programmet fokuseras mot att beskriva bergets genomsläpplighet utifrån det stora antal olika hydrauliska tester som kommer att göras i borrhålen. För att erhålla underlag till randvillkoren inom det regionala området fortsätter och utbyggs monitoringsprogrammet, omfattande hydrologiska mätstationer (meteorologi, avrinning) och grundvattennivåmätningar.

Inom hydrogeokemiprogrammet genomförs fortsatta undersökningar av främst djupa grundvatten. Här är det väsentligt att komplettera, verifiera och öka datamängden för att få en så fullständig bild av grundvattensituationen som möjligt samt för att få ett bra underlag för utvärderingar och modellering.



För att bestämma bergets transportegenskaper görs laboratoriemätningar på borrhävar och bergmaterial för att bestämma sorptionsvärden och diffusiviteter. Vissa in-situ-tester och spår försök planeras även. Beskrivningen av bergets transportegenskaper bygger på en sammanvägning av generiska data, resultat från de olika testerna och den hydrogeologiska och hydrogeokemiska beskrivningen av berget.

## Karakteriseringsmetoder

En samlad geologisk karakterisering av ett område innebär att geometriskt representera det undersökta områdets topografi, deformationszoner, bergartsgränser, bergenheter och jordlager och att beskriva dessa i en samlad modell. För att undersöka geologin används ett stort antal metoder. Dessa kan översiktligt beskrivas under huvudrubrikerna: geofysik, ytgeologi, jordartsgeologi, berggrundsgeologi, borrhålsundersökningar och geodetiska mätningar.

Inom det bergmekaniska programmet bestäms de initiala bergspänningarna dels med direkta mätmetoder dels genom olika indikationer i borrhål och med ledning av strukturgeologisk modell. Det intakta bergets och sprickornas mekaniska egenskaper mäts i huvudsak på upptagna bergkärnor. Deformationsegenskaperna och hållfastheten hos bergmassan uppskattas utifrån det intakta bergets egenskaper och på frekvens, orientering och mekaniska egenskaper hos sprickorna.

Bergets termiska egenskaper (värmeledningsförmåga och värmekapacitet) bestäms i första hand utifrån mineralsammansättningen samt genom laboratorieundersökningar av upptagna borrhävar.

Den hydrogeologiska karakteriseringen omfattar meteorologiska och hydrologiska undersökningar, hydrauliska borrhålsundersökningar samt monitorering. Tyngdpunkten ligger på hydrauliska borrhålsundersökningar, som pumptester och flödesloggar. Med dessa kan jordlagrens och bergets vattengenomsläpplighet mätas längs borrhålen och mellan näraliggande borrhål (interferenstest).

Den hydrogeokemiska karakteriseringen omfattar undersökningar av ytvatten och yt nära grundvatten, borrhålsundersökningar, långtidsmätning/monitorering samt vatten- och sprickmineralanalyser. Borrhålsundersökningar omfattar undersökningar i hammarborrhål och i kärnborrhål med avseende på grundvatten och sprickmineral.

Bestämningen av bergets transportegenskaper utgår från generiska, icke platsspecifika data, kombinerat med den hydrogeologiska och hydrogeokemiska beskrivningen av berget. Laboratoriemätningar på borrhävar och bergmaterial används för att bestämma/kontrollera sorptionsvärden och diffusiviteter. Diffusionsförsök och spår försök i och mellan borrhål kan användas för att kontrollera rimligheten hos uppskattade parameter värden.

Ämnesområdet yt nära ekosystem omfattar både den levande miljön (biotiska) dvs djur, växter samt deras interaktioner och den icke levande (abiotiska) miljön, t ex klimat och vatten. Karakteriseringen omfattar dels hydrogeologisk och hydrogeokemisk karakterisering av jordlager och ytvatten och dels inventering/karakterisering av flora och fauna.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	15
1.1	Bakgrund och syfte	15
1.2	Nyckelfrågor	16
1.3	Metodutveckling	17
1.4	Denna rapport	17
<b>2</b>	<b>Programöversikt</b>	19
2.1	Mål och etappindelning	19
2.1.1	Mål för platsundersökningsskedet	20
2.1.2	Etapper	20
2.1.3	Undersökningarnas mål och produkter	22
2.1.4	Angränsande aktiviteter	23
2.1.5	Samverkan mellan huvudaktiviteter	25
2.2	Undersökningarnas inriktning under olika etapper	25
2.2.1	Styrning av undersökningsinsatserna	25
2.2.2	Vad ska bestämmas?	26
2.2.3	Inledande platsundersökning	26
2.2.4	Komplett platsundersökning	27
2.3	Metodik	29
2.3.1	Stegvis planering, genomförande och tolkning	29
2.3.2	Platsbeskrivande modeller	31
2.3.3	Placering av borrhål	36
2.3.4	Tolkning och beskrivning av osäkerheter	38
2.3.5	Samordning	40
2.4	Miljöpåverkan	41
2.5	Kvalitetssäkring	41
<b>3</b>	<b>Genomförandeprogram</b>	43
3.1	Inledning	43
3.2	Inledande platsundersökning – val av prioriterad plats	43
3.2.1	Ytnära ekosystem	45
3.2.2	Borrprogram	47
3.2.3	Geologi	48
3.2.4	Bergmekanik	53
3.2.5	Termiska egenskaper	54
3.2.6	Hydrogeologi	54
3.2.7	Hydrogeokemi	58
3.2.8	Bergets transportegenskaper	61
3.3	Inledande undersökningar av prioriterad plats	61
3.3.1	Ytnära ekosystem	62
3.3.2	Borrprogram	63
3.3.3	Geologi	65
3.3.4	Bergmekanik	68
3.3.5	Termiska egenskaper	69
3.3.6	Hydrogeologi	70
3.3.7	Hydrogeokemi	72
3.3.8	Bergets transportegenskaper	74

3.4	Komplett platsundersökning	76
3.4.1	Ytnära ekosystem	76
3.4.2	Borrprogram	78
3.4.3	Geologi	79
3.4.4	Bergmekanik	83
3.4.5	Termiska egenskaper	84
3.4.6	Hydrogeologi	85
3.4.7	Hydrogeokemi	87
3.4.8	Bergets transportegenskaper	91
3.5	Basprogram för undersökningar i olika borrhål	93
3.5.1	Parameterregistrering under borrning	94
3.5.2	Tester under borrhållsperioden	94
3.5.3	Standardiserade borrhållsundersökningar efter avslutad borrning	95
3.5.4	Kompletterande undersökningar i kärnborrhål	95
3.6	Infrastruktur på den undersökta platsen	96
<b>4</b>	<b>Geologi</b>	99
4.1	Allmänt	99
4.1.1	Inledning	99
4.1.2	Ämnesspecifika mål	101
4.1.3	Arbetsmetodik och samordning	102
4.2	Modeller och parametrar	104
4.2.1	Modellernas uppbyggnad	104
4.2.2	Ingående parametrar	107
4.2.3	Modellverktyg och analyser	108
4.3	Karakteriseringsmetoder	111
4.3.1	Geodetiska metoder	111
4.3.2	Mätning av berggrörelser	112
4.3.3	Ytgeofysiska metoder	113
4.3.4	Geologiska metoder – ytmetoder	115
4.3.5	Geologisk borrhållsundersökning	116
4.3.6	Geofysiska borrhållsmetoder	118
<b>5</b>	<b>Bergmekanik</b>	121
5.1	Allmänt	121
5.1.1	Inledning	121
5.1.2	Ämnesspecifika mål	123
5.1.3	Arbetsmetodik och samordning	124
5.2	Modeller och parametrar	125
5.2.1	Modellernas uppbyggnad	125
5.2.2	Ingående parametrar	126
5.2.3	Modellverktyg och planerade analyser	127
5.3	Karakteriseringsmetoder	130
5.3.1	Bergspänningsmätning	130
5.3.2	Laboratoriemetoder för bestämning av mekaniska egenskaper hos intakt berg	132
5.3.3	Bestämning av mekaniska och hydromekaniska egenskaper hos sprickor	134
5.3.4	Metoder för bestämning av mekaniska egenskaper hos olika bergmassor	136
5.3.5	Metoder för att beskriva mekaniska egenskaper hos sprickzoner	138
5.3.6	Analysstrategi för framtagande av hållfasthets- och deformationsegenskaper	139

<b>6</b>	<b>Termiska egenskaper</b>	141
6.1	Allmänt	141
6.1.1	Inledning	141
6.1.2	Ämnesspecifika mål	142
6.1.3	Arbetsmetodik och samordning	142
6.2	Modeller och parametrar	144
6.2.1	Modellernas uppbyggnad	144
6.2.2	Ingående parametrar	145
6.2.3	Modellverktyg och analyser	145
6.3	Karakteriseringsmetoder	146
6.3.1	Fältmetoder	146
6.3.2	Laboratoriemetoder	146
<b>7</b>	<b>Hydrogeologi</b>	149
7.1	Allmänt	149
7.1.1	Inledning	149
7.1.2	Ämnesspecifika mål	150
7.1.3	Arbetsmetodik och samordning	152
7.2	Modeller och parametrar	154
7.2.1	Modellernas uppbyggnad	154
7.2.2	Ingående parametrar	157
7.2.3	Modellverktyg och planerade analyser	158
7.3	Karakteriseringsmetoder	161
7.3.1	Meteorologiska och hydrologiska undersökningar	161
7.3.2	Undersökningar/dokumentation av brunnar och anläggningar	162
7.3.3	Hydrogeologiska borrhålsundersökningar	163
7.3.4	Hydrogeologisk monitoring	170
<b>8</b>	<b>Hydrogeokemi</b>	173
8.1	Allmänt	173
8.1.1	Inledning	173
8.1.2	Ämnesspecifika mål	174
8.1.3	Arbetsmetodik och samordning	175
8.2	Modeller och parametrar	176
8.2.1	Modellernas uppbyggnad	176
8.2.2	Ingående parametrar i den beskrivande modellen	178
8.2.3	Modellverktyg och planerade analyser	178
8.3	Karakteriseringsmetoder	184
8.3.1	Kemiklasser	184
8.3.2	Provtagning av ytvatten och nederbörd	186
8.3.3	Provtagning av sedimentporvatten	186
8.3.4	Provtagning av brunnar	187
8.3.5	Provtagning i jordrör	188
8.3.6	Provtagning i hammarborrhål	188
8.3.7	Provtagning under kärnboring	189
8.3.8	Hydrokemisk loggning	191
8.3.9	Fullständig kemikaraktisering med mobilt fältlaboratorium	192
8.3.10	Provtagning vid pumptester	194
8.3.11	Långtidsmonitoring av kemiska parametrar	195
8.3.12	Vattenanalys enligt kemiklasserna 1 till 5	195
8.3.13	Sprickmineralanalys	197

<b>9</b>	<b>Bergets transportegenskaper</b>	199
9.1	Allmänt	199
9.1.1	Inledning	199
9.1.2	Ämnesspecifika mål	200
9.1.3	Arbetsmetodik och samordning	201
9.2	Modeller och parametrar	203
9.2.1	Modellernas uppbyggnad	203
9.2.2	Ingående parametrar	205
9.2.3	Modellverktyg och planerade analyser	206
9.3	Karakteriseringsmetoder	209
9.3.1	Laboratoriemätningar	210
9.3.2	Fältmätningar	211
<b>10</b>	<b>Ytnära ekosystem</b>	215
10.1	Allmänt	215
10.1.1	Inledning	215
10.1.2	Ämnesspecifika mål	217
10.1.3	Arbetsmetodik och samordning	218
10.2	Modeller och parametrar	219
10.2.1	Modellernas uppbyggnad	219
10.2.2	Ingående parametrar	220
10.2.3	Modellverktyg och planerade analyser	222
10.3	Karakteriseringsmetoder	223
10.3.1	Inventering av nyckelbiotoper	226
10.3.2	Vegetations- och biotopskartering	227
10.3.3	Sammanställning av rödlistade arter	227
10.3.4	Biomassabestämning	228
10.3.5	Provtagning av gifter och radionuklider i växter och djur	229
10.3.6	Produktionsuppskattningar	230
10.3.7	Provtagning av jordmån och torvmossar	230
10.3.8	Bestämning av markanvändning (växt- och djurodling)	231
10.3.9	Bestämning av övrigt markutnyttjande	232
10.3.10	Akvatisk parameterinsamling	233
10.3.11	Sammanställning av klimatinformation	235
<b>11</b>	<b>Program för borrhning</b>	237
11.1	Allmänt	237
11.1.1	Inledning	237
11.1.2	Borrprogrammets mål	238
11.1.3	Arbetsmetodik och samordning	238
11.2	Borrhning	240
11.2.1	Jordborrhning/sondering	240
11.2.2	Hammarborrhning	244
11.2.3	Kärnborrhning	246
11.3	Kvalitetsaspekter	249
11.3.1	Renhetskrav	249
11.3.2	Spolmedelshantering	250
11.3.3	Inmätning av borrhål	251
11.3.4	Riktning av borrhål	252
11.3.5	Borrhålsstabilitet	252
11.4	Parameterregistrering under borrhning	253
11.4.1	Borrparametrar	253
11.4.2	Spolvattenparametrar	253
	<b>Referenser</b>	255

# 1 Inledning

En platsundersökning är ett viktigt steg i processen för att lokalisera ett djupförvar för använt kärnbränsle. SKB vill genomföra noggranna undersökningar i tre kommuner och ta fram detaljerade förslag på hur ett djupförvar kan byggas och drivas /SKB, 2000a/. SKB:s mål är att kunna inleda platsundersökningar år 2002. Omfattande förberedelser pågår för denna övergång till nästa skede i lokaliseringsprocessen för djupförvaret.

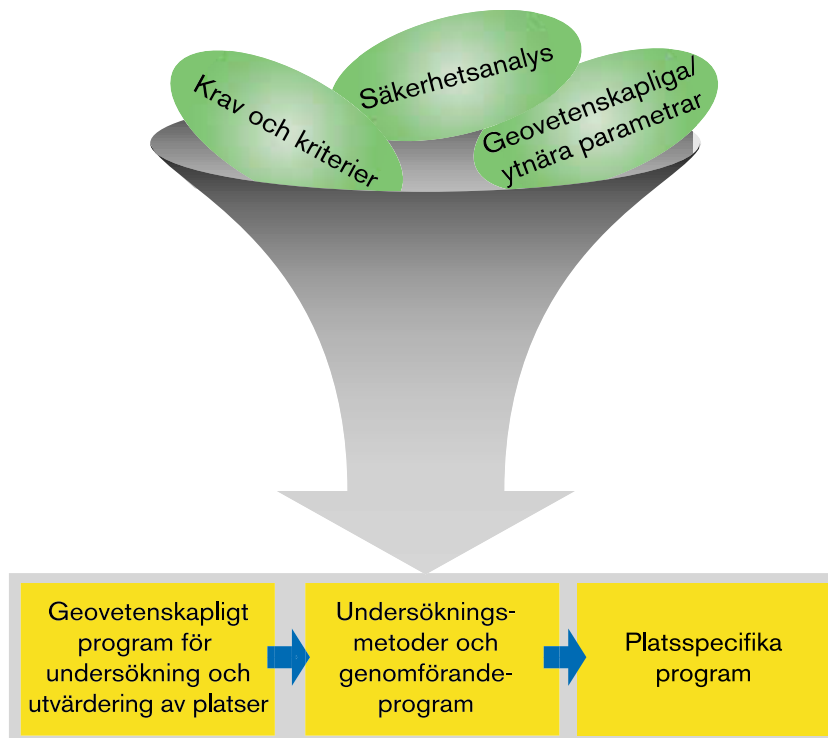
## 1.1 Bakgrund och syfte

En av huvuduppgifterna är att ta fram ett samlat och tydligt platsundersökningsprogram. Med platsundersökningsprogram avses här ett i huvudsak geovetenskapligt program för undersökning och utvärdering av platser. Programmet anger både vilken typ av information som avses samlas in från en plats och hur den ska användas vid utvärdering av platsens lämplighet för djupförvaret. Det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet har tidigare presenterats /SKB, 2000b/.

Denna rapport är en utvidgning av det generella programmet och beskriver undersökningsprogram och undersökningsmetoder mera utförligt i s k ämnesspecifika program. Både det generella programmet och denna rapport är generiska, dvs inte anpassade till de specifika förutsättningar som kommer att råda på respektive plats.

De ämnesspecifika programmen utgör grund för platsspecifika genomförandeprogram. När innehåll och omfattning av de olika etappernas delsteg anpassas till de olika platserna kan det visa sig att vissa undersökningsmoment måste tillföras, medan andra här redovisade är onödiga och därför kan utgå. Ordningföljden mellan olika undersökningsmoment kan också behöva modifieras. Det väsentliga är att den platsspecifika informationen inhämtas när den behövs och att den slutligen är tillräcklig för den platsbeskrivande redovisningen efter genomförd platsundersökning.

En översikt av de olika programmen ges i figur 1-1. Förutom programskrivning pågår utveckling, tester och dokumentation av undersökningsmetoder, mätinstrument, analysmetoder samt framtagning av organisationsplan och kvalitetsrutiner.



*Figur 1-1. Programskrivning i steg inför platsundersökningarna. Översikt av viktiga dokument som grund för programskrivningsarbetet. Undersökningsmetoder och genomförandeprogram presenteras i denna rapport.*

## 1.2 Nyckelfrågor

Framtagandet av undersökningsprogrammet utgår från ett antal nyckelfrågor som behöver hanteras. De viktigaste är att:

- utforma programmet så att den information som behövs om platsen verkligen tas fram,
- kunna beskriva platsens egenskaper i rummet och kunna bedöma osäkerheten i beskrivningen utifrån mätresultat från markytan och från ett begränsat antal borrhål,
- se till att olika ämnesområden samverkar och bygger upp en konsistent beskrivning av geosfär och biosfär,
- identifiera om det finns mätningar som måste utföras i en viss ordningsföljd eftersom vissa mätmetoder innebär att platsen påverkas kortsiktigt,
- se till att programmet får en rimlig omfattning och fokuseras på de olika behoven av information i olika beslutsskeden.

Den principiella hanteringen av dessa frågor beskrivs i kapitel 2. Den metodik som där redovisas används sedan genomgående för de olika ämnesområden som ingår i programmet.

Behovet av geovetenskaplig information framgår av den s k parameterrapporten /Andersson m fl, 1996/. Behovet av information för ytnära ekosystem beskrivs i /Lindborg och Kautsky, 2000/. Parameterrapporten bygger till stora delar på erfarenheter från tidigare säkerhetsanalyser av KBS-3-metoden. Listorna över geovetenskapliga parametrar hålls uppdaterade i den mån ny kunskap framkommer. Förutom parameterrapporten utgör även rapporten om krav och kriterier /Andersson m fl, 2000/, SR 97 /SKB, 1999a/ och det generella programmet /SKB, 2000b/ väsentliga underlag för programskrivningen.

Parameterrapporten presenterar och motiverar vad som ska bestämmas under en platsundersökning, krav- och kriterierapporten presenterar på vilka geovetenskapliga grunder det går att avgöra en plats lämplighet medan programmen för platsundersökningarna presenterar en strategi för genomförandet och hur det ska gå till. Undersökningsmetoderna, slutligen, utgör verktygslådan.

### **1.3 Metodutveckling**

Rapporten beskriver idag tillgängliga undersökningsmetoder. En viss metodutveckling kommer att ske (se avsnitt 4.4 i /SKB, 2000b/). De idag tillgängliga metoderna bedöms dock som fullt tillräckliga för att karakterisera undersökta platser.

### **1.4 Denna rapport**

Kapitel 2, redogör för mål och strategisk uppläggning av undersökningsprogrammet. Kapitel 3, genomförandeprogram, ger en integrerad redovisning om vilka mätningar, analyser och tolkningar som kommer att göras under olika skeden av platsundersökningarnas stegvisa genomförande. Kapitel 4–10 redogör ämnesvis för vad som ska bestämmas, hur berget och platsen beskrivs i en företrädesvis geovetenskaplig platsbeskrivande modell och vilka karakteriseringsmetoder som kan komma att användas. Kapitel 11 sammanställer olika praktiska aspekter på borrhning.

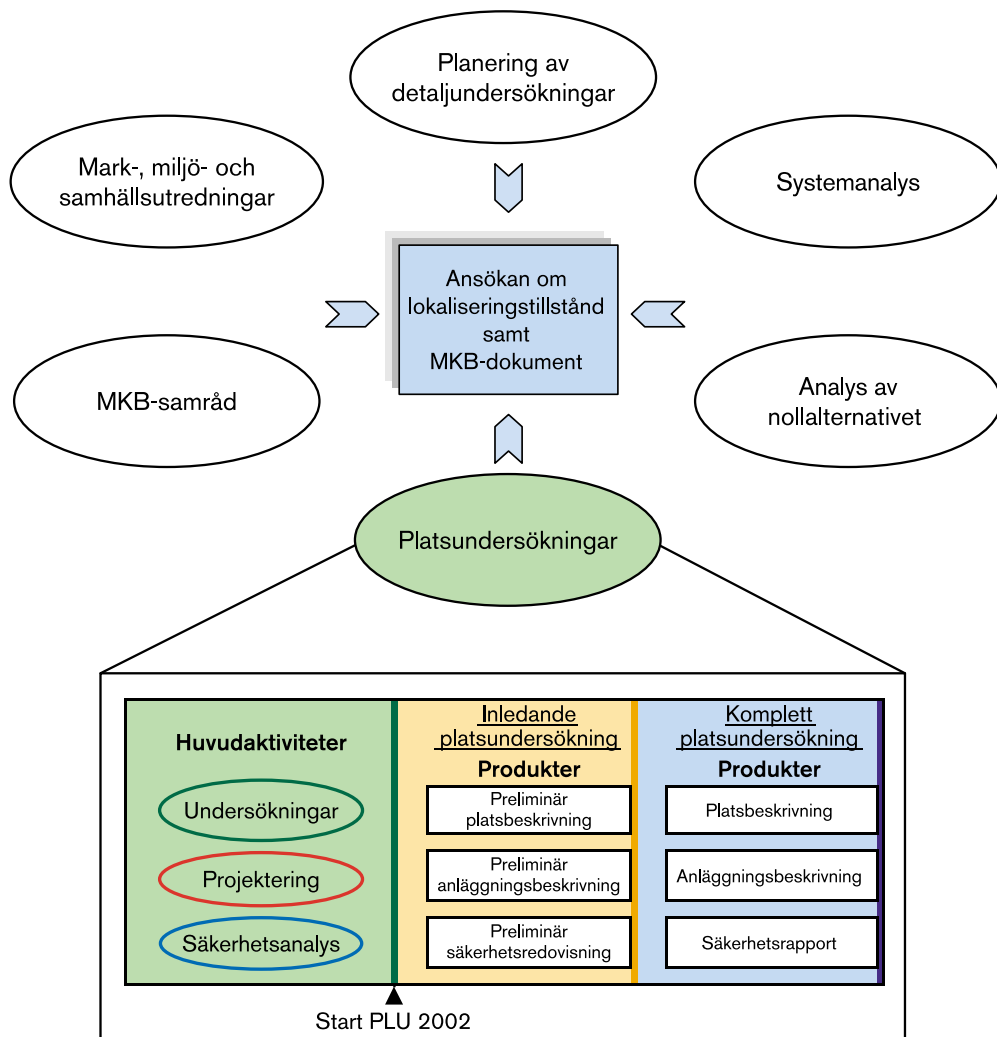


## 2 Programöversikt

### 2.1 Mål och etappindelning

Mål, etappindelning och huvudsakliga aktörer för de geovetenskapligt inriktade arbetena under platsundersökningsskedet beskrivs i det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet /SKB, 2000b/. Föreliggande program utgår från dessa mål. Undersökningsprogrammet är strukturerat ämnesspecifikt för ämnena *geologi, bergmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, hydrogeokemi, transportegenskaper* och *ytnära ekosystem*.

Figur 2-1 redovisar de aktiviteter som SKB planerar under platsundersökningsskedet. Det är de tekniska huvudaktiviteterna *undersökningar, projektering* och *säkerhetsanalys* som utför undersökningar, utvärderar informationen och tar fram det tekniska underlag som behövs i form av platsbeskrivning, anläggningsbeskrivning och säkerhetsrapport.



**Figur 2-1.** Illustration av de aktiviteter och produkter som SKB förväntar sig under platsundersökningsskedet (PLU). Produkterna är en del av underlaget inför ansökan om lokaliseringstillstånd för djupförvaret. Aktiviteter anges i figuren som ellipser medan produkter anges som rektanglar.

Speciellt bör noteras att det samråd som sker för att ta fram en miljökonsekvensbeskrivning utgör en egen aktivitet och beskrivs inte i denna rapport. De tekniska huvudaktiviteterna kommer dock att ta fram mycket av det väsentliga underlag som kommer att behövas i miljökonsekvensbeskrivningen.

### 2.1.1 Mål för platsundersökningsskedet

Målet för platsundersökningsskedet är att få de tillstånd som krävs för att lokalisera och bygga djupförvaret. De geovetenskapligt inriktade insatserna under platsundersökningsskedet ska ge det breda kunskapsunderlag som krävs för att kunna utvärdera undersökta platsers lämplighet för ett djupförvar. Materialet ska vara tillräckligt omfattande för att:

- visa huruvida den valda platsen uppfyller grundläggande säkerhetskrav och om byggtkniska förutsättningar är uppfyllda,
- möjliggöra jämförelser med andra platser som undersökts, samt
- kunna ligga till grund för anpassning av djupförvaret till platsens förutsättningar och egenskaper med acceptabel inverkan på miljö och samhälle.

Arbetet genomförs i samråd med kommuner, myndigheter och närboende.

När undersökningar och övriga utredningar genomförts och resultaten analyserats kommer SKB att ta ställning till huruvida förutsättningarna för att lämna in ansökan om lokalisering av djupförvaret på en av platserna är uppfyllda. Om så är fallet lämnas ansökan in, till vilken bifogas de miljökonsekvensbeskrivningar som utarbetas i löpande samråd med alla berörda. Tillstånds- och tillåtlighetsprövning sker därefter enligt kärntekniklagen, miljöbalken samt plan- och bygglagen. Om tillstånd erhålls påbörjas detaljundersökningsskedet.

### 2.1.2 Etapper

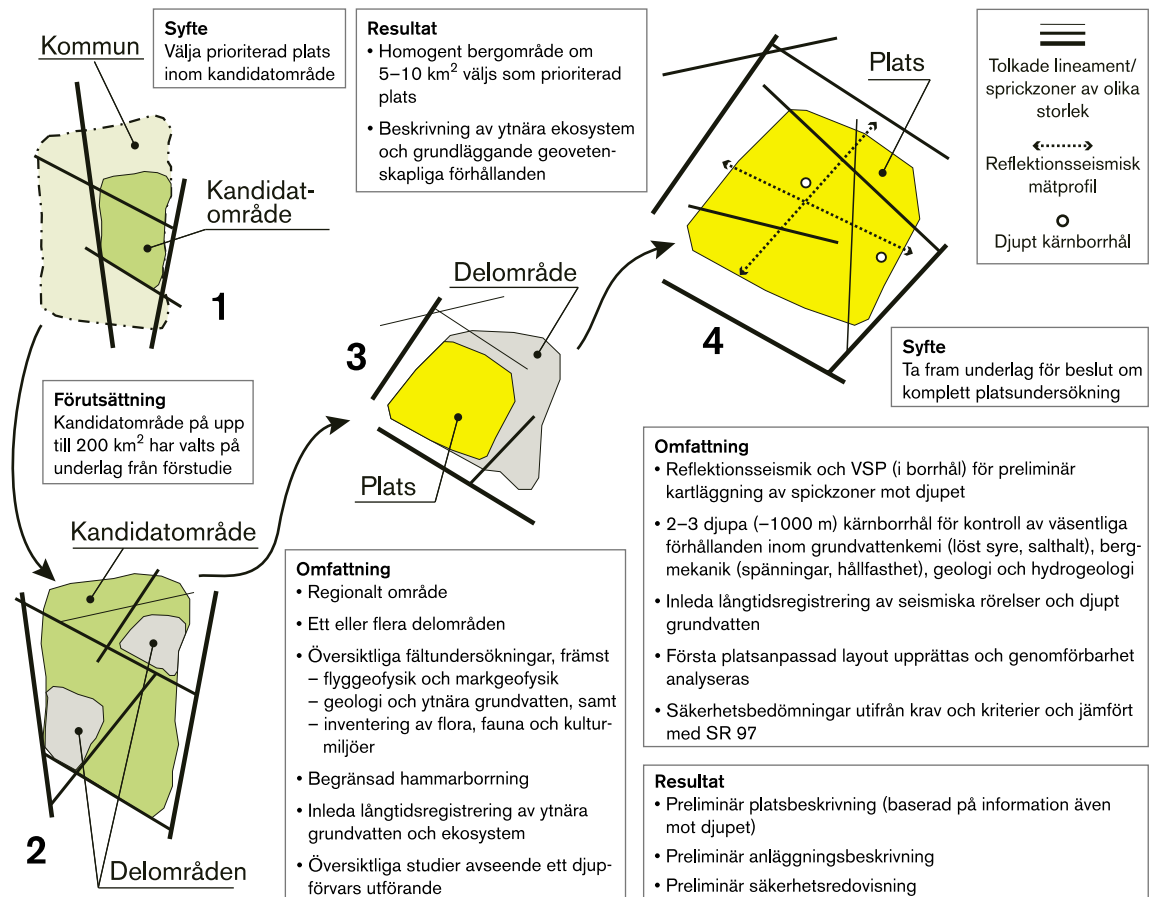
Platsundersökningsskedet är av sådan omfattning i tid, rum och innehåll att en indelning i etapper är nödvändig för ett rationellt genomförande av alla undersökningar och analyser. En etappindelning ger dessutom bättre möjligheter för en platsanpassad undersökningsmetodik och effektivare återkoppling från utvärderingen. Platsundersökningen delas därför in i etapperna *inledande* respektive *komplett* (mer detaljerad) platsundersökning.

Huvudsyftet med den inledande etappen är:

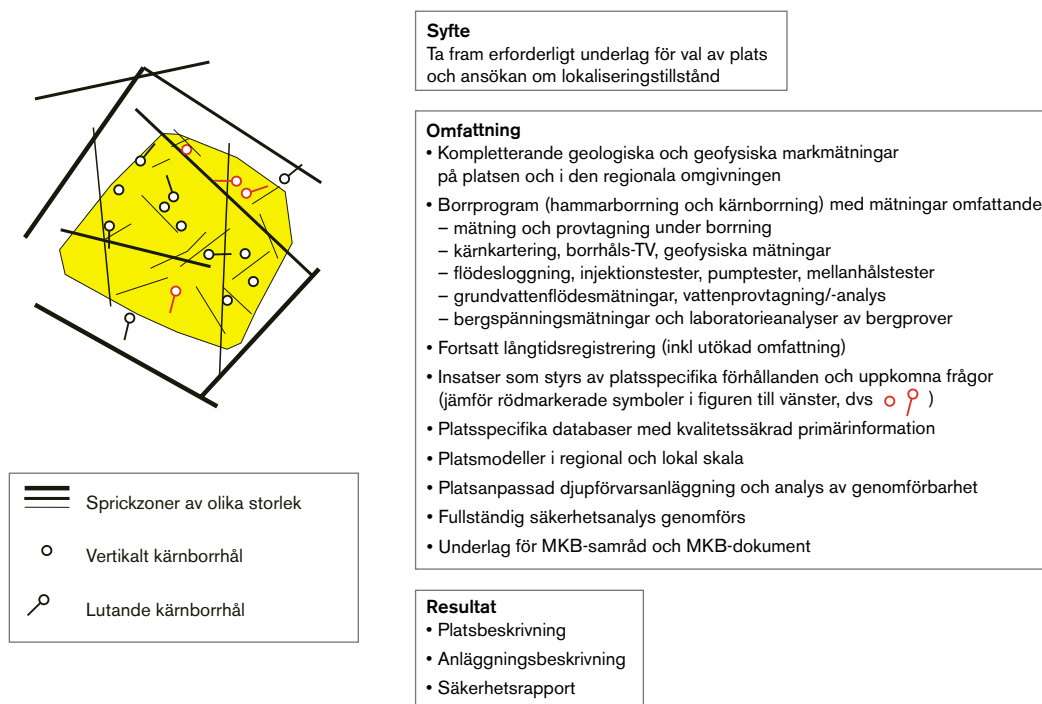
- att identifiera och välja den plats inom ett angivet kandidat område som bedöms vara mest lämpad för djupförvaret och därmed också den del dit de fortsatta undersökningarna ska koncentreras, och
- att med begränsade insatser avgöra om förstudiens bedömning om kandidat områdets lämplighet kvarstår även med data från djupet.

Med plats menas en prioriterad del av ett kandidat område, dvs den yta som erfordras för att med god marginal rymma djupförvaret och dess närmaste omgivning, uppskattningsvis 5–10 km<sup>2</sup>. Figur 2-2 visar tänkbar omfattning.

Om den samlade bedömningen visar att det fortfarande finns goda förutsättningar för att lokalisera djupförvaret på de undersökta platserna följer kompletta platsundersökningar på dessa platser, figur 2-3. Syftet med de kompletta platsundersökningarna är att ta fram



Figur 2-2. Tänkbar omfattning av och aktiviteter under en inledande platsundersökning.



Figur 2-3. Tänkbar omfattning av och aktiviteter under en komplett platsundersökning.

det underlag som krävs för att kunna välja plats samt ansöka om tillstånd för lokalisering av djupförvaret. Det betyder att kunskapen om berget och dess egenskaper behöver utökas så att:

- en vetenskaplig förståelse för platsen kan erhållas vad gäller nuvarande förhållanden (tillstånd) och naturligt pågående processer,
- en platsanpassad utformning av förvaret kan tas fram,
- en analys avseende byggets genomförbarhet och konsekvenser kan göras, samt
- en säkerhetsanalys kan genomföras för att bedöma om den långsiktiga säkerheten kan tillgodoses på platsen.

### 2.1.3 Undersökningarnas mål och produkter

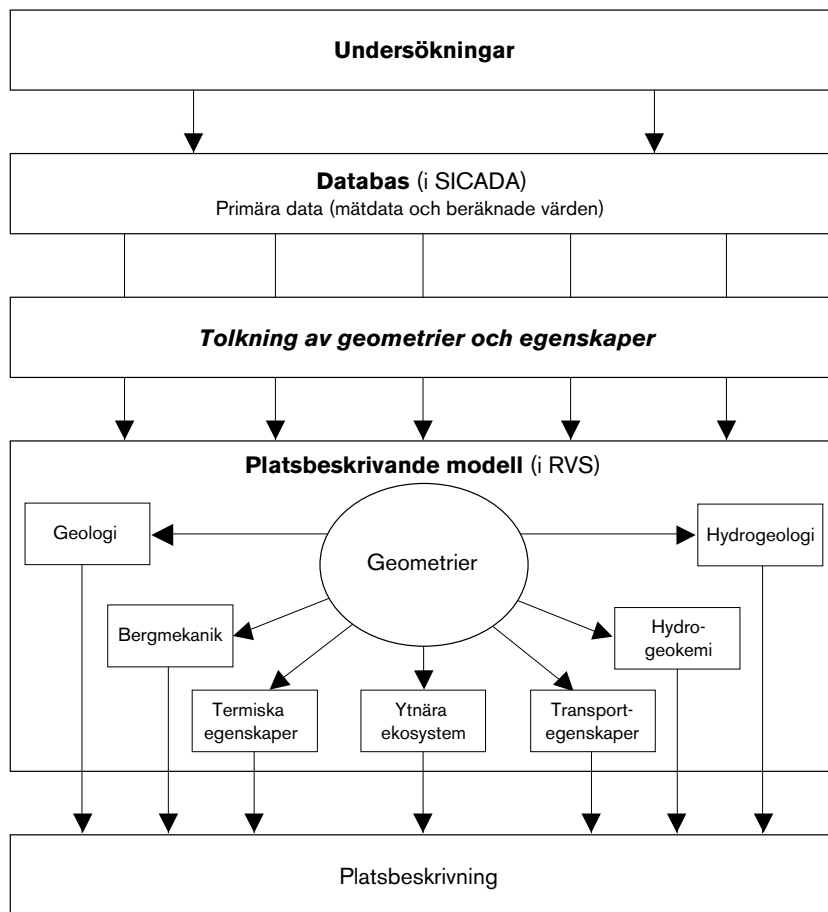
Aktiviteten att genomföra fältundersökningar och att utvärdera data kallas *undersökningar*. När platsundersökningarna är klara vid en plats ska aktiviteten undersökningar ha:

- presenterat erforderliga data om platsen för att en platsanpassad utformning av djupförvaret och analys av djupförvarets långsiktiga radiologiska säkerhet ska kunna genomföras,
- uppnått grundläggande vetenskaplig förståelse, dvs ha analyserat tillförlitligheten och bedömt rimligheten i gjorda antaganden med avseende på platsens nuvarande tillstånd och naturligt pågående processer,
- identifierat objekt som kan kräva speciell miljöhänsyn under bygge och drift av djupförvaret.

Utifrån dessa allmänna mål bestäms vad som ska undersökas och hur omfattande undersökningarna ska vara. För att uppnå målet enligt den första punkten är det nödvändigt att bestämma de egenskaper inom förvarsvolymen som har betydelse för säkerhet och bergbyggnad och speciellt de strukturer i berget som är avgörande för förvarets utformning. Bestämning måste vidare kunna användas för att avgöra om den gynnsamma bergvolymen är tillräckligt stor för att rymma ett förvar. Den slutgiltiga utformningen av undersökningsprogrammet måste dock anpassas till de aktuella (verkliga) platserna.

Undersökningarnas huvudprodukt är en *platsbeskrivning*. Dokumentet presenterar en sammanvägd beskrivning av platsen (geosfär och biosfär) och dess regionala omgivning med avseende på nuvarande tillstånd och naturligt pågående processer. I beskrivningen redovisas alla insamlade data och tolkade parametrar som är av betydelse dels för den samlade vetenskapliga förståelsen av platsen, dels för de analyser och bedömningar som görs av *projektering* och *säkerhetsanalys* med avseende på djupförvarets utformning och byggande samt långsiktiga funktion och radiologiska säkerhet.

Undersökningarna resulterar i primärdata (mätvärden och direkt beräknade värden) som samlas i en *databas*. För att kunna utnyttja den insamlade (uppmätta) informationen för projektering och säkerhetsanalys, samt för att bedöma informationens tillförlitlighet måste den tolkas och presenteras i en (i huvudsak geovetenskaplig) *platsbeskrivande modell*, figur 2-4. Den platsbeskrivande modellen består av en beskrivning av platsens geometri och olika egenskaper och utgör tillsammans med databaser stommen i platsbeskrivningen. Efter den inledande platsundersökningen presenteras en *preliminär platsbeskrivning*.



**Figur 2-4.** Undersökningarnas primärdata samlas i en databas. Data tolkas och presenteras i en platsbeskrivande modell, vilken består av en beskrivning av platsens geometri och olika egenskaper.

### 2.1.4 Angränsande aktiviteter

Aktiviteterna säkerhetsanalys och projektering är de primära avnämarna för de platsbeskrivningar som tas fram. *Projekteringen* använder platsbeskrivningen för att ta fram en platsspecifik anläggningsbeskrivning med förvarsutformning och bedömer förutsättningar för och konsekvenser av anläggningsarbetena. *Säkerhetsanalysen* utvärderar säkerheten utifrån angivna platsmodeller och förvarsutformning. Resultat från tidiga analyser från projektering och säkerhetsanalys kommer även att kunna styra inriktningen på fortsatta undersökningsinsatser.

#### **Projektering**

Med projektering avses det samlade arbetet att ta fram en anläggningsbeskrivning för en föreslagen lokalisering, inklusive layout ovan och under mark, samt definition av ingående system. När platsundersökningarna är klara ska aktiviteten projektering ha:

- presenterat en platsanpassad djupförvarsanläggning bland flera analyserade och påvisat genomförbarhet för denna,
- identifierat anläggningsspecifika tekniska risker, samt
- tagit fram detaljerade projekteringsförutsättningar för detaljundersökningskedet.

Projekteringsens huvudprodukt är en *anläggningsbeskrivning*. Här redovisas layoutförslag med tillhörande byggnalys baserade på redovisade data från undersökningar. Vidare redovisas olika förutsättningar för de olika bergarbeten som ska utföras, som t ex krav på bergförstärkning. En teknisk riskvärdering genomförs och med detta avses t ex en beskrivning av osäkerheter i gjorda kalkyler och miljöpåverkan av anläggningsarbeten. I anläggningsbeskrivningen redovisas valet av teknik och förvarslayout samt etableringsbeskrivning.

Anläggningsbeskrivningen, inklusive plan för tunnelarbeten under detaljundersökningen, utgör en av förutsättningarna för utarbetande av förslagshandlingar för berg- och byggnadsarbeten. Beskrivningen ger också underlag för att utarbeta program för layoutstyrande system inom underjordsanläggningen såsom ventilation, bergdränage, och elförsörjning. Resultaten av platsundersökningarna används i projekteringen för att föreslå lägen för de olika anläggningsdelarna, och därmed erhålls djupförvarets platsanpassade layout.

Anläggningsbeskrivningen utvecklas stegvis. När de inledande platsundersökningarna har genomförts kommer en *preliminär anläggningsbeskrivning* att presenteras. Alternativa layoutskisser kan erfordras för att hantera osäkerhet i tidiga versioner av den platsbeskrivande modellen. Efter något delsteg av den kompletta platsundersökningen utarbetas en huvudlayout för förvaret som sedan kompletteras under följande steg för att sedan ingå i den färdiga anläggningsbeskrivningen. I varje steg utförs olika analyser vars resultat används som underlag för den fortsatta detaljinriktningen av platsundersökningsprogrammet, som underlag till säkerhetsanalysarbetet och för det fortsatta projekteringsarbetet.

## **Säkerhetsanalys**

Med säkerhetsanalys avses den analys som krävs för att utvärdera den långsiktiga säkerheten hos föreslagen anläggningsutformning på aktuell plats. När platsundersökningarna är klara ska aktiviteten säkerhetsanalys ha:

- utvärderat den långsiktiga radiologiska säkerheten för det planerade djupförvaret baserat på redovisade undersökningsresultat och upprättad förvarslayout.

Metodiken och resultaten från säkerhetsanalysen SR 97 /SKB, 1999a/ utgör en viktig grund för arbetet med säkerhetsanalyser under platsundersökningarna. Säkerhetsanalysen kan sägas bestå av att:

- noga beskriva förvarssystemets utseende eller tillstånd vid en initial tidpunkt, t ex då det just har byggts och förslutits,
- kartlägga vilka förändringar förvaret kan tänkas genomgå med tiden till följd av dels inre processer, dels yttre påverkan, samt
- utvärdera förändringarnas konsekvenser för den långsiktiga säkerheten.

Säkerhetsanalysens huvudprodukt är en *säkerhetsrapport*. I säkerhetsrapporten redovisas analyser och bedömningar huruvida den långsiktiga säkerheten är uppfylld för det planerade djupförvaret utifrån redovisade undersökningsresultat och upprättad förvarslayout. Säkerhetsanalysen genomför analyser av termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska förlopp kring djupförvaret liksom beräkningar av radionuklidtransport.

Större säkerhetsbedömningar levereras minst vid två tillfällen i platsundersökningsprogrammet; dels i form av en *preliminär säkerhetsbedömning* baserad på data från den inledande platsundersökningen, dels som en *säkerhetsanalys* baserad på data från den kompletta platsundersökningen. Dessutom används löpande de preliminära bedömningar och analyser som görs inom ramen för säkerhetsanalysarbetet vid planeringen av de fortsatta undersökningarna och den platsbeskrivande modelleringen. Säkerhetsmässiga aspekter på layoutförslag eller mer detaljerade frågor om förvarets utformning analyseras och bedöms och ger därvid underlag till det fortsatta projekteringsarbetet.

### **2.1.5 Samverkan mellan huvudaktiviteter**

Integrationen mellan huvudaktiviteterna undersökning, projektering och säkerhetsanalys beskrivs ingående i /SKB, 2000a/ och kommer inte närmare att beskrivas i denna rapport. När undersökningar tagit fram och tolkat nya data till reviderade platsbeskrivande modeller kan först layouten modifieras och därefter kan säkerhetsanalysen revideras med utgångspunkt från de nya modellerna med tillhörande layout. Vid projekterings- och säkerhetsanalysarbetet uppstår önskemål om nya data eller data med högre precision. Bedömningar som görs under säkerhetsanalysarbetet kan dessutom innebära att layouten bör revideras. Beroendet mellan de olika huvudaktiviteterna ställer krav på samordning för att bland annat säkerställa att säkerhetsanalys och layout bygger på konsistenta versioner av platsbeskrivande modeller, att onödiga överlapp mellan olika modelleringsinsatser undviks, att frågor eller bedömningar som görs inom en huvudaktivitet faktiskt besvaras eller tillgodogörs i de andra aktiviteterna, samt att arbetet avbryts när målen för de olika huvudaktiviteterna har uppnåtts.

## **2.2 Undersökningarnas inriktning under olika etapper**

Undersökningarna ska ge den information som behövs för att projektering och säkerhetsanalys ska kunna bedöma platsens lämplighet och om så är fallet det övriga underlag som behövs för en lokaliseringsansökan, se figur 2-1. De övergripande målen för undersökningarna, som presenterades i avsnitt 2.1, är generella och räcker inte för att i detalj styra undersökningarna under deras stegvisa genomförande.

### **2.2.1 Styrning av undersökningsinsatserna**

Undersökningsprogrammet delas in i olika ämnesområden. Ämnesområdena har dock inga egna övergripande mål. Inom varje ämnesområde styrs verksamheten utifrån de gemensamma syftena med undersökningarna. För varje ämnesområde ska detaljstyrningen framgå genom att ämnesområdets huvuduppgifter och aktiviteter preciseras utifrån de gemensamma syftena.

Undersökningarnas successiva genomförande handlar i mycket om att öka detaljeringsgraden och minska osäkerheten i de platsbeskrivande modellerna. Det är viktigt att kunna avgöra vad som är erforderlig detaljeringsgrad och vad som är acceptabel osäkerhet i data. Detta görs genom en stegvis avstämning (se avsnitt 2.3.1) mot programmets intentioner, tillförlitlighetsbedömningar av de integrerade modellbeskrivningarna samt avnämarnas behov.

Strategin är således att för undersökningarna gemensamt definiera preciserade syften för varje undersökningssteg och de huvuduppgifter för varje ämnesområde som relateras till dessa syften. Däremot kan man i detta program inte lägga fast omfattningen av undersökningarna. Anledningen är att både de plats specifika förhållandena och avnämarnas konkreta behov måste vara med och styra detaljer i programmets genomförande.

### **2.2.2 Vad ska bestämmas?**

SKB har genomfört ett flertal studier, främst parameterrapporten /Andersson m fl, 1996/ och rapporten om krav och kriterier /Andersson m fl, 2000/, för att utreda vilken plats specifik information som behövs för att kunna genomföra säkerhetsanalys och projektering under platsundersökningskedet. Valet av parametrar som behöver bestämmas baseras på SKB:s mångåriga erfarenhet av undersökningar av berg, inklusive Äspö-laboratoriet, och från olika funktions- och säkerhetsanalyser som har genomförts. Data-behovet har i synnerhet stämts av mot erfarenheter och slutsatser från SKB:s senaste säkerhetsanalys SR 97 /SKB, 1999a/. Behovet av information för ytnära ekosystem beskrivs i /Lindborg och Kautsky, 2000/.

I det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet /avsnitt 4.1.1 i SKB, 2000b/ anges vilka parametrar som behöver bestämmas för att bedöma om de krav och önskemål som ställs på berget är uppfyllda och för att beskriva de ytnära ekosystemen och i övrigt nå en god förståelse av platsen. Ytterligare information om markförhållanden m m behövs för projekteringen av förvarets ovanjordsanläggningar och för att, till exempel, ge byggtekniskt underlag för placering av tillfartstunnlar utanför det egentliga förvarsområdet. De parametrar som kommer att bestämmas framgår av tabeller, som redovisas i respektive ämneskapitel, längre fram i denna rapport.

Rapporten om krav och kriterier (Andersson m fl /2000/, avsnitt 10.1.3) anger också kriterier för förhållanden som kan göra att en platsundersökning behöver avbrytas. Platsen accepteras bara om det i säkerhetsanalysen går att visa att ett säkert djupförvar kan uppföras. Under en platsundersökning, då mätvärden erhållits från förvarsdjup, men innan den samlade analysen har genomförts, används kriterier för att kontrollera om krav och önskemål kan vara uppfyllda. Kriterierna ger vägledning om hur analyserna kommer att utfalla och kan därför också användas som hjälpmedel för den som vill granska en säkerhetsanalys.

### **2.2.3 Inledande platsundersökning**

Under etappen inledande platsundersökningar undersöks varje kandidat område för att:

- ge ett första underlag för förståelse av berget och de ytnära ekosystemen i regional skala,
- ge underlag för att välja en prioriterad plats för fortsatta undersökningar, och
- med hjälp av djupundersökningar i ett begränsat antal borrhål på prioriterad plats ta fram information som gör det möjligt att bedöma om den prioriterade platsen är lämplig för kompletta platsundersökningar.



Vid de inledande undersökningarna ska dessutom sådana parametrar som kräver ostörda förhållanden bestämmas och monitorering av sådana parametrar där långa tidsserier är väsentliga inledas.

Utgångsläget för de inledande platsundersökningarna kan komma att vara mycket olika, bland annat vad beträffar storleken av och kunskapsnivån om de anvisade kandidat-områdena. Det inledande undersökningsprogrammet för undersökningar kommer därmed att vara olika mellan olika kandidatområden. Vid en storlek av upp emot ett par hundra kvadratkilometer, eller där den geovetenskapliga kunskapsnivån är låg, kan det exempelvis vara lämpligt att genomföra den geografiska områdesbegränsningen genom att identifiera och studera flera potentiella platser eller delområden.

För att kunna ge underlag till valet av prioriterad plats inom givet kandidatområde, behöver framförallt följande bestämmas redan under den inledande platsundersökningen:

- förhållanden som kan tyda på geologisk homogenitet och lämplig bergartstyp,
- en första bedömning av utbredningen av omfattande deformationszoner<sup>1)</sup>, dvs regionala och lokala större sprickzoner samt omfattande plastiska skjuvzoner,
- avsaknad av indikationer på ogynnsamma grundvattenkemiska och hydrologiska förhållanden.

Den inledande platsundersökningen omfattar olika yttäckande undersökningar, ett antal hammarborrade hål och några få (2 till 3) djupa kärnborrhål. Den preliminära platsbeskrivningen, se figur 2-3, som ska produceras på detta underlag utgör i sin tur underlag för preliminär anläggningsbeskrivning och preliminär säkerhetsbedömning. På basis av dessa produkter görs en samlad bedömning om den valda platsen är lämplig för kompletta undersökningar.

## 2.2.4 Kompletta platsundersökning

Under förutsättning att den inledande platsundersökningen visar att den prioriterade platsen är fortsatt lämplig, påbörjas kompletta platsundersökningar. Under etappen kompletta platsundersökningar syftar undersökningarna till att:

- fullborda den geovetenskapliga karakteriseringen av den prioriterade platsen och dess omgivning så att, om platsens befinns vara lämplig, projektering och säkerhetsanalys kan ta fram det underlag som behövs för en lokaliseringsansökan,
- sammanställa och presentera all information i platsspecifika databaser och platsbeskrivande modeller om platsens geofärs- och biosfärsförhållandena.

Under den kompletta platsundersökningen bestäms de parametrar som är av betydelse för att ta reda på om den undersökta platsen uppfyller de grundläggande krav som ställs på berget och i vilken utsträckning platsen uppfyller ställda önskemål. Undersökningarna bygger på och kompletterar den kunskap om platsen som erhållits under den inledande undersökningen.

---

<sup>1)</sup> SKB använder ordet deformationszon som samlingsnamn för plastiska skjuvzoner och (spröda) sprickzoner, se t ex Andersson m fl /2000/.

Huvudaspekter avseende undersökningsprogrammets uppläggning, främst borrhningarnas genomförande, under den kompletta platsundersökningen är:

- Den prioriterade platsen ska vara väl definierad geografiskt och de platsbeskrivande modellerna ska täcka hela denna volym (lokal modell). Likaså ska undersökningsområdets avgränsning mot djupet vara väl definierad.
- Det regionala modellområdet bör vara väl geografiskt avgränsat.
- Borrhålsplaceringar och borrhålsriktningar väljs dels för lokalisering och karakterisering av enskilda sprickzoner och dels för att karakterisera olika bergenheter. Härvid ska olika borrhålsriktningar och lutningar användas för att uppnå statistisk representativitet för parametrar som kan vara riktningberoende (dvs anisotropa), som t ex sprickfrekvens och vattengenomsläpplighet.
- Undersökningsborrningarna planeras och genomförs så att minsta möjliga störning uppstår för andra pågående undersökningar, framförallt hydrokemiska provtagningar och hydrauliska tester. Lämpligen borrar ett par hål samtidigt för att däremellan kunna åstadkomma lugnare perioder avsedda för undersökningar.
- Det är väsentligt att redan under borrhningen registrera mätdata, ta prover och genomföra tester. Borrprogrammet ska därför innehålla en undersökningsdel som tillgodoser de olika ämnesområdenas behov av data.
- Vilka undersökningar som kommer att utföras i färdigborrade hål beror på huvudsyftet med det aktuella borrhålet. Beroende på olika parametrars rumsliga variation, enstaka mätvärdens representativitet, önskad detaljeringsgrad, datasäkerhet, m m, krävs olika mätomfattning för olika parametrar. Avnämarnas behov (för geovetenskaplig förståelse, projektering och säkerhetsanalys) samordnas till specifika mätprogram för varje enskilt borrhål.
- För att erhålla en jämn grundkunskap för alla borrhål kommer ett basprogram att genomföras i samtliga borrhål (dock olika i hammarborrhål respektive kärnborrhål).
- Vissa borrhål prioriteras för vissa ämnesområden, men kommer givetvis att användas även för andra syften.
- Tidigare inledda monitoreringsprogram på markytan och i borrhål fortsätter och kompletteras med nya mätpunkter så att obrutna mätserier med lämplig punkttäthet och mätfrekvens erhålls.
- Tidigare dokumentation av ytnära ekosystem kompletteras med detaljerade studier för att uppnå en fullgod beskrivning av förhållandena. Därvid kan också platsundersökningarnas genomförande anpassas för värnande av värdefulla landskapselement och biologisk mångfald.

Undersökningarnas omfattning kan bara bestämmas platsspecifikt och i samråd med de primära avnämarna projektering och säkerhetsanalys. SKB gör bedömningen att den kompletta platsundersökningen kan komma att omfatta mellan 10 till 20 kärnborrhål vid varje plats samt åtminstone lika många hammarborrhål. Ett rationellt genomförande av borrhning och undersökning fordrar att man borrar och undersöker i omgångar med ett begränsat antal borrhål (2–4) i varje omgång. De olika undersökningsomgångarna skiljer sig inte så mycket från varandra. Nya borrhål sätts där SKB utifrån den tidigare utvärderingen bedömer att det behövs mer information.

## 2.3 Metodik

Undersökningsprogram och undersökningsmetoder presenteras ämnesspecifikt för ämnena *geologi, bergmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, hydrogeokemi, transportegenskaper* och *ytnära ekosystem*. För att verksamheten ska kunna producera erforderlig information av tillräcklig precision, detaljeringsgrad och noggrannhet, samt med effektivt utnyttjande av resurser, krävs ett logiskt och väl strukturerat undersökningsprogram enligt följande:

- Undersökningarna och analyserna av mätdata genomförs i ändamålsenliga steg.
- Mätdata analyseras och tolkas för att ta fram en platsbeskrivande modell i olika skalor.
- Undersökningarnas inriktning och omfattning bestäms av avnämarnas (främst projektering och säkerhetsanalys) behov och satta mål.
- Integration mellan de olika ämnesområdena är nödvändig.
- Interaktion med avnämare är en förutsättning.

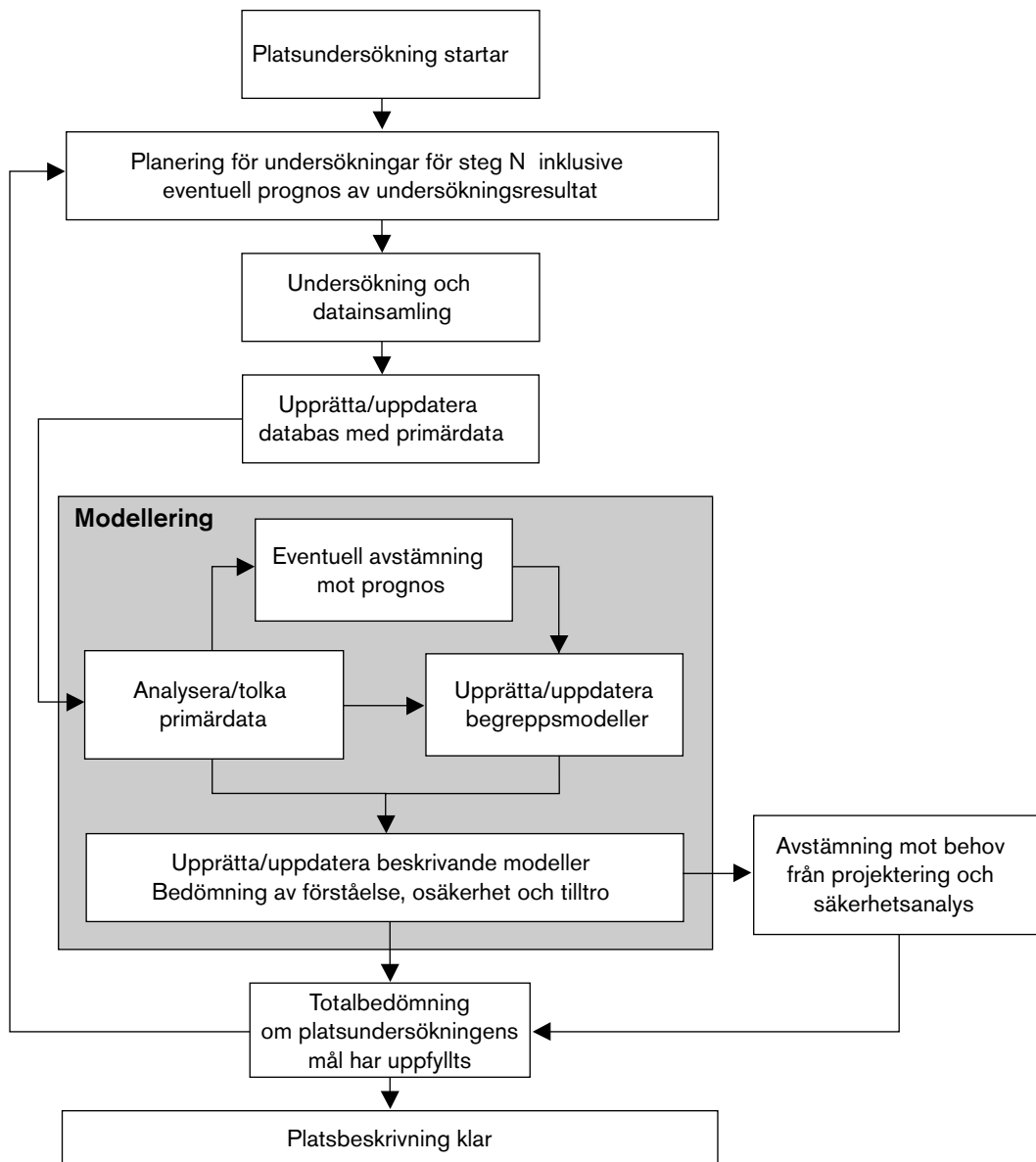
Integrationen mellan ämnesområden är framförallt av avgörande betydelse vid genomförandet i fält för att på bästa sätt utnyttja såväl borrhål som tid och resurser och vid framtagandet av den platsbeskrivande modellen (se nedan). I följande avsnitt diskuteras den metodik som utgör stommen i programmet.

### 2.3.1 Stegvis planering, genomförande och tolkning

Platsundersökningarna delas in i de två huvudetapperna *inledande platsundersökningar* respektive *kompleta (mer detaljerade) platsundersökningar*. Det övergripande syftet med dessa två huvudetapper redovisades i avsnitt 2.1.2. Undersökningarnas huvudinriktning för dessa etapper presenterades i avsnitt 2.2.3 och 2.2.4. För genomförandet av undersökningarna bryts dessa huvudetapper ner i mindre steg.

Stegindelningen ger bättre möjligheter för en platsanpassad undersökningsmetodik och effektivare återkoppling från utvärderingen. Generellt sett består varje nytt steg av att bekräfta eller förkasta föregående stegs huvudresultat, svara på uppkomna frågeställningar samt att uppnå de mål som satts för den aktuella etappen. Varje steg bygger vidare på den beskrivning som framkom i föregående undersökningssteg. I varje steg samverkar alla ämnesområden i planeringen av undersökningarna och utvärderingen av resultat. Stegen delas in i flera moment (se även figur 2-5):

- Planering av undersökningar.
- Undersökningar och datainsamling.
- Upprättande av databas med primärdata.
- I förekommande fall: Kontroll av om utfall av undersökningssteg överensstämmer med prognos gjord innan.
- Formulering/uppdatering av begreppsmodeller (se 2.3.2).
- Tolkning av primärdata och bestämning/uppdatering av parametrar i den platsbeskrivande modellen (se 2.3.2).



**Figur 2-5.** Platsundersökningsskedet omfattar flera steg med planering, undersökningar, tolkning och avstämning. Innebörden i orden "begreppsmodell" respektive "beskrivande modell" redovisas i avsnitt 2.3.2.

- Avstämning med säkerhetsanalys och projektering och vid vissa steg överlämnande av aktuella modellversioner, och diskussion om var ytterligare kunskap erfordras.
- Prediktioner eller bedömning av vad som kan förväntas i nästa undersökningssteg används som underlag för planeringen och som underlag för att pröva förståelse.

Planering av undersökningarna görs i samråd mellan ämnesområdena för att dels samordna vissa gemensamma undersökningar och dels för att se till att minimera riskerna för störningskänsliga undersökningar. Undersökningar, tolkningar och analyser utförs sedan i de flesta fall ämnesvis, men kräver integrering med andra ämnesområden.

Etappindelning och iterativ undersökningsmetodik har tillämpats av SKB vid tidigare typområdesundersökningar, samt under förundersökningsskedet för Äspölaboratoriet /se t ex Rhén m fl, 1997a/.

**Tabell 2-1. Tänkbar uppdelning av olika versioner av de platsbeskrivande modellerna som tas fram under platsundersökningen.**

Skede	Underlag	Omfattar	Produkt/modell
<b>Före platsundersökning</b>	Kommunvisa förstudier. Bearbetning av existerande data. Fältkontroller.	Kommundel och kandidat-område där prioriterad plats kommer att väljas.	Översiktlig modell, framförallt i regional skala (version 0).
<b>Inledande platsundersökning</b>	Översiktliga undersökningar från luft, mark samt korta borrhål.	Kandidatområde och prioriterad plats (regional och lokal skala).	Val av prioriterad plats. Översiktlig modell (version 1.1).
	Undersökningar från mark och några djupa borrhål.	Prioriterad plats (regional omgivning).	Preliminär modell i lokal och regional skala (version 1.2). Preliminär platsbeskrivning.
<b>Komplett platsundersökning</b>	Undersökningar i många djupa borrhål och kompletterande markmätningar.	Prioriterad plats. Regional omgivning.	Modell i regional och lokal skala (version 2.1).
	Ytterligare djupa borrhål och kompletterande markmätningar.	Prioriterad plats. Regional omgivning.	Reviderad modell i regional och lokal skala (version 2.2).
	Ytterligare kompletteringar.	Prioriterad plats. Regional omgivning.	Färdig modell i regional och lokal skala (version 2.x). Platsbeskrivning.

Den i huvudsak geovetenskapliga platsbeskrivande modellen upprättas och uppdateras stegvis under de pågående platsundersökningarna, tabell 2-1. Modellversioner upprättas i takt med att ny information blir tillgänglig. Modellversioner som tas fram under den inledande platsundersökningen benämns i denna rapport preliminärt 1.1 och 1.2<sup>2)</sup>. Modellversionerna 2.1, 2.2 osv tas således fram under den kompletta platsundersökningen. Observera dock att antalet modellversioner kan komma att modifieras. Både färre och fler versioner kan komma att tas fram beroende på de lokala förhållandena och hur lätt det är att tolka den studerade platsen. Detta påverkar i sin tur samspelet med övriga aktörer. För att hantera osäkerheterna i tolkningen av data kan, speciellt i de inledande skedena, även alternativa tolkningar tas fram.

### 2.3.2 Platsbeskrivande modeller

Resultatet av gjorda mätningar måste analyseras och tolkas för att kunna ge en beskrivning av platsen som kan användas för projektering och säkerhetsanalys. Primära undersökningsdata lagras i platsspecifika databaser i SICADA. Databasens primärdata representerar huvudsakligen parametervärden för enskilda mätpunkter eller begränsade mätobjekt.

Primärdata analyseras och tolkas såväl ämnesspecifikt som integrerat över ämnesområden, dels för att kunna dela in platsen i lämpliga geometriska *enheter* och dels för att åsätta ämnesspecifika egenskaper för dessa geometriska enheter. På detta sätt byggs en

<sup>2)</sup> Versionsnumreringen görs preliminärt på format m.n där m=0 för versioner som baseras på förstudiematerial, m=1 för versioner som tas fram under den inledande platsundersökningen och m=2 för versioner som tas fram under den kompletta platsundersökningen, n anger ordningsnummer.

tredimensionell, i huvudsak geovetenskaplig, platsbeskrivande modell (avbildning) av berg och mark. Relationen mellan undersökningsdatabas och platsbeskrivande modell illustreras i figur 2-4.

Syftet med att dela upp den platsbeskrivande modellen i olika geometriska enheter är att på ett hanterligt sätt kunna beskriva den rumsliga variationen. De geometriska enheterna väljs så att den rumsliga variationen är begränsad, eller kan beskrivas med relativt enkla statistiska mått, inom enheten. Enheternas utbredning utgår väsentligen från den tolkade *geometrin för sprickzoner samt jord- och bergartsfördelning*, men även t ex hydrogeologisk information kan användas för att åstadkomma en ändamålsenlig geometrisk indelning. För varje geometrisk enhet beskrivs de *geologiska förhållandena, mekaniska, termiska, hydrauliska och hydrogeokemiska egenskaper* samt egenskaper av betydelse för *transport* av i grundvattnet lösta ämnen i berget. Dessutom beskrivs de *yttnära ekosystemen*. Vad som behöver ingå i den platsbeskrivande modellen och hur detaljerat beskrivningen behöver vara avgörs främst av projekteringens behov av att ta fram en anläggningsbeskrivning, säkerhetsanalysens behov av att studera utvecklingen på lång sikt och behovet av att kunna uppnå och visa geovetenskaplig förståelse.

Den platsbeskrivande modellen utgör en av huvudbeståndsdelarna i platsbeskrivningen. Tabell 2-2 beskriver kortfattat principen för hur SKB avser att bygga upp och presentera de ämnesspecifika modeller som ingår denna modell.

**Tabell 2-2. Kortfattad presentation av ämnesspecifika modellers uppbyggnad och innehåll. Den platsbeskrivande modellen omfattar främst geometriskt ramverk, parametrar, datarepresentation och randvillkor (skuggat område i tabellen).**

---

**Modellens namn**

**Modellens syfte**

Presentation av vad modellen ska användas till.

**Processbeskrivning**

Förklaring av vilken process som hanteras i modellen, i förekommande fall identifieras ekvationer som används vid processbeskrivningen.

---

**Modellens beståndsdelar**

**Geometriskt ramverk**

Presentation av modellens dimension och modellområdets geometriska avgränsning. Specifikation av modellens (geometriska) enheter, hur dessa genereras och vilka geometriska parametrar som ingår i underlaget.

**Parametrar**

Specifikation av vilka parametrar som ingår i modellen. Presentation av datas ursprung och/eller hur värden bestäms.

**Datarepresentation**

Presentation av hur parametervärden fördelats inom modellens geometriska enheter.

**Randvillkor**

Specifikation av typ och geometri för randvillkor samt initialtillstånd och hur dessa bestäms.

**Numeriska verktyg**

Presentation av matematiska formler eller datorprogram som används vid simulering av process.

**Beräkningsresultat**

Presentation av de resultat som erhålls vid numerisk simulering/beräkning.

---

## **Begreppsmodell**

De generella delarna av modellen, som beskriver modellens beståndsdelar, kallas *begreppsmodell* (eller konceptuell modell). Begreppsmodellen anger modellens principiella uppbyggnad och de ingående processerna.

Begreppsmodellen bestäms med hänsyn till vad modellen ska användas till, dess syften. Utifrån alla tänkbara processer fokuserar begreppsmodellen på de processer som kontrollerar de frågeställningar som modellen syftar till att besvara. Rapporten *Processer i förvarets utveckling* /SKB, 1999b/, som utgör en del av säkerhetsanalysen SR 97, redogör ämnesvis för vilka processer som behöver beskrivas för att analysera förvarets långsiktiga utveckling. Valet av ingående processer baseras dessutom på den utveckling och tillämpning som gjorts vid Äspölaboratoriet /Olsson m fl, 1994/.

## **Beskrivande (kvantitativ) modell**

Den beskrivande (kvantitativa) modellen, för respektive ämnesområde, anger värden eller statistiska fördelningar för de parametrar som utifrån begreppsmodellen behövs för att beskriva bergets egenskaper och initialtillstånd. Valet av parametrar inom respektive ämnesområde utgår från begreppsmodellen och de genomgångar som gjorts i "Parameterrapporten" /Andersson m fl, 1996/ och i rapporten om krav och kriterier /Andersson m fl, 2000/. Dessa tidigare genomgångar har nu reviderats inom respektive ämnesområde och redovisas för respektive ämnesområde (kapitel 4–10) i tabeller som följer den principiella uppläggnings i tabell 2-3.

De beskrivande modellerna utgår från ett gemensamt geometriskt ramverk, se figur 2-4. Den geometriska modellen beskriver i första hand det undersökta områdets topografi, deformationszoner, bergartsgränser, bergenheter, jordlager och vattendrag. (Ordet deformationszon används som samlingsnamn för plastiska skjuvzoner och sprickzoner, se Andersson m fl /2000/). För varje del i den geometriska modellen anges för respektive ämnesområde värden och initialtillstånd för de inom ämnesområdet relevanta parametrarna. Vissa parametrar anges *statistiskt*, medan andra åsätts *deterministiska* värden. Den rumsliga upplösningen av beskrivningen ("*skalan*") kan också variera inom olika områden och under olika skeden av platsundersökningen.

Med deterministisk beskrivning menas att parametern (egenskap eller geometriskt läge) anges som ett värde eller en funktion, medan statistisk beskrivning innebär att egenskaper beskrivs i statistiska termer (t ex sprickdensitet och fördelning av vattengenomsläpplighet i bergmassa). Osäkerheten kan, framförallt i tidiga skeden av karakteriseringen, också representeras genom att man parallellt utnyttjar olika (alternativa)

**Tabell 2-3. Principiell tabell över ingående parametrar och deras användning. Tabellen visar också när parametern huvudsakligen bestäms. Många parametrar bestäms dock preliminärt i tidiga skeden, men uppdateras sedan kontinuerligt allteftersom ny information blir tillgänglig. IPLU och KPLU tillhör platsundersökningsskedet och föregås av förstudier (FS) och följs av detaljundersökningar (DETU).**

Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för
		FS	IPLU	KPLU	DETU	

begreppsmodeller eller beskrivande modeller. Å andra sidan kan, i och för sig osäkra, egenskaper anges "deterministiskt" som till exempel ett medelvärde om denna detaljeringsgrad är tillräcklig för avnämarnas syften. Graden av determinism i beskrivningen och nödvändigheten av att arbeta med olika alternativ beror på den tillgängliga informationstätheten men även på avnämarnas behov av detaljeringsgrad.

I och med att modellerna hela tiden vidareutvecklas (uppdateras) och baseras på ett successivt ökat dataunderlag är strikt versionshantering väsentlig och nödvändig. Denna kvalitetsaspekt inbegriper att det dataunderlag som ingår i varje modellversion också måste vara spårbart så att det kan återskapas exempelvis för att genomföra granskning vid senare tillfälle. Detta diskuteras vidare i avsnitt 2.5.

### **Modellområdets storlek – olika skalor**

De generaliseringar i en modell som är nödvändiga för att få en översikt eller vara relevanta ur ett processperspektiv beror på med vilken geometrisk upplösning (skala) de beskrivs. Under platsundersökningen upprättas en detaljerad beskrivande modell, en *lokal modell*, för det område inom vilket förvaret förväntas bli inplacerat, inklusive tillfarter och den närmaste omgivningen. Utöver beskrivning i lokal skala upprättas även en beskrivning över ett mycket större område, en *regional modell*, för att ge randvillkor och för att sätta in den lokala modellen i sitt sammanhang. Varje ämnesmodell utvecklas successivt från översiktliga regionala till mera detaljerade lokala beskrivningar under platsundersökningens stegvisa genomförande.

Djupförvarets yta (på förvarsdjup) är i ett idealt fall cirka 2 km<sup>2</sup>. Denna yta inkluderar ett fullt utbyggt förvar med cirka 4 000 kapslar och 90 % antagen utnyttjandegrad av möjliga kapselpositioner samt erforderliga centralutrymmen. Ovanmarksanläggningen och nerfarten till djupförvaret är inte inkluderad i denna yta eftersom deras ytbehov beror på om rak ramp, spiralramp eller schakt kommer att användas. Det geometriska ideala fallet kommer inte att uppnås i verkligheten eftersom djupförvarets utformning kommer att anpassas till berggrundens förhållanden (sprickzoner, m m). Ju fler deponeringsområden djupförvaret delas upp i och ju mer oregelbundna dess geometrier är desto större total förvarsyta krävs därför att mellanliggande ej utnyttjade "korridorer" också måste tas med i den "omslutande" totalytan. Mot denna bakgrund kan 2–4 km<sup>2</sup> användas som ett riktvärde för förvarsområdets underjordsdelar. Ovanmarksområdet omfattar en förhållandevis liten yta som vid det raka rampalternativet ligger utanför själva förvarsområdet och även medför en "rampkorridor" vars längd och geometri är platsspecifikt beroende.

Det lokala undersöknings- och modellområdet bör vara avsevärt större än förvarsområdet framförallt därför att man annars inte kan prova alternativa förvarsutformningar och successivt komma fram till den optimala placeringen och anpassningen till bergets förhållanden. Den lokala modellen torde därför omfatta en yta av 5–10 km<sup>2</sup>. Även i djupled ska den lokala modellens område bestämmas. Mot bakgrund av att djupförvaret ska placeras på cirka 500 m djup (vilket beroende på bergförhållandena kan betyda mellan 400–700 m djup), och berggrunden bör karakteriseras ner till cirka 1,5 gånger det tänkta förvarsdjupet så bör modellen, och därmed även undersökningarna, sträcka sig ner till cirka 1 000 m.

De regionala modellernas geografiska omfattning beror på de lokala förutsättningarna och styrs av behovet att uppnå förståelse för de förhållanden och processer som bestämmer förhållandena på platsen. Den regionala modellen bör omfatta så stor yta att de geovetenskapliga förhållanden som direkt eller indirekt kan påverka de lokala förhållandena eller hjälpa till att förstå de geovetenskapliga processerna i förvarsområdet blir medtagna. Praktiskt sett kan det handla om några hundra kvadratkilometers area.



## **Beräkningsverktyg – analytiska och numeriska beräkningsmetoder**

Den platsbeskrivande modellen representeras dels med hjälp av geografiska informationssystem (GIS) och dels (framförallt) med SKB:s datorverktyg Rock Visualisation System (RVS) tillsammans med underliggande databaser. RVS baseras på ett CAD-program (Microstation®) och presenterar modeller i tre dimensioner. RVS, som är direkt länkad mot SKB:s databas SICADA, används som ett aktivt instrument vid tolkningen av databasens primära data, speciellt för identifiering av deformationszoner och deras utbredning, dvs för upprättandet av den geometriska stommen i de platsspecifika modellerna. För närvarande vidareutvecklas RVS så att tolkade egenskaper för de geometriska enheterna kan bokföras och administreras i en given ämnesorienterad struktur (Munier, Hermanson, 2001). Applikationen kommer att inbegripa rutiner för versionshantering för att uppnå spårbarhet och konsistens mellan olika ämnesområden. Det ska också framgå vilka data som ligger till grund för en viss modellversion och vem som står bakom den gjorda tolkningen. Modellversion och annan information om spårbarhet är väsentlig när platsbeskrivande modeller används för projektering och säkerhetsanalys. Vidare utarbetas konverteringsrutiner så att RVS-modellen ska kunna exporteras till de matematiska beräkningsverktyg som beskrivs nedan.

Beskrivningen tas i första hand fram för att möjliggöra prognoser av förvarets framtida utveckling inom säkerhetsanalysen och för de olika analyser som görs vid projekteringen. För att göra prognoser och analyser används matematiska beräkningsverktyg som ibland kan vara enkla analytiska lösningar och i andra fall är mer eller mindre komplexa datorkoder (numeriska lösningar). Beräkningar behövs också för att ta fram den platsbeskrivande modellen.

De kvantitativa modellverktygen behöver inte omfatta alla de processer och parametrar som ingår i begreppsmodellen eller motsvara rumsupplösningen i den platsbeskrivande modellen. Modellverktygen kan vara anpassade för att beskriva ett fåtal processer under vissa speciella förhållanden. Eftersom flera processer samverkar och de dominerande processerna varierat under olika tidsperioder får olika modellverktyg olika prediktiv kapacitet i tid och rum.

Valet av datorkoder är i första hand en fråga för avnämarna (säkerhetsanalys och projektering), men måste givetvis anpassas till den gjorda parameterbeskrivningen. Efterföljande analyser inom säkerhetsanalys eller projektering kan dock t ex ändra detaljeringsgraden, utesluta vissa parameter eller välja värden som t ex överdriver konsekvenser, allt utifrån syftet med dessa senare analyser. Planer för dessa kommande analyser eller valet av beräkningsverktyg som är lämpliga för dessa analyser beskrivs inte närmare här, utan behandlas i planer för säkerhetsanalys och projektering.

Beskrivningen kompliceras av att flera av bergets egenskaper (parametrar), t ex vattengenomsläpplighet, bestäms genom att utsätta berget för en störning, t ex pumptest. Matematiska modellberäkningar används för att simulera störningen och parametervärdena anpassas (kalibreras) så att den beräknade påverkan överensstämmer med observationerna. Matematiska beräkningar kan också användas för att simulera platsens historiska utveckling.

De beräkningsverktyg som kommer att användas för tolkning av data och för att analysera platsens utveckling beskrivs under respektive ämnesområde. Inom säkerhetsanalys och projektering kan, som redan nämnts, andra verktyg komma att användas i vissa sammanhang och för vissa syften. Där så är lämpligt kommer det dock att eftersträvas att samma beräkningsverktyg används för att genomföra både geovetenskapliga modellsimuleringar och de analyser som ingår i säkerhetsanalys och projektering.

### **2.3.3 Placering av borrhål**

De olika karakteriseringsmetoderna beskrivs under respektive ämneskapitel. Gemensamt för de flesta undersökningsmetoderna är dock att de utförs från borrhål, men även olika yttäckande undersökningar från markytan genomförs också. Väsentligen borrar två typer av hål, relativt korta (100 till 200 m) hammarborrhål och djupa (700 till 1 000 m) kärnborrhål, se kapitel 11. Placeringen av borrhål och ordningsföljd för olika mätningar i hålen planeras tillsammans mellan olika berörda ämnesområden.

#### ***Informationstäthet***

Idealt bör informationstätheten vara jämnt fördelad inom det lokala respektive regionala modellområdet. (Informationstätheten är givetvis mycket lägre inom det regionala området). Det är därför lämpligt att den lokala modellens geografiska område bestäms så tidigt som möjligt under platsundersökningarna, dvs när en prioriterad plats valts inom ett område. Även den regionala modellen bör ges en bestämd geografisk avgränsning. En del av informationen till den regionala modellen finns sammanställd från förstudierna, men ytterligare fältundersökningar kommer att genomföras under platsundersökningarna, såväl under den inledande som under den kompletta platsundersökningen.

Graden av determinism i modellbeskrivning beror till stor del på detaljeringsgrad, informationstäthet och osäkerhet och bör därför öka i takt med att undersökningarna fortskrider. Det är dock väsentligen avnämarnas efterfrågade grad av precision för ett visst undersökningsskede som bör styra undersökningarnas omfattning. Vare sig projektering eller säkerhetsanalys behöver en alltigenom deterministisk kunskap om bergets egenskaper efter avslutad komplett platsundersökning. För flera parametrar räcker det med att ta fram en statistisk fördelning. Redan ett mindre antal borrhål ger god information om platsens större sprickzoner och om den statistiska fördelningen av bergets egenskaper. Ytterligare borrhål ger information om mindre sprickzoner och ger mer detaljkunskap om egenskapernas rumsliga variation. När osäkerheterna är tillräckligt väl bestämda finns det ingen anledning att utföra fler borrhål, även om detta skulle ge ett begränsat informationstillskott. För flera parametrar är det dessutom avsevärt lättare att sedan öka detaljeringsgraden vid de efterföljande detaljundersökningarna under mark. Andra parametrar kan överhuvudtaget inte bestämmas med borrhål från markytan utan kräver mätningar under jord.

Det är inte på förhand möjligt att ange hur många borrhål som behövs för att nå tillräcklig kunskap. Undersökningarnas omfattning beror på hur komplex platsen är och hur borrhålen placeras. En plats med heterogen berggrund och som har många oregelbundet förekommande sprickzoner behöver relativt sett fler borrhål än en plats med homogen berggrund och mer regelbundna sprickzoner. Undersökningarnas omfattning kan därför bara bestämmas platsspecifikt och i samråd med de primära avnämarna projektering och säkerhetsanalys. SKB gör dock bedömningen att den kompletta platsundersökningen kan komma att omfatta mellan 10 till 20 djupa kärnborrhål kompletterat med ett antal mindre djupa hammarborrhål.

#### ***Geometrisk fördelning av borrhål***

Trots omfattande undersökningar kommer informationstätheten vid platsundersökningarna att vara förhållandevis låg. Den geometriska fördelningen av mätpunkter i den stora bergvolymen kommer att vara ojämn. Den största skillnaden uppstår naturligtvis mellan de ytligare delarna där mätningar kan göras från markytan och de djupare delarna där man är hänvisad till borrhål. Denna skillnad minskar något på platser med stort jordtäckte, då även det ytliga berget måste undersökas med korta borrhål.

Generellt gäller dock att borrhålen ska vara lämpligt fördelade över hela platsen, till såväl geografisk yta som djup, med målet att uppnå samma geovetenskapliga kunskapsnivå för hela det lokala modellområdet, men med ökad detaljeringsgrad för de delar som bedöms vara aktuella som deponeringsområden. Borrhål kan även placeras för att undersöka rena byggtkniska frågor t ex för att ge underlag för placering av eventuella tillfartstunnlar utanför själva förvarsområdet.

Idealt borde informationspunkterna vara så jämnt fördelade som möjligt. Å andra sidan kan det vara nödvändigt att öka informationstätheten där bergförhållandena uppvisar större variation än där förhållandena är mer homogena. Påtagliga exempel med stor variation är de större sprickzonerna. Regionala och lokala större sprickzoner som ska beskrivas deterministiskt kräver sålunda större informationstäthet för att lokaliseras, orienteras och karakteriseras.

Eftersom den mesta informationen från djupet inhämtas från borrhål är borrhålens placering och orientering avgörande för mätpunkters fördelning. Utan någon som helst kunskap om bergvolymen skulle en jämn geometrisk spridning av såväl borrhålsplaceringar som borrhålsriktningar vara idealt, det senare för att identifiera bergvolymens anisotropa egenskaper i såväl stor som liten skala. En annan borrhålsstrategisk ytterlighet skulle vara att varje borrhål placeras för att kontrollera eller verifiera indikerade sprickzoner. Eftersom osäkerheter alltid förekommer riskerar man då att överdriva informationstätheten till vissa begränsade delar medan andra stora områden blir underrepresenterade. Den lämpligaste är att kombinera båda dessa aspekter med en grundläggande jämn spridning av mätpunkter i hela bergvolymen i kombination med riktade undersökningar/borrningar för att säkerställa information om berggrundens viktigaste egenskaper.

Den detaljerade planeringen av var nya borrhål ska placeras sker inför varje delsteg (se 2.3.1) och kan därmed inte bestämmas från början. Behov av ytterligare informationstäthet i olika områden beaktas. Genom att simulera tänkbara utfall av de nya undersökningarna utifrån aktuell version av den beskrivande modellen (förmodellering, se avsnitt 2.3.4) kan kommande insatser optimeras. Det görs därvid även en bedömning hur mycket ytterligare information som skulle tillföras med nya borrhål. Om informationstillskottet bedöms bli marginellt kan detta vara skäl för att avsluta borrhålsprogrammet.

### ***Borrhålsgeometri i förhållande till förvarsområdet och pluggning***

Undersökningarna får naturligtvis inte försämra platsens långtidsegenskaper. Borrhålen i sig utgör kortslutande kanaler i berggrunden av relativt stora dimensioner sett i förhållande till enskilda naturliga sprickor. Detta utgör dock primärt ingen restriktion för var borrhålen kan placeras, men ett par aspekter på borrhålsplaneringen måste beaktas:

- Vid planering av borrhål i närheten av förvarsområdet bör man beakta ett respektavstånd mellan deponeringsområden och borrhål. Detta kan innebära svårigheter, eftersom deponeringsområdets läge inte exakt kan avgöras förrän efter borrhåls- och andra undersökningar, men får göras på bästa möjliga sätt. För att säkert definiera säkerhetsavståndet är korrekta *inmätningar* av borrhålens läge helt avgörande. Vid projektering som sker vid det senare detaljundersökningsskedet finns det möjlighet att se till att deponeringsområdena förläggs med lämpligt respektavstånd till borrhål.
- Efter avslutade platsundersökningar väljs en plats ut för detaljundersökningar. Då även dessa går mot sitt slut måste en del av borrhålen i förvarsområdet och i dess närhet pluggas med tätande material.

- Beslut om vilka borrhål som ska pluggas när förvaret förslutits och vilka som eventuellt ska finnas kvar för långsiktig monitoring fattas i sena skeden av förvarsutbyggnaden eller först i samband med att förvaret ska förslutas.

Att tackla problem med kortslutande borrhål ligger långt fram i tiden men bör ändå lyftas fram i planeringsarbetet.

### **2.3.4 Tolkning och beskrivning av osäkerheter**

Resultaten från undersökningarna i fält används i första hand till att bestämma parametervärden i den beskrivande modellen. En parameter definieras alltid utifrån en viss modell och i strikt mening innebär all mätning en modelltolkning. Dessutom gäller att endast få parametrar direkt kan bestämmas över hela undersökningsområdet. Det vanligaste är att mätdata (primära data) måste tolkas och extrapoleras till olika delar av modellområdet (se avsnitt 2.3.2). Vid tolkning av mätdata är huvudsyftet att ta fram värden för de olika parametrarna i den beskrivande modellen. Samtidigt görs en värdering av osäkerheterna både i enskilda parametervärden och en bedömning om begreppsmodellen är rimlig. Analysen används också som underlag för planeringen av fortsatta undersökningsinsatser. De olika analyserna bygger i varierande grad på olika modellsimuleringar.

#### ***Alternativa modeller***

Med tanke på den rumsliga variationen och svårigheten att i detalj bestämma en rimlig geometrisk uppdelning av berget är det väsentligt att inte låsa sig vid ett enstaka modellalternativ, speciellt i ett tidigt karakteriseringsstadium. Ett viktigt sätt att hantera osäkerheter och alternativa tolkningar är att ta fram alternativa geometriska indelningar eller alternativa värden på modellernas parametrar och att analysera konsekvenserna för de olika alternativen.

#### ***Extrapolation till hela volymen***

Mätresultaten från undersökningarna avser i regel förhållanden inom mycket begränsade områden, som undersökningar av uttagna borrhål, karterade borrhål eller vattenprov. För att få parametervärden i hela bergvolymen måste resultaten extrapoleras. Detta görs utifrån den antagna begreppsmodellen som principiellt beskriver hur den aktuella storheten varierar i rummet.

Extrapolationen utgår ifrån den geometriska modellens, eller modellalternativens, olika geometriska enheter. Grunden för denna indelning är en analys av den geometriska information som ger ledning om lägen och utbredning av deformationszoner, bergartsgränser, bergenheter, jordlager och vattendrag. Inom varje enhet kan strävan sedan vara att ange en viss parameter som ett konstant värde, ett medelvärde, eller som en statistisk fördelning. Graden av antagen rumslig variation bygger på tidigare erfarenheter om den aktuella storheten och modelleringens syften. Till exempel är det nödvändigt med en detaljerad upplösning av variationen i vattengenomsläpplighet i lokal skala för att på ett tillförlitligt sätt kunna bestämma bergets retentionsegenskaper. Vattengenomsläppligheten beskrivs där lämpligen som ett stokastiskt kontinuum, se t ex /Walker m fl, 1997/ eller som ett diskret spricknätverk /Dershowitz m fl, 1999/. För den regionala beskrivningen, som oftast görs för att bestämma randvillkor, är det för de flesta syften tillräckligt att ange medelvärden för varje enhet.

Efter utförd extrapolation är det nödvändigt att ställa frågan om de underliggande modellerna av den rumsliga variationen är rimlig. Detta gäller speciellt den faktiska indelningen i geometriska enheter. Det är därvid värdefullt om man kan genomföra modellberäkningar för att simulera hur berget reagerar på en större störning och sedan jämföra detta med det faktiska utfallet av störningen. Ett exempel på en sådan störning är de tryckresponser som uppstår vid hydrauliska interferenstester mellan olika borrhålssektioner. En simulering kan till viss del innebära att parametern ”trimmas in” (kalibrering) men det ger även en kontroll av den beskrivande modellen som kan medföra att t ex den geometriska modellen av en eller flera zoner justeras.

### **Prognos av förväntade undersökningsresultat**

Inför varje viktigt undersökningssteg bör man göra en prognos av förväntat utfall av de kommande undersökningarna. Vilken typ av analys och beräkningar, som är nödvändiga för att göra sådana prognoser varierar mellan ämnesområden och aktuell undersökningsmetod. Prognoser med den befintliga geometriska modellen kan till exempel avse beräknade lägen för var nya borrhål kommer att träffa på olika sprickzoner och görs därför lämpligen med RVS-verktyget. Prognos av hydrauliska interferenstest kan avse förväntad tryckrespons i olika mätsektioner och görs med lämplig grundvattensimuleringsmodell.

Prognosen kan direkt användas för att optimera undersökningsinsatserna, till exempel var nya borrhål bör placeras eller vilken storlek på störning (t ex pumpning, val av spårämne) som kan tänkas ge en tydlig respons. Om det finns alternativa tolkningar kan det vara speciellt intressant att se om de nya undersökningarna förmår särskilja dessa.

Prognoserna är också värdefulla vid utvärderingen av resultaten när de nya undersökningarna har genomförts. Modellernas tillförlitlighet prövas genom att för nya uppsättningar av mätdata kontrollera överensstämmelsen med förutsägelser från aktuella modellversioner och modellalternativ. I denna process kan vissa modellalternativ förkastas och nya kan komma till. Ett alternativ kan visa sig vara mera rimligt än andra och blir därmed att betrakta som huvudmodell. Om överensstämmelsen för alla alternativ är dålig måste också frågan ställas om begreppsmodellen bör revideras. Det är dock viktigt att behålla möjliga alternativ till huvudmodellen och att genomföra variationsanalyser för att pröva modellernas känslighet (se också figur 2-5).

### **Bedömning av förståelse – tilltro till modellerna**

Tilltron till säkerhetsanalysens prognoser beror i mycket hög grad på tilltron till de modeller som tas fram. Denna tilltro behöver beskrivas. Strävan är att göra modellerna så tillförlitliga som möjligt, men eftersom alla modeller är förenklade representationer av verkligheten kommer det alltid att finnas avvikelser mellan modellen och verkligheten. De osäkerheter som finns i modeller består dels i att processer kan ha försumrats eller förenklats och att vissa parametrar uppvisar en rumslig variabilitet, som endast är möjlig att hantera statistiskt, dels i osäkerheter som beror av mätfel, mätnoggrannhet, tolkningsmetodik etc. Osäkerheter som beror på mätfel eller mätnoggrannhet är dock ofta relativt små.

Osäkerheten i tolkningen bedöms och kvantifieras efter varje undersökningssteg. Storleken på den statistiska spridningen eller möjligheten att göra många olika tolkningar utifrån samma mätinformation indikerar graden av osäkerhet. En ytterligare indikation på tilltron i beskrivningen är i vilken utsträckning mätresultat från sena

undersökningsteg konfirmerar prognoser som gjorts i tidigare steg. God överensstämmelse mellan prognos och mätresultat är tecken på att modellerna är rimliga i den aktuella jämförelsen medan dålig överensstämmelse tyder på det motsatta.

Det är också väsentligt att de redovisade modellerna på ett trovärdigt sätt kan förklara platsens nuvarande tillstånd utifrån de naturligt pågående processer som förändrar tillståndet. Till exempel bör fördelningen av grundvattnets sammansättning på platsen vara rimlig i förhållande till bergartsammansättning, sprickmineralogi, grundvattenströmning och den tidigare klimatutvecklingen med tillhörande förändringarna av hydrogeologiska och kemiska randvillkor. Även om sådana paleohydrogeologiska argument inte kan användas som formella bevis för att modeller och parametrar valts på ett riktigt sätt, är de väsentliga i en kvalitativ indiciekedja för att avgöra modellernas tillförlitlighet.

### **Dokumentation av osäkerheter**

Osäkerheter ska på ett ändamålsenligt sätt alltid beskrivas, om möjligt kvantifieras och diskuteras i samband med resultatredovisningar och då inte bara vid slutredovisning utan i alla mät- och undersökningssteg. En sådan redovisning är dessutom förknippad med kvalitetssäkringens krav på spårbarhet (se 2.5). Till redovisningen hör även en värdering av kvaliteten i data, ofta som en angivelse eller diskussion av osäkerheter i data. I vissa fall anges alternativa modelltolkningar. Dessutom dokumenteras förståelsen och osäkerheten utifrån observerade fältdata, extrapolationer i rummet och modellsimuleringar i platsbeskrivningen.

### **2.3.5 Samordning**

Uppdelningen i ämnesområden utgör basen för programmets uppläggning, för genomförande samt för modellering och rapportering. Integration och samordning mellan ämnesområdena är dock en grundförutsättning för ett lyckat genomförande. Detta gäller speciellt för undersökningarna i fält liksom för upprättandet av platsbeskrivande modeller.

Ytnära ekosystem, geologi, hydrogeologi och hydrogeokemi samt i viss mån bergmekanik är de ämnesområden som dominerar undersökningarna i fält. De flesta mätbara termiska parametrarna erhålls från de geologiska undersökningarna. Mätdata som ger underlag för att bestämma transportegenskaper hämtas framförallt från hydrogeologi och hydrogeokemi, men vissa specifika undersökningar av transportegenskaper ingår också i programmet. Geofysik ingår som en del av det geologiska ämnesprogrammet.

Vid utarbetandet av de ämnesspecifika modellerna kommer man i hög grad att behöva använda information (data och tolkade parametrar) som tagits fram inom andra ämnesområden. För varje ämnesområde görs därför en inventering av vilka data som hämtas från andra program. Avstämning och kontroll att olika ämnesområden använder konsistenta data sker framförallt efter varje genomfört delsteg av undersökningarna.

## **2.4 Miljöpåverkan**

Det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet /SKB, 2000b, kapitel 2/ beskriver hur undersökningarna kommer att märkas på plats, i vilken omfattning fältarbetena kan påverka miljön och hur SKB avser att i möjligaste mån anpassa verksamheten så att negativa miljöeffekter av undersökningarna begränsas. Den största påverkan utgörs av borrhingsverksamheten. Ytterligare störningar kan tänkas uppstå från bland annat tillfälliga överflygningar, eventuell blottläggning av bergytan, vägbyggen och från besöksverksamheten. En mer detaljerad beskrivning än den som ges i /SKB, 2000b/ upprättas när undersökningsprogrammen anpassas till en viss plats. Programmet för ytnära ekosystem (se kapitel 10) ser till att erforderligt underlag om miljöförhållandena införskaffas och sammanställs så att denna anpassning kan göras.

## **2.5 Kvalitetssäkring**

Kvalitetssäkring behandlas i SKB /2000b/. Den platsbeskrivande modellen upprättas och uppdateras stegvis under de pågående platsundersökningarna. Nya versioner upprättas i takt med att ny information blir tillgänglig och lagrats som kvalitetssäkrade primärdata i platsspecifika databaser. För att kunna upprätthålla spårbarhet och konsistens inom och mellan olika ämnesområden tillämpas en strikt versionshantering. Det ska klart framgå vilka mätdata som ligger till grund för en viss version.

## 3 Genomförandeprogram

### 3.1 Inledning

Med programmets uppläggning som grund redovisas i detta kapitel ett *möjligt genomförandeprogram* för undersökningarna med uppdelning på inledande platsundersökning och på komplett platsundersökning. Utifrån detta möjliga program kommer senare *platsspecifika program* att upprättas och anpassas efter de platsspecifika frågeställningarna och förhållandena på respektive kandidat område. När innehåll och omfattning av de olika etappernas delsteg anpassas till de olika platserna kan det visa sig att vissa undersökningsmoment måste tillföras, medan andra här redovisade är onödiga och därför kan utgå. Ordningföljden mellan olika undersökningsmoment kan också behöva modifieras. Det väsentliga är att den platsspecifika informationen inhämtas när den behövs och att den slutligen är tillräcklig för den platsbeskrivande redovisningen efter genomförd platsundersökning.

Den inledande platsundersökningen genomförs i två delsteg, där det första syftar till att få underlag till att välja prioriterad plats (avsnitt 3.2) och det andra delsteget syftar till att från en begränsad mängd djupundersökningar ta fram information som gör det möjligt att bedöma om den prioriterade platsen är lämplig för fortsatta undersökningar (avsnitt 3.3). Även den kompletta platsundersökningen genomförs i delsteg, men stegen är sinsemellan mycket lika och de beskrivs därför i ett samlat avsnitt (avsnitt 3.4).

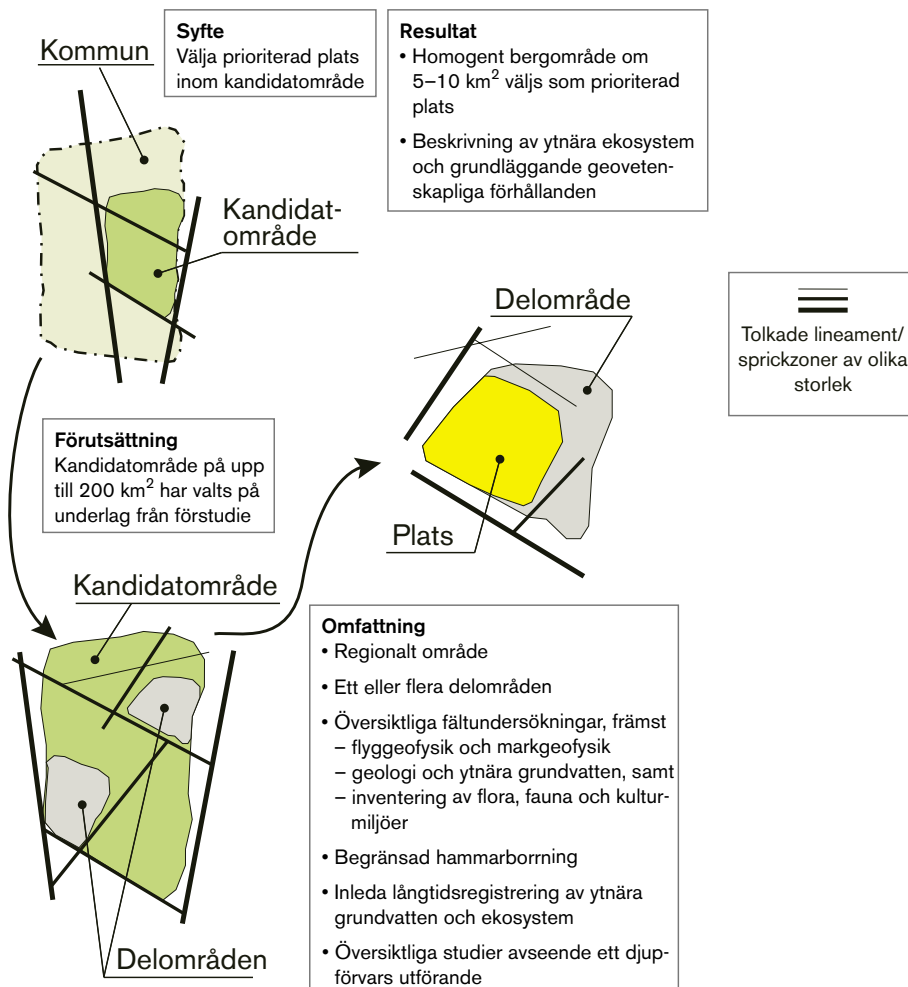
Kapitlet anger vilka mätinsatser som planeras och på vilket underlag olika versioner av den platsbeskrivande modellen kan tas fram. Kapitlet ger dock ingen närmare beskrivning av metoderna för fältundersökning, analys, tolkning och modellering. Denna information ges i de olika ämneskapitlen (4–10). Dessa kapitel behandlar också vilka parametrar som ska bestämmas.

### 3.2 Inledande platsundersökning – val av prioriterad plats

Undersökningarna i det första delsteget av den inledande platsundersökningen utgår från förstudieresultat, omfattar inledningsvis hela kandidatområdet och avslutas när prioriterad plats valts. Utgående från den integrerade översikten i figur 3-1 ges nedan ämnesvisa genomförandeprogram.

Innehåll och omfattning av de inledande platsundersökningarna är, som flera gånger tidigare påpekats, mycket platsspecifikt beroende. Några absoluta gränser för vad som ingår i det ena eller andra delsteget kan därför inte ges, men det har varit en ambition att så tydligt som möjligt koppla omfattning till de två givna huvudsyftena för inledande platsundersökningar. Som indikeras i figur 3-1 kan steget att fokusera undersökningarna till en prioriterad plats även innebära studier av ett eller flera delområden. Om ett valt kandidatområdet å andra sidan är så litet att det i det närmaste motsvarar det som i figur 3-1 kallas för plats behöver följaktligen inget val av prioriterad plats göras. Då behöver heller inga undersökningar som direkt syftar till detta val genomföras, vilket innebär att platsundersökningarna i princip börjar med delsteget undersökningar på prioriterad plats.





**Figur 3-1.** Det första delsteget av den inledande platsundersökningen syftar till att välja prioriterad plats.

Undersökningar i den regionala omgivningen är exempel på insatser som kan göras vid olika tillfällen under såväl inledande som komplett platsundersökning. Det väsentliga är att den regionala informationen inhämtas när den behövs och att den slutligen är tillräcklig för den platsbeskrivande redovisningen efter genomförd platsundersökning.

De konkreta platsspecifika förberedelserna för platsundersökningarna inleds i och med att SKB presenterat sitt val av områden för platsundersökningar. Dessa förberedelser resulterar bl a i platsspecifika program för undersökningarnas genomförande. För att kunna utforma dessa program kommer, i den mån det behövs, resultaten från respektive förstudie kompletteras med eventuellt annat befintligt material gällande kandidatområdena. Vid denna sammanställning upprättas platsbeskrivande modeller enligt den struktur som sedan kommer att användas vid de fortsatta undersökningarna. Denna modell, version 0, kommer att utgöra utgångspunkt för de platsspecifika programmen och sedermera för uppdatering till senare modellversioner. Ambitionen är att redan denna version ska vara en integrerad platsbeskrivande modell, baserad på ett gemensamt upprättat geometriskt ramverk, enligt avsnitt 2.3.2. Även om modellen upprättas som en

3D-modell med hjälp av datorverktyget RVS kommer den naturligtvis framförallt att baseras på information från ytan. Detta innebär också att osäkerheten i beskrivningen mot djupet är mycket stor för denna modell. Vidare är beskrivningarna mycket olika för de olika ämnesområdena.

Ett viktigt underlag för detaljplaneringen av undersökningarnas genomförande är den sammanställning och inventering av värdefulla natur- och kulturvärden inom området. Här avses såväl kända fornminnen och naturskyddade objekt som värdefulla landskapsmiljöer. Sammanställningen resulterar i en tillgänglighetskarta som ger ledning i hur undersökningarna kan anpassas till dessa miljöer så att negativ påverkan kan minimeras. För varje aktivitet som kan medföra störning (såsom borrning, vägbygge etc) ska avstämning göras mot denna tillgänglighetskarta, se även 3.2.1, 3.3.1 och 3.4.1.

Under förutsättning att det första delsteget för val av prioriterad plats genomförs kommer resultaten från dessa steg att sammanfattas i en uppdatering av den platsbeskrivande modellen (i denna rapport preliminärt benämnd version 1.1).

### **3.2.1 Ytnära ekosystem**

Karakteriseringen av de ytnära ekosystemen påbörjas tidigt och koncentreras därför till den inledande platsundersökningen, även om uppföljande mätningar (monitering) görs under senare skeden. Tabell 10-1, i kapitel 10, anger översiktligt när olika data lämpligen bör bestämmas. Det är inte nödvändigt att alla de mätningar som beskrivs nedan genomförs innan andra mätningar genomförs.

#### ***Sammanställning av befintlig information***

Vad gäller ytnära ekosystem pågår en relativt omfattande insamling av data i olika nationella och regionala övervakningsprogram, rikskogstaxeringen och diverse forskningsprojekt. En sammanställning av några nationellt tillgängliga data har gjorts: Lindell m fl /1999/ (klimatdata), Haldorson /2000/ (statistik) och Kyläkorpi m fl /2000/ samt Blomqvist m fl /2000/ för andra parametrar.

När kandidatområdena för platsundersökning valts, börjar sammanställningen av befintlig information i de tilltänkta områdena med tonvikt på data från befintliga vegetationskarteringar, flygbildstolkningar och satellitbilder. Sammanställningen presenteras i kartform och analyseras i GIS för att identifiera områden som inte kräver speciell hänsyn eller skyddsåtgärder. Dessa biotops- och vegetationskartor utgör ett bra underlag så att inledande undersökningar kan göras med minsta möjliga miljöstörning och med nödvändig anpassning till områdets natur. Vidare identifieras områden, främst i vattenmiljö men också i markmiljö, där man bör påbörja långa ostörda mätserier. Underlaget ger också en uppfattning om vilka parametrar som måste samlas in i detta program och som inte täcks av andra arbeten.

Även områdets kulturhistoriska värden dokumenteras i denna sammanställning (tillgänglighetskarta), även om de inte hör till ämnesområdet. Här avses såväl arkeologiska objekt som värdefulla kulturmiljöer.

## **Fältinventeringar**

De översiktliga biotop- och vegetationskartorna utgör underlag för var mer noggranna fältkontroller och inventeringar bör genomföras. Syftet är att öka kunskapen om de områden som kräver speciella hänsyn med avseende på miljöpåverkan, t ex speciella nyckelbiotoper och boplatser. Även fornminnen och kulturmiljöer inventeras och tillgänglighetskartan för platsundersökningen kan detaljeras. Eventuella ingrepp som vägdragningar och borrningar bör planeras med utgångspunkt från den förtätade informationen. Om områden som klassificerats för speciella hänsyn kommer att beröras, genomförs ytterligare inventeringar för säkerställande av ett tillräckligt underlag så att eventuell miljöpåverkan kan minimeras och dokumenteras. Med miljöpåverkan avses här framförallt den från ett eventuellt djupförvar men också sådan som de aktuella undersökningarna skulle kunna medföra. I andra områden görs en enklare fältkontroll före eventuella ingrepp.

Kartan utgör också en del av utgångsläget för den datainsamling som erfordras för kunna beskriva de viktigaste funktionerna i ekosystemet med avseende på radionuklidtransport, vilket behövs för säkerhetsanalysen, och för att kunna upprätta MKB-dokument för beskrivning av eventuell framtida miljöpåverkan från ett eventuellt djupförvar. Denna datainsamling fortgår under hela platsundersökningen.

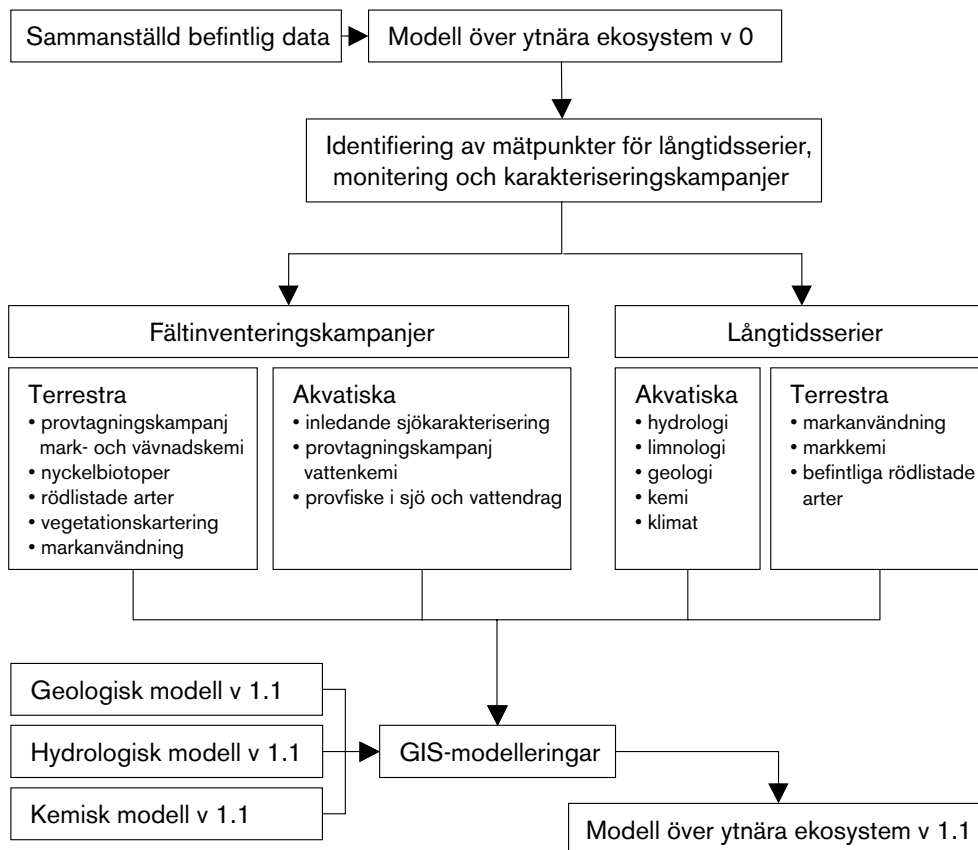
De punkter som valts ut för långtidsmonitoring bör inventeras tidigt i fält för att ge tillräckligt med bakgrundsdata. Detta gäller i synnerhet vattendrag och sjöar.

## **Långtidsmonitoring**

Efter fältkontroll och utvärdering kan långtidsmätningar starta av vattenkemi, hydrologi samt fauna och flora. Dessa långtidsmätningar ger underlag för områdets naturliga utveckling under en längre tid och kommer att fortsätta om platsen väljs för djupförvaret. Långtidsserier ger ett bra underlag för att dokumentera ostörda förhållanden och för förståelsen av årstidsväxlingar i området under förutsättning att de börjar innan störningen sker. Platsundersökningarna bedöms dock endast ge mycket begränsad miljöpåverkan och då på speciella objekt. Därför är det framförallt inför ett eventuellt djupförvars byggnation och drift som miljöpåverkan ska dokumenteras. Monitoring av naturlig utveckling görs dels på den aktuella platsen och dels inom näraliggande referensområde, utanför möjlig påverkan. Den pågår under hela platsundersökningsskedet och kommer därvid att ge flera års tidsserier innan detaljundersökningen startar. En del av mätstationerna är temporära och kommer att överges om området lämnas.

## **Analys, tolkning och modellering**

Resultatet från de inledande sammanställningarna, fältundersökningarna och långtidsmätningarna kommer att presenteras som version 1.1, figur 3-2.



**Figur 3-2.** Flödesplan och informationsbehov för den första modellen (version 1.1<sup>3)</sup> över de ytnära ekosystemen som upprättas i den inledande platsundersökningens första steg.

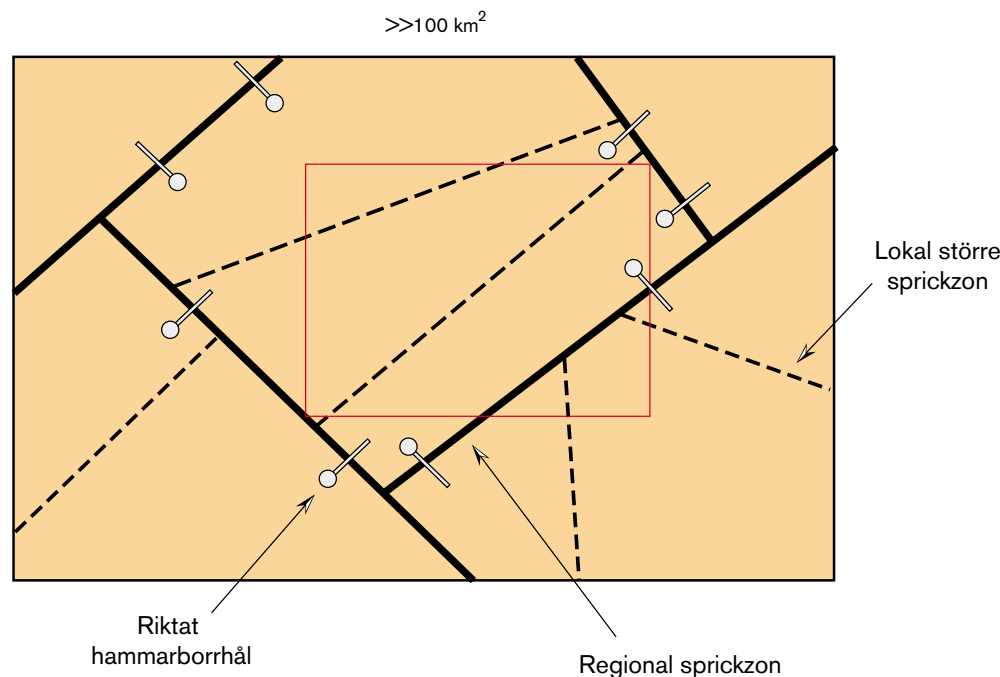
### 3.2.2 Borrprogram

I det första delsteget av inledande platsundersökningar är borrhningar av underordnad omfattning jämfört med senare skeden. Ett begränsat hammarborrningsprogram preliminärt omfattande 10–20 hammarborrhål (oftast gradade och med maximalt vertikaldjup cirka 150–200 m) genomförs, om det behövs, för att svara på specifika frågeställningar som att t ex bekräfta och preliminärt karakterisera de regionala och lokala sprickzoner som identifierats med hjälp av geologiska och geofysiska undersökningar (se avsnitt 3.2.2). Med borrhålen kan i första hand sprickzonernas lutning och hydrauliska egenskaper fastställas, figur 3-3. Val av borrhplatser och undersökningar koordineras i första hand mellan programmen för geologi, bergmekanik, hydrogeologi och hydrogeokemi.

För karakterisering av jordlager genomförs jordborrning och jordprovtagning samt drivning av grundvattenrör. Omfattningen av dessa aktiviteter är beroende av jordlagrens utbredning och variabilitet. I den mån undersökningsområdet innehåller sjöar och/eller havsområden är sedimentborrning och/eller -provtagning aktuell. Dessa borrhaktiviteter utförs integrerat med programmen för ytnära ekosystem, geologi, hydrogeologi och hydrogeokemi. Borrprogram och borrhmetoder beskrivs utförligt i kapitel 11.

<sup>3)</sup> Versionsnumreringen görs preliminärt på format m.n där m=0 för versioner som baseras på förstudiematerial, m=1 för versioner som tas fram under den inledande platsundersökningen och m=2 för versioner som tas fram under den kompletta platsundersökningen. n anger ordningsnummer.

## Förslag till borrhprogram



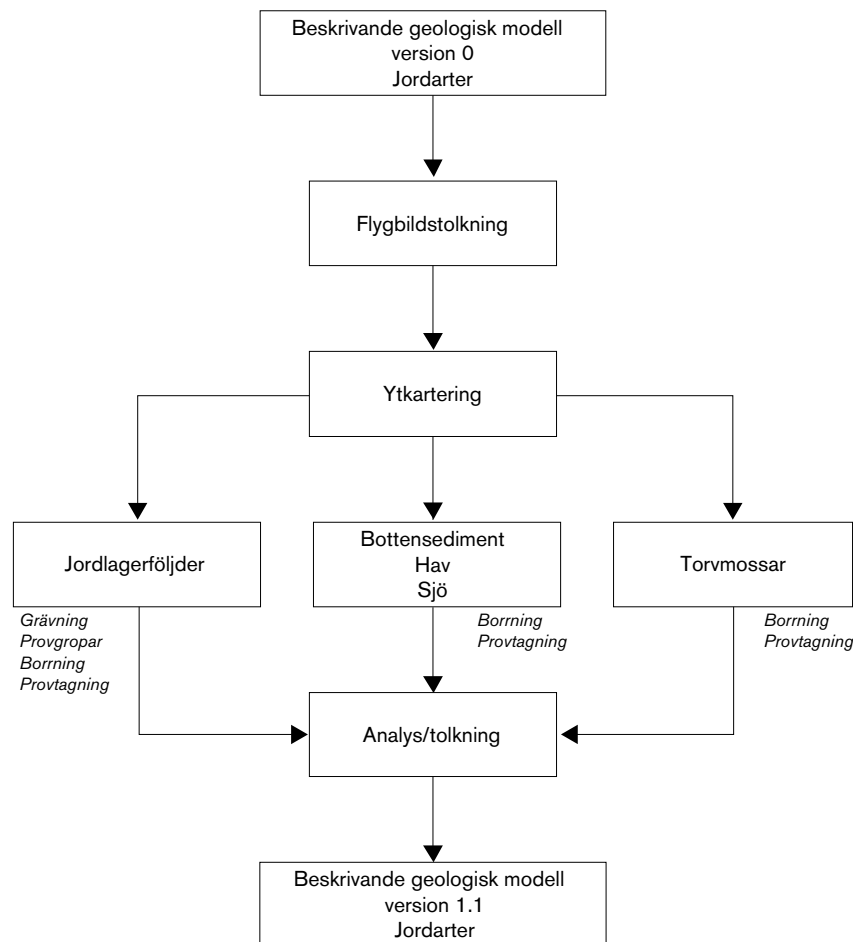
**Figur 3-3.** Ett borrh- och undersökningsprogram som preliminärt omfattar 10–20 hammarborrhål genomförs i början av den inledande platsundersökningen.

### 3.2.3 Geologi

Den platsspecifika planeringen förutsätter sammanställning av befintligt förstudiematerial. I början av den inledande platsundersökningen fokuseras insatserna på att få god kännedom om regionala och lokala större sprickzoner, samt finna bergområden med relativt homogen bergartsammansättning. Undersökningarna omfattar *geologisk kartläggning* (geologiska fältstudier, flyggeofysik, geofysiska markmätningar, undersökningar av bergartsprover, eventuellt även reflektionsseismik) och *lineamenttolkning* från olika kartmaterial kompletterat med information från hammarborrhål. Dessutom inleds *långtidsmonitoring* av förhållanden som kräver långa tidsserier. Viss del av undersökningarna kan komma att genomföras redan innan den egentliga platsundersökningen inleds, om detta bedöms vara lämpligt av olika skäl. Geologiprogrammets modeller, parametrar och metoder presenteras i kapitel 4.

#### **Geologisk kartläggning**

De inledande fältstudierna domineras av berg- och jordartskartering samt geofysiska mätningar. Bergartskarteringen omfattar studier av berghällar, vägsårningar och eventuella bergtäkter och utgör en fördjupning av de geologiska fältkontroller som gjorts under förstudierna. Den ger information om bergarter och deras fördelning samt bergmassans strukturer (veck, foliation, sprickor, m m) och deformationszoner (plastiska skjuvzoner och sprickzoner). Allmän kännedom om sprickors frekvens, orientering och längd är viktig redan i ett tidigt skede. I samband med bergartskartering mäts radioaktiv strålning och magnetisk susceptibilitet med handburna instrument (se avsnitt 4.3.3).



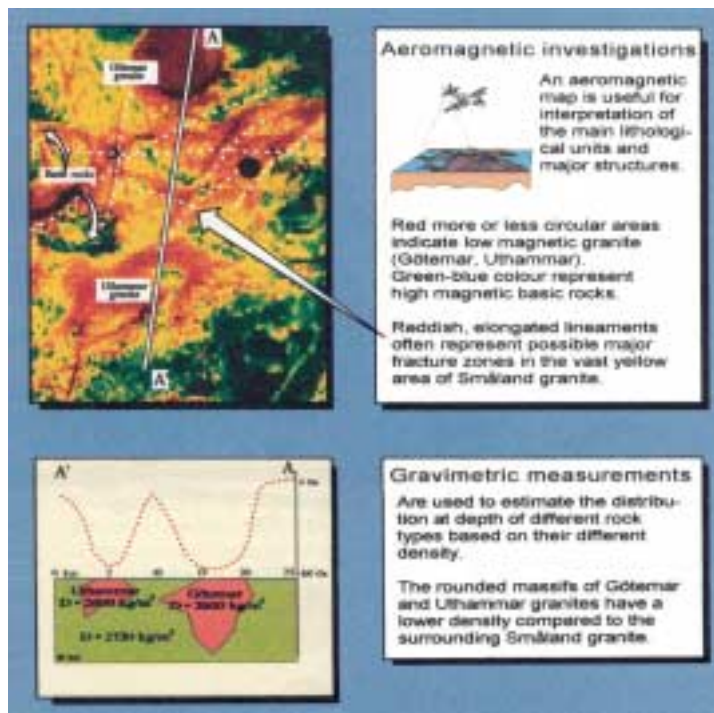
**Figur 3-4.** Flödesplan för karakterisering och beskrivning av jordarter. Jordartskarakteriseringen utförs vid lämpliga tillfällen under platsundersökningarna vilket innebär att flödesplanen inte är unik för något särskilt skede.

Jordartskarteringen omfattar såväl bestämning av jordarternas utbredning och karaktär på ytan som studier av jordlagerföljd och jorddjup, med hjälp av grävda provgropar och jordborrning, se figur 3-4. En översiktlig jordmånskartering kan utföras i samband med fältinventering av jordarter. I samband med jordartskarteringen är det viktigt att observera eventuella indikationer på postglaciala förkastningar, se vidare avsnitten 4.1.1 och 4.3.3.

### **Geofysiska mätningar**

Vilka geofysiska mätningar som ska genomföras beror på innehållet i det från förstudien befintliga underlaget.

Vid behov kommer redan tillgängliga flyggeofysiska basmätningar att kompletteras med flygmätningar med ett helikopterburet system över hela kandidatområdet med regional omgivning. Magnetiska och i viss mån radiometrisk metod används för beskrivning av bergarter medan magnetiska och elektromagnetiska metoder (EM) används för identifiering av regionala och lokala större sprickzoner, figur 3-5. Eftersom positioneringen utförs med hjälp av GPS kan täta profiler mätas. En tät flygmätning med



*Figur 3-5. Flyggeofysisk magnetmätning och gravimetrisk mätprofil på markytan för regional beskrivning (från Rhén m fl 1997a).*

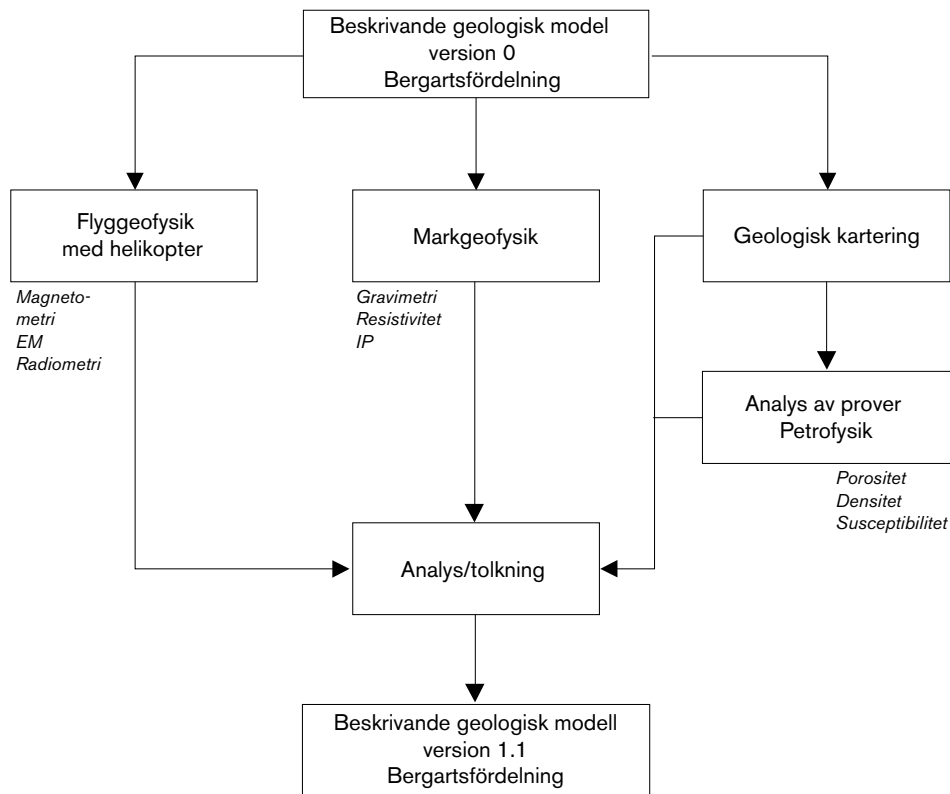
helikoptersystem förväntas ersätta motsvarande geofysiska mätningar på marken vilka kräver ett uppbyggt staksystem för noggrann positionering. Flygmätningarna kommer att genomföras så tidigt som möjligt, eftersom de utgör bas för fortsatta karakteriseringsinsatser.

Exempel på geofysiska markmätningar som kan bli aktuella är metoderna gravimetri, med vilken större bergenheter med olika densitet (t ex granitkroppar eller grönstenar) kan identifieras och resistivitets- och IP-mätning (Inducerad Polarisering), med vilken olika bergenheters s k bulkresistivitet och IP-effekt kan bestämmas. Den senare används för att studera eventuell förekomst av metalliska mineraliseringar, (greisenbildningar) inom undersökningsområdet. För kristallint berg bestäms bulkresistiviteten framförallt av bergets sprickighet.

För att understödja analys och tolkning av geofysiska resultat och geologisk kartering tas bergartsprover från undersökningsområdet. Dessa prover sänds till laboratorier för bestämning av petrofysiska parametrar som densitet, porositet och susceptibilitet.

Eventuellt genomförs reflektionsseismiska mätningar redan i detta skede, lämpligen i form av korsande profiler av några kilometers längd, för att identifiera eventuella subhorisontella strukturer (sprickzoner) av betydelse, se vidare avsnitten 3.3.2 och 4.3.2.

De geofysiska mätningarna ger tillsammans med geologisk kartering underlag till framställning av en regional berggrundskarta (geologisk modell av bergarter), figur 3-6.



**Figur 3-6.** Flödesplan för karakterisering och beskrivning av bergarter, företrädesvis i regional skala, under det första steget av inledande platsundersökning.

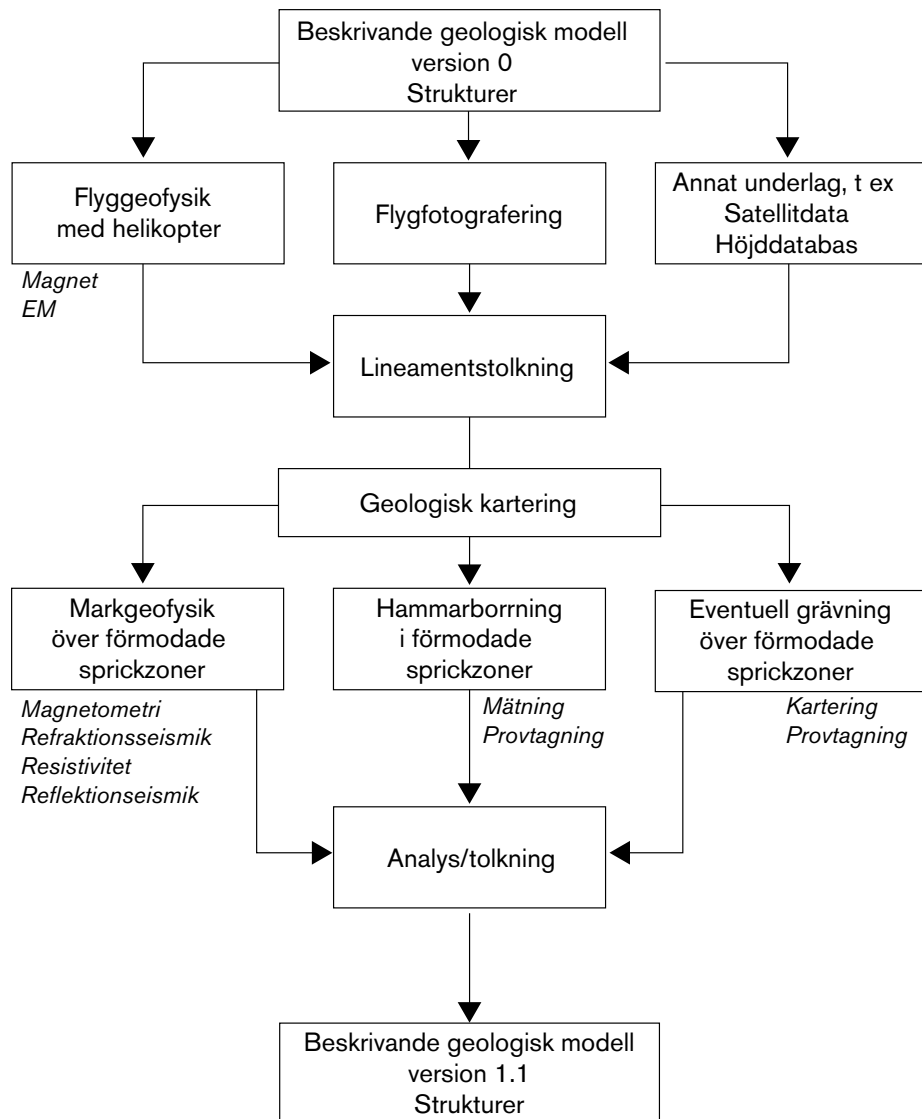
### **Lineamenttolkning – identifiering av regionala sprickzoner**

Om detaljerad flygfotografering saknas genomförs en flygfotografering från 500–1 000 m höjd. Rektifierade flygfoton utgör ett bra underlag för såväl tolkning av lineament som för upprättande av baskartunderlag med lämplig upplösning i plan och höjdd.

Lineamenttolkning används för identifiering av områdets regionala och lokala större sprickzoner och görs på underlag av bl a geofysiska kartor, topografiska kartor/bilder och satellitbilder, se avsnitt 4.3.3. Identifierade lineament kontrolleras i fält bl a med hjälp av markgeofysik, hammarborrning eller grävning. Mätning med magnetometer, slingram eller resistivitet och refraktionsseismik utförs lämpligen längs tvärprofiler över förmodade regionala eller lokala större sprickzoner för att mer preciserat konstatera deras förekomst samt fastställa läge och bredd.

Tolkade regionala sprickzoner inom området kontrolleras vid behov med hammarborrning för att svara på specifika frågeställningar, som t ex att bekräfta sprickzoners existens samt bestämma deras lutning och hydrauliska egenskaper. Figur 3-7 visar flödesplanen för undersökning av områdets strukturer. Även grävning tvärs över större sprickzoner kan tillgripas för att utröna sprickzoners karaktär. Eventuella indikationer på postglaciala rörelser i berg och jordlager undersöks också i detta sammanhang.





**Figur 3-7.** Flödesplan för karakterisering och beskrivning av strukturer, företrädesvis i regional skala, under det första steget av inledande platsundersökning.

### Långtidsmonitorering

För parametrar som bör långtidsmoniteras startar monitoringsprogram tidigt. Det kan exempelvis vara lämpligt att som komplettering till Sveriges befintliga regionala seismiska nät tidigt etablera ett lokalt seismiskt nät som också medger registrering av små jordskalv för att på så sätt erhålla en relativt lång tidsserie och därmed erhålla ett underlag för att förstå orsaker till seismiska händelser inom området. Det seismiska nätet utgör därvid underlag för att bygga upp en geovetenskaplig förståelse av platsens mekaniska stabilitet. Deformationsmätningar med GPS-teknik, för kontroll av eventuella kryprörelser i berggrunden är en annan metod som innebär återkommande mätningar under lång tid. Precisionsnät för dessa mätningar upprättas i första hand över regionala sprickzoner, se avsnitt 4.3.2.

## **Analys, tolkning och modellering**

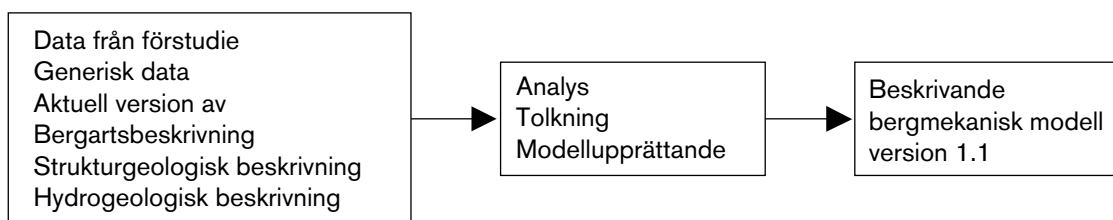
Den första geologiska modellen (version 0) upprättades som underlag för den plats-specifika programskrivningen. När undersökningarna inleds påbörjas också uppdateringen av den beskrivande geologiska modellen och pågår sedan parallellt under hela platsundersökningen. Inledningsvis är modellerna utan detaljer och med stort inslag av generiska data, vilket successivt ersätts av platsspecifik information och högre detaljupplösning och säkerhet. De första versionerna grundas alltså huvudsakligen på befintlig förstudieinformation och resultat från mätningar från ytan.

Huvudsakligen arbetas i regional skala, med fokus på att identifiera regionala och lokala större sprickzoner i ytan. Tolkade sprickzoner, bergarter och jordarter på ytan läggs in i RVS, tänkbar utbredning mot djupet illustreras som exempel (se vidare diskussion i avsnitt 4.2.3). Beskrivningen i djupled innehåller stora osäkerheter i denna modellversion, av förklarliga skäl eftersom den främst baseras på observationer och mätningar på ytan. Osäkerheterna dokumenteras. Tolkningsmetodikens beskrivs mer utförligt i avsnitt 4.2.3.

Den geologiska terminologin fastställs också i detta skede. Det gäller exempelvis hur bergarter ska indelas och benämnas på området, dvs etablera en platsspecifik tillämpning av generella nomenklaturregler. Detsamma gäller eventuella preciseringar i gällande beteckningar av deformationszoner (se annars tabell 4-2 i kapitel 4).

### **3.2.4 Bergmekanik**

Det är inte möjligt att karakterisera bergets mekaniska egenskaper med hjälp av de begränsade insatser som görs inom bergmekanikprogrammet i den inledande fasen. Däremot kan den generiska kunskap som finns preciseras med hänsyn till de bergarter som finns inom aktuellt område. Detta underlag används för att sätta upp den första egentliga beskrivande bergmekaniska modellen, figur 3-8. Denna modell utgår från version 0 som upprättades redan på basis av sammanställningen före platsundersökningen. Det bergmekaniska programmets modeller, parametrar och metoder presenteras i kapitel 5.



*Figur 3-8. Flödesplan för att ta fram den första bergmekaniska beskrivningen under den inledande platsundersökningen.*

### **3.2.5 Termiska egenskaper**

Det är inte möjligt att karakterisera bergets termiska egenskaper med hjälp av de begränsade insatser som görs vid de inledande undersökningarna. Dessa består endast av temperaturloggning i de hammarborrhål som utförs i detta skede. Däremot kan den generiska kunskap som finns för de olika termiska egenskaperna preciseras med hänsyn till aktuellt område och speciellt de bergarter som finns inom detta område. Det termiska programmets modeller, parametrar och metoder presenteras i kapitel 6.

### **3.2.6 Hydrogeologi**

De hydrogeologiska undersökningarna inriktas inledningsvis på det regionala området. Undersökningarna ger ett delunderlag för att välja prioriterad plats, men inriktas främst mot att preliminärt definiera det område som bör ingå i den regionala hydrogeologiska modellen. Det ger ett väsentligt underlag för planering av fortsatta undersökningar. Undersökningarna syftar till att inom det regionala området översiktligt beskriva de hydrogeologiska egenskaperna i bergets ytnära delar (regionala sprickzoner och ytnära bergmassa) samt att översiktligt beskriva de hydrauliska randvillkoren och grundvattennivåns naturliga variation. Sistnämnda data erhålls genom att etablera hydrologiska mätstationer (meteorologi, avrinning) och påbörja grundvattennivåmätningar för monitoring. De hydrogeologiskt inriktade undersökningarna i detta inledande steg består dels av karteringar i fält och dels av borrhålsundersökningar i hammarborrhål. Det hydrogeologiska programmets modeller, parametrar och metoder presenteras i kapitel 7.

#### ***Datasammanställningar***

Den platsspecifika planeringen av en platsundersökning förutsätter att förstudiematerialet gås igenom och att det kompletteras genom sammanställning av annat befintligt material som inte redan ingår i förstudien. Följande delar berörs:

- material från hydrogeologiska undersökningar främst inom det regionala området,
- data från brunnsarkivet för regionen,
- vattendrags utbredning och eventuella mätningar av avrinning i vattendragen,
- meteorologiska data för regionen, samt
- tolkning av avrinningsområden.

Baserat på förstudiematerial och nya sammanställningar av befintligt material upprättas version 0 av den beskrivande hydrogeologiska modellen. Modellen blir väsentligen tvådimensionell. Denna modell utgör underlag för de egentliga platsundersökningarna.

#### ***Hydrogeologisk kartering***

Hydrogeologisk kartering utförs samtidigt med den geologiska karteringen och består i kartering av källor, bäckar, utströmningsområden, dämpningsföretag, dräneringar och markanvändning. Befintliga brunnar inventeras med avseende på produktionsdata (kapacitet, behovstäckning, avsänkning). Viktiga underlag för den hydrogeologiska modellen är kvartärgeologin och berggrundsgeologin (tolkning av lineament, sprickorientering, sprickkaraktär, spricklängder, orientering av karterade ytor på berghällar och vägskärningar) inom det regionala området.

Borrning och grävning i jordlagren dokumenteras geologiskt (se avsnitt 3.2.2) och jordprov tas för kornstorleksanalys. I rör som sätts i jordlagren mäts grundvattennivåer och i vissa fall utförs någon enkel hydraulisk test. I vissa fall kan det vara aktuellt att borra/gräva brunnar och utföra pumptester i dessa. Finns näraliggande borrhål mäts eventuella tryckresponser i dessa under pumpningarna. Grundvattennivån i några av brunnarna och i observationsrör satta i jordlagren, kommer att registreras kontinuerligt på samma sätt som i borrhålen i berg, se nedan. Även här är det väsentlig att starta tidigt för att få en lång tidsserie på grundvattennivåns naturliga variation i jordlagren.

I ett urval av inventerade befintliga brunnar (både borrhålen och grävda) och borrhål utförs kapacitetstester varefter grundvattennivåer mäts cirka 6 ggr/år.

Om det inte finns lämplig meteorologisk station inom området bör det upprättas minst en sådan. Det kan också vara nödvändigt att upprätta en eller flera mätstationer för flöden i några av de större vattendragen inom området.

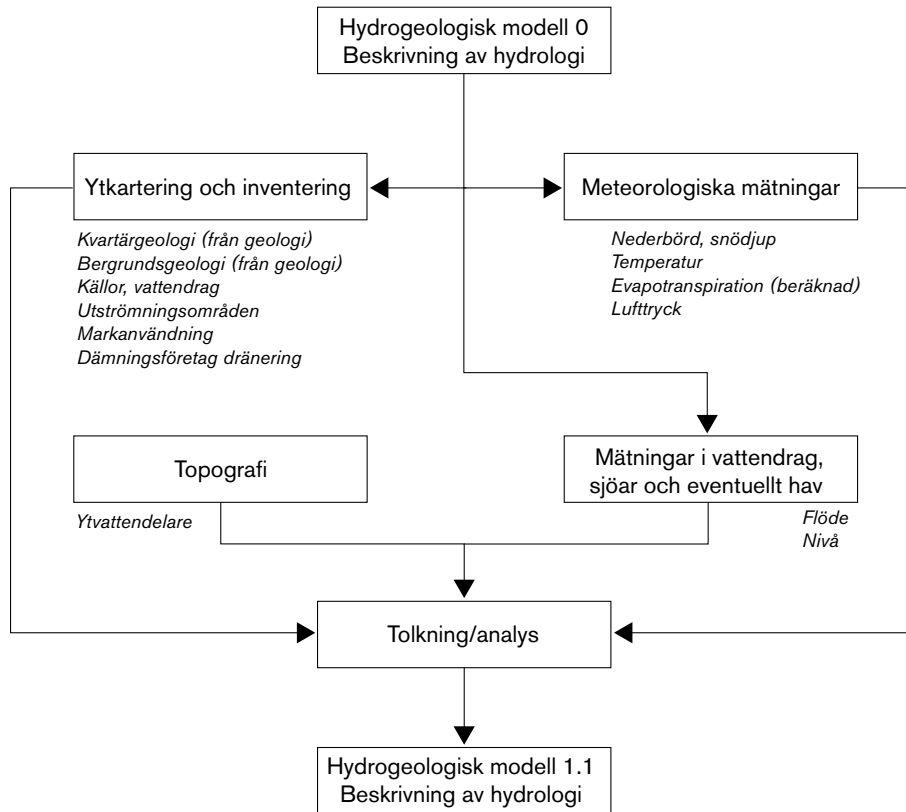
### **Hydrauliska tester i hammarborrhål**

Data från brunnsarkivet och övriga hydrogeologiska undersökningar inom det regionala området ger ett underlag för att uppskatta bergmassans vattenledande förmåga i det yttnära berget men kan inte direkt användas för att bestämma vattengenomsläpplighet på djupet. Hydrogeologiska egenskaperna på måttligt djup kan bedömas utifrån hydrogeologiska undersökningar i de 100–200 m långa hammarborrhål som borrar i detta skede, se avsnitt 7.3.

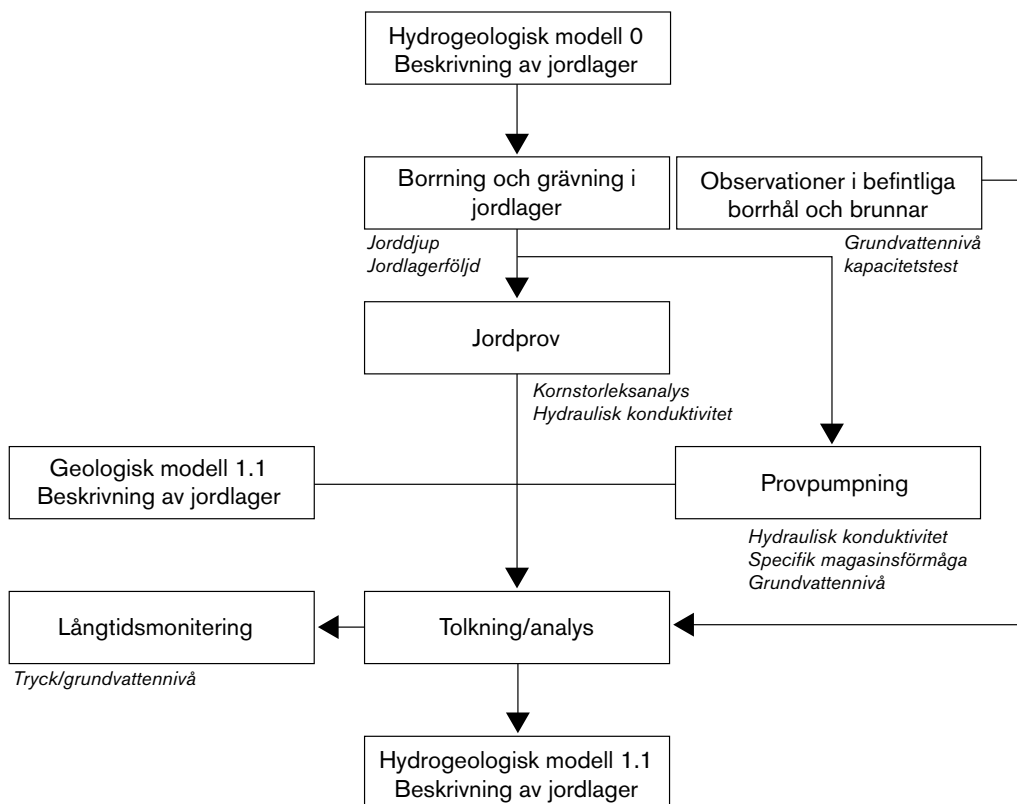
För att bedöma vattengenomsläppligheten utförs pumptester för varje 100 m sektion under eller efter avslutad borrning av hammarborrhål. Om det finns näraliggande borrhål bör även eventuella tryckresponser i dessa mätas under pumpningarna. Efter borrning flödesloggats varje borrhål varvid även avsänkning och återhämtning mäts. Därefter bestäms om, och i så fall hur, borrhålet ska manschetteras för monitorering av grundvattentryck och återkommande vattenprovtagningar.

### **Analys, tolkning och modellering**

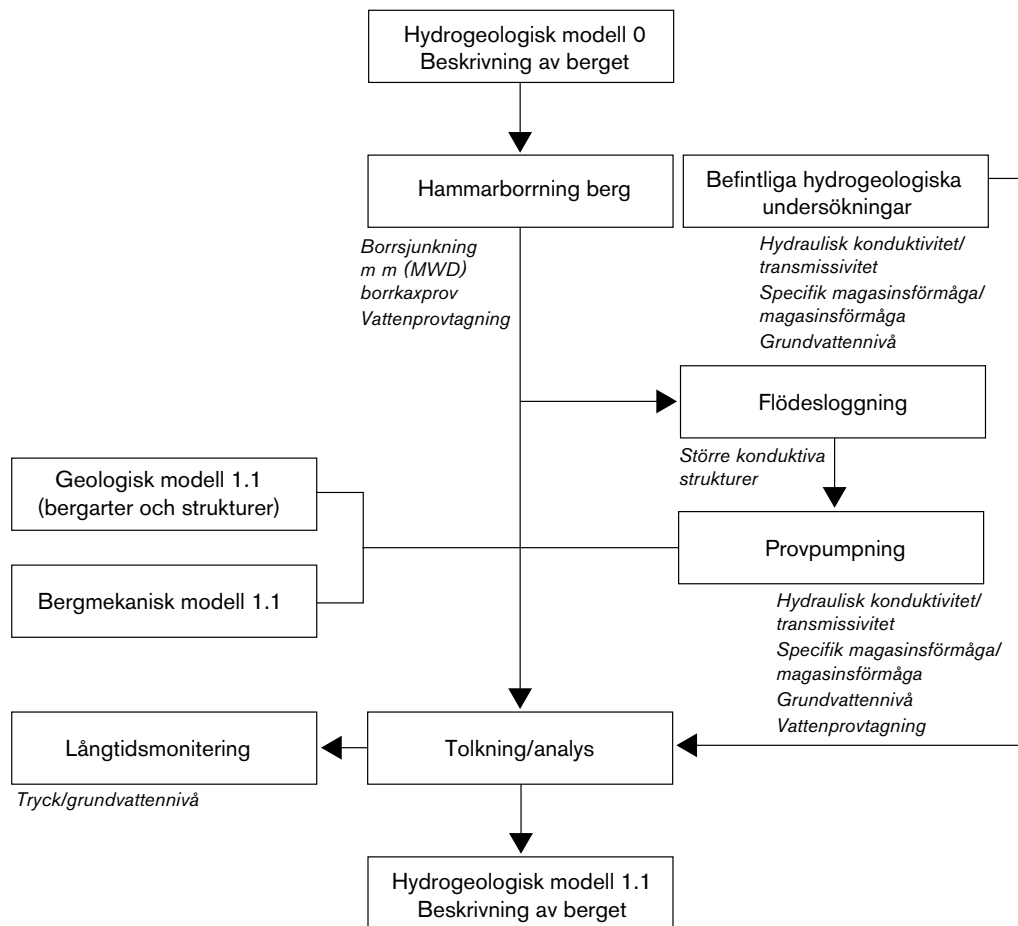
När resultat från de egentliga undersökningarna börjar bli tillgängliga, påbörjas upprättandet av version 1.1 av den hydrogeologiska delen av den platsbeskrivande modellen. De hydrauliska testerna, övriga karteringar och mätningar i fält utvärderas, och det bedöms om begreppsmodellerna kan tillämpas på området eller om de måste modifieras. Modifieras begreppsmodellerna kan utvärderingar behöva kompletteras. Alla data bearbetas därefter utifrån begreppsmodellens uppbyggnad och den gemensamt upprättade geometriska modellen. Som resultat av analysen erhålls rumsligt fördelade egenskaper. I figur 3-9, 3-10 och 3-11 illustreras arbetsmetodiken för hur de ingående delarna i hydrogeologimodellen upprättas och vilket underlag som behövs från andra ämnesprogram. (Tolkningsmetodiken beskrivs utförligare i avsnitt 7.2.3.)



**Figur 3-9.** Flödesplan för att ta fram den första beskrivningen av hydrologin i den hydrogeologiska modellen under den inledande platsundersökningen.



**Figur 3-10.** Flödesplan för att ta fram den första beskrivningen av jordlagren i den hydrogeologiska modellen under den inledande platsundersökningen.



**Figur 3-11.** Flödesplan för att ta fram den första beskrivningen av berget i den hydrogeologiska modellen under den inledande platsundersökningen.

Modellbeskrivningen version 1.1 upprättas huvudsakligen i regional skala och baseras på i huvudsak tvådimensionell information.

- Den hydrologiska beskrivningen omfattar avrinningsområden, avrinningsdata, metrologiska data, samt tolkade in- och utströmningsområden. Beskrivning av grundvattenbildningen och grundvattennivåns naturliga variation ingår också.
- Jordlagrens indelning i hydrauliska enheter baseras på den kvartärgeologiska karteringen.
- För berget bestäms översiktligt transmissiviteten för de yt nära delarna av större sprickzoner och hydraulisk konduktivitet på en relativt grov rumslig detaljnivå (cirka "skalan" 100 m) för bergets yt nära delar ner till cirka 100 m.

Utifrån den gjorda beskrivningen genomförs även beräkningar av grundvattenflödet i regional skala, med någon lämplig beräkningsmodell. Syftet med beräkningarna är att få en översikt över det storskaliga flödesmönstret för att bedöma in- och utströmningsområden samt att studera hur olika randvillkor påverkar det beräknade flödet. Beräkningen behöver inte vara färdigupprättad inför valet av prioriterad plats, men däremot när den inledande platsundersökningen är klar.

### 3.2.7 Hydrogeokemi

Med hänvisning till undersökningarnas mål under inledande platsundersökning inför val av prioriterad plats kan den hydrogeokemiska verksamheten samlas under följande huvudaktiviteter:

- Undersökning av ytnära grundvatten, sjöar och vattendrag.
- I förekommande fall provtagning i hammarborrhål efter borring.
- Start av långtidsmonitoring av kemiska parametrar i utvalda provtagningspunkter.
- Utarbetande av modellversion 1.1, främst med beskrivning av de ytnära förhållandena och presentation av viss djupinformation från enstaka grunda borrhål.

Under det första steget av de inledande platsundersökningarna görs den första karakteriseringen av förekommande ytvatten, ytnära grundvatten och grundvatten i hammarborrhål ner till cirka 200 meters djup. Resultaten används för att ge en översiktlig beskrivning av vattensystemen i området och för att bekräfta hydrologiskt identifierade in- och utströmningsområden. En översikt över de provtagningsobjekt som ingår i den inledande platsundersökningen samt provtagningstillfällena och analysomfattning för respektive objekt ges i tabell 3-1. Det hydrogeokemiska programmets modeller, parametrar och metoder presenteras i kapitel 8.

**Tabell 3-1. Provtagningsobjekt, provtagningstillfällena och analysomfattning vid den inledande platsundersökningen. Tabellen omfattar även de provtagningar som görs efter det att den prioriterade platsen har valts.**

Provtagningsobjekt	Heltäckande kemisk kartläggning	Naturliga variationer	Analysklass*
<b>Ytvatten</b>			
Nederbörd**	X	6–20 ggr/år	3 (a, b)***
Sjöar	X	12–20 ggr/år	5 (c, f, g, h)***/ 3 (a, b)***
Vattendrag	X	12–20 ggr/år	5 (c, f, g, h)***/ 3 (a, b)***
Havsvatten**	X	12–20 ggr/år	5 (c, f, g, h)***/ 3 (a, b)***
Porvatten i sediment (sjöar, hav)**	X	4 ggr/år	5 (h)****
Källor**	X	6 ggr/år	5 (c, f, g, h)***
<b>Ytnära grundvatten</b>			
Brunnar	X	6 ggr/år	3 (a, b)***
Jordrör**	X	6 ggr/år	5 (c, f, g, h)***
<b>Grundvatten</b>			
Hammarborrhål**	X	6 ggr/år	3 (a, b, c, d)/ 5(c, d, f, g, h)
Kärnborrhål** (kemiprioriterat)			
– vid borring	X	–	3 (a, b, c, d)
– hydrokemisk loggning	X	–	3 (a, b, c, d)
– fullständig kemikarakterisering	X	–	4 (e)/ 5 (c, d, f, g, h, i, j, k, l)
– långtidsmonitoring	–	–	5 (c, d, f, g, h)

\* Definition av analysklasserna ges i tabell 8-4, kapitel 8.

\*\* Typvatten som kan utgöra viktiga underlag(indata) vid blandningsberäkningar se avsnitt 8.2.

\*\*\*Inkluderar dessutom tillval från ämnesområdet ytnära ekosystem som t ex närsalter, tungmetaller och radionuklider.

## **Vattenprovtagning i fält**

I ett inledande skede, innan området är alltför påverkat av borrhingsaktiviteter, påbörjas en heltäckande kartläggning av ytvatten och ytnära grundvatten i nära samarbete med ämnesområdet ytnära ekosystem. Omfattningen är beroende på områdets tillgång på och typ av provtagningsobjekt. Valet av provtagningspunkter görs utifrån indikationer på in- och utströmningsområden samt för att få en spridning över hela området och täcka in olika typer av provtagningsobjekt.

Provtagningarna utförs i form av en första sammanhängande provtagningskampanj som sedan upprepas regelbundet under en tvåårsperiod i ett mindre antal utvalda provtagningspunkter. Detta för att få en så tydlig helhetsbild av ytvattensystemet i området som möjligt även med avseende på de naturliga variationernas storlek under t ex en årscykel. Den kemiska sammansättningen i ytvatten och ytnära grundvatten kan förväntas variera starkt beroende på väderförhållanden och årstid och det är viktigt att få ett grepp om variationernas storlek. Ur ämnesområdet ytnära ekosystems synpunkt är det även nödvändigt att veta när variationerna inträffar och vad som styr dem.

En ytterligare form av återkommande uppföljning är långtidsmonitoring av vattensammansättningen i ett antal valda observationspunkter. Programmet för långtidsmonitoring kommer att fortgå under den kompletta platsundersökningen och även sträcka sig in i detaljundersökningsskedet. En strävan är att få långa tidsserier men provtagningspunkter kommer att falla ifrån respektive tillkomma under tiden undersökningarna pågår.

I samband med, eller efter de mer ytnära provtagningarna och vartefter borrhingarna kommer igång, startar provtagningar i hammarborrhål. Genomförandet av vattenprovtagningar i fält beskrivs översiktligt i punktform med motivering av analysomfattning. För utförligare beskrivning av karakteriseringsmetoder hänvisas till avsnitt 8.3.

- Nederbörd i form av regn och snö samlas in under olika årstider under en tvåårsperiod. Nederbördens sammansättning är viktig ur modelleringsaspekter och bör därför karakteriseras utförligt, men eftersom många halter är mycket låga och under detektionsgränsen genomförs ett begränsat analysprogram enligt klass 3.
- Vid den första heltäckande provtagningen av sjövattnet, havsvattnet, källor och vattendrag tas proven ut i många punkter vid samma tillfälle och analysomfattningen görs så fullständig som möjligt. Därefter, vid upprepade provtagningstillfällen och med tidigare resultat som underlag kan antalet provtagningspunkter minska. Alla komponenter analyseras inte vid varje tillfälle. Tabell 3-1 ger maximal och minimal omfattning.
- Provtagning av sedimentproppar i sjöar och hav genomförs med flera ämnesprogram (även geologi och ytnära ekosystem) som intressenter. För hydrogeokemin är det sedimentporvattnet som är intressant och analysomfattningen bör så långt möjligt motsvara klass 5 eftersom porvattensammansättningen är viktig ur modelleringsaspekter. Antalet provtagningspunkter beror på tillgången men kan begränsas till 5 per kandidat område. I en eller två av punkterna undersöks om porvattensammansättningen visar naturliga variationer genom att upprepa provtagningarna.
- Uttag av prov från brunnar sker under den kartläggande kampanjen. Några av brunnarna väljs för att ingå i den upprepade provtagningen (cirka sex gånger per år i två års tid) för att bestämma naturliga variationer. Vid valet tas hänsyn till antropogena föroreningskällor såsom vägsalt, gödslade åkrar och ladugårdar. Alla privata brunnar i området ingår i ett program för långtidsmonitoring av dricksvattenkvalitet. Analysklass 3 motiveras med att dessa vatten förväntas vara påverkade av mänskliga aktiviteter och därmed har kemidata begränsad användning vid modellering.



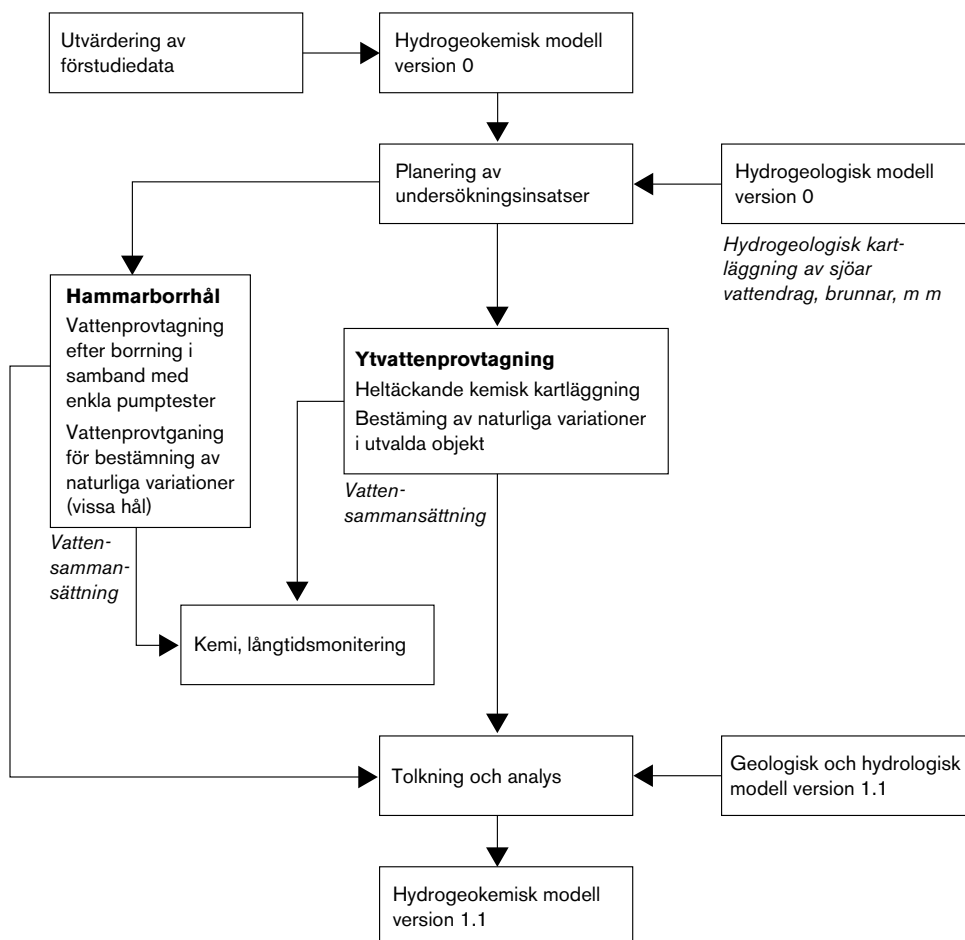
- Vattenprov från jordrör förväntas ge en god bild av ytnära grundvattensystem jämfört med proven från befintliga brunnar. Ett relativt stort antal placeras för att ge en god spridning över området och för att undersöka in- och utströmningsområden. Dessutom ska olika marktyper (skog, äng, mosse etc) täckas in. I den första kartläggningen ingår samtliga jordrör. Därefter väljs ett antal jordrör för upprepad provtagning under två års tid. Vissa av jordrören kommer att ingå i programmet för långtidsmonitoring.

I samtliga hammarborrhål utförs provtagning genast efter borrning för att ge en bild av så ostörda förhållanden som möjligt. Av praktiska skäl begränsas analysomfattningen till klass 3. Ett ytterligare skäl till begränsningen är att vattnet kan ha kontaminerats av syre i samband med borrningen. Upprepad provtagning, enligt klass 5, genomförs i några få valda borrhål, sex gånger per år under en tvåårsperiod. Provtagningen görs för att om möjligt identifiera naturliga variationer och sker i samband med övrig provtagning av ytvatten och ytnära grundvatten. Långtidsmonitoring sker i utvalda borrhål (cirka 5 st) enligt klass 5.

Proven från de olika provtagningsobjekten ovan analyseras enligt någon av SKB:s kemiklasser /SKB, 1998/, se tabell 8-4, kapitel 8.

### **Analys, tolkning och modellering**

Resultaten från provtagningar och analyser tolkas och sammanställs i hydrogeokemisk modell, version 1.1, och ingår i underlaget för val av prioriterad plats, se figur 3-12.



**Figur 3-12.** Flödesplan och informationsbehov för den första hydrogeokemiska modellen som upprättas i den inledande platsundersökningens första steg.

De provtagningar och analyser som utförts avseende ytnära förhållandena tolkas för att ge en rumslik presentation av de kemiska komponenternas fördelning. Resultatet används för att identifiera och/eller bekräfta in- och utströmningsområden samt identifiera förekomst av olika typvatten. Om möjligt kommer även effekter av kemiska reaktioner och biologiska processer att utredas.

### **3.2.8 Bergets transportegenskaper**

De inledande platsundersökningarna innefattar en begränsad mängd undersökningar inom transportprogrammet. Under det inledande delsteget görs inga egna mätningar. Geologiska och hydrokemiska undersökningar såsom bergartsbestämning och vattenprovtagning ger underlag för kopplingar till tillgängliga generiska databaser för diffusions- och sorptionsparametrar som kan användas för inledande skattningar av platsspecifika transportparametrar. Parametrar, modeller och metoder som används av programmet för transportegenskaper presenteras i kapitel 9.

#### ***Tolkning/modellering***

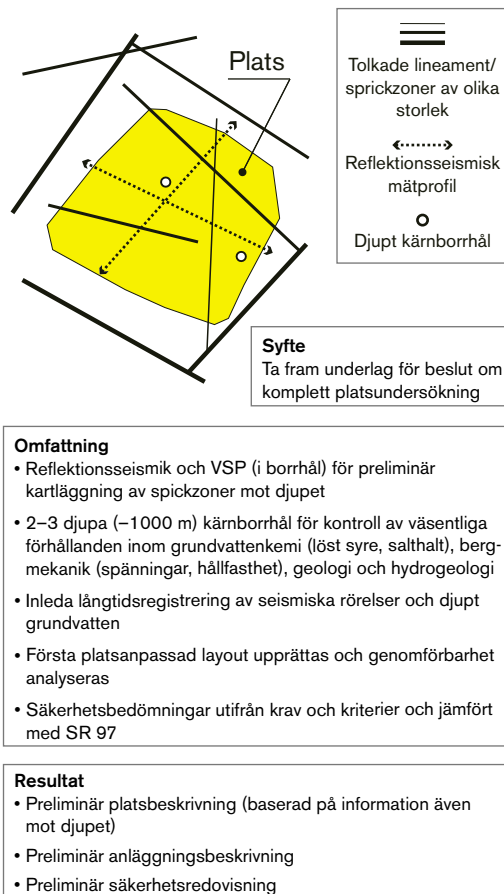
Transportmodellering är ej meningsfull att genomföra i det tidiga skedet innan prioriterad plats valts med de begränsade data som då finns tillgängliga. Det kommer med andra ord inte att upprättas någon transportmodell version 1.1. I detta skede kommer dock skattningar av transportparametrar att göras baserat på generiska data från liknande berggrundsförhållanden.

### **3.3 Inledande undersökningar av prioriterad plats**

Senast när den prioriterade platsen har valts fokuseras undersökningarna på att karakterisera förhållandena mot djupet. Det bör dock poängteras att det inte finns undersöknings-tekniska hinder att borra djupa kärnborrhål redan innan alla de undersökningsmoment som redovisas i avsnitt 3.2 har genomförts.

Inledande och begränsade undersökningar av den prioriterade platsen genomförs för att, speciellt mot djupet förbättra uppställda modeller och bedöma om platsen är lämplig för fortsatta undersökningar. I första hand gäller det att identifiera eventuella förhållanden mot djupet som inte kan accepteras eller är klart olämpliga för djupförvaret.

Utgående från den integrerade översikten i figur 3-13 ges nedan ämnesspecifika genomförandeprogram. Undersökningarna i detta skede utgår, för varje undersökt plats, från den platsbeskrivande modellen, version 1.1, och ska efter genomfört skede resultera i en platsbeskrivande modell, version 1.2, samt en redovisande rapport, preliminär platsbeskrivning.

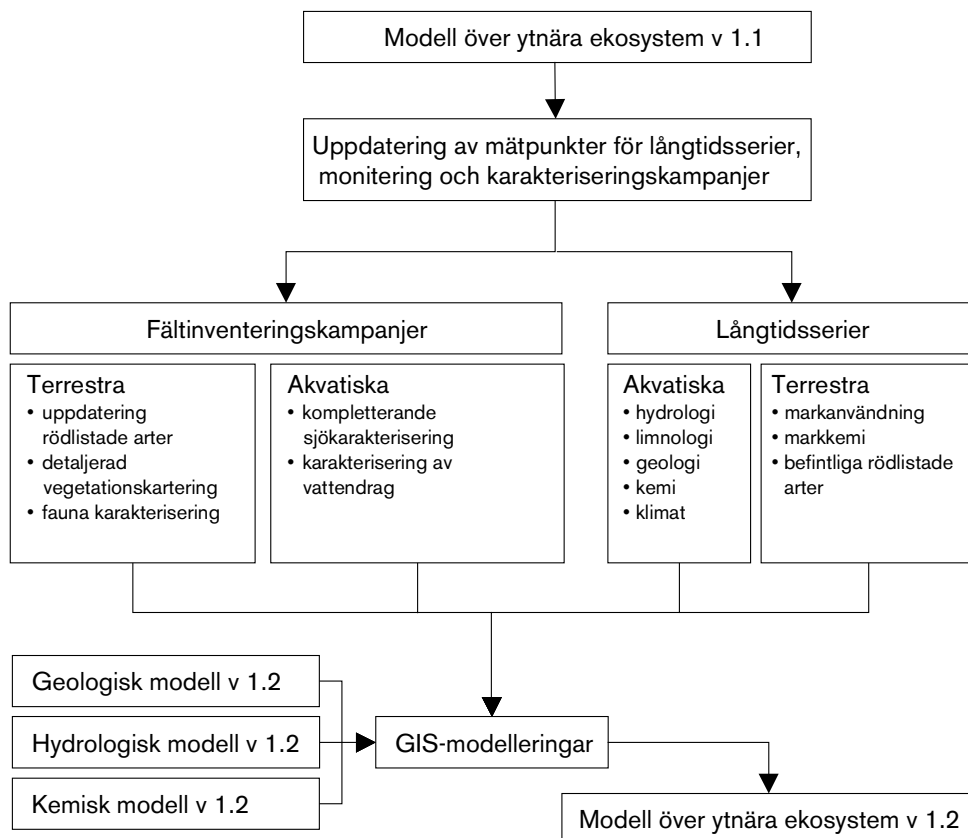


*Figur 3-13. Vid det andra delsteget av inledande platsundersökning genomförs de första egentliga undersökningarna mot djupet.*

### 3.3.1 Ytnära ekosystem

Arbetet koncentreras från den tidigare huvudsakligen regionala skalan till en lokal insamling på prioriterat område. Mätserier och monitoringspunkter som har inletts regionalt kommer att fortgå tills den naturliga variationen och årscyklar har förstått, eller fungera som referenspunkter till undersökningarna på prioriterad plats.

Framtagandet av markanvändnings- och biotopkartor kompletteras med mer detaljerade vegetationskartor. Beroende på områdesförutsättningar fortsätter den redan inledda karakteriseringar av sjöar, vattendrag och havsbassänger vad gäller kemi, morfologi, hydrologi och biota. Utifrån den befintliga datasammanställningen och de tidigare inledda fältundersökningarna kommer GIS-modellering att utföras för att framställa markanvändningskartor, biotopsgränser, avlagringsmodeller och ydrologi. Tillgänglighetskartan som framställdes tidigare (se avsnitt 3.2.1) uppdateras och anpassas till det prioriterade området för att ytterligare säkerställa platsens natur- och kulturvärden. Den platsbeskrivande modellen över de ytnära ekosystemen uppdateras till version 1.2 (figur 3-14).



*Figur 3-14. Flödesschema och informationsbehov under den inledande platsundersökningen för att uppdatera modellen som beskriver platsens ytnära ekosystem.*

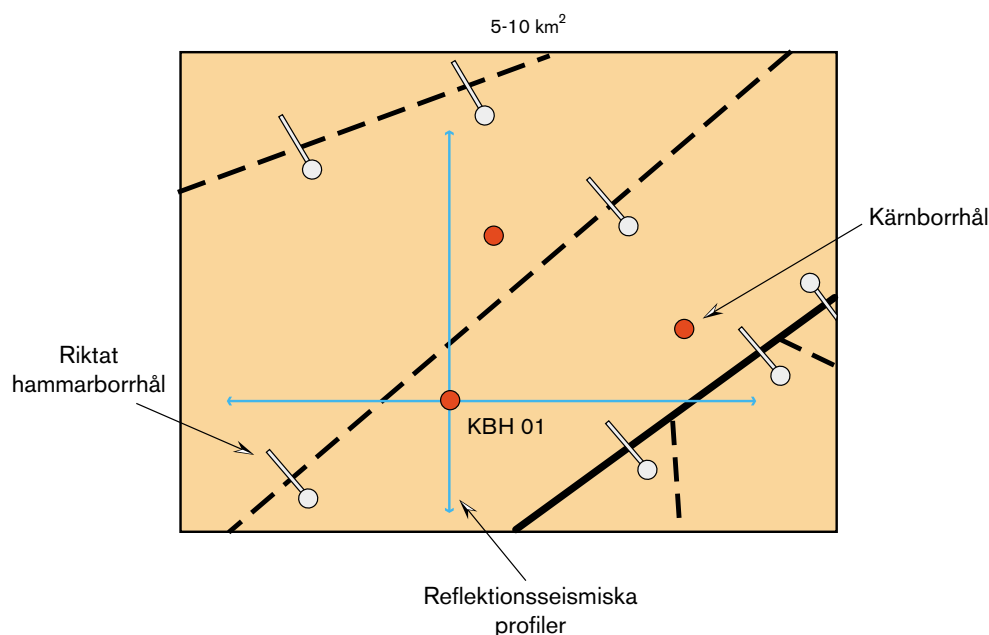
### 3.3.2 Borrprogram

Vid de första egentliga undersökningsborrningarna till större djup är det väsentligt att i första hand undersöka parametrar som kräver ostörda förhållanden och sådana förhållanden mot djupet som direkt skulle kunna avgöra att den prioriterade platsen inte kan accepteras. Ett borr- och undersökningsprogram omfattande ett fåtal (preliminärt två till tre) djupa kärnborrhål genomförs därför med dessa primära syften, figur 3-15.

Två av kärnborrhålen planeras att bli cirka 1 000 m djupa och nästan vertikala, medan eventuella ytterligare hål i första hand ska nå ner under tänkbart förvarsdjup. Undersökningarna koordineras med behov från olika ämnesområden. Speciell hänsyn måste tas till behoven inom hydrogeokemi och bergmekanik. Det första kärnborrhålet planeras vara ett kemiprioriterat borrhål, som utförs med speciella kvalitets- och renhetskrav, se kapitel 11. Ett eller två kärnborrhål används för bergspänningsmätningar.

I kemiprioriterade borrhål görs en fullständig hydrogeokemisk karakterisering. Flera av de hydrogeokemiska parametrarna är störningskänsliga varför det är viktigt att proven tas tidigt och att speciella åtgärder vidtas i undersökningshålet och för rengöring av utrustning som ska ner i borrhålet. Kontroll av total salthalt och kontroll av om löst syre förekommer görs dessutom i alla andra borrhål, eftersom båda dessa parametrar är lämplighetsindikatorer för djupförvarets lokalisering. Dessa mätningar förutsätter inte speciellt kemiprioriterade hål.

## Förslag till borrhoprogram



**Figur 3-15.** Vid den inledande platsundersökningen borrar preliminärt 2 till 3 kärnborrhål. Minst ett av dessa borrar vertikalt ner till cirka 1 000 m djup.

För alla kärnborrhål tillämpas SKB:s koncept för spolvattenhantering under borrhning. Konceptet är avsett att minimera kontamination av bergets spricksystem och grundvatten med spolvatten och borrhkax och att möjliggöra dokumentation av den kontaminering som är oundviklig, se avsnitt 11.3.2.

Kärnborrhålen utförs med så kallad teleskopborrningsteknik, se avsnitt 11.2.3, vilket bl a innebär att de översta 100 meterna har en större diameter. Denna del hammarborrar antingen direkt eller ryms med hammarborrning efter förborrning med kärntagning. Det första alternativet används framförallt för kemiprioriterade borrhål och för att då kunna erhålla kärnprover även från detta avsnitt av berggrunden (för geologisk karakterisering och för provtagning av sprickmineral) kan ett 100 m kärnborrhål borrar i närheten av det ordinarie kärnborrhålet.

Dessutom borrar ett begränsat antal hammarborrhål (preliminärt 5–10) med maximalt 200 m djup inom platsen, för att bekräfta och preliminärt karakterisera lokala större sprickzoner och regionala sprickzoner.

Val av borrhplatser och borrhriktningar görs samordnat, där behov främst från geologi, bergmekanik, hydrogeologi och hydrogeokemi vägs samman. Åtminstone ett av kärnborrhålen bör placeras på så sätt i förhållande till utförda eller kommande reflektionsseismiska mätningar att det kan utnyttjas för VSP-mätningar, se 3.3.3.

Inom programmet för ytnära ekosystem fortsätter kartläggningen av jordlager och (i förekommande fall) sjö- och havssediment, nu mer fokuserat mot den prioriterade platsen, vilket kan innebära borrhning av ytterligare jordborrade borrhål inklusive jordprovtagning, upptag av sedimentproppar samt drivning av grundvattenrör. Liksom i det förra skedet utförs dessa borrhaktiviteter integrerat med programmen för geologi, hydrogeologi och hydrogeokemi, vilka utnyttjar insamlade data för programspecifika syften. I anslutning till jordborrningen provtas bergöverytan, antingen som kax- eller kärnprovtagning eller med specialiserad metod för provtagning av bergflisor, se avsnitt 11.2.1.

### **3.3.3 Geologi**

Sprickor och sprickzoner förekommer i alla storlekar och är kanske den företeelse som mest typiskt erfordrar kraftigt ökade undersökningsinsatser i takt med ökade krav på kännedom om berggrunden. Det är först då undersökningen koncentreras till en prioriterad plats som det ges faktiska möjligheter att kartlägga bergets sprickzoner mot djupet. Framförallt är det viktigt att undersöka huruvida någon större flack sprickzon förekommer på för anläggningen olämpligt djup eftersom dessa i avsevärd grad begränsar den tillgängliga bergvolymen eller till och med kan göra platsen olämplig för djupförvaret. Bergarter och deras fördelning mot djupet är inte kritiska på samma sätt, om inte brytvärda mineraler påträffas, men eftersom de första kärnborrhålen borras i detta skede erhålls nu den första direkta informationen om bergarter och deras fördelning på förvarsdjup.

Undersökningarna i detta skede fokuseras på reflektionsseismik och på att tolka resultaten från de första djupa undersökningsborrningarna. Om reflektionsseismiska mätningar redan genomförts innan prioriterad plats valts, kan de kompletteras.

#### ***Geologisk kartläggning av bergarter och jordarter***

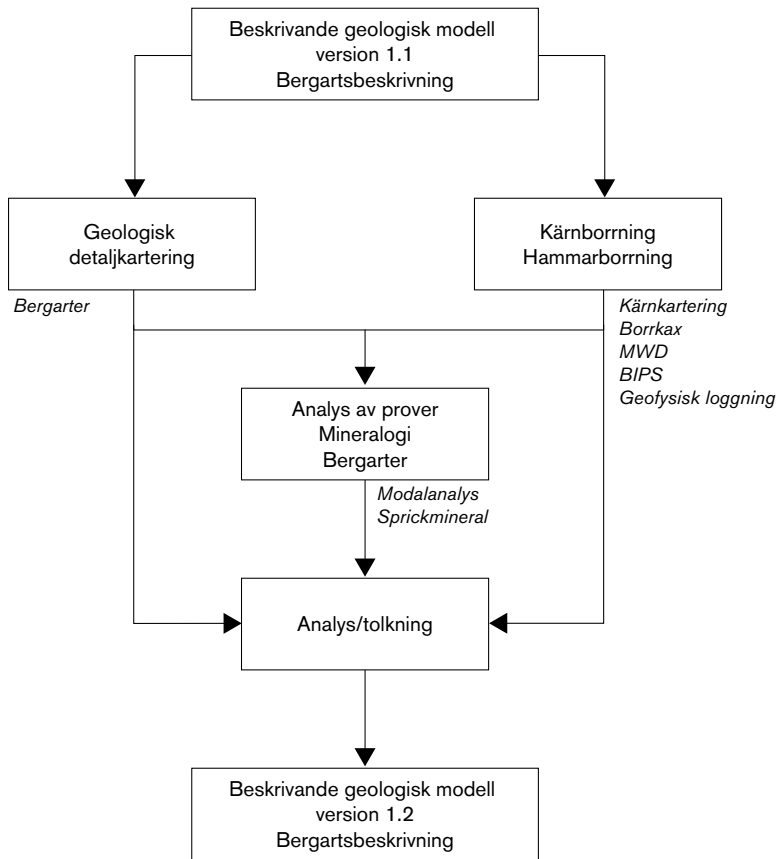
Fältkartering av jordarter genomförs. Provtagning i form av grävning och jordborrning utförs för att studera jordarters lagerföljd och jordarters karaktär. Jordartsbeskrivningens omfattning bestäms dels av vad som gjorts i tidigare steg och dels av vad som erfordras i detta steg. Övrig kartläggning av jordarter kan genomföras under komplett platsundersökning.

Bergarternas fördelning på ytan bestäms genom kartering. Provtagning och analys utförs för bestämning av bergartstyp. Även om endast ett fåtal borrhål till stort djup genomförs ger borrhälen och undersökningar i dessa en relativt god bild av förekommande bergarter och deras fördelning samt de strukturgeologiska förhållandena i övrigt. Figur 3-16 sammanfattar hur undersökningen genomförs i detta skede för att uppdatera den platsbeskrivande modellen, avseende bergarter. För beskrivning av de metoder som anges i figuren hänvisas till avsnitt 4.3.

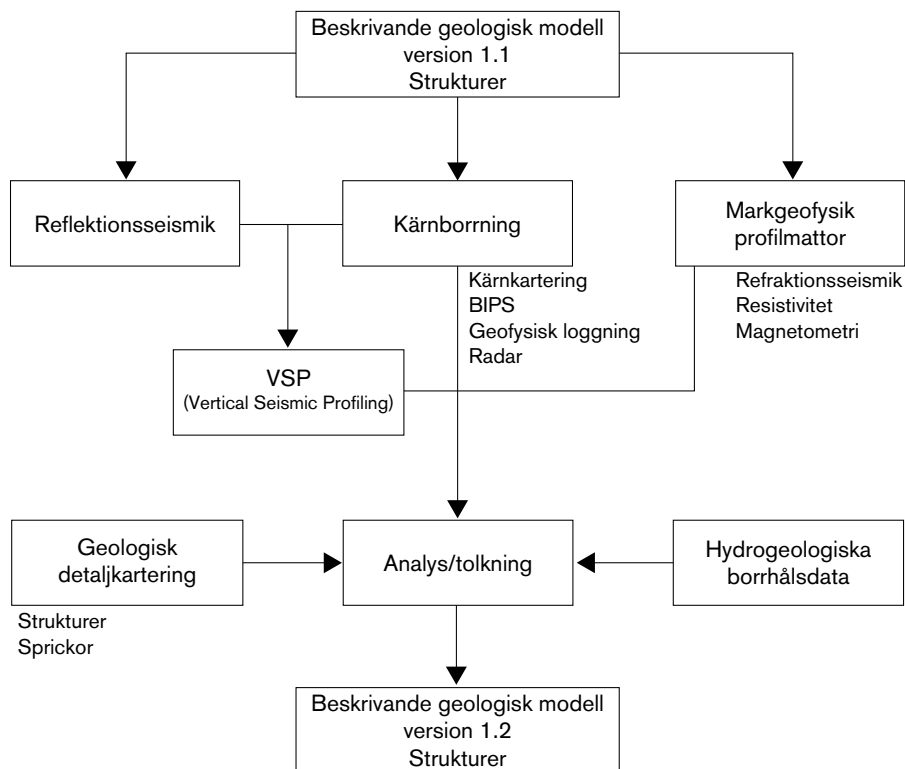
#### ***Sprickzoner och sprickor***

Den strukturgeologiska karakteriseringen inriktas på att preliminärt identifiera sådana sprickzoner som påverkar förvarslayouten i stort. Det innebär att det i första hand är de regionala och lokala större sprickzonerna som bör identifieras. Det är därvid även viktigt att söka indikationer på eventuella flacka större sprickzoner, eftersom dessa inte enkelt kan identifieras från den tidiga ytkarteringen. De sprickzoner som kan förväntas få mindre betydelse för förvarslayouten (främst lokala mindre sprickzoner och sprickor) bestäms mera översiktligt i detta steg. En flödesplan för framtagande av modellversion 1.2 för geologiska strukturer under den inledande platsundersökningen visas i figur 3-17.

Med ledning av det tidigare skedets platsbeskrivande modell planeras strategiska lägen för ett (kompletterande) reflektionsseismiskt mätprogram. (Eventuellt påbörjas reflektionsseismiken ännu tidigare, se 3.2.2.) Reflektionsseismiken genomförs som en av de första undersökningarna i detta skede och utförs preliminärt längs korsande profiler av några kilometers längd vardera.



**Figur 3-16.** Flödesplan för karakterisering och modellering av bergarter under den inledande platsundersökningen på prioriterad plats.



**Figur 3-17.** Flödesplan för identifikation av sprickzoner och framtagande av strukturgeologisk beskrivning under den inledande platsundersökningen på prioriterad plats.

Data för identifiering och tolkning av sprickzoner hämtas från geologiska och geofysiska mätningar (se avsnitt 4.3.5 och 4.3.6) i kärnborrhålen eventuellt kompletterade genom borrning av kortare hammarborrhål, speciellt avsedda för att bestämma markutgående sprickzoners stupning. Ett av de djupa kärnborrhålen bör placeras i närheten av de reflektionsseismiska profilernas korspunkt. I detta hål som ska vara nästan vertikalt och cirka 1 000 m djupt planeras VSP (Vertical Seismic Profiling) att utföras. Samtolkning av VSP och reflektionsseismik ger goda möjligheter att karakterisera förekomst av större sprickzoner av betydelse i en relativt stor bergvolym.

Geofysiska profilmätningar, främst magnetiska och elektromagnetiska eller elektriska metoder förlagda i så kallade profilmattor med till exempel sex profiler med ett profilavstånd på 50 m, bör genomföras för att komplettera den strukturgeologiska karakteriseringen. Elektriska resistivitetsmetoder (CVES) och transient elektromagnetisk sondering (TEM) kan användas för att erhålla indikation på resistivetsförändringar mot djupet, vilket kan bero på större flacka sprickzoner med förhållandevis hög sprickfrekvens eller på gränsskikt till saltare grundvatten. Om resultaten kan kalibreras med provtagning i ett kärnborrhål kan exempelvis utbredningen av salta grundvattnet över ett större område bestämmas.

### ***Analys, tolkning och modellering***

De geologiska modellerna uppdateras efterhand (satsvis) som nya undersökningsresultat inkommer och övergår allt mer i den lokala modellskalan, men även framgent ska de regionala modellerna också hållas uppdaterade. Tidigare modellversion baseras framförallt på ytdata, även om den med hjälp av RVS presenteras i tre dimensioner där geometrierna mot djupet huvudsakligen utgörs av vertikala projiceringar eller kvalificerade bedömningar. Med undersökningar mot djupet blir den tredimensionella modellen mer verklighetsbaserad, även om de begränsade djupundersökningarna i detta skede endast ger knapphändigt underlag.

Den integrerade platsbeskrivande modellen bygger på ett gemensamt geometriskt ramverk, där platsen är indelad i olika geometriska enheter, se avsnitt 4.2.3. Den geologiska platsbeskrivningen innebär att geologiska data, representerande borrhål och ytdata, analyseras och tolkas för att identifiera geometriska enheter och så att varje tolkad geometrisk enhet kan ges geologiska egenskaper för den geologiska platsbeskrivningen.

Läget för de geometriska observationerna av tänkbara sprickzoner läggs in i RVS. För att bestämma lägen av sprickzonerna försöker man vid tolkningen att knyta ihop dessa olika observationer till olika sammanhängande zoner. Tolkningar och osäkerheter beskrivs i det platsbeskrivande dokumentet. En första bastolkning av läget för regionala och lokala större sprickzoner vid den prioriterade platsen redovisas också i RVS. Alternativa lägen, eller helt alternativa tolkningar kan också presenteras, beroende på en bedömning av osäkerheternas storlek. Varierande och osäkra parametrar beskrivs statistiskt. Modell-dokument och olika RVS-representationer utgör den geologiska modellen (version 1.2) efter genomförd inledande platsundersökning.

Förutom beskrivning av de nuvarande förhållandena på platsen ingår också att beskriva den geologiska-tektoniska utvecklingen som en del av den geologiska platsbeskrivningen.



### **3.3.4 Bergmekanik**

Den egentliga bergmekaniska karakteriseringen inleds först när det finns tillgång till djupa kärnborrhål. Undersökningarna kommer att vara inriktade på att få en översiktlig bild av de initiala bergspänningarna och bergmassans kvalitet på en tänkt förvarsnivå inom vald plats. En första bedömning om det finns risk för allvarliga smållbergsproblem på förvarsnivå görs i detta delsteg. Metodbeskrivning framgår av avsnitt 5.3 i kapitel 5.

#### ***Bergspänningar***

Bergspänningsmätningar genomförs med överborrningsmetoden ner till cirka 500 m och genom hydraulisk spräckning ner till cirka 700 m. Mätningarna (för båda metoderna) börjar vid cirka 200 m djup. Hydraulisk spräckning genomförs efter den hydrogeologiska karakteriseringen av borrhålet.

Mätningarna görs på 2–3 nivåer för att ge en uppfattning om spänningstillväxten mot djupet. Inriktningen är att ett eller två hål ska användas och att båda metoderna används. Hålen bör placeras tämligen centralt i potentiellt intressanta block av intakt berg för att mätresultaten ej ska störas av eventuella lokala störningar i spänningsfältet nära blockens ränder. För att hydraulisk spräckning ska utföras bör borrhålen inte avvika mer än 30° från vertikalen.

Borrhålen karteras med avseende på eventuell instabilitet. Om så kallade "breakouts" observeras avslöjar detta höga bergspänningar.

För att få en bild av det regionala spänningsfältets riktning och variation bör mätningarna i borrhålen kompletteras med ytliga bergspänningsmätningar i berghällar genom överborrninng inom ett större område.

#### ***Karakterisering av borrhärnor***

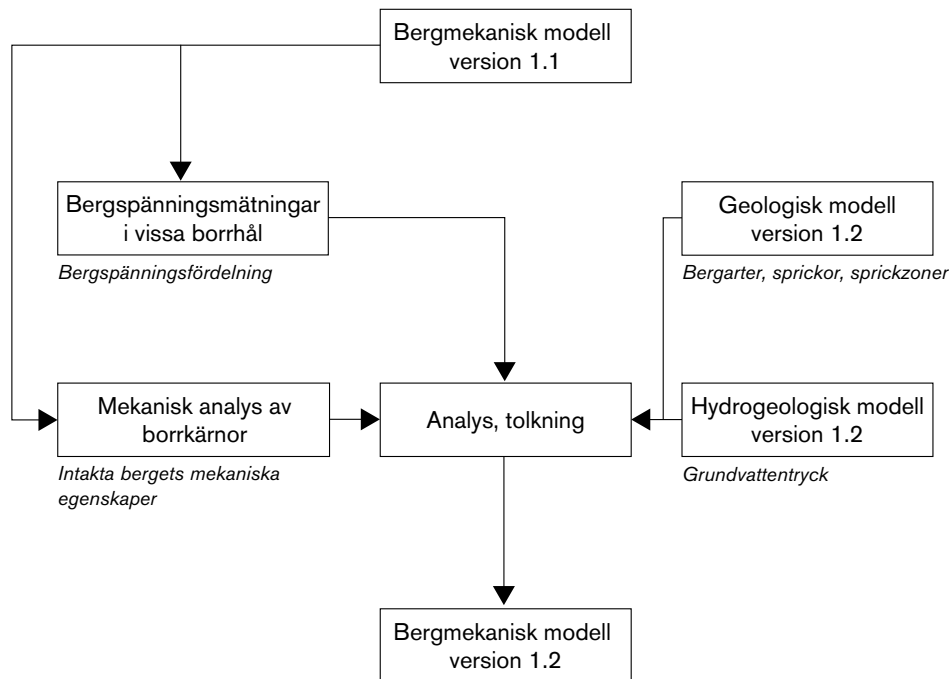
Utöver insamlande av geologiska parametrar karteras borrhärnan med avseende på:

- bergmassans kvalitet som bestäms genom kartering av borrhärnan enligt de olika bergklassningssystemen (se avsnitt 5.3.4), och
- "core discing" som avslöjar höga bergspänningar.

På upptagna borrhärnor genomförs olika tester på laboratorium som:

- Enaxliga- och triaxiella tryckförsök för bestämning av det intakta bergets deformations- och hållfasthetsegenskaper.
- Bestämning av P-vågens gånghastighet, som bland annat kan användas för att bedöma om upptagna borrhärnor har skadats genom mikrosprickor. (Inom det geologiska programmet övervägs användande av full-wave sonic (FWS) som ger såväl P- som S-våghastighet. FWS kan då bli ett viktigt komplement till dessa laboratoriemätningar på kärnor och ger en närmast kontinuerlig hastighetsprofil längs borrhålet.)

Testerna utnyttjas för att identifiera eventuella egenskapsvariationer med djup eller mellan bergarter.



**Figur 3-18.** Flödesplan för att uppdatera den beskrivande bergmekaniska modellen i den inledande platsundersökningen på prioriterad plats.

### **Information från bergskärningar och berghällar**

Följande information från den geologiska karteringen av bergskärningar och berghällar kommer att användas:

- Orientering av sprickor och sprickzoner.
- Spricklängd.
- Sprickors råhet (i liten och stor skala).

### **Analys, tolkning och modellering**

Erhållna primärdata från undersökningarna lagras i SICADA och baserat på dessa data uppdateras den bergmekaniska modellen till version 1.2, figur 3-18, som utgör en del av den samlade preliminära platsbeskrivningen se vidare avsnitt 5.2.3.

#### **3.3.5 Termiska egenskaper**

Huvudinriktningen för de inledande platsundersökningarna i detta skede är att i möjligaste mån identifiera eventuella olämpliga förhållanden såsom hög termisk gradient, hög initialtemperatur på förvarsdjup eller starkt heterogena termiska egenskaper. I detta skede kommer undersökningarna att vara inriktade på följande aktiviteter:

- Loggning av temperatur i borrhål.
- Bestämning av densitet, porositet, kemisk och mineralogisk sammansättning, värmekonduktivitet och värmekapacitet på kärnor från det första kärnborrhålet.

## ***Analys, tolkning och modellering***

Erhållna primärdata från undersökningarna lagras i SICADA och baserat på dessa data uppdateras den termiska modellen till version 1.2, som utgör en del av den samlade preliminära platsbeskrivningen.

### **3.3.6 Hydrogeologi**

De inledande platsundersökningarna av den prioriterade platsen syftar till att översiktligt ge en första uppskattning av bergets vattenförande egenskaper från markytan ned till cirka 1 000 m djup (storlek och variabilitet såväl i egenskaper som rumsligt) vid den prioriterade platsen. Ett ytterligare syfte är att förbättra beskrivningen av randvillkoren genom att inom det regionala området fortsätta och utöka monitoringsprogrammet. Det begränsade antal hål som borraras under detta skede tillåter ingen fullständig bestämning av vattengenomsläpplighetens variation inom den prioriterade platsen, men ger en uppfattning om förhållandena mot djupet.

#### ***Hydrauliska borrhålstester***

I de hammarborrhål som borraras utförs undersökningarna på det sätt som beskrivits i avsnitt 3.2.6. I kärnborrhålen utförs ett omfattande undersökningsprogram.

Under kärnborrning bör pumptester utföras för varje 100 m sektion i berg. Vidare bör en pumptest utföras i samband med att vattenprov tas under borrning. Även absoluttrycket bör mätas i sektioner längs borrhålet. Efter borrning bör kärnborrhålet pumpas och flödesloggats (se avsnitt 7.3) för att ge information om de mer vattengenomsläppliga partierna längs borrhålet. Informationen används för tolkning av bergets strukturer och som underlag till var vattenprovtagning och manschettering bör göras i hålet. Pump-testen utförs som interferenstest om det finns skäl att tro att tryckresponser kan mätas i närliggande borrhål. Data från geologiprogrammet (BIPS-loggning och geofysisk loggning) är ytterligare underlag för den hydrogeologiska utvärderingen av borrhålet.

Hydrauliska tester bör därefter genomföras systematiskt längs hela kärnborrhålet (i kemiprioriterade hål dock först efter genomförd kemikampanj). Dessa tester utförs innan eventuell hydraulisk spräckning görs för att bestämma bergspänningar, se avsnitt 3.3.4. Testerna utförs lämpligen som injektionstester med (preliminär) sektionlängd av 20 m, eller som differensflödesloggning, se avsnitt 7.3.3. I något borrhål genomförs dessutom injektionstester med (preliminär) sektionlängd 5 m inom djupintervallet 100–700 m. Efter den systematiska testningen av borrhålet kan någon pumptest mellan manschetter övervägas, exempelvis om borrhålet penetrerar regionala eller lokala större sprickzoner med hög vattengenomsläpplighet. Pumptid och återhämtningstid beräknas då vara några timmar.

I ett urval av korta sektioner i något kärnborrhål utförs grundvattenflödesmätningar under naturlig gradient. Från det hydrogeokemiska programmet hämtas uppgifter om salthaltsfördelningen mot djupet, vilket är väsentligt för grundvattenflödesmodelleringen.

Varje kärnborrhål manschetteras därefter och monitorering av grundvattentryck påbörjas. För att ge tidsserier på den naturliga variationen fortsätter tidigare inledd monitorering av grundvattennivåer i brunnar, grundvattentryck i hammarborrhål och monitorering av meteorologiska och hydrologiska parametrar. Under perioder då varken hydrotester, borrning eller andra hydrauliskt störande aktiviteter pågår kan det naturliga (ostörda) grundvattenflödet mätas i de avmanschetterade sektionerna.

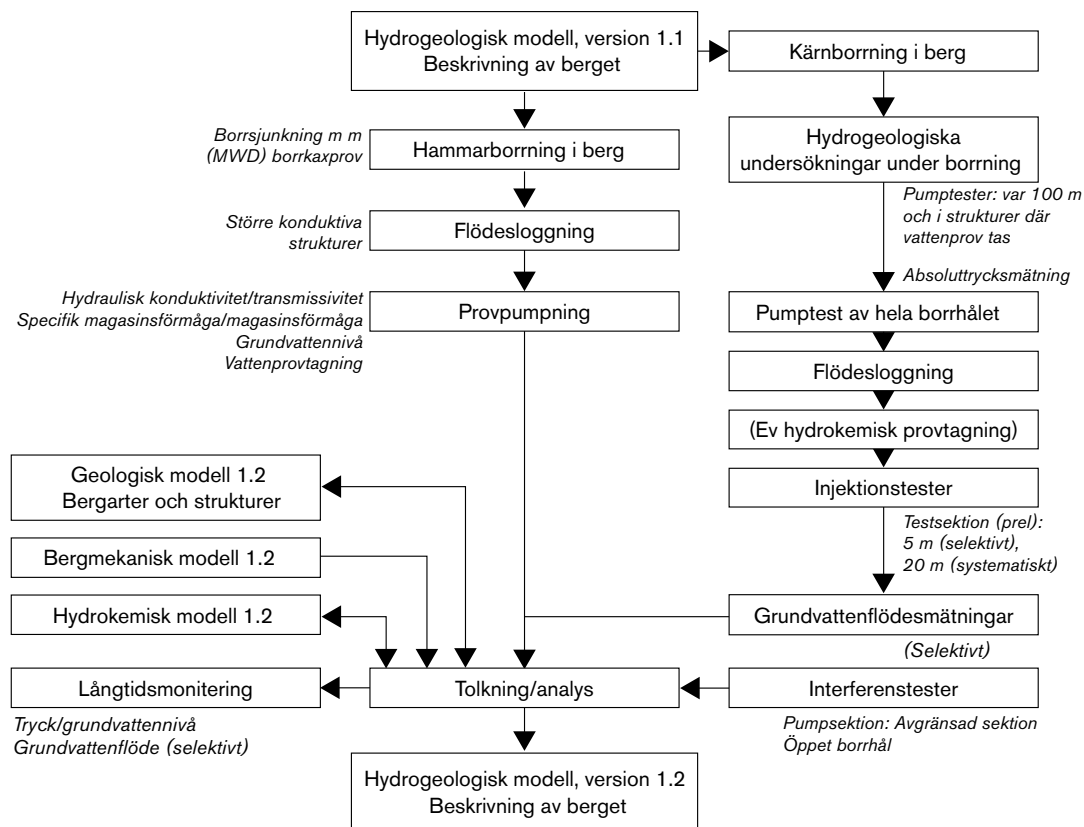
I slutskedet av den inledande platsundersökningen övervägs huruvida interferenstester också ska genomföras under detta skede. Utgångsläget är dock att sådana tester utförs först under komplett platsundersökning.

### Hydrogeologisk kartering

Eventuellt kompletteras den hydrogeologiska karteringen inom aktuell plats. Viktiga underlag för den hydrogeologiska modellen är kvartärgeologin och berggrundsgeologin (tolkning av sprickzoner, sprickorientering, sprickkaraktär, spricklängder, trunkering av sprickor, orientering av karterad yta på berghällar och vägskärningar) inom platsen. Beräknade huvudspänningsriktningar i bergmassan ger ett av underlagen för att bedöma möjlig anisotropi i bergmassan.

### Tolkning, analys och modellering

Modelleringsarbetet består till stor del av analys av resultat från flödesloggning, pump-tester och injektionstester. Begreppsmodellerna granskas och modifieras om det finns behov. Som resultat av analysen erhålls rumsligt fördelade egenskaper. En bedömning görs om anisotropa förhållanden råder eftersom det påverkar de fortsatta undersökningarna. I figur 3-19 illustreras arbetsmetodiken för hur modellerna upprättas huvudsakligen baserat på undersökningar/tester i hammar- och kärnborrhål. Jordarts- och hydrologisk modell uppdateras enligt figur 3-9 och 3-10.



Figur 3-19. Flödesplan för beskrivningen av berget i den hydrogeologiska modellen vid den inledande platsundersökningen på prioriterad plats.

För den hydrogeologiska modellen upprättas i version 1.2 en beskrivning i lokal skala i tre dimensioner. Beskrivningen i regional skala uppdateras.

- Hydrologi och jordlager beskrivs på samma sätt som i version 1.1, men med ökad precision och reviderad geometrisk indelningsgrund. Jordlagrens hydrauliska egenskaper kan nu även bestämmas utifrån resultat av olika hydrauliska tester.
- För berget bestäms översiktligt transmissiviteten för de ytnära delarna av större sprickzoner och på större djup för de områden där det finns information från de djupa borrhålen. Fördelningen av den hydrauliska konduktiviteten i de delar av berget som inte klassas som sprickzoner anges översiktligt och med olika detaljeringsnivåer ("skalor"). Preliminärt beskrivs hela hålen, ner till ett djup av cirka 1 000 m, både i skalorna 100 m och 20 m och i djupintervallet 100 m till 700 m anges även konduktiviteten i 5 m skala. Dessutom görs en bedömning om berget är hydrauliskt anisotropt, baserad på de geologiska och bergmekaniska modellerna samt på resultat från injektionstester och eventuella interferenstester. Skalindelningen bestäms slutgiltigt vid utformandet av de platsspecifika genomförandeprogrammen. Det är dock väsentligt att alla undersökta platser beskrivs på ett likartat sätt.

Rådande grundvattenflöde beräknas i lokal skala baserat på den beskrivande modellen. Syftet med beräkningarna är att få en översikt över det storskaliga flödesmönstret för att bedöma in- och utströmningsområden samt att studera hur olika randvillkor påverkar resultatet. Eventuellt görs även nya beräkningar av grundvattenflödet i regional skala.

### **3.3.7 Hydrogeokemi**

Resultaten från den hydrogeokemiska karakteriseringen under den inledande platsundersökningen är vägledande för beslut om fortsättning av undersökningarna. Vattnets salthalt och redoxstatus på förvarsnivå är de avgörande kemiska parametrarna i detta skede. Det krävs inga omfattande beräkningar för att klargöra om platsen duger för fortsatta undersökningar. När den prioriterade platsen har valts koncentreras arbetet till denna. Den hydrogeokemiska verksamheten samlas under följande huvudaktiviteter:

- Provtagning i samtliga hammarborrhål efter borrhning.
- Provtagning under borrhning av kärnborrhål.
- Hydrokemisk loggning i samtliga kärnborrhål.
- Fullständig kemisk karakterisering av minst ett djupt kemiprioriterat kärnborrhål.
- Start av långtidsmonitoring av kemiska parametrar i nya utvalda provtagningspunkter.
- Sprickmineralundersökningar initieras under slutfasen av den inledande platsundersökningen.
- Utarbetande av modellversioner 1.2 då beskrivningen av kemiska förhållanden mot djupet har stor betydelse för att bedöma huruvida platsen har fortsatt god prognos att vara lämplig för djupförvaret.

En översikt över de provtagningsobjekt som ingår i den inledande platsundersökningen samt provtagningsstillfällena och analysomfattning för respektive objekt ges i tabell 3-1 ovan.

### **Vattenprovtagning i fält**

Vattenprovtagningen i fält fortsätter och genomförs med samma rutiner som i den inledande delen av den inledande platsundersökningen, se avsnitt 3.2.7 ovan.

### **Verksamhet i kärnborrhål**

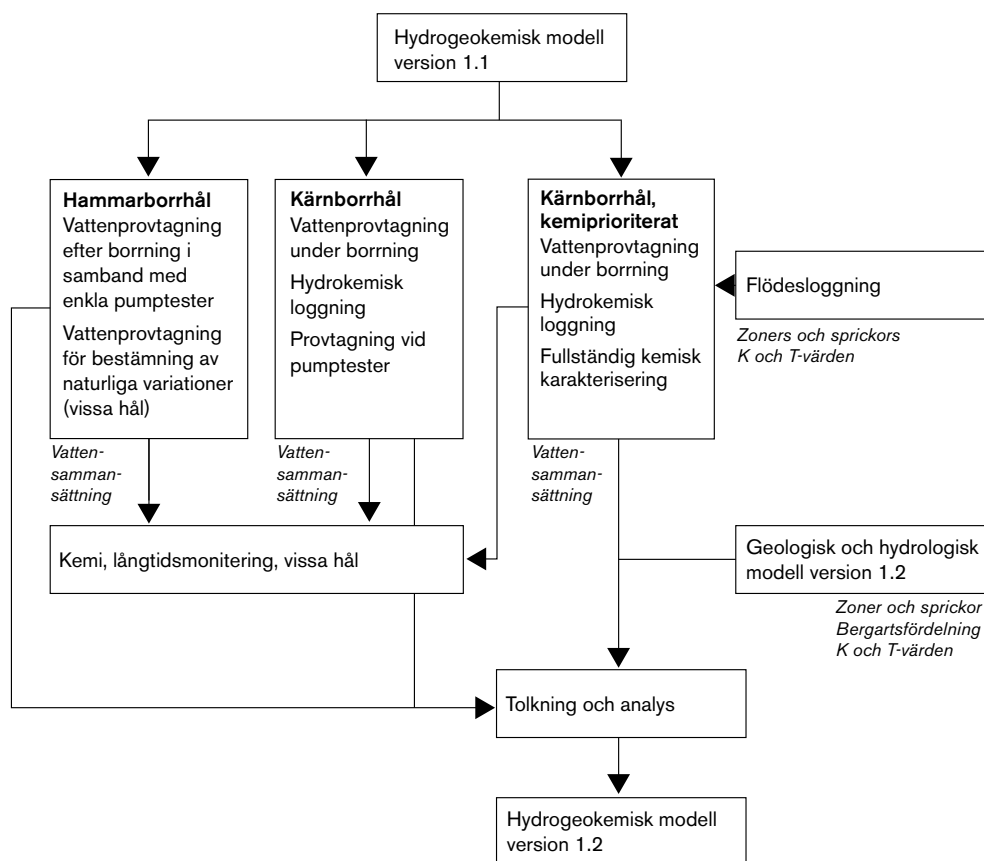
Minst ett, och sannolikt det första, av kärnborrhålen under den inledande platsundersökningen kommer att vara kemiprioriterat. Kemiprioriterat borrhål innebär bland annat, att endast ett fåtal helt nödvändiga undersökningar får utföras före ”fullständig kemikaraktisering” av borrhålet och att det ställs höga krav på renhet och materialval vid borrning (se kapitel 11). Provtagning sker med flera metoder och vid flera tillfällen. Insatserna görs i den sekvens som beskrivs nedan och de föregående resultaten ger information till nästa steg i undersökningen.

- Vattenprovtagningen under borrning kommer att ske med en vattenprovtagare i sektionen. Provtagningen har fördelen att grundvattenkemin bedöms vara mindre påverkad än vid senare provtagningstillfällen eftersom borrhålets kortslutande effekt har verkat under kortare tid. En nackdel är att spolvatteninblandningen i proven kan vara hög, och att antalet parametrar som kan bestämmas är begränsade. Provtagning enligt klass 3 sker när vattenförande sprickzoner penetreras och/eller var 100:e meter.
- BIPS-filmning, flödesloggning och geofysikloggning av temperatur och elektrisk konduktivitet utförs inom ämnesprogrammen för hydrogeologi och geologi före fullständig kemikaraktisering. Information från dessa metoder är nödvändig för att välja vattenförande borrhålssektioner för kemikaraktiseringen.
- En hydrokemisk loggning av borrhålet görs kort efter avslutad borrning med hjälp av slangprovtagare. Den hydrokemiska loggningen ger snabbt en översikt över vattensammansättningen i avsnitt om 50 meter längs hela borrhålet och påvisar eventuella koncentrationssprång. Analyserna sker enligt klass 3.
- Fullständig kemikaraktisering med mobilt fältlaboratorium påbörjas inom en månad efter borrningen. Provtagningen genomförs i vattenförande sektioner i borrhålen (hydraulisk konduktivitet,  $K$ , mellan  $10^{-6}$  m/s och  $10^{-8}$  m/s) och sektionerna fördelas över djupet. Ett riktmärke är fem provtagna sektioner per borrhål. Proven analyseras enligt klass 4 och 5.

Eventuellt upprepas den hydrokemiska loggningen för att undersöka eventuella förändringar i vattensammansättningen när borrhålet kommit i stationärt tillstånd efter borrningen. Detta för att identifiera intern cirkulation i hålet.

Efter den fullständiga karakteriseringen kommer minst två borrhålssektioner i varje borrhål att väljas för fortsatt regelbunden provtagning (en till två gånger per år) vilket utgör en start för långtidsmonitoreringen av kemiparametrar i dessa kärnborrhål. Detta förutsätter montering av permanent borrhålsutrustning i borrhålen.

Proven från de olika provtagningsobjekten ovan analyseras enligt någon av SKB:s kemiklasser /SKB, 1998/, se tabell 8-4 i kapitel 8.



**Figur 3-20.** Flödesplan och informationsbehov för hydrogeokemisk modell som upprättas i den inledande platsundersökningen på prioriterad plats.

### **Analys, tolkning och modellering**

Föregående version av den beskrivande hydrogeokemiska modellen (version 1.1) uppdateras på basis av undersökningar, analyser och tolkningar under detta steg till modellversion 1.2, se figur 3-20. Denna utgör i sin tur grund för de fortsatta undersökningarna under den kompletta platsundersökningen.

### **3.3.8 Bergets transportegenskaper**

#### **Undersökningar**

När undersökningarna fokuserats till en prioriterad plats sker borring av ett fåtal djupa kärnborrhål. Detta innebär att den regionala grundvattenmodellen kan förfinas med data som är av stor betydelse för modelleringen av bergets transportegenskaper. Dessa är:

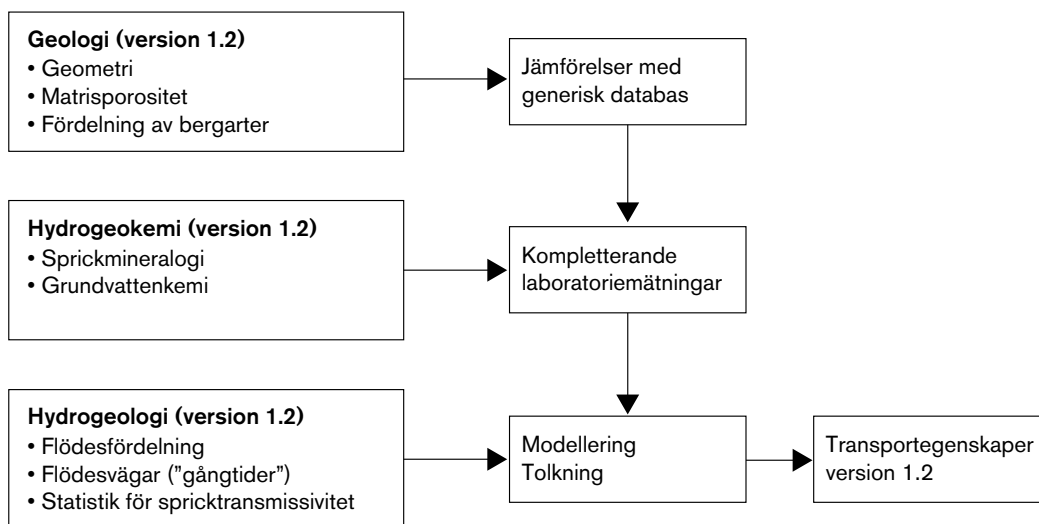
- Läge, geometri, utsträckning och konnektivitet hos hydrauliskt ledande strukturer.
- Bergmassans frekvens av hydrauliskt ledande strukturer (konduktiv sprickfrekvens).
- Bergmassans hydrauliska konduktivitet.
- Grundvattenflöde (beräknat och uppmätt).

- Bergmassans bergartsfördelning mot djupet.
- Sprickmineral samt omvandling.
- Grundvattenkemiska förhållanden.

De metoder och undersökningar som används för att bestämma dessa parametrar finns till största delen beskrivna i geologi-, hydrogeologi- och hydrogeokemikapitlen. Bestämning av grundvattenflödet samt därvid även indirekt fördelning av vattengenomsläpplighet och hydrauliska randvillkor har stor betydelse för att kunna uppskatta bergets transportegenskaper. I något av de första djupa borrhålen görs därför mätningar av grundvattenflöde, i korta sektioner (2 till 10 m) längs borrhålet i utvalda sprickor/sprickzoner. I de fall mineralogi och/eller grundvattenkemi väsentligt avviker från den generiska databasen kommer vissa tidskrävande laboratorieundersökningar såsom genomdiffusionsmätningar att initieras.

### **Analys, tolkning och modellering**

Under de inledande platsundersökningarna görs ingen fullständig modell av bergets transportegenskaper vid den prioriterade platsen. Utifrån den geologiska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska beskrivningen, version 1.2 görs dock en första preliminär beskrivning, transportmodell version 1.2, se figur 3-21. Modellen används främst för planering och design av kommande fält- och modelleringsinsatser. Denna mycket preliminära beskrivning av transportegenskaper kommer att ingå i den samlade preliminära platsbeskrivningen som ska presenteras efter den inledande platsundersökningen. Avsnitt 9.2.3 ger en utförligare beskrivning av hur modellarbetet kommer att genomföras.



**Figur 3-21.** Flödesplan och informationsbehov för modell av bergets transportegenskaper som upprättas under den inledande platsundersökningen på prioriterad plats.

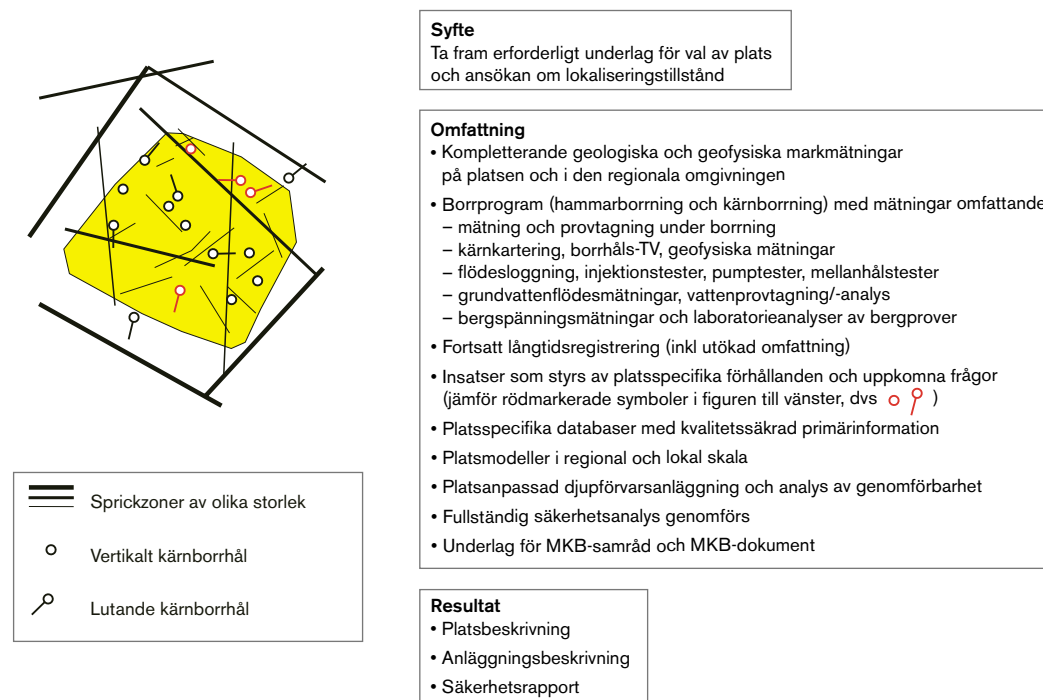


## 3.4 Kompletta platsundersökning

Huvudsyftet med komplett platsundersökning är att genomföra undersökningar på den prioriterade platsen och dess regionala omgivning för att ge tillräckligt underlag för att kunna slutföra projektering och säkerhetsanalys så att platsens lämplighet för djupförvaret kan avgöras, se figur 3-22. Undersökningarna kommer att genomföras i delsteg och eftersom undersökningarna domineras av borrhning och borrhålsundersökningar är det framförallt praktiska aspekter på dessa insatser som styr stegindelningen. Detta utvecklas vidare i borrhprogrammet, avsnitt 3.4.2. Karakteriseringen, för respektive plats, under komplett platsundersökning baseras på version 1.2 av den platsbeskrivande modellen. För varje delsteg uppdateras den platsbeskrivande modellen till nya versioner, 2.1, 2.2, etc. Efter slutförd komplett platsundersökning sammanställs den slutliga platsredovisningen i en slutrapport benämnd platsbeskrivning.

### 3.4.1 Ytnära ekosystem

Förutom en fortsatt uppföljning av säsongsvariationer som startades under den inledande platsundersökningen kompletteras befintliga data med kvantitativa inventeringar av fauna och flora på land och i vatten. Detta arbete består av att täckningsgraden av dominerande vegetationstyper/faunabälten skattas. En stratifierad kvantitativ provtagning genomförs i varje identifierad dominerande zon för att kunna uppskatta total biomassa. De kvantitativa proverna sorterar och artbestämningar görs av dominerande taxa samt mängduppskattningar per m<sup>2</sup> i biomassa uttryckt som kol. Beroende på biotop används olika metoder (se kapitel 10). Detta kvantitativa underlag används i de systemekologiska modeller som ligger till grund för säkerhetsanalysen, men är också underlag för MKB-dokumentet för djupförvaret. Informationen är också väsentlig för att kunna göra bedömningar av eventuella radiologiska effekter på miljön.

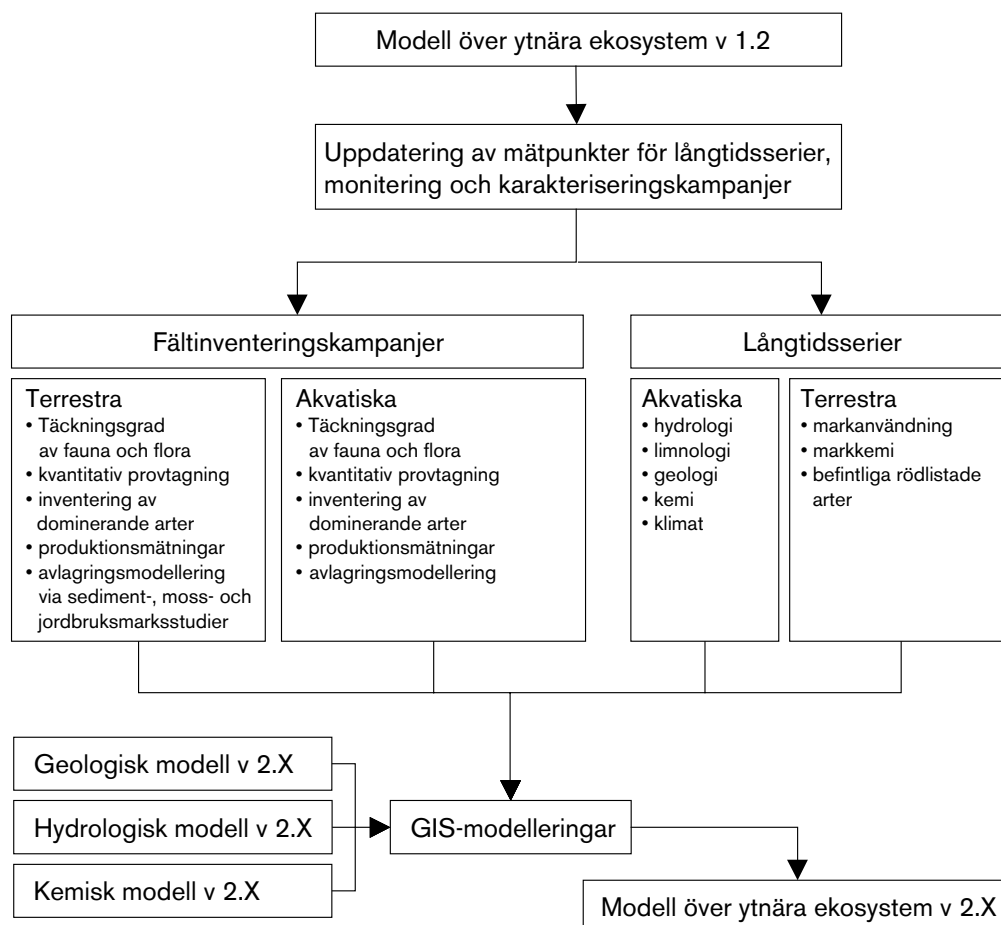


**Figur 3-22.** Den kompletta platsundersökningen domineras av djupa borrhål och omfattande mätningar i dessa.

Under den kompletta platsundersökningen bör även mätningar av biologisk produktion framförallt i sjöar, myrar men eventuellt även i hav genomföras. Arbetet bedrivs som intensiva kampanjer under årets olika säsonger där syrgas- och koldioxid dynamiken följs tillsammans med närsaltomsättningen för de olika biotoperna i vattnen. På land genomförs produktionsuppskattningar som tillväxtmätningar av vegetationen vid vissa utvalda platser. Trots att produktionsuppskattningar är viktig kvantitativ information i de systemekologiska modeller som används i säkerhetsanalysen, finns det få mätningar gjorda hitintills.

Tillsammans med hydrologiprogrammet genomförs karteringar och kvantifieringar av utströmningsområden på land och i vatten i områden som identifierats i de tidigare studierna. Detta ger underlag för att beskriva processerna och omsättningen i gränsskiktet geosfär och biosfär. Tillsammans med det geologiska programmet genomförs studier av sediment, torvmossar, jordbruksmark och avlagringar för att beskriva och kvantifiera den långsiktiga utvecklingen av området vilket är ett underlag för att kunna beskriva den framtida utvecklingen för de närmaste 1 000 åren.

Ovanstående arbete stäms av mot behovet av data och förståelse för de systemekologiska modeller som utvecklats med hjälp av tidigare kvantifieringar. Modellen som beskriver platsens ytnära ekosystem uppdateras, figur 3-23 och ingår som en del i den integrerade platsbeskrivningen. Liksom under inledande platsundersökningen hålls tillgänglighetskartan uppdaterad för att säkerställa att hänsyn tas till platsens miljövärden.



**Figur 3-23.** Flödesschema och informationsbehov under den kompletta platsundersökningen för att uppdatera modellen som beskriver platsens ytnära ekosystem.

### 3.4.2 Borrprogram

Borrhålsprogrammet genomförs i ett antal delsteg om 2 till 4 kärnborrhål. Undersökningarna under dessa delsteg kommer att vara likartade men fokuseras alltmer mot aktuellt förvarsdjup för att detaljera kunskapen inom de områden där projektering placerat tänkbara deponeringsområden. Ytterligare hammarborrhål kommer också att borras.

Huvudfaktorer avseende borrhållningarnas genomförande under den kompletta platsundersökningen är bl a följande:

- Undersökningsborrningarna ska vara lämpligt fördelade över hela den centrala undersökningsvolymen (geografisk yta och djup), med målsättningen att uppnå samma geologiska kunskapsnivå (detaljeringsgrad och säkerhet) för hela modellens volym, men med viss ökad detaljeringsgrad för de delar som har större funktionell betydelse.
- Borrhålsplaceringar och borrhålsriktningar väljs dels för lokalisering och karakterisering av enskilda sprickzoner och dels för att karakterisera olika enheter av bergmassan, figur 3-24. Härvid ska olika borrhålsriktningar och -lutningar användas för att uppnå statistisk representativitet för egenskaper som kan uppvisa anisotropa förhållanden (olika sprickriktningar, m fl orienteringsberoende parametrar).
- Åtminstone något av de under detta skede tillkommande kärnborrhålen ska vara kemiprioriterat.
- Kärnborrhålen utförs med så kallad teleskopborrningsteknik, se avsnitt 3.3.2 ovan och avsnitt 11.2.3.

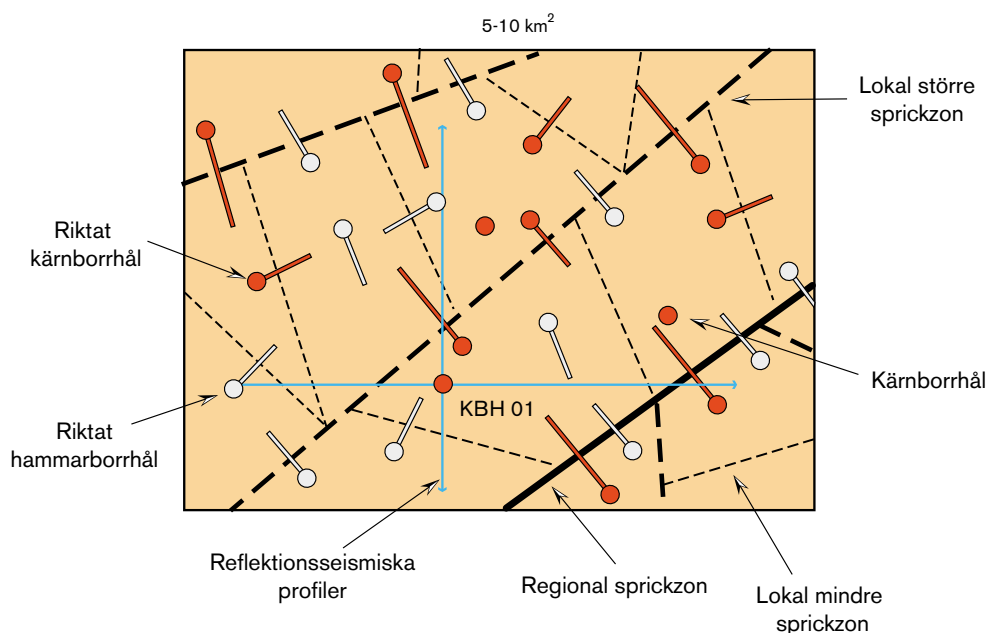
Borrprogrammets omfattning i antal borrhål och mätningarnas omfattning kan inte specificeras i förväg, beroende på att förhållandena på platsen, såsom jordtäckning och bergets homogenitetsgrad, har en mycket stor betydelse för detta. Som en vägledning kan dock borrprogrammet beräknas omfatta 10–20 kärnborrhål och 5–10 hammarborrhål, se figur 3-24. Något eller några av kärnborrhålen placeras inom det regionala området för att ge underlag till hydrauliska och hydrogeokemiska rand- och initialvillkor, t ex djup ner till salt vatten, i regionalmodellen.

Karakteriseringen av jordarterna inom den prioriterade platsen, som påbörjades i den inledande undersökningen, fullföljs. Därvid utförs ytterligare ett antal jordborrhål för sondering av bergytan och bestämning av jordlagerföljd (inklusive jordprovtagning). Genom foderrörsdrivning bevaras vissa av borrhålen för efterföljande vattenprovtagning, hydrauliska tester och grundvattennivåmätningar. Antalet borrhål beror på förhållandena på platsen och på omfattningen av motsvarande borrhållningar under den inledande platsundersökningen.

Även karteringen och provtagning av sjö- och havssediment slutförs i detta skede.

Borrprogrammet och olika tekniska förhållanden som måste beaktas diskuteras i kapitel 11, Borrprogram.

### Förslag till borrhprogram



**Figur 3-24.** Under KPLU borras 10–20 kärnborrhål och 5–10 hammarborrhål. Hålen syftar både till att identifiera och karakterisera sprickzoner och till att undersöka mellanliggande berg.

### 3.4.3 Geologi

Den kompletta platsundersökningen syftar i första hand till att med hjälp av borrhålsundersökningar och geologiska och geofysiska undersökningar verifiera och komplettera kunskapen om berget inom det begränsade område som valts ut under den inledande platsundersökningen. De egenskaper i berget som i första hand kommer att beaktas är:

- kunskap om olika bergarters egenskaper och deras fördelning,
- utökad kännedom om regionala och lokala större sprickzoner som är bestämmande för djupförvarets huvudlayout, samt
- utökad kännedom om mindre sprickzoners och sprickors frekvens och egenskaper.

De geologiska undersökningarna kommer att domineras av borrhning och borrhålsundersökningar (mätningar och tester). Även kartläggning och mätningar på markytan förekommer under den kompletta platsundersökningen, dock i mindre omfattning än tidigare och med färre antal metoder, främst i syfte att komplettera tidigare undersökningar och att besvara specifika frågeställningar från tidigare undersökningssteg. Det handlar då framförallt om att detaljera den geologiska kartläggningen och att genomföra kompletterande geofysiska mätningar. Även den regionala omgivningen blir sannolikt föremål för kompletterande undersökningar i detta skede.

Under den kompletta platsundersökningen bekräftas/ändras och kompletteras kännedomen om alla förekommande sprickzoner som i samråd med projektering och säkerhetsanalys klassats så att de ej tillåts förekomma inom förvarsvolymen, respektive bara kan tillåtas mellan förvarsdelar. Geometrin för varje sådan sprickzon ska, inom den prioriterade platsen, beskrivas deterministiskt. Ingående egenskaper karakteriseras. Övriga sprickzoner beskrivs statistiskt, med vilket menas att förekomst, geometrisk utbredning och egenskaper representeras med statistiska mått.

## **Undersökningar av borrhål och borrhärnor**

Datansamlingen under den kompletta platsundersökningen kommer huvudsakligen att baseras på borrhärning och borrhärningsundersökningar. De olika undersökningsmetoderna beskrivs i avsnitt 4.3. Metoderna och deras syften sammanfattas här bara kortfattat.

I det färdiga borrhålet videofilmas borrhärsvärn med det s k BIP-systemet. Geofysiska loggningar (radiometriska, elektriska, magnetiska, akustiska metoder och temperatur) samt borrhärnsradar genomförs. Även borrhärnsseismiska metoder (VSP) används. Se utförligare metodbeskrivningar i avsnitt 4.3.

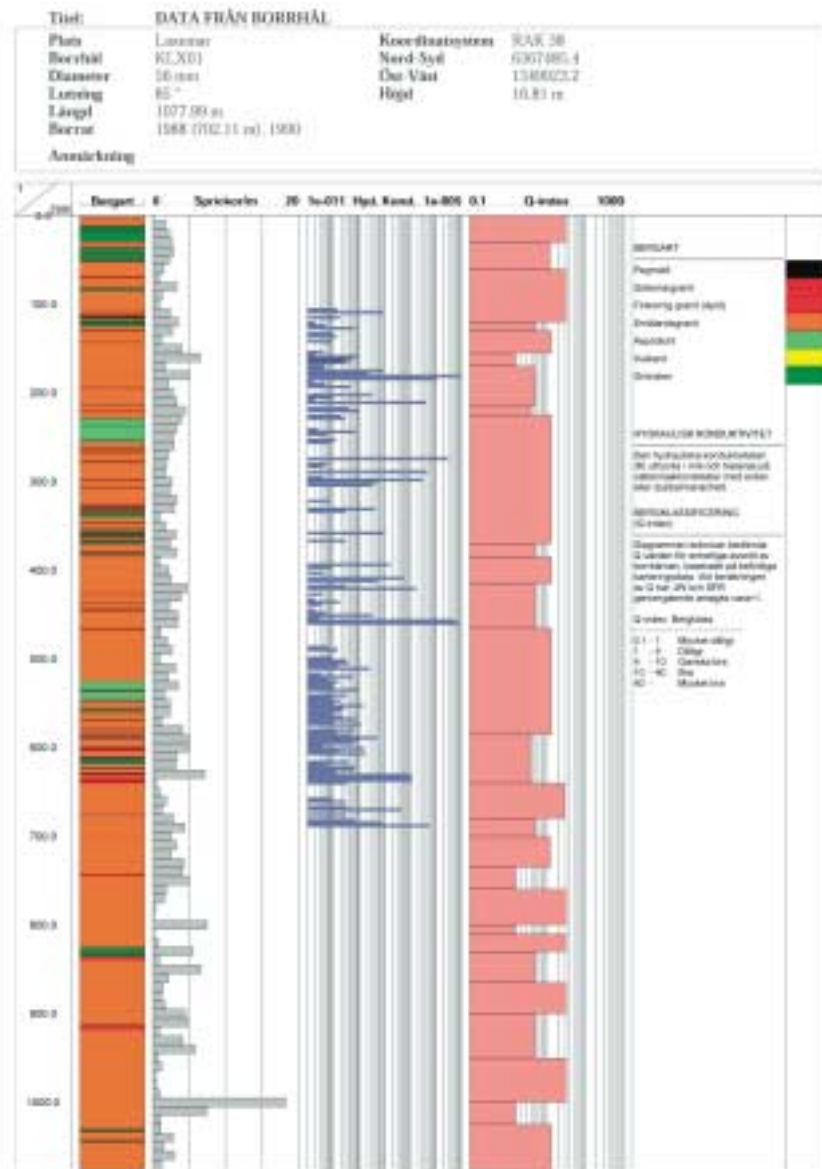
Basen för den geologiska kartläggningen längs kärnborrhålet består i integrerad kartering av borrhärnar och analys av videoinspelningen i borrhålet. För bergarter och mindre sprickzoner och enskilda sprickor har kombinationen av borrhärnar och BIPS-data visat sig vara mycket användbar. Metodiken för den geologiska borrhärnskarteringen bygger på att de geometriska komponenterna (bergartsgränser och vissa sprickors läge och orientering) tas från BIPS-bilden medan bergartsinformation och sprickytors egenskaper (sprickmineral, råhet, m m) hämtas från borrhärnskärnan. Med televiewer erhålls en BIPS-liknande bild av sprickor men metoden bygger på sprickans akustiska egenskaper.

Den geologiska karakteriseringen av kärnborrhålet kompletteras med laboratorieanalyser av kärnprover. Mikroskopiska, kemiska och petrofysiska analyser används för mineralogisk analys av bergarter och sprickmineral, kemisk sammansättning respektive bestämning av densitet, porositet, susceptibilitet, m m. Vid hammarborrhärning kontrolleras färg på vatten-/kaxblandningen som kommer upp och rutinmässiga prover på detta tas för okulär besiktning och vid behov också laboratorieanalyser.

De geofysiska loggarna ger kompletterande indirekt information om bergets petrofysiska egenskaper, se kapitel 4. Exempelvis mäts berggrundens naturliga radioaktivitet, vilken framförallt bestäms av andelen radioaktiva isotoper av uran, torium och kalium och alltså beror på bergartens mineralogiska sammansättning. Metoden kan därför bidra till att avgränsa olika bergarter, vilket ibland kan vara svårt med blotta ögat. Av elektriska metoder används resistivitetsmetoder för att spegla variationer i berggrundens sprickighet längs borrhålet, varvid enstaka sprickor kan detekteras eller genomsnittlig resistivitet bestämmas, beroende på hur elektroderna arrangeras geometriskt i borrhålet och på markytan. Datorbaserade utvärderingsmetoder såsom multivariatanalys av geofysiska parametrar har provats. De geofysiska loggningsresultaten enligt ovan bör ses som kompletterande information för den karterande geologen och hydrogeologen.

Borrhärnsradarn är framförallt användbar för att lokalisera och bestämma orienteringen på lokala större och lokala mindre sprickzoner, i en omgivning som i gynnsamma fall omfattar upp till 100 m radiellt avstånd från borrhålet. Seismiska borrhärnsmetoder (VSP) har oftast möjlighet att detektera sprickzoner på ännu större avstånd, men då med sämre detaljupplösning. Metoderna kompletterar varandra vid bestämningen av sprickzoner, dels genom den nämnda skillnaden i räckvidd och upplösning men kanske framförallt för att metoderna utnyttjar olika egenskaper i berget (elektriska respektive akustiska) och därför är gynnsamma under olika förutsättningar.

Med SKB:s integrerade system för Geologisk BorrhärnsDokumentation (GBD) av enskilda borrhärnar baserat på BIP-systemet, karteringsystemet Boremap, med tolkningsstöd från geofysik och provanalyser, presenteras resultaten i s k composite diagram med hjälp av ett anpassat WellCAD system, se figur 3-25. Valfritt antal parametrar kan presenteras, liksom statistiskt bearbetad information.



*Figur 3-25. Exempel på redovisning av Geologisk BorrhålsDokumentation (GBD) med hjälp av WellCAD-presentationer.*

Pappersutskrift av kontinuerlig BIPS-registrering från ett helt borrhål utgör också en mycket användbar grunddokumentation av borrhålet. Detta ger vid sidan av GBD-resultaten en mycket bra visuell uppfattning om borrhålet, till nytta vid planering av olika slags efterföljande mätningar i borrhålet.

### **Undersökningar på markytan**

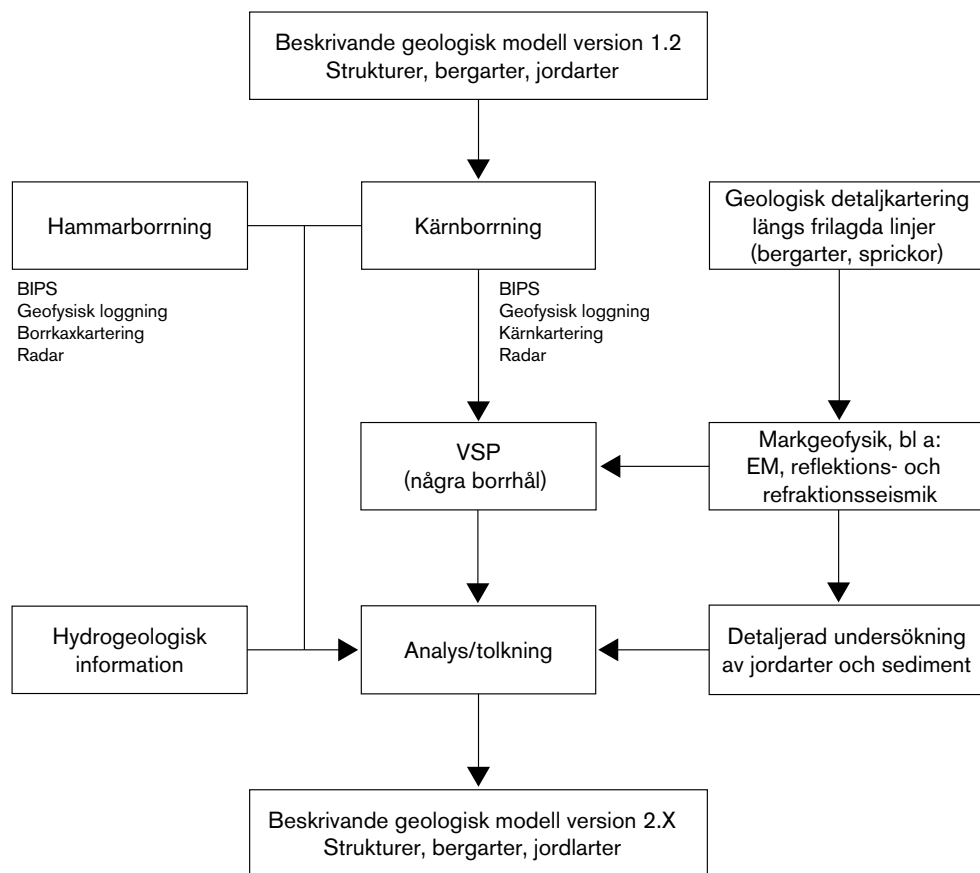
Även om de geologiska och geofysiska undersökningarna domineras av borrhålsaktiviteter, kommer också kompletterande geologiska och geofysiska studier på markytan att utföras. Beroende på andelen berg i dagen kan ytgeologisk kartering genomföras med varierande grad av svårighet. Bergytan blottläggs för kartläggning längs åtminstone ett par vinkelräta stråk och någon större yta. Vid stort jordtäckte bör detta åtminstone delvis kompenseras med utökad korthålsborrning för provtagning av berget. Vidare karakteriseras områdets jordarter, lagerföljder och jorddjup, och i förekommande fall, sediment på sjö- och havsbottnar.

### Tolkning av data – uppdatering av beskrivande modell

I den geologiska modellbeskrivningen representeras huvudbergarter deterministiskt, dvs geometrisk utbredning och egenskaper bestäms för varje bergart. Likaså beskrivs geometrin och egenskaper hos större sprickzoner (regionala och lokala större). Underordnade bergarters förekomst, procentuella andel och egenskaper presenteras som statistiskt fördelade parametervärden. Lokala mindre sprickzoner och sprickor beskrivs statistiskt. I än högre grad än för tidigare skeden kommer RVS-systemet att vara ett centralt hjälpmedel inte minst för den strukturgeologiska modellen, liksom även för den geometriska förvarsmodellen, för vilken den strukturgeologiska modellen utgör den geovetenskapliga grunden. Metodiken för tolkning och redovisning av osäkerheter beskrivs i avsnitt 4.2.3.

Liksom under den inledande platsundersökningen kommer de geologiska modellbeskrivningarna att uppdateras allteftersom ny platspecifik information erhålls, figur 3-26. Flera modellalternativ bör utvecklas parallellt för att kunna prövas och jämföras med varandra. Integrationen mellan ämnesområdena pågår kontinuerligt avseende såväl undersökningarnas detaljplanering som modelleringsarbetet. Större modellavstämningar görs efter den uppdelning i delsteg som tidigare nämnts. Återkopplingen från avnämarna sker företrädesvis också på dessa modellversioner.

I samtliga undersökningssteg insamlas data som har betydelse för den geologiska utvecklingshistorien, t ex jordarternas och bergarternas relativa/absoluta ålder och strukturernas relativa ålder. Resultaten beskrivs i en sammanfattande geologisk utvecklingsmodell (se avsnitt 4.2).



**Figur 3-26.** Flödesplan för undersökning och uppdatering av geologisk modell för beskrivning av jordarters och bergarters fördelning samt strukturer i berggrunden under den kompletta platsundersökningen.

### **3.4.4 Bergmekanik**

Vid komplett platsundersökning genomförs en bergmekanisk karakterisering av bergmassan i det centrala undersökningsområdet vid prioriterad plats för att kunna påvisa genomförbarheten att bygga djupförvarsanläggningen. En så jämn fördelning av borrhål i den stora bergvolymen som möjligt bör eftersträvas för att ge indata till den beskrivande bergmekaniska modellen.

#### ***In-situ-tester i borrhål***

Bergspänningsmätningar genomförs med någon eller några av följande metoder i ett antal av borrhålen med någon eller några av följande metoder:

- Bergspänningsmätningar genom överborrning.
- Bergspänningsmätningar genom hydraulisk spräckning, efter hydrogeologisk och hydrogeokemisk karakterisering.
- Bergspänningsmätningar genom HTPF (Hydraulic Testing of Pre-existing Fractures), om tillräckligt många sprickgrupper påträffats i borrhål.

Dessutom karteras borrhål med avseende på eventuell instabilitet, ”breakouts”.

#### ***Kartering av borrhärnor***

Utöver insamlande av geologiska parametrar karteras borrhärnan med avseende på:

- Bergmassans kvalitet – enligt olika bergklassningssystemen (se avsnitt 5.3.4).
- ”Core discing” – som avslöjar höga bergspänningar.

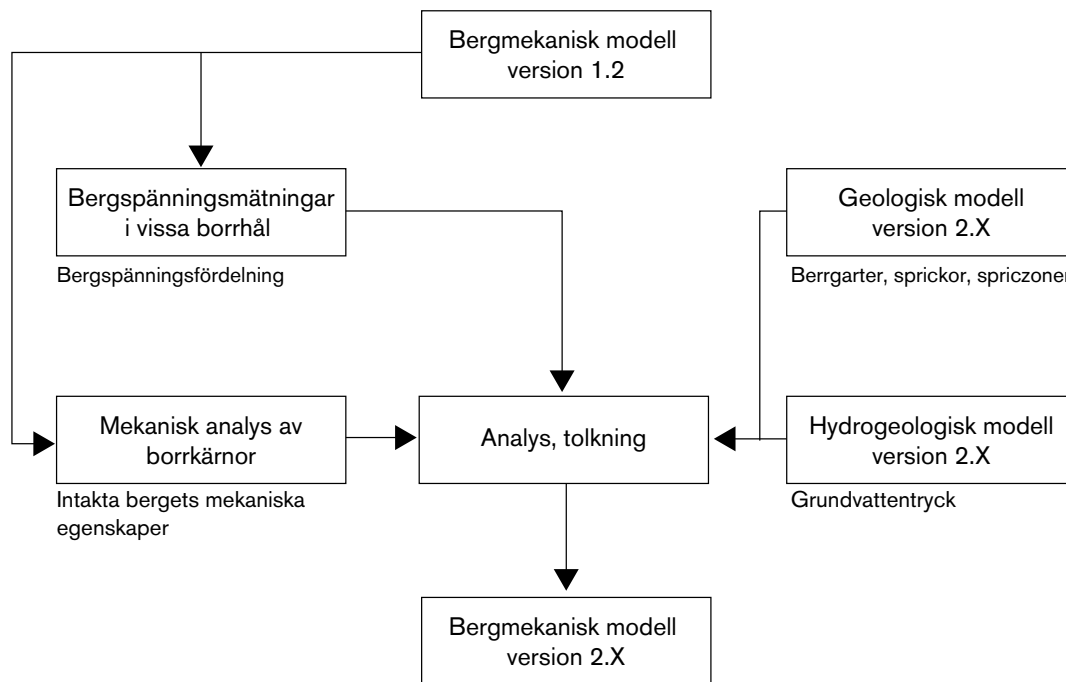
På upptagna borrhärnor utförs olika tester på laboratorium, som:

- Enaxliga- och triaxiella tryckförsök för bestämning av det intakta bergets deformation och hållfasthetsegenskaper.
- P-vågens gånghastighet.
- Enskilda sprickors mekaniska egenskaper, direkta skjuvförsök och karakterisering.
- Bestämning av eventuellt lervittrade produkter (mineral, svälltryck).

#### ***Analys, tolkning och modellering***

Erhållna och kvalitetssäkrade primärdata från undersökningarna lagras successivt i SICADA. Baserat på dessa data uppdateras den bergmekaniska modellen, se figur 3-27, efter varje delsteg (borrhålsomgång). Efter genomförd platsundersökning kommer slutversionen av den bergmekaniska modellen att utgöra en del av den integrerade platsbeskrivningen. (Se även avsnitt 5.2.3 i kapitel 5.)





*Figur 3-27. Flödesplan för att uppdatera den bergmekaniska modellen under den kompletta platsundersökningen.*

### 3.4.5 Termiska egenskaper

Vid komplett platsundersökning genomförs en termisk karakterisering av bergmassan inom och runt förvarsanläggningen. En beskrivning av det termiska initialtillståndet och termiska randvillkoren upprättas. Den beskrivande termiska modellen bygger på bergartsmodellen som tas fram inom det geologiska programmet. På borrhäknor tagna från kärnborrhål genomförs en serie laboratorieundersökningar. Densitet, porositet, kemisk och mineralogisk sammansättning, värmekonduktivitet och värmekapacitet bestäms för de olika förekommande bergarterna. (Se avsnitt 5.3 för metodbeskrivningar.)

Prover för laboratorieanalys tas jämnt fördelat inom området för att kunna bedöma den rumsliga fördelningen av de termiska egenskaperna. Denna analys grundas även på den bergartsmodell som tas fram inom geologiprogrammet och med hjälp av generisk kunskap om bergarternas termiska egenskaper.

Laboratorieundersökningarna kan komma att kompletteras med termiska responstester i borrhål för att i fält bestämma/kontrollera bergmassans termiska egenskaper i större skala.

Erhållna och kvalitetssäkrade primärdata från undersökningarna lagras successivt i SICADA. Baserat på dessa data uppdateras den termiska modellen efter varje delsteg (borrhålsomgång). Efter genomförd platsundersökning kommer slutversionen av den termiska modellen att utgöra en del av den integrerade platsbeskrivningen.

### **3.4.6 Hydrogeologi**

De hydrogeologiska undersökningarna inriktas på att:

- uppnå en hydrogeologisk förståelse av det regionala och lokala området som är tillräcklig för att ge underlag till analys av egenskaper och randvillkor,
- upprätta hydrogeologiska beskrivningar i regional och lokal skala som är tillräckligt detaljerade för att utgöra hydrogeologiskt underlag för utvärdering enligt de behov som föreligger inom säkerhetsanalys och projektering.

För att erhålla underlag till randvillkoren inom det regionala området fortsätter och utbyggs monitoringsprogrammet, omfattande hydrologiska mätstationer (meteorologi, avrinning) och grundvattennivåmätningar, även under den kompletta platsundersökningen.

#### ***Hydrauliska borrhålstester***

I alla borrhål utförs hydrogeologiska undersökningar. I hammarborrhålen utförs undersökningarna på samma sätt som under den inledande platsundersökningen och i kärnborrhålen i huvudsak på det sätt som beskrivits i avsnittet 3.3.6. En skillnad är att injektionstester med kort sektionlängd (preliminärt 5 m) endast genomförs i vissa av kärnborrhålen och endast inom djupintervallet 300–700 m. Alla kortvariga pumpstester, dvs tester som pågår några timmar per test, utförs som interferenstester om det finns skäl att tro att tryckresponser kan mätas i näraliggande borrhål.

Flera interferenstester med pumpning cirka 3 dagar och återhämtning cirka 1 dag genomförs. Flertalet av dessa tester utförs efter respektive borrhålskampanj. När dessa interferenstester utförs är det av största vikt att det inte pågår aktiviteter som skapar tryckresponser i grundvattenmagasinet inom testens influensområde. Aktiviteter som kan störa är t ex borrhålsborrning, andra hydrogeologiska tester och vattenprovtagning. Pumpning sker i avgränsade sektioner i kärnborrhål eller i öppna kärn- eller hammarborrhål. Tryckobservationer med anpassade mätintervall utförs preliminärt i borrhålssektioner som ligger närmare än cirka 1 km från pumpat borrhål. I slutskedet av den kompletta platsundersökningen utförs någon eller några interferenstester med pumpning under 3–6 månader och återhämtning cirka 1–2 månad. Eventuellt kombineras en av dessa tester med ett storskaligt spårförsök.

#### ***Hydrogeologisk kartering***

Vid ett tidigt steg inom skedet kompletteras den hydrogeologiska karteringen inom det regionala området och prioriterad plats för att ge ett komplett underlag för beskrivningen av jordlagren. Det innebär också att den kvartärgeologiska modellen kompletteras och görs mera detaljrik inom prioriterad plats och dess närområden, framförallt inom områden som kan förväntas vara in- och utströmningsområden. Den strukturgeologiska karteringar av frilagda bergytter längs linjer och ytor ger också värdefull information om de spröda strukturer som är upp till ett 10-tal meter långa.

#### ***Monitering***

Monitering av grundvattentryck i alla avmanschetterade borrhålssektioner och mätning av meteorologiska- och hydrologiska parametrar fortsätter. Liksom under inledande platsundersökning kan grundvattenflödesmätningar i avmanschetterade sektioner utföras

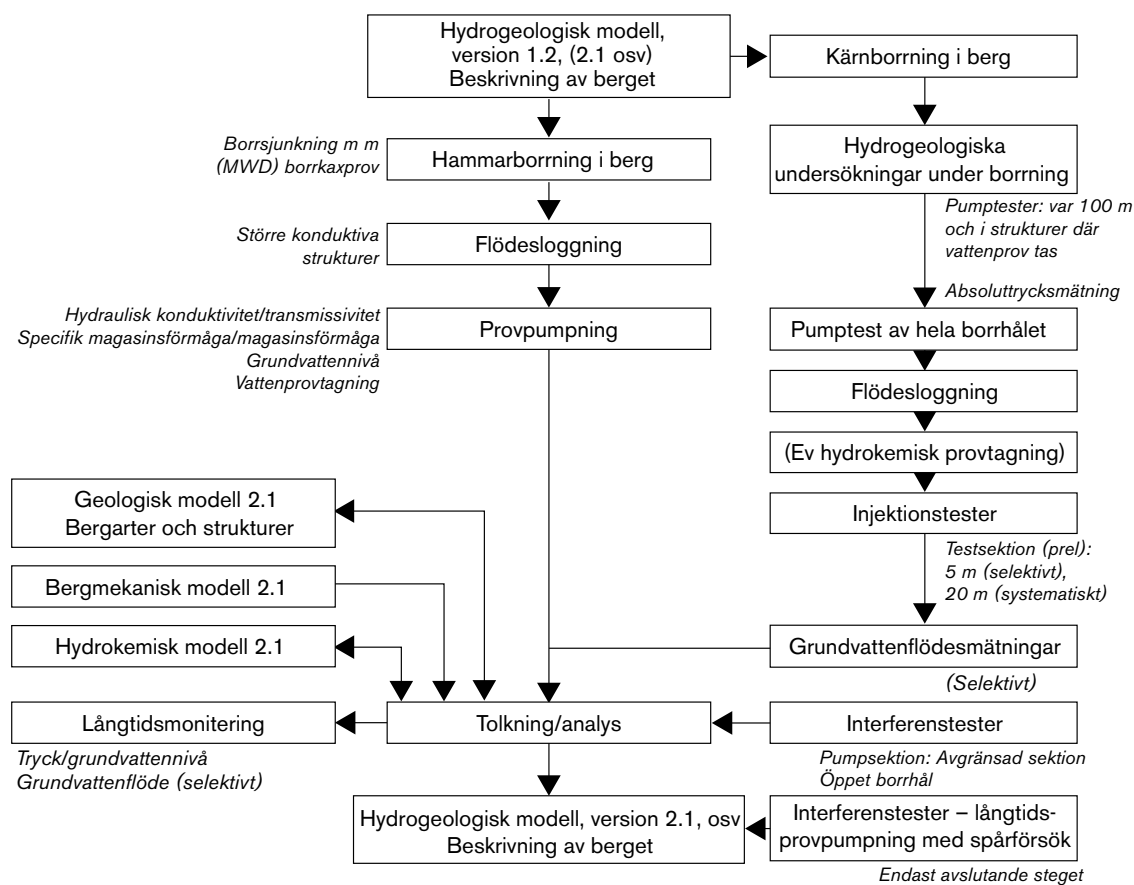
då ingen hydraulisk störning pågår (se även programmet för bergets transportegenskaper kapitel 9). Mätningar av grundvattennivåer i tidigare valda brunnar och borrhål fortsätter med samma frekvens som tidigare.

### Tolkning, analys och modellering

Erhållna och kvalitetssäkrade primärdata från undersökningarna lagras successivt i SICADA. Analysen liknar den som utförts under andra etappen av den inledande platsundersökningen, se avsnitt 3.3.6, med den skillnaden att interferenstesterna kommer att vara fler och av bättre kvalitet. Det medför att det finns ett bättre underlag för att bedöma utsträckning och hydrauliska kopplingar mellan sprickzoner, främst regionala och lokala större sprickzoner. Beskrivningen av kvartärgeologin inom platsen och det regionala området uppdateras också i detta skede.

Arbetsmetodiken för att upprätta olika modellversioner av beskrivningen av berget är likartad med den som görs under den inledande undersökningen, och illustreras i figur 3-28. Beskrivningen av hydrologi och av jordlager uppdateras på samma sätt som under den inledande undersökningen (se figur 3-9 och 3-10).

Den hydrogeologiska modellen uppdateras i olika versioner (2.1, 2.2 osv). Beskrivningen är tredimensionell och görs i lokal och regional skala. Hydrologi och jordlager beskrivs på samma sätt som i version 1.2, men med ökad precision och reviderad geometrisk indelningsgrund.



Figur 3-28. Flödesplan för beskrivningen av berget i den hydrogeologiska modellens olika versioner under den kompletta platsundersökningen.

Berget beskrivs på följande sätt, men med ökad precision för senare modellversioner (se även avsnitt 7.2.3):

- Flertalet regionala sprickzoner och några lokala större sprickzoner inom det regionala området beskrivs översiktligt med avseende på transmissivitet och läge. Djupare delar av sprickzoner baseras på statistik från sprickzoner inom området där det finns kunskap mot djupet.
- Alla kända lokala större sprickzoner och regionala sprickzoner inom platsen beskrivs med avseende på transmissivitet och läge.
- Några av de lokala mindre sprickzonerna inom platsen beskrivs med avseende på transmissivitet och läge.
- Lokala mindre sprickzoner och sprickor beskrivs statistiskt med avseende på transmissivitet, frekvens (densitet) och rumslig fördelning. Detaljeringsgraden är högre på förvarsdjup.
- Hydraulisk konduktivitet i skalan 100 m anges statistiskt inom platsen från markytan ner till cirka 1 000 m och anges översiktligt statistiskt inom det regionala området ned till minst 1 000 m djup.
- Hydraulisk konduktivitet i skalan 20 m (en lämplig multipel av ”kapselskala”<sup>4)</sup>, se nedan) anges statistiskt inom platsen från markytan ner till 1 000 m och översiktligt statistiskt inom regionalområdet ner till cirka 1 000 m.
- Hydraulisk konduktivitet i skalan 5 m (”kapselskala”) anges statistiskt inom platsen området från 300 m djup ner till cirka 700 m.
- Bedömning av om hydrauliskt anisotropa förhållanden råder, baserat på de geologiska och bergmekaniska modellerna samt på resultat från injektionstester och interferenstester.

Grundvattenflödet beräknas både i lokal och regional skala baserat på den beskrivande modellen. Ett syfte med beräkningarna av det storskaliga flödesmönstret är att bedöma in- och utströmningsområden inom det regionala området och den prioriterade platsen samt att studera hur olika randvillkor påverkar resultat. Efter genomförd platsundersökning kommer slutversionen av den hydrogeologiska modellen att utgöra en del av den integrerade platsbeskrivningen.

### 3.4.7 Hydrogeokemi

Under den kompletta platsundersökningen genomförs fortsatta undersökningar av främst djupa grundvatten. Här är det väsentligt att komplettera, verifiera och öka datamängden för att få en så fullständig bild av grundvattensituationen som möjligt samt för att få ett bra underlag för utvärderingar och modellering. Resultaten av dessa undersökningar ska användas för analys av förvarets långsiktiga säkerhet och ingenjörsbarriärernas funktion.

En översikt över de provtagningsobjekt som ingår i den kompletta platsundersökningen samt provtagningsstillfällena och analysomfattning för respektive objekt ges i tabell 3-2.

---

<sup>4)</sup> Det är väsentligt att bestämma vattengenomsläppligheten med olika upplösning för att därvid få en uppfattning om dess skalberoende. Den valda 20 m-skalan lämpar sig för karakterisering av alla borrhål och är därför en viktig ”basskala”.

**Tabell 3-2. Provtagningsobjekt, provtagningsstillfällena och analysomfattning under komplett platsundersökning (analysklasserna framgår av tabell 8-4 i kapitel 8).**

Provtagningsobjekt	Heltäckande kemisk kartläggning	Naturliga variationer	Långtidsmonitering	Analysklass*
<b>Ytvatten</b>				
Samtliga	Ej aktuellt	Ej aktuellt	1–12 ggr/år	5 (c, f, g, h)***/ 3(a,b)***
<b>Ytnära grundvatten</b>				
Brunnar	Ej aktuellt	Ej aktuellt	1–2 ggr/år	3 (a, b)***
Jordrör**	Ej aktuellt	Ej aktuellt	1–2 ggr/år	5 (c, f, g, h)***
<b>Grundvatten</b>				
Hammarborrhål**	Ej aktuellt?	Ej aktuellt	1–2 ggr/år	5 (c, f, g, h)
Kärnborrhål**				
– vid borrning	X	–	–	3 (a, b, c, d)
– hydrokemisk loggning	X	–	–	3 (a, b, c, d)
– fullständig kemikaraktisering	X	–	–	4 (e)/ 5(c, d, f, g, h, i, j, k, l)
– vid pumptester	X	–	–	4 (e)/ 5(c, d, f, g, h, l)
– långtidsmonitering	–	–	1–2 ggr/år	5 (c, d, f, g, h)
– sprickmineral	X	–	–	–

\* Definition av analysklasserna ges i tabell 8-4, kapitel 8.

\*\* Typvatten som kan utgöra viktiga underlag (indata) vid blandningsberäkningar, se avsnitt 8.2.

\*\*\*Inkluderar dessutom tillval från ämnesområdet ytnära ekosystem som t ex närsalter, tungmetaller och radionuklider.

De fyra verksamhetsområdena inom den kompletta platsundersökningen i form av vattenprovtagning i fält och analyser, verksamhet i kärnborrhål samt utvärdering/modellering beskrivs var för sig i följande avsnitt.

### **Vattenprovtagning i fält**

Undersökningen av naturliga variationer i ytvatten och ytnära grundvatten förväntas vara slutförd men riktade undersökningar av ytvattnen ur andra aspekter kommer att genomföras under den kompletta platsundersökningen, exempelvis ”produktionsstudier” i sjöar eller studier för att upptäcka om djupt grundvatten tränger upp till ytan. Långtidsmonitering fortsätter under den kompletta platsundersökningen och nya objekt kan tillkomma. Eventuella nya hammarborrhål provtas snarast efter borrning på samma sätt som tidigare.

### **Verksamhet i kärnborrhål**

Tyngdpunkten i undersökningarna under den kompletta platsundersökningen ligger i ett antal kompletterande djupa kärnborrhål ner till cirka 1 000 meters djup. Något/några av kärnborrhålen kommer att vara av typen kemiprioriterade. Antalet kemiprioriterade borrhål beror på hur många som borrades redan under den inledande platsundersökningen. Provtagning i kemiprioriterade borrhål sker på samma sätt som beskrivits tidigare, se 3.3.7.

Icke kemiprioriterade borrhål innebär att kraven på tvättning/sterilisering av borrutrustning och annan borrhålsutrustning inte är lika höga. Vidare kommer kemiundersökningarna i dessa borrhål att i första hand samordnas med de pumptester

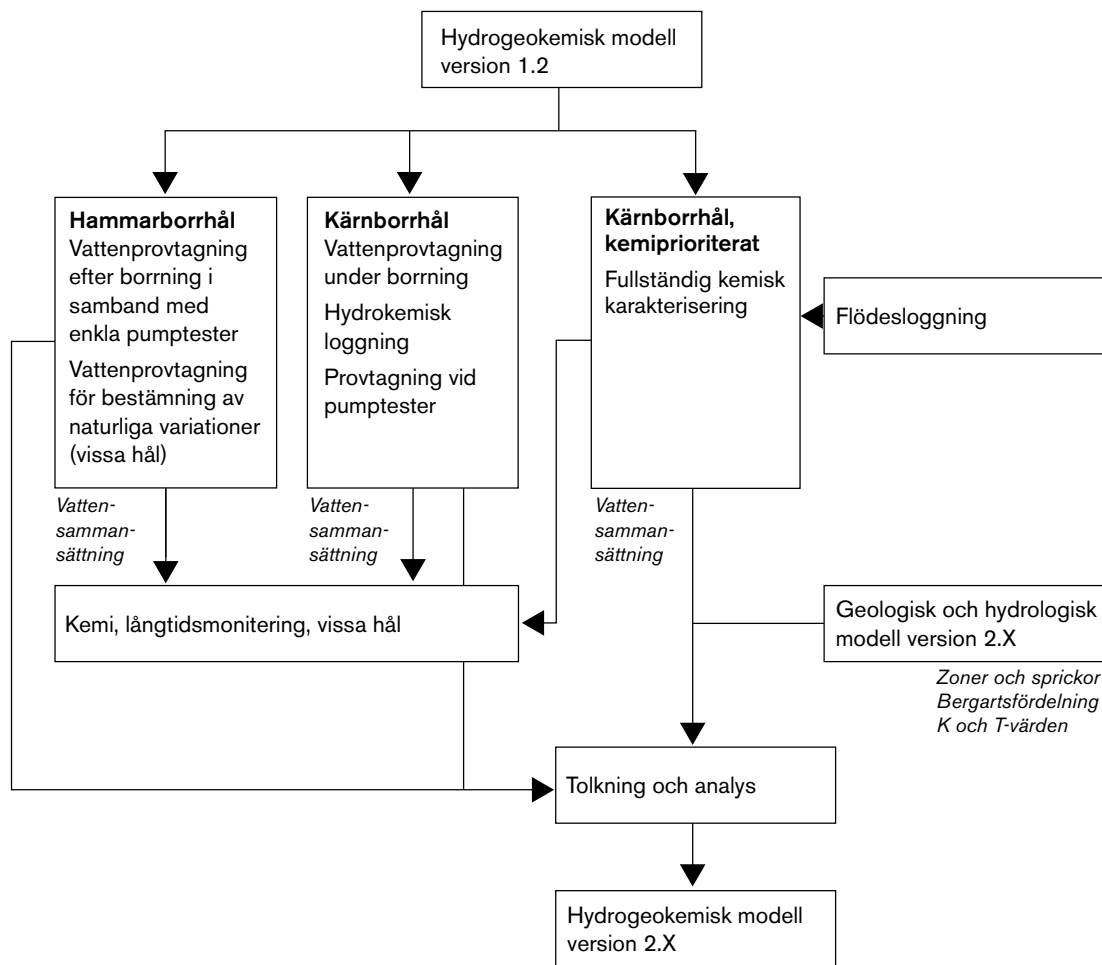
som utförs inom ämnesområdet hydrogeologi. Undersökningar i icke kemiprioriterade borrhål sker i den sekvens som beskrivs nedan. Metoderna beskrivs närmare i avsnitt 8.3.

- Vattenprovtagning under borrning sker med vattenprovtagare i borrhålssektionen eller med annan teknik. Provtagning enligt klass 3 sker när vattenförande sprickzoner penetreras och/eller var 100:e meter.
- Hydrokemisk loggning av borrhålet görs med hjälp av slangprovtagare kort efter avslutad borrning. Eventuellt upprepas den hydrokemiska loggningen i ett senare skede. Analyseras enligt klass 3. Man bör kontrollera den hydrogeokemiska provtagningen med geofysisk loggning av salinitet, före och efter den kemiska provtagningen, för att få en uppfattning om den omrörning provtagningen ger upphov till och därmed provernas representativitet för ett visst borrhålsdjup.
- Eftersom hålen inte är kemiprioriterade kan därefter undersökningssteg inom andra ämnesområden föregå de fortsatta kemiundersökningarna.
- Provtagning i samband med pumptester kommer att vara det primära undersökningssteget i icke kemiprioriterade kärnborrhål. Under pumptesterna kommer cirka fyra vattenprov att tas ut enligt klass 4/5 från varje testad borrhålssektion. Dessutom görs samtidig mätning av parametrarna pH, Eh, elektrisk konduktivitet och löst syre.
- Fullständig kemikarakterisering med mobilt fältlaboratorium kan även ske i icke kemiprioriterade kärnborrhål där det blir nödvändigt att komplettera och verifiera datamängder. Utförandet sker på samma sätt som vid inledande platsundersökning. Provtagning och analys enligt klass 4 och 5. I icke kemiprioriterade borrhål kan bakteriell provtagning komma att utgå eftersom sterilisering och tvättning av borrhålsutrustning inte genomförts.
- Borrkärnor studeras med avseende på frekvens av olika sprickmineral som funktion av djupet och förekomst av vattenförande sprickor. Som underlag för studien används kärnkarteringen vilken utförs inom geologiprogrammet. Mineralogi, textur och kemisk sammansättning studeras och prover tas för såväl kemisk sammansättning som isotopsammansättning. Dessutom undersöks sprickmineralprover som motsvarar de vattenförande sprickzonerna i borrhålet. Avsnittet från 0 till 100 meters djup studeras i borrkärnor från näraliggande korta kärnborrhål borrade enbart för detta ändamål. Detta eftersom den första delen av kärnborrhålen hammarborras.
- Efter kemikampanjen kommer minst två borrhålssektioner i vissa borrhål att väljas för fortsatt regelbunden provtagning (en till två gånger per år). Detta utgör en grund för långtidsmonitoreringen av kemiparametrar i dessa kärnborrhål och förutsätter montering av permanent borrhålsutrustning i borrhålen.

Proven från provtagningsobjekten analyseras enligt någon av de olika kemiklasserna /SKB, 1998/, se tabell 3-2, på samma sätt som beskrivits tidigare. Resultaten används för modellering enligt avsnitt 8.2.3.

### ***Analys, tolkning och modellering***

Resultaten från provtagning och analys i de tidigast borrade djupa hålen användes under den inledande platsundersökningen i en första tolkning för att beskriva grundvattenkemins djupberoende. Därefter, med data från fler borrhål interpoleras resultaten till en tredimensionell fördelning i de identifierade konduktiva strukturerna. Utvärdering av konduktiva strukturer, deras förekomst och egenskaper, måste genomföras integrerat med geologi- och hydrogeologiföreträdare. Flödesschema och informationsbehov framgår av figur 3-29.



**Figur 3-29.** Flödesschema och informationsbehov för att uppdatera den hydrogeokemiska modellen under den kompletta platsundersökningen.

Grundvattnets historia utreds utifrån de fördelningar av lösta komponenter och isotopkvoter som påträffats i samtliga borrhålssektioner som provtagits. För att kunna göra den historiska tillbakablicken (paleohydrologi) krävs även en konceptuell grundvattenflödesbild bakåt i tiden. Med kunskap om de olika typvatten som förekommer kan blandningsberäkningar genomföras. Resultaten av dessa jämförs i varje punkt med uppmätta värden för varje enskild löst komponent. Skillnaden emellan beräknade och mätta värden (massbalansen) visar i vilken omfattning kemiska och biologiska reaktioner har förekommit. Därefter fortsätter beräkningar av kemiska jämvikter, som visar i vilken omfattning det hydrogeokemiska systemet är stabilt eller dynamiskt. Ju fler av de kemiskt aktiva mineral som befinner sig i jämvikt med lösta konstituenterna i grundvattnet desto stabilare är systemet. Detta har en direkt betydelse för tolkningen av grundvattnets omsättningstider och indirekt även flödes hastigheter.

Utöver förståelsen för nuvarande och tidigare rådande hydrogeokemiska förhållanden behövs i säkerhetsanalysen parameter värden för de komponenter som listas i tabell 8-2 i kapitel 8. Den framtagna modellen ingår som hydrogeokemisk del av den samlade platsbeskrivningen.

### 3.4.8 Bergets transportegenskaper

Den kompletta platsundersökningen syftar till att ta fram underlag för att kunna genomföra en säkerhetsanalys varför platsspecifika data för samtliga transportparametrar angivna i tabell 9-3 i kapitel 9 ska bestämmas.

#### **Undersökningar**

Den kompletta platsundersökningen omfattar ett antal kärnborrhål borrade i flera omgångar. I tabell 3-3 och 3-4 redovisas en preliminär omfattning av laboratoriemätningar och fältmätningar för bestämning av platsspecifika transportparametrar. (För att bestämma transportparametrar behövs dessutom information från flera andra ämnesområden, se tabell 9-3 i kapitel 9.)

Laboratiemätningarna kompletteras med mineralogisk analys av utvalda bergprover samt hydrogeokemisk provtagning. Dessa analyser samordnas med geologi- och hydrogeokemiprogrammen.

Grundvattenflödesmätningar utförs dels genom loggning, enligt tabell 3-4, men också i senare skede, efter instrumentering, genom utspädningsmätningar i fasta sektioner i syfte att kontrollera inverkan av aktiviteter under platsundersökningen (långtidsmonitoring).

Bestämning av transportmotståndet sker främst utifrån den hydrogeologiska och hydrogeokemiska beskrivningen. Beskrivningen kompletteras med olika fältmätningar (se avsnitt 9.3.2):

- I enskilda borrhål kombineras geologisk information, hydrauliska tester, finskalig differensflödeslogg och borrhåls-TV (BIPS).
- I en strömningsväg mellan två relativt tätt placerade borrhål genomförs och utvärderas spårförsök, där injicerings- och detektionsborrhålet undersökts enligt ovanstående punkt.

**Tabell 3-3. Sammanställning av laboratiemätningar för bestämning av platsspecifika transportparametrar under den kompletta platsundersökningen. Metoderna beskrivs i avsnitt 9.3.**

Metod	Parameter	Antal prover/fraktioner
Batchsorptionmätning	Sorptionskoefficienter	Minst tre från varje bergart beroende på homogenitet. Två fraktioner (fin+grov). Prover från eventuellt jordlager.
Genomdiffusionsmätning	Matrisdiffusivitet, matrisporositet, sorptionskoefficienter	Minst tre från varje bergart samt en sprickyta beroende på homogenitet.
Gasdiffusionsmätning	Matrisdiffusivitet	Se ovan
Porositetsmätningar; vattenmättnadstekniken, <sup>14</sup> C-PMMA-metoden	Matrisporositet, porstruktur	Bestäms på närliggande prover (eller samma prov) som sorptionskoefficienter och diffusivitet.



**Tabell 3-4. Sammanställning av fältmätningar för bestämning av platsspecifika transportparametrar under den kompletta platsundersökningen. Metoderna beskrivs i avsnitt 9.3.**

Metod	Parametrar	Antal tester/sektioner
Grundvattenflödesmätning	Grundvattenflöde	Tre borrhål, en mätning cirka var 100:e meter i enskilda sprickor/sprickzoner.
Enhålsspårförsök (push-pull)	Våt yta, dispersivitet, flödesporositet, sorptionsparametrar	Tre borrhål. Några mätningar per hål, inkluderar injicering av svagsorberande ämnen.
Flerhålsspårförsök	Verifiering av strukturmodell, dispersivitet, flödesporositet, gångtid	Ett test i två närliggande borrhål. Dessa bör även vara testade med push-pull-test. Minst ett test i samband med långtidsprov pumpning (LPT).
Enhålsspårförsök (in-situ-sorption)	Sorptionsparametrar	Ny metod, omfattning och användning under utredning.
Radonmätning	Våt yta (transportmotstånd)	Ny metod, omfattning och användning under utredning.
Resistivitetmätning	Matrisdiffusivitet	Ny metod, omfattning och användning under utredning.

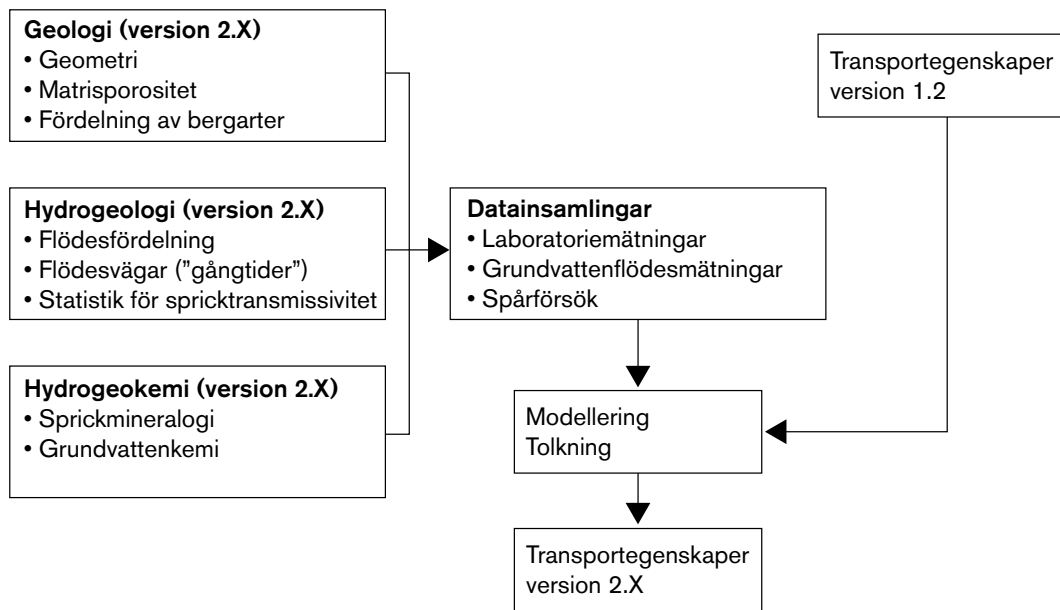
Bestämning av matrisporositet och/eller matrisdiffusivitet samt sorptionskoefficienter bestäms med enhålstest i fält (in-situ-sorptionstest) om det är praktiskt möjligt. En pilotstudie planeras för närvarande inom TRUE-projektet. Metoden har fördelen att den görs under verkliga vattentryck och kemiska förhållanden i berget i kontrast till laboratoriebestämningar.

Spridningen i "gångtider" (dispersionen, se kapitel 9) bestäms i tre skalor. I enskilda sprickor genom enhålsspårförsök (push-pull-test) och i enskild struktur genom tvåhålsförsök. För det senare utnyttjas samma försök som för bestämning av våta ytan och flödesporositeten. Den storskaliga dispersiviteten bestäms vid ett kombinerat interferens-test och spårförsök (LPT).

### ***Analys, tolkning och modellering***

Förutom dessa direkta mätningar inom transportprogrammet görs ett antal mätningar inom angränsande program som är av stor betydelse för transporten av lösta ämnen:

- Komplettering av de under inledande platsundersökningen genomförda vattenkemiska provtagningarna för grundvattenkemisk karakterisering av strömningsvägar samt berg med låg hydraulisk konduktivitet på planerat förvarsdjup (se kapitel 8).
- Bestämning av hydraulisk konduktivitet med vatteninjektionstester (se kapitel 7).
- Bestämning av konduktiv sprickfrekvens och flödesfördelning med finskalig differensflödesloggning (se kapitel 7).



*Figur 3-30. Flödesschema och informationsbehov under den kompletta platsundersökningen för att uppdatera modellen av bergets transportegenskaper.*

Undersökningarnas resultat används för upprättande av en beskrivande modell av platsens transportegenskaper. Denna utgör del av den samlade platsbeskrivningen, i enlighet med figur 3-30. Avsnitt 9.2.3 ger en mer utförlig beskrivning av modelleringsarbetet.

### 3.5 Basprogram för undersökningar i olika borrhål

Under platsundersökningen kommer borrhningar att genomföras under i stort sett alla skeden, vilket framgår av sammanställningen i tabell 3-5. Redan under borrhning registreras flera parametrar. Dessutom genomförs vissa tester, mätningar eller provtagningar under den pågående borrhningsaktiviteten. Efter avslutad borrhning genomförs undersökningar med ett basprogram för hammarborrhål och ett annat basprogram för kärnborrhål. I de flesta kärnborrhålen kompletteras basprogrammet med ytterligare undersökningar.

Tidig datainsamling ger flera fördelar. För vissa parametrar är tidig provtagning tvingande, eftersom fördröjning av provtagningen kan leda till kontaminering (t ex grundvattenprover) eller därför att mätningen är beroende av att borrhålets botten befinner sig på en viss nivå (t ex bergspänningsmätning genom överborrning). Tidiga undersökningar kan också användas som underlag för beslut om ändrad inriktning på undersökningarna. Slutligen ger ett tidigt dataflöde bättre möjligheter till effektiv analys och utvärdering av undersökningsområdet genom att en god förståelse av de geovetenskapliga förhållandena kan byggas upp redan från början.

**Tabell 3-5. Sammanställning av vilka borrhål som borras under de olika skedena av platsundersökningen samt preliminär uppskattning av antalet borrhål.**

PLU-skede	Typ av borrhål	Antal borrhål
<b>Inledande platsundersökning</b> Val av prioriterad plats	1) Hammarborrhål 2) Jordborrhål	1) Platsspecifikt upp till 10–20 st 2) Platsspecifikt, sannolikt <100 st
<b>Inledande platsundersökning</b> Förberedande undersökning av prioriterad plats	1) Kärnborrhål (långa) 2) Hammarborrhål 3) Jordborrhål	1) Platsspecifikt cirka 2–3 st 2) Platsspecifikt cirka 5–10 st 3) Platsspecifikt, sannolikt <50 st
<b>Komplett platsundersökning</b>	1) Kärnborrhål (långa) 2) Hammarborrhål 3) Jordborrhål	1) Platsspecifikt 10–20 st (i omgångar om 2–4 st) 2) Platsspecifikt cirka 5–10 st 3) Platsspecifikt, sannolikt <50 st

### 3.5.1 Parameterregistrering under borring

Vid platsundersökningarna kommer ett antal borrhållparametrar och spolvattenparametrar att registreras under pågående borring, se avsnitt 11.4. Borrhållparametrarna (matningstryck, vridmoment, borrsjunkning och flödestillskott) kan dels vara relaterade till det genomborrade materialet, dels maskinrelaterade. En del parametrar kan utnyttjas för dokumentation av olika funktioner hos borrhållutrustningen, och vissa data återförs för optimering av borrhållprocessen. Andra registrerade borrhållparametrar beror på bergets egenskaper och ger därför tidig information som kan användas inom olika ämnesprogram. De spolvattenparametrar som här är aktuella är flödesparametrar (tryck och flöde, som registreras) och fysikalisk-kemiska parametrar (spårämneshalt, syrehalt genom provtagning). På returvattnet registreras motsvarande parametrar, dock ej syrehalt medan elektrisk konduktivitet kan övervägas.

### 3.5.2 Tester under borrhållperioden

Tester under borrhållperioden kräver att borrhållningen avbryts under kortare eller längre tid för att sedan återupptas efter avslutad test. Tester under borring utförs inom ämnesprogrammen för bergmekanik, hydrogeologi och hydrogeokemi. Testprogrammet under borring skiljer sig åt mellan hammar- respektive kärnborrhål. Följande program är en inriktning, men avvikelser kan förekomma av olika skäl:

- I hammarborrhål utförs pumptester var 100:e meter (gärna som interferenstest), se avsnitt 7.3.3. Borravbrottet kan begränsas till några timmar.
- I vissa kärnborrhål (ej i de kemiprioriterade) utförs bergspänningsmätningar genom överborring, se avsnitt 5.3.1. Mätinsatsen kräver ett borravbrott på något eller ett par dygn.
- I alla kärnborrhål genomförs pumptest var 100:e meter (då även vattenprov tas), se avsnitt 7.3.3. Testerna kräver ett borravbrott på några timmar till ett dygn.
- I alla kärnborrhål tas vattenprover med wireline-sond (eller motsvarande utrustning) vid indikation på att vattenförande spricka penetrerats, se avsnitt 8.3.7. Borravbrottet kan uppskattas till några timmar, högst ett dygn.

### 3.5.3 Standardiserade borrhålsundersökningar efter avslutad borrhning

I samtliga färdigborrade bergborrhål kommer borrhålsundersökningar att utföras enligt standardiserade program, här kallade basprogram. Basprogrammet genomförs i nära anslutning till att borrhningen avslutats och syftar till att ge en grundläggande karakterisering av formationen baserat på enhetlig metodik. Basprogrammet har något olika utformning i hammarborrhål respektive i kärnborrhål.

I *hammarborrhål* omfattar basprogrammet följande moment:

- BIPS- och borrhålsradarmätning (se geologi avsnitt 4.3.6).
- Geofysisk loggning (se geologi avsnitt 4.3.6).
- Boremap-kartering (se geologi, avsnitt 4.3.5).
- Testpumpning och flödesloggning (se hydrogeologi, avsnitt 7.3.3).
- Vattenprovtagning (se hydrogeokemi avsnitt 8.3.6).
- Installation av grundvattenmoniteringsutrustning (se hydrogeologi, avsnitt 7.3.4).

Basprogrammet för *kärnborrhål* består av följande moment:

- BIPS- och borrhålsradarmätning (se geologi, avsnitt 4.3.6).
- Geofysisk loggning (se geologi, avsnitt 4.3.6).
- Hydrokemisk loggning (se hydrogeokemi, avsnitt 8.3.8).
- Flödesloggning och pumptester i med olika sektioner (se hydrogeologi, avsnitt 7.3.3).
- Boremap-kartering (se geologi avsnitt 4.3.5).
- Geologiska analyser på borrhkärneprover och på borrhkax. (För litologisk och mineralogisk analys, se avsnitt 4.3.5. För bergmekanisk analys, se avsnitt 5.3.2. För termisk analys, se avsnitt 6.3.2.)

### 3.5.4 Kompletterande undersökningar i kärnborrhål

Efter genomfört basprogram utförs ytterligare undersökningar, framförallt i kärnborrhålen. Vilka mätningar, tester eller provtagningar som ska utföras beror på borrhålens syfte. Till exempel utses några kärnborrhål till att bli kemiprioriterade. Några metoder utförs endast i enstaka borrhål medan andra utförs i flertalet borrhål. Metoderna beskrivs i ämneskapitlen och deras användning beskrivs i det i tidigare avsnitt redovisade genomförandeprogrammet. De metoder som blir aktuella är i första hand:

- Differensflödesloggning eller hydrauliska injektionstester med 20 m sektionslängd utförs i de flesta borrhål (se hydrogeologi, avsnitt 7.3.3).
- Hydrauliska injektionstester med 5 m sektionslängd utförs i några borrhål, och då framförallt i djupintervallet 300–700 m (se hydrogeologi, avsnitt 7.3.3).
- Grundvattenflödesmätningar, utförs i ett begränsat antal borrhål (se transportegenskaper, avsnitt 9.3.2 och hydrogeologi, avsnitt 7.3.3).

- Fullständig hydrokemisk karakterisering utförs i kemiprioriterade borrhål (se hydrogeokemi, avsnitt 8.3.9).
- Interferenstester i form av pumptester utförs i ett par borrhål per borromgång (se hydrogeologi, avsnitt 7.3.3).
- Bergspänningsmätningar med metoden hydraulisk spräckning utförs i ett begränsat antal borrhål, företrädesvis samma borrhål som under borring mätts med metoden överborring (se bergmekanik, avsnitt 5.3.1).
- Vertical Seismic Profiling (VSP) utförs i några borrhål, lämpligen i anslutning till reflektionsseismiska profiler (se geologi, avsnitt 4.3.6).
- Spår försök utförs i form av såväl enhålsförsök som flerhålsförsök, med olika varaktigheter och testutföranden (se transportegenskaper, avsnitt 9.3.2).

### 3.6 Infrastruktur på den undersökta platsen

När en prioriterad plats valts, kommer omfattande undersökningar att utföras på denna under en period av flera år. För att arbetet ska kunna bedrivas rationellt måste en viss infrastrukturell basstruktur åstadkommas. De viktigaste av de anläggningar som måste finnas på undersökningsområdet är:

- Skogsbilvägar till samtliga kärnborrhål liksom till utvalda hammarborrhål.
- Jämn, avgrusad plan vid varje kärnborrhål liksom vid utvalda hammarborrhål.
- Elektricitet (3-fas och 1-fas) vid varje kärnborrhål och vid utvalda hammarborrhål liksom vid undersökningsområdets basläger, se nedan. Längs vissa sträckor kan även signalkabel från borrhål till centralt belägen logger behöva dras.
- Basläger för kontors- och analysarbete. Här ska, helst på en jämn plan av tillräcklig storlek, finnas arbetslokal, personalutrymmen, demonstrationslokal och omklädningsrum för besökare, förråd för borrhålsprover och andra prover liksom för undersökningsinstrument m m, uppställningsplats för fordon och farmartankar, tvätt- och toalettutrymmen samt anordning för hantering av sopor.

Skogsbilväg till varje kärnborrhål är nödvändigt dels för att tung och skrymmande borrhålsutrustning ska kunna transporteras fram till borrhålsplatsen, dels med tanke på det stora antal undersökningar som utförs i varje kärnborrhål, och som medför ett stort antal person- och utrustningstransporter till och från borrhålen. Vägarna behöver inte vara breda men måste ha god bärighet (för tung lastbil). Till hammarborrhålen behöver väg byggas endast i undantagsfall, eftersom hammarborrtrusning har god framkomlighet i terrängen, och därför att omfattningen av borrhålsundersökningar i hammarborrhål är mindre än i kärnborrhål.

Skogsbilvägarna byggs så att de naturliga dräneringsvägarna inte stängs av och även i övrigt med hänsyn till markförhållanden och vegetation. Man måste ha i åtanke att vägarna kräver visst underhåll under undersökningsperioden liksom att snöröjning måste skötas under vinterhalvåret. Efter avslutade undersökningar och långtidsmonitoring kan vägarna tas bort eller, om markägaren så önskar, lämnas kvar, t ex för att underlätta framtida skogstransporter.

En avgrusad plan om cirka 400 m<sup>2</sup> krävs vid varje kärnborrhål för uppställning av borrhållsrustning med tillbehör under borrhållningsfasen och senare för uppställning av mätutrustning. Runt borrhålets foderrör gjuts en cementplatta, dels för att förhindra ytvatten att läcka in längs foderröret, dels för uppställning av borrhållscontainer och mätutrustning rakt över borrhålet. Efter gjutningen fylls omgivande mark upp med grus eller makadam för att utjämna nivåkillnaden mellan plattan och omgivningen. Efter avslutade undersökningar kan planen lämnas intakt eller minskas i omfattning beroende på markägarens önskemål.

Tillgång till elektricitet vid borrhållen kan lösas på två sätt. För det första kan kabel dras från lämplig kraftledningsstolpe fram till respektive kärnborrhål, där elcentraler installeras med 3-fas och 1-fasuttag, och med tillräcklig avsäkring för de elutrustningar som ska användas. För det andra kan dieseldrivna elverk användas. Den senare lösningen har många nackdelar, exempelvis buller och avgaser, men kan vara nödvändig att ta till, antingen temporärt eller om ledningsdragning inte är möjlig, eller som reservaggregat vid spänningsbortfall på det fasta nätet.

Lokalerna i baslägret utgörs i första hand av mobila manskapsbaracker och av låsbara stålcontainrar. Om undersökningsplatsen är belägen nära bebyggelse kan som alternativ en eller flera fastigheter hyras in. Den senare lösningen är att föredra av bekvämlighets-skäl och därför att kommunikation med omvärlden underlättas. Sannolikt behöver även ett basläger långt från bebyggelse ha fast internetuppkoppling, vilket kan kräva relativt lång (temporär) ledningsdragning.

Fältundersökningar utförs även i ett större, regionalt område. Vissa av de infrastrukturrella anläggningar som ovan nämnts krävs även i detta större område, t ex bilväg till och avgrusad plan vid kärnborrhål. Merparten av undersökningarna i regionalområdet utgörs dock av mätningar från luft och på mark, som inte kräver mer än marginella infrastrukturella resurser. De flesta borrhål i detta område är jord- och hammarborrhål.

## 4 Geologi

### 4.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs vilka geologiska förhållanden och egenskaper som kommer att bestämmas och tänkbara karakteriseringsmetoder. I kapitlet beskrivs även hur den mätta informationen tolkas i den geologiska modell som utgör en del av den platsbeskrivande modellen. Den geologiska modellen baseras på en geometrisk modell som är gemensam för alla ämnesområden. Som grund för förståelsen av de geologiska förhållandena upprättas dessutom en beskrivning av områdets geologiska utveckling.

#### 4.1.1 Inledning

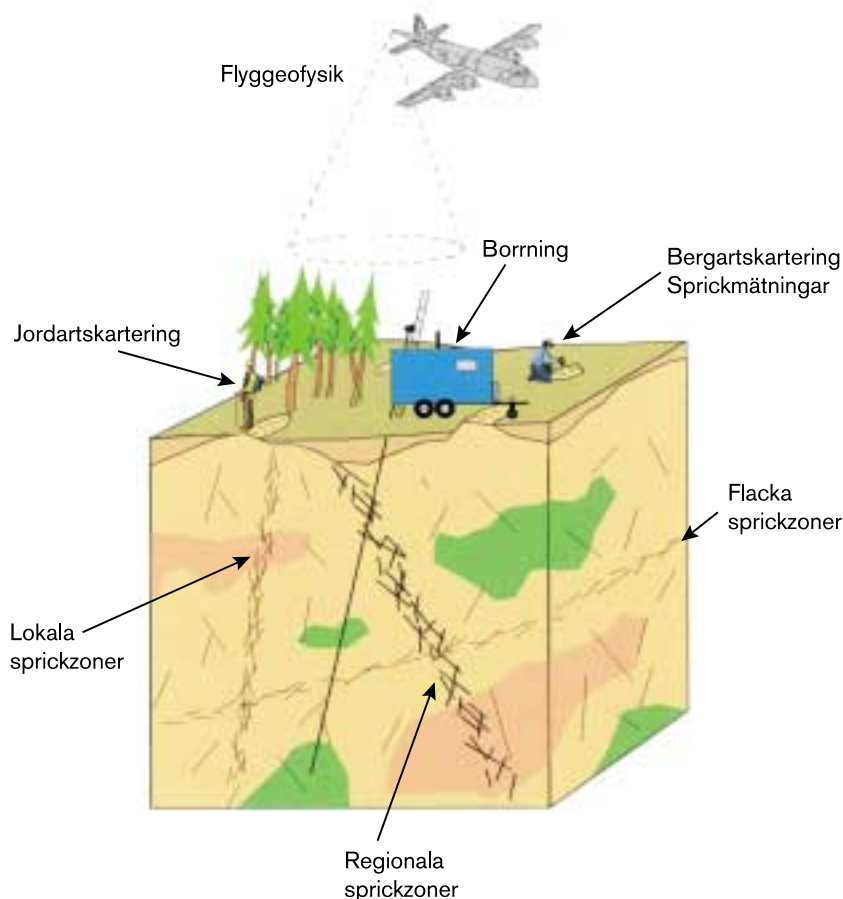
Den svenska kristallina berggrunden är uppbyggd av olika bergarter av vilka gnejs och granit är vanligast. En stor del av dessa bergarter i östra Sverige har en ålder av cirka 1 750–1 900 miljoner år. Som ett resultat av upprepade tektoniska rörelser i berggrunden har t ex plastiska skjuvzoner, sprickzoner och förkastningar bildats. Dessa benämns gemensamt som deformationszoner. Plastiska skjuvzoner har bildats på relativt stort djup (10–15 km) och under hög temperatur (300–400 °C). Bergarter som deformeras på högre nivå i jordskorpan ger upphov till sprickor, sprickzoner och förkastningar. En ansamling av sprickor längs stråk av olika längd och bredd bildar sprickzoner som delar upp berggrunden i större eller mindre block. De delar av berggrunden som är opåverkade eller till synes obetydligt påverkade av omgivande plastiska skjuvzoner benämns tektoniska linser /Bergman m fl, 1996; Bergman m fl, 1998/.

En viktig uppgift är att fastställa utbredning och karaktär för större (regionala) sprick- och skjuvzoner som ska undvikas vid lokalisering av djupförvaret. God kännedom krävs också om bergets sprickighet och frekvens av lokala sprickzoner i berget mellan de regionala sprickzonerna.

Kännedom om jordarternas utbredning och karaktär är främst av intresse för hydrogeologiska och ytekologiska bedömningar, men vissa störningar i jordarternas lagerföljd kan vara viktiga indikationer på postglaciala rörelser (förkastningar) i underliggande berggrund.

En god kännedom om bergets och jordlagers egenskaper är av stor betydelse för samtliga geovetenskapliga ämnesområden. Figur 4-1 ger en överblick av några geologiska undersökningsmetoder och de egenskaper i berggrunden som ska beskrivas.

En samlad geologisk karakterisering av ett område innebär att geometriskt representera det undersökta områdets topografi, deformationszoner, bergartsgränser, bergenheter och jordlager och att beskriva dessa i en samlad modell. För att undersöka geologin används ett stort antal metoder. Dessa kan översiktligt beskrivas under huvudrubrikerna: geofysik, ytgeologi, jordartsgeologi, berggrundsgeologi, borrhålsundersökningar och geodetiska mätningar /Stanfors m fl, 1997/.



**Figur 4-1.** Några geologiska undersökningsmetoder och egenskaper som ska beskrivas.

Med vissa *geofysiska* metoder mäter man de naturliga variationer i fysikaliska egenskaper som föreligger mellan olika berg- och jordarter, med andra metoder skapar man störningar och mäter de responser som alstras. Resultaten kan därmed användas som underlag för att göra geologiska, hydrogeologiska eller bergmekaniska tolkningar.

Med begreppet *ytgeologi* avses alla de undersökningar som utförs av jordarter och berggrund från markytan. Indelning görs här i jordartsgeologi och berggrundsgeologi. Studierna av yngre rörelser och deformationer i berggrunden har sammanförts under rubriken neotektonik. *Jordartsgeologin* omfattar undersökning och beskrivning av områdets jordarter och i förekommande fall även sediment i sjöar och hav. Undersökning av indikationer på eventuella postglaciala rörelser som t ex störningar i sedimentära lager ska ingå som separat moment. *Berggrundsgeologin* omfattar undersökning och beskrivning av områdets bergarter och strukturer i berggrunden utifrån kartering av blottade bergytter (berghällar).

Studier av neotektonik omfattar undersökning av eventuella indikationer på postglaciala förkastningar. Monitering med ett lokalt seismiskt nät för registrering av mikroskalv samt deformationsmätningar med GPS-teknik för kontroll av eventuella rörelser i berggrunden ger underlag för att bygga upp en förståelse av platsens mekaniska tillstånd.

Även om t ex reflektionsseismik, bulkresistivitet och gravimetri indirekt ger värdefull information om geologiska förhållanden på djupet är det genom direkta *borrhålsundersökningar* som man inhämtar den huvudsakliga informationen om geologiska



förhållanden ner till ett djup av minst cirka 1 000 m. Borrning utförs antingen som kärnbronning, varvid borrhärlor erhålls, eller som hammarborrnng. Borrhärlorna karteras och undersöks med avseende på geologiska, geofysiska och bergmekaniska parametrar. Borrhärlgeofysik omfattar undersökningar av borrhärl med olika geofysiska loggar.

I momentet *geodesi* ingår utsättning och inmätning av mätpunkter, mätprofiler och borrhärl.

#### **4.1.2 Ämnesspecifika mål**

De krav, önskemål och kriterier som identifierats för ämnesområdet geologi redovisas av /Andersson m fl, 2000/. Med hänvisning till undersökningarnas allmänna inriktning, avsnitt 2.2 är den geologiska verksamheten huvudsakligen inriktad att undersöka:

- terrängformer och jordtäcket utbredning samt ingående jordarter och deras egenskaper,
- berggrundens sammansättning avseende bergarter och deras utbredning och kontaktmönster samt graden av komplexitet med hänsyn till antalet bergarter,
- berggrundens deformationsmönster avseende såväl plastiska strukturer (plastiska skjuvzoner) som spröda strukturer (sprickor och sprickzoner),
- geologisk utveckling i området med hjälp av geokronologiska studier, sprickmineralens genés och studier av rörelser längs sprickytor.

Undersökningarna ligger till grund för upprättandet av geologiska modeller vilka utgör en del av de platsbeskrivningar som i sin tur används för projektering och säkerhetsanalys. Det är väsentligt att undersökningarna och beskrivningarna är tillräckligt detaljerade så att platsens lämplighet kan avgöras. Utförligare presentation av vilka geologiska parametrar som ska bestämmas ges i avsnitt 4.2.2.

#### ***Inriktning under den inledande platsundersökningen***

Med hänvisning till avsnitt 2.2.3 inriktas den geologiska verksamheten under den inledande platsundersökningen på:

- undersökning av geologisk homogenitet, lämpliga bergartstyper och eventuell malmförekomst,
- undersökning av sprickzoners utbredning och karaktär (främst regionala, lokala större och subhorisontella zoner av avgörande betydelse),
- undersökning av eventuella indikationer på postglaciala förkastningar.

Dessutom inleds långtidsmonitoring av parametrar där det är väsentligt att ha långa tidsserier för att få en användbar databas (seismiskt nät och deformationsmätningar).

En första version av den geologiska beskrivningen i den platsbeskrivande modellen upprättas i ett tidigt skede. Beskrivningen uppdateras efter avslutade inledande undersökningar.

### **Inriktning under den kompletta platsundersökningen**

Under den kompletta platsundersökningen fullbordas den geologiska karakteriseringen av den prioriterade platsen. Den generella inriktningen framgår av avsnitt 2.2.4. För geologi inriktas undersökningarna på:

- detaljerad undersökning av förekomst och utbredning av sprickzoner och andra strukturelement inom den prioriterade platsen och att även i övrigt ge en fördjupad kunskap om geologiska förhållanden på platsen.

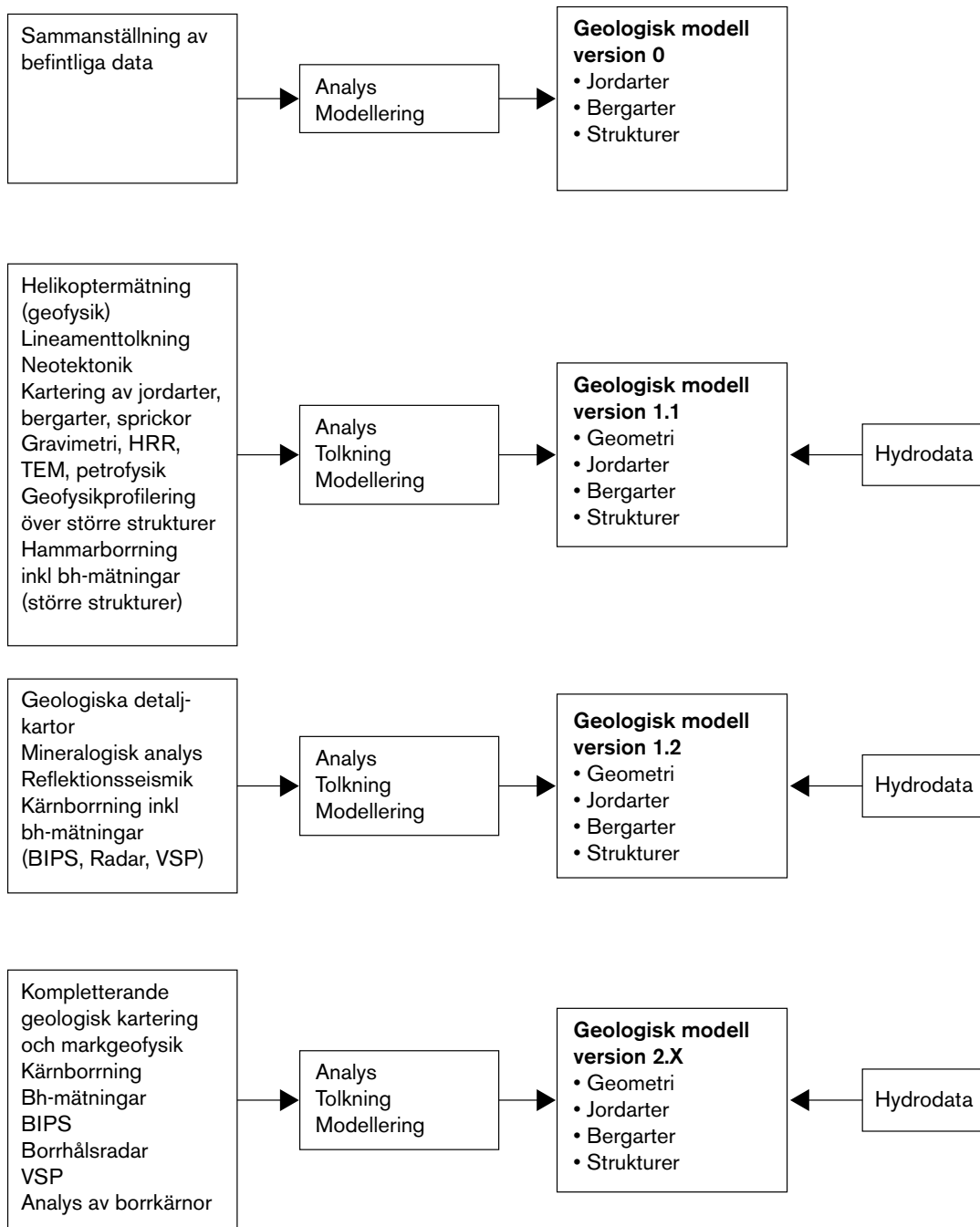
Det geologiska programmet ska sörja för god geometrisk representation av data för bestämning av bergarters och strukturers läge och egenskaper med t ex lämplig borrhåls-utsättning. Den geologiska beskrivningen i den platsbeskrivande modellen uppdateras vid olika tillfällen, koordinerat med uppdatering av beskrivningen utifrån andra ämnesområden. Beskrivningen fastläggs när platsundersökningarna avslutats.

### **4.1.3 Arbetsmetodik och samordning**

Undersökningar och karakterisering genomförs stegvis (se avsnitt 2.3.1). Samverkan med övriga ämnesområden är nödvändig. Arbetsgången illustreras översiktligt i figur 4-2.

Planering av undersökningarna görs i samråd med övriga ämnesområden för att dels samordna vissa gemensamma undersökningar och dels se till att minimera riskerna för störningskänsliga undersökningar. Samverkan måste ske vid planering och utsättning av kärnborrhål för bergspänningsmätningar, tidig hydrogeokemisk provtagning och hydrauliska tester. Vid planeringen måste hänsyn även tas till att flera undersökningsmoment är årstidsberoende (t ex geologiska fältundersökningar) andra (t ex helikoptermätningar) kräver speciella tillstånd och förberedande utsättning i terrängen. En del insatser kräver långa mätserier t ex seismiska nät och deformationsmätningar.

Mätningar, tolkningar/analyser och kontroll/uppdatering av den beskrivande modellen utförs ämnesvis men kräver integrering med andra ämnesområden. Ämnesprogrammet för geologi ger grundläggande data och parametrar som är väsentliga för övriga ämnesområden. Resultat från interferenstester och kemidata ger värdefull information för den geologiska modelleringen. Sprickmineralstudier ska samordnas med hydrogeokemi-programmet. Det ger underlag för bergarts- och strukturgeologisk modell samt är av intresse för bergmekaniken.



*Figur 4-2. Övergripande flödesschema som visar hur den geologiska och geometriska modellen växer fram och hur den beror på information från andra ämnesområden.*

## 4.2 Modeller och parametrar

### 4.2.1 Modellernas uppbyggnad

Grunden för en samlad geologisk karakterisering består i att geometriskt representera det undersökta områdets topografi, deformationszoner, bergartsgränser, bergenheter och jordlager och beskriva dessa i en platsbeskrivande modell. Den platsbeskrivande modellen upprättas i regional och lokal skala. Modellen består dessutom av flera olika delar (figur 2-4 i kapitel 2).

En gemensam geometrisk modell används för alla ämnesområden. Den geometriska beskrivningen av berggrunden kommer att grunda sig huvudsakligen på geologisk information, men information även från de övriga ämnesområdenas databaser ingår i underlaget för tolkning av geometrier. Den geologiska beskrivningen utgör alltså en del av den platsbeskrivande modellen. Inom geologi utarbetas beskrivningar av jordartsfördelning, bergartsfördelning och strukturgeologi. Som grund för förståelsen och för förståelsen av hur de olika beskrivningarna hänger ihop behövs också en geologisk utvecklingsmodell. En samlad bild av de geologiska modellerna finns i tabell 4-1 /Olsson m fl, 1994/.

**Tabell 4-1. Kortfattad presentation av de geologiska delarna av den platsbeskrivande modellen.**

---

#### Geologisk beskrivning av förvarsplatsen

---

##### Modellens syfte

Att för en given undersökt volym beskriva jordarter, bergarter och bergmassans strukturer i nuläge samt dessutom beskriva områdets geologiska utveckling.

##### Processbeskrivning

Beskrivning av nu pågående processer i det aktuella området, t ex långsamma rörelser i jordskorpan.

---

#### Modellens beståndsdelar

---

##### Geometriskt ramverk

Koordinatsatt jord/bergvolym med jordartsfördelning, bergartsfördelning, geometrisk fördelning och orientering av plastiska och spröda strukturer (sprickzoner).

##### Parametrar

Jordarter – stratigrafi, struktur, sammansättning.

Bergarter – mineralsammansättning, textur, porositet, densitet, sprickfördelning (sprickkaraktär, sprickmineral).

Strukturer – karaktär (plastiska–spröda), sprickighet, omvandlingsgrad (sprickmineral).

Relativ åldersfördelning.

##### Datarepresentation

För jordarter och bergarter eftersträvas en jämn fördelning av data inom hela den aktuella volymen.

För regionala och lokala större sprickzoner eftersträvas en deterministisk bestämning av geometrin.

Lokala mindre sprickzoner och sprickmatrisens egenskaper beskrivs stokastiskt.

##### Randvillkor

Regional och lokal beskrivning inbördes konsistenta.

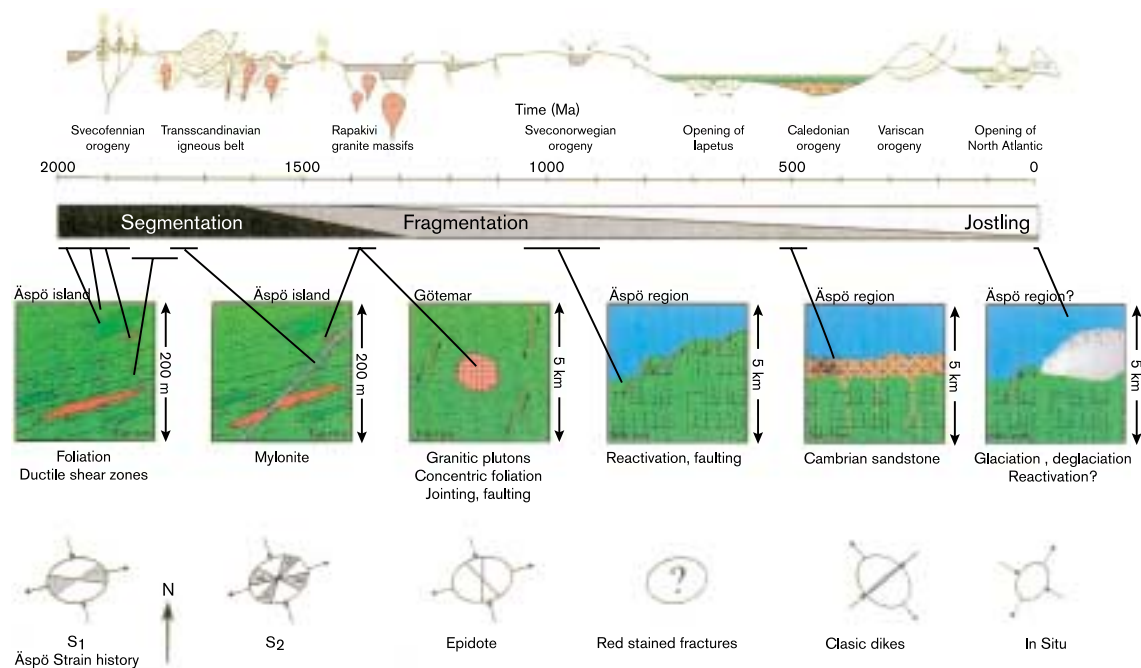
##### Numeriska verktyg

RVS

##### Beräkningsresultat

Egenskaper och fördelning av jord- och bergarter samt läge, bredd, orientering och egenskaper av större sprickzoner.

---



Figur 4-3. Schematisk illustration av en geologisk utvecklingsmodell (från Rhén m fl /1997c/).

### Geologisk utvecklingsmodell

Den geologiska utvecklingsmodellen utgör grunden för den geovetenskapliga förståelsen av platsens geologi. I utvecklingsmodellen beskrivs hur och när bergarter och strukturer bildats/omvandlats. Utvecklingen omfattar även den kvartärgeologiska utvecklingen. Åldersbestämningar, t ex med isotopmätningar, utgör här en viktig informationskälla. Exempel på nu pågående processer är de långsamma rörelser i berggrunden som är ett resultat av kontinentalförskjutningen (någon eller några mm/år). Figur 4-3 visar exempel på en geologisk utvecklingsmodell /Rhén m fl, 1997/.

### Jordartsbeskrivning

Jordartsbeskrivningen omfattar i första hand fördelning, mäktighet och sammansättning av olika jordarter och bottensediment i hav och sjöar. Denna beskrivning är i första hand underlag för modellering av ytnära ekosystem och recipientförhållanden (biosfärmodellering).

### Bergartsbeskrivning

Bergartsbeskrivningen omfattar bergmassans uppbyggnad vad gäller fördelning av olika bergarter såväl rumsligt som procentuellt samt en karakterisering av de olika bergarterna. Denna beskrivning är främst av betydelse för upprättandet av de strukturgeologiska och bergmekaniska beskrivningarna. De olika bergarterna har också betydelse för den geokemiska förståelsen av platsen.

## Strukturgeologisk beskrivning

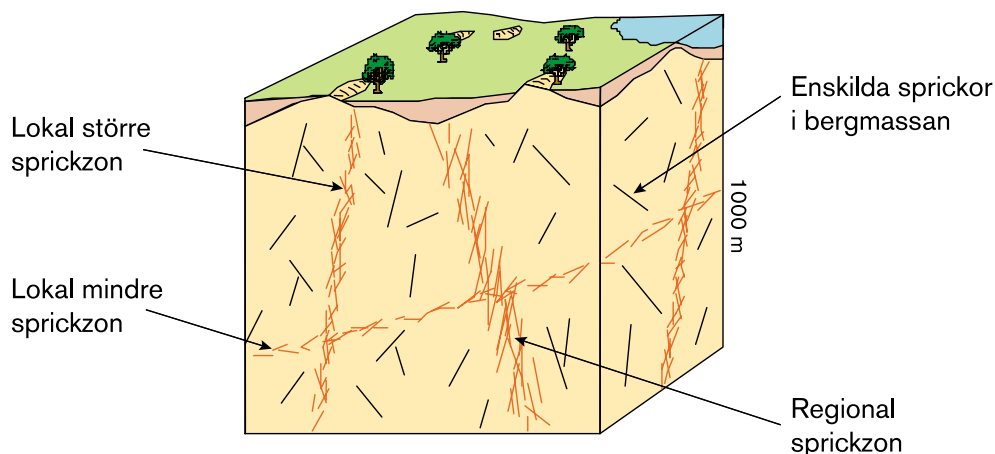
Den strukturgeologiska beskrivningen omfattar beskrivning av bergets plastiska strukturer, t ex veck och foliation och dess olika deformationszoner. Deformationszonerna indikerar att omvandlingar eller rörelser har skett någon gång under den geologiska utvecklingshistorien. För att erhålla en enhetlig terminologi, som utan missförstånd ska kunna förstås av olika ämnesföreträdare, använder SKB begreppen "plastiska skjuvzoner", respektive "sprickzoner" för att beteckna zoner där deformationen varit plastisk respektive spröd /se Andersson m fl, 2000/. Sprickzonerna delas in i storleksklasserna *regionala*, *lokala större*, *lokala mindre* och *sprickor*, se tabell 4-2, respektive figur 4-4.

Beskrivningen är av direkt betydelse för de bergmekaniska och hydrogeologiska beskrivningarna samt för allmän geologisk förståelse. Den strukturgeologiska modellen har därmed mycket stor betydelse för djupförvarets utformning eftersom de principer som används för inplacering av djupförvaret i berget i hög grad baseras på inpassning efter de regionala och lokala större sprickzonerna.

**Tabell 4-2. Indelning och benämning av sprickzoner samt ambitionsnivå för geometrisk beskrivning vid platsundersökning (från Andersson m fl /2000/).**

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

## Strukturgeologisk modell



**Figur 4-4.** Sprickzoner indelas efter storlek i regionala, lokala större och lokala mindre sprickzoner. I berget i övrigt förekommer dessutom enskilda sprickor.

## 4.2.2 Ingående parametrar

För att upprätta de önskade beskrivningarna behövs information om uppmätta parametrar. Beskrivningarna bygger i sin tur på att ett antal olika parametrar bestäms – tolkas. De nödvändiga parametrarna framgår av tabell 4-3, som bygger på de tabeller som togs fram för parameterrapporten /Andersson m fl, 1996/, den revision som skedde vid arbetet med krav och kriterier /Andersson m fl, 2000/ och vid framtagandet av det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet /SKB, 2000b/.

**Tabell 4-3. Sammanställning av geologiska parametrar som ingår i den geologiska beskrivningen i den platsbeskrivande modellen. Tabellen visar också när parametern huvudsakligen bestäms (se förklaring i tabell 2-3).**

Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för
		FS	IPLU	KPLU	DETU	
Topografi	– topografi	x	x			Översikt, struktur-geologisk modell, identifikation av strukturer.
Jordtäck	– jordtäcket mäktighet		x	x		Jordartsmodell
	– jordartsfördelning	x	x			(indirekt mark- och miljö, ytlig hydrogeologi, biosfärsmodell).
	– jordartsbeskrivning		x			
	– jordmån		x			
	– bottensediment		x	x		
	– indikation neotektonik		x			Bedömning neotektonik.
<b>Berggrund – bergarter</b>						
<b>Förekommande bergarter</b>	– bergartsfördelning (rumslig och procentuell)	x	x	x	x	Bergartsmodell (används indirekt för bergmekanisk, hydrogeologisk och geokemisk förståelse).
	– xenoliter			x	x	
	– bergartsgångar	x	x	x	x	
	– bergartskontakter		x	x		
	– ålder			x		
	– malmpotential-industrimineral	x	x			
<b>Bergartsbeskrivning</b>	– mineralogisk sammansättning		x	x	x	Bergartsmodell (används indirekt för bergmekanisk, hydrogeologisk och geokemisk förståelse).
	– kornstorlek		x	x	x	
	– mineralorientering		x	x	x	
	– mikrosprickor		x	x	x	
	– densitet		x	x		
	– porositet			x		
	– susceptibilitet, gammastrålning m m		x			
	– mineralogisk omvandling/vittring		x	x	x	
<b>Berggrund – strukturer</b>						
<b>Plastiska strukturer</b>	– veck (geometri)		x	x	x	Strukturgeologisk modell.
	– foliation		x	x		
	– stänglighet		x	x	x	
	– ådring		x	x		
Skjuvzoner	– ålder			x		
	– utbredning, egenskaper	x	x	x	x	

Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för
		FS	IPLU	KPLU	DETU	
<b>Spröda strukturer</b>						
Regionala och lokala större sprickzoner	– läge	x	x	x		Strukturgeologisk modell. Förvarsdesign. Indata till hydrogeologisk modell och bergmekanisk modell. Sprickmineral m m indata till hydrogeokemisk modell.
	– orientering		x	x		
	– längd	x	x	x		
	– zonbredd		x	x		
	– rörelser (storlek, riktning)			x		
	– ålder			x		
Lokala mindre sprickzoner (i första hand data som möjliggör stokastisk beskrivning av parametrar, men där diskreta observationer rapporteras)	– egenskaper (antal sprickgrupper, sprickavstånd, blockstorlek, sprickkaraktär, sprickfyllnad (sprickmineral), vittring/omvandling)		x	x	x	Indata till hydrogeologisk modell och bergmekanisk modell (förvarsdesign). Sprickmineral m m indata till hydrogeokemisk modell.
	– läge/densitet		x	x	x	
	– orientering			x	x	
	– längd		x	x	x	
	– zonbredd			x	x	
	– rörelser (storlek, riktning)			x	x	
Sprickor – data för stokastisk beskrivning	– ålder			x	x	Indata till detaljerad hydrogeologisk modell och detaljerad bergmekanisk modell. Indirekt indata till nuklidtransportmodell. Sprickmineral m m indata till hydrogeokemisk modell.
	– egenskaper (antal sprickgrupper, sprickavstånd, blockstorlek, sprickkaraktär, sprickfyllnad (sprickmineral), vittring/omvandling)			x	x	
	– densitet (olika grupper)		x	x	x	
	– orientering		x	x	x	
	– längd		x	x	x	
	– kontaktmönster			x	x	
	– sprickvidd			x	x	
	– råhet			x	x	
– vittring (omvandling)			x	x		
– sprickfyllnad (sprickmineral)			x	x		
– ålder			x	x		

### 4.2.3 Modellverktyg och analyser

Vid en platsundersökning insamlas och tolkas en stor mängd data från olika undersökningar. Med hjälp av denna information upprättas de olika beskrivningarna av platsens egenskaper och förhållanden.

#### **Tolkning av data och extrapolation till rummet – ”geologisk modellering”**

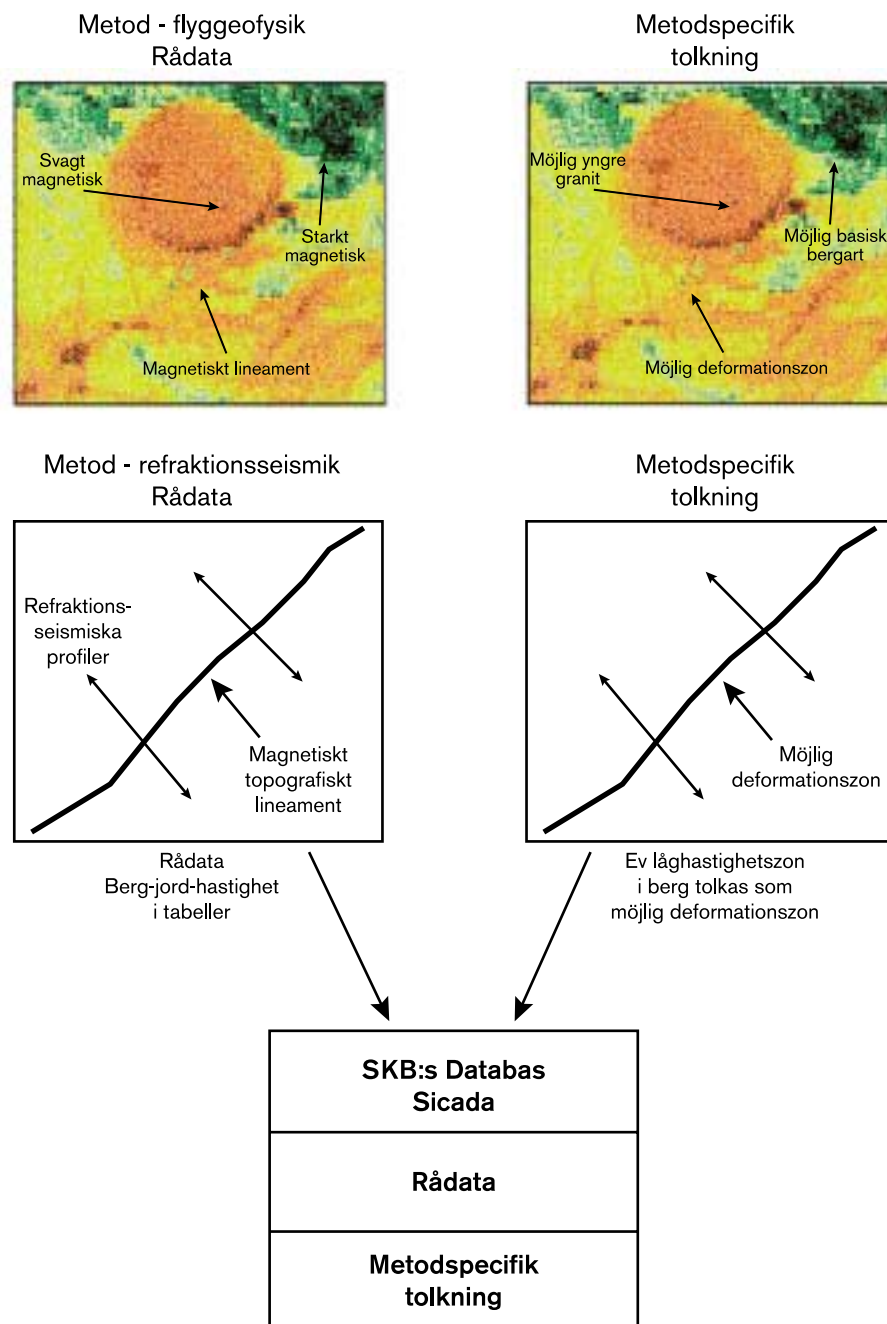
Undersökningarna resulterar i primära data (mätvärden och rutinmässigt beräknade värden) som samlas i en databas (SICADA). Primära data tolkas, dels med avseende på berggrundens geometriska enheter (sprickzoner, bergarter etc) och dels med avseende på bergensheternas olika egenskaper enligt angivna parametertabeller för olika ämnesområden, se figur 2-4. Det är härvid viktigt att man skiljer mellan primära data (lagras i SICADA) och tolkade egenskaper (presenteras i modeller).

Tolkningen innebär i princip att mätresultat, representerande mätpunkter med olika god spridning och täthet på markyta eller i borrhål, genom exempelvis interpolation, statistisk bearbetning, m m analyseras av experter så att specifika egenskaper (parametervärden) kan åsättas och fördelas över hela den modellerade bergvolymen. Tolkningsmetodiken kan inte beskrivas med samma exakthet som rutinmässiga mätningar och beräkningar eftersom de också inbegriper ämnesexperter bedömningar och värderingar



av den primära informationen (se figur 4-5). Osäkerheter måste beskrivas, se t ex /Saksa, 1998/. Tolkning kan vara såväl metodspecifik som ämnesövergripande och det är viktigt att tydliggöra huruvida en tolkning bygger på en metod, flera metoder inom ett ämnesområde eller är ämnesövergripande.

Så kan t ex en gabbrokropp i en omgivande granitmassa tolkas som en skiva eller en lins med viss antagen dimension. Detta kan göras med ledning av data från t ex hålobservationer, geofysik (gravimetri) och kärnborrhål. På motsvarande sätt kan en sprickzon tolkas med ledning av ytobservationer i form av ett lineament (topografiskt, magnetiskt), hålobservationer (stor sprickfrekvens) och geofysik, avseende utbredning på ytan och karaktär (delvis). Borrhål och reflektionsseismik ger data angående utbredning (stupning) och karaktär mot djupet.

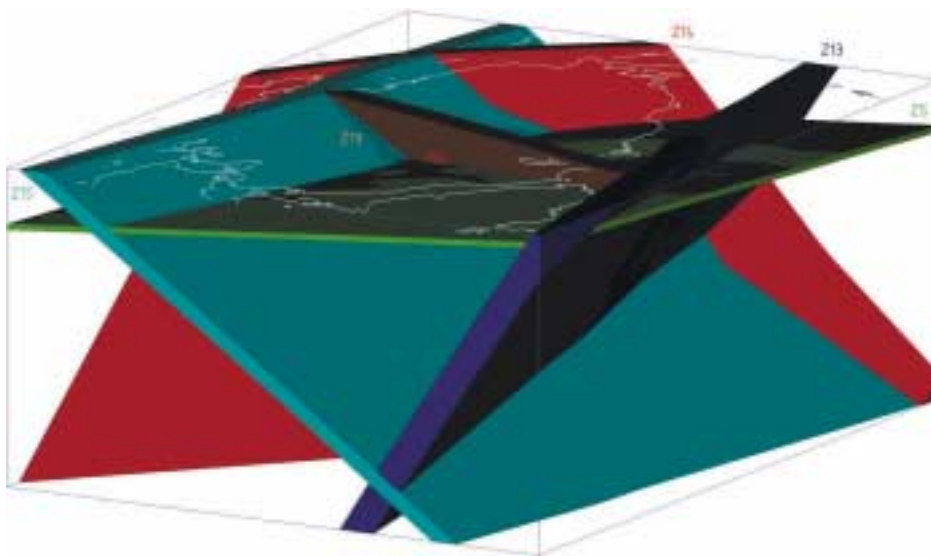


Figur 4-5. Exempel på metodspecifik tolkning av rådata för två geofysiska metoder.

Tolkningen utförs enligt metodik som SKB utvecklat kring 3D-verktyget RVS, figur 4-6. Denna metod går i huvudsak ut på att inledningsvis konstruera en strikt geometrisk beskrivning, där berget delas upp i geometriska enheter. Därefter beskrivs, efter hand som primärdata insamlas, de identifierade geometriska enheterna med geovetenskapliga egenskaper (tolkade data). Modellernas successiva uppbyggnad versionshanteras och sparas i en "modelldatabas". Till varje version (eller alternativ beskrivning) sparas även uppgift om vilket dataunderlag som modellen bygger på samt vem som utfört tolkning.

I början av platsundersökningen finns det mycket lite data mot djupet. Tidiga modellversioner har därför stor osäkerhet i djupled. Placeringen av sprickzoner utgår från tolkade lineament i ytan. Bedömningen av sprickzonernas fortsättning mot djupet eller förekomst av subhorizontella strukturer är mycket osäker. I RVS infogas i första hand beskrivningen av relativt väl kända förhållanden, framförallt fördelningen av lineament och bergartsfördelning i bergytan. Sprickzonernas utbredning mot djupet kan också exemplifieras i RVS för olika antagna stupningar eller frekvens av subhorizontella sprickzoner. I tidigt skede finns det med andra ord flera alternativa tolkningar, även om bara några kommer att visualiseras.

Allt eftersom undersökningarna fortskrider erhålls mer information från djupet, till exempel i form av reflektionsseismik, borrhålsgeofysik eller tolkning av borrhäror. I senare lägen tillkommer även information från hydrogeologiska interferenstester. Läget för de geometriska observationerna av tänkbara sprickzoner läggs in i RVS. För att bestämma lägen av sprickzonerna försöker man vid tolkningen att knyta ihop dessa olika observationer till olika sammanhängande zoner. Osäkerheten i tolkning beror bland annat på tätheten av observationspunkter/områden, men också på hur lättolkade observationerna är. För varje modellversion beskrivs tolkningsförfarande och osäkerheter i det platsbeskrivande dokumentet. Om osäkerheterna inte är orimligt stora presenteras en rimlig bastolkning av läget för regionala och lokala större sprickzoner i RVS. Alternativa lägen, eller helt alternativa tolkningar kan också presenteras, beroende på en bedömning av osäkerheternas storlek. Lokala mindre sprickzoner och enskilda sprickor beskrivs företrädesvis i statistiska termer.



*Figur 4-6. Exempel på modellering (RVS) av attributet deformationszon.*

De geometriska enheterna innehåller inledningsvis ingen geologisk information (enbart koordinater) förrän de märks med sk attribut. Ett attribut kan betraktas som en rubrik för ett antal geologiska parametrar. Exempel på attribut är deformationszon, lineament och bergenhets. För att ett attribut ska ingå i beskrivningen krävs att fastställda parametrar bestämts med tillräcklig täthet och acceptabel säkerhet med hänsyn till metodik och rådande geologiska förhållanden. Till exempel beskrivs attributet "deformationszon" som en volym (skiva) inom vilken sprickzoner eller plastiska skjuvzoner bedöms förekomma. Respektive deformationszon bedöms med ledning av ett antal parametrar och bedömningens precision graderas. De geometriska enheterna åsätts sedan parametervärden som tolkats utifrån gjorda mätningar, eller i vissa fall i tidiga skeden ansätts utifrån generiska värden.

### **4.3 Karakteriseringsmetoder**

I det följande ges översiktliga redogörelser för olika karakteriseringsmetoder som kan användas för den geologiska beskrivningen.

#### **4.3.1 Geodetiska metoder**

Med geodetiska metoder menas de metoder som på olika sätt används för inmätning och utsättning av mätprofiler, mätpunkter, provtagningspunkter, borrhål m m, tabell 4-4. De geodetiska metoderna ger geometrisk information som är nödvändig för alla mätningar.

Vad gäller mätpunkter på markytan kommer traditionella inmätningssmetoder och GPS (Global Positioning System) att användas. GPS-metoden utvecklas ständigt med avseende på noggrannhet och praktisk användning, varför den förväntas bli alltmer använd. Inmätning med teodolit kommer också att utföras.

Erfarenheter från Äspölaboratoriet visar att det inte är trivialt att använda lokala koordinatsystem vid sidan av ett nationellt system. Dessa erfarenheter resulterar i rekommendationen att endast ett, och då i första hand det nationella koordinatsystemet (RAK) bör användas.

Det finns flera kommersiella metoder för inmätning av borrhålens riktning och krökning. SKB brukar använda Maxibore-systemet, som utnyttjar 3 reflektorringar (varav en med libell) placerad i en följd i 3 aluminiumrör. Läget av reflektorringarna registreras optiskt på en CCD-platta. Förskjutningen av ringarna visar åt vilket håll borrhålet avviker. SKB håller för närvarande på att utvärdera olika metoders funktion och noggrannhet.

Vad gäller borrhålsundersökningar har längdmätning i flera fall bristfällig noggrannhet, speciellt vad avser metoder där mätsonder bärs av vajer eller kabel. Detta problem håller på att lösas av SKB genom att en metod utvecklas där fixa längder markeras i borrhålet genom att fräsa spår i borrhålsväggen i samband med borrhållning. Spåren används sedan för kalibrering av mätsondernas längdmätning.

### 4.3.2 Mätning av bergrörelser

För deformationsmätningar för kontroll av rörelser i berggrunden bör precisionsmätningar utföras med GPS-teknik /Muir-Wood, 1993; LaPointe, 1999/. Mätningarna koncentreras lämpligen till regionala sprickzoner och bör leda till att rörelser i storleksordningen 1 mm per år kan skattas med tillräcklig noggrannhet efter 2–3 års mätningar. För detta ändamål borras 7–10 mätdubbar i fast berg. På dubben monteras satellit-antennerna med ett fritt synfält ned till 20° över horisonten. Antenner och mottagare placeras ut 2–3 gånger per år och mätningar görs mot satelliter under 24–48 timmar.

För att övervaka seismiska händelser i området och för att få ett grepp om de deformationsprocesser som pågår behövs ett seismiskt observationsnät. Observationsnätet bör täcka ett stort område. Enstaka seismiska händelser måste kunna relateras till seismiska händelser i en större region för att kunna utvärderas. Det är därför lämpligt att förlänga det befintliga nätet längs Bottenvikens kust söderut mot Oskarshamn, samt att göra en förtätning av nätet kring de undersökta platserna. För en utbyggnad av nätet från Gävle till Oskarshamn behövs cirka 14 nya stationer för att en nå önskad detektionsnivå på magnitud ( $M$ ) 0,5. För att öka detektionsnivån ytterligare kring de undersökta platserna föreslås en förtätning i den omedelbara närheten med 2 stationer. Detta beräknas ge en ökning av känsligheten ner till magnitud 0 samt en rimlig möjlighet till noggrann djupbestämning i de aktuella områdena.

**Tabell 4-4. Beskrivning av geodetiska metoder för utsättning och inmätning av punkter, borrhål m m.**

Metod	Parameter (information)	Kommentar
<b>Geodetiska metoder</b>		
<b>Koordinatsystem</b>		
<b>Baskoordinatsystem</b> RAK nationella system bör användas	<b>Positioneringsstruktur</b> X, Y, Z-koordinater	Användning av ett enhetligt koordinatsystem är nödvändigt.
<b>Utsättning och inmätning</b>		
<b>Inmätning med traditionell metod eller GPS</b>	<b>Koordinatpositioner</b>	Känd, kommersiell metodik, där främst GPS ständigt utvecklas.
• mätprofiler	X, Y, Z (RAK)	
• mätpunkter/provtagningspunkter	X, Y, Z (RAK)	
• borrhål	X, Y, Z (RAK) och riktning	
<b>Borrhålsinmätning och krökningsmätning</b>	<b>Positioner längs borrhål</b>	Krökmätningssmetoder bristfälligt verifierade och kommer att ses över. Eget system för längdkalibrering har utvecklats.
• längd från borring	borrhålslängd	
• borrhålskrökning	X, Y, Z (RAK) mot borrhålslängd	
• längdmarkering och längdkalibrering i borrhål	Längdkorrigerade mätpunkter	
<b>Bergrörelser</b>		
<b>Observationer och långtidsmonitoring</b>	<b>Indikatorfenomen</b>	Ett deformationsmättningsprogram pågår i Oskarshamn.
• geologiska/topografiska observationer i jord och berg	neotektoniska indikationer (postglaciala förkastningar)	
• seismiska observationer/monitoring	seismisk aktivitet (stabilitet)	
• analys av geodetiska data	långsamma tektoniska rörelser och blockförskjutningar	
• GPS-nät och precisionsavvägning		
• landhöjningsdata		
• deformationsmätningar		

### 4.3.3 Ytgeofysiska metoder

Med hjälp av ytgeofysiska metoderna kan såväl berggrundens karaktär och förekomst av plastiska och spröda strukturer som ovanliggande jordtäckte undersökas, se tabell 4-5. De ytgeofysiska metoder som beskrivs här omfattar såväl flygburen geofysik som markgeofysiska mätningar.

#### **Flyggeofysik**

De flyggeofysiska metoder som används är magnetiska, elektromagnetiska och radiometriska metoder. Större delen av Sverige täcks av mätningar med dessa metoder, dock med varierande undersökningsparametrar. De flyggeofysiska kartorna används för en bedömning av förekomsten av regionala och lokala större sprickzoner och olika bergartsvolymer och deras karaktär.

Helikopterburna mätningar utförs över ett något mindre område och även här används magnetiska, elektromagnetiska och radiometriska metoder. Magnetometern som används är en känslig protonmagnetometer av cesiumtyp. Som elektromagnetiska metoder används ett multifrekvens-EM-system med frekvenser från cirka 1 kHz till mer än 30 kHz. Vid helikoptermätningarna är mätsensorerna placerade i en speciell modul (bird) som bärs under helikoptern på cirka 40 m höjd ovanför markytan. Helikoptern flyger på cirka 80 m höjd. De flyggeofysiska kartorna ger bergartsinformation och information om förekomst av regionala och lokala sprickzoner och viss information om övertäckningen (jordlager). Det helikopterburna systemet flygs företrädesvis i en riktning med 50 m linjeavstånd.

**Tabell 4-5. Beskrivning av geofysiska metoder för att undersöka jordarter och den ytliga berggrunden.**

Metod	Parameter (information)	Kommentar
<b>Geofysiska metoder</b> <b>Ytgeofysiska metoder</b>		
<b>Flyggeofysik</b> (även helikopter) <ul style="list-style-type: none"><li>• magnetiska metoder</li><li>• elektromagnetiska metoder</li><li>• radiometriska metoder</li></ul>	<b>Flyggeofysiska kartor, tolkningsunderlag för</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• regionala och lokala strukturer, bergarter</li><li>• regionala och lokala strukturer</li><li>• bergarter</li></ul>	Dokumenterade metoder. Mätning från helikopter kan erbjudas av Finland och Norge. Tolkningsmetodik bör optimeras.
<b>Geofysisk markmätning</b> (olika skalor) <ul style="list-style-type: none"><li>• gravimetri</li><li>• magnetiska metoder</li><li>• resistivitet (CVES)</li><li>• elektromagnetiska metoder (VLF, slingram)</li><li>• transient elektromagnetisk sondering (TEM)</li><li>• refraktionsseismik</li><li>• reflektionsseismik</li><li>• markradar</li></ul>	<b>Geofysiska kartor, tolkningsunderlag för</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• bergarter</li><li>• bergarter, strukturer</li><li>• strukturer, (porositet)</li><li>• strukturer</li><li>• strukturer, djupt salt grundvatten</li><li>• strukturer</li><li>• subhorisontella strukturer</li><li>• strukturer, jorddjup</li></ul>	Huvudsakligen dokumenterade metoder. Vidareutveckling av seismiska metoder pågår. Studier för optimering av elektriska (CVES) och EM-metoder bör genomföras.

## **Geofysisk markmätning**

Gravimetrisk mätning ger främst information om de olika bergarternas utbredning mot djupet och en viss information om jorddjup där dessa varierar kraftigt. Gravimetriska metoder bygger på att en vikt upphängd i en fjäder på olika platser eller punkter påverkas av jordens dragningskraft. Konstruktionen är extremt känslig och kan detektera förändringar i jordens dragningskraft på i storleksordningen  $10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>. De gravimetriska mätningarna utförs med en punkttäthet av omkring 1 punkt/km<sup>2</sup>. För att få värdefull information om variationer i berggrunden måste korrektioner för höjd över geoiden (eller havsytan) och topografi i närheten av mätpunkten utföras. Därmed måste punkternas höjd över havet bestämmas med GPS eller avvägning.

Resistivitetsmätning (CVES) mäter resistiviteten i bergvolymen. Ner till några 100 meters djup ger den en viss information om förekomst av lokala större sprickzoner och information om djupet till salt grundvatten. Vid resistivitetsmätning placeras ett 80-tal mätelektroder ut längs med en profil. Successivt kopplas en elektrisk ström parvis mellan ett par elektroder och den därmed uppkomna elektriska potentialen mäts under samma tid mellan ett par andra elektroder. Styrenheterna kopplar sedan om mätelektroderna och elektrisk ström sänds ut mellan ett par andra elektroder och potentialen mäts upp på nytt i ett par andra. Detta upprepas tills dess att hela utlägget är mätt. Utlägget flyttas till en ny position och mätningarna upprepas igen. Resistivitetsmätningen utförs längs ett par korsande profiler över de potentiellt intressanta områdena för den kompletta platsundersökningen.

Transient elektromagnetisk sondering (TEM) ger samma information som CVES men till större djup. Vid TEM placeras en mätslinga ut på marken. En elektromagnetisk puls innehållande ett stort antal frekvenser sänds ut. En induktion av virvelströmmar sker i elektriskt ledande lager i berggrunden. Virvelströmmarna ger upphov till ett sekundärfält som mäts upp i en mottagarslinga. Ju lägre frekvens desto större djup erhålls information ifrån. Information erhålls också från djupt liggande saltvattenhorisonter.

Med geofysisk markmätning längs med parallella profiler med profilavstånd varierande inom intervallet 10–50 m, studeras regionala och lokala sprickzoners karaktär och stupning noggrannare. De metoder som används i detta fall är magnetisk, elektromagnetisk (HLEM) flerfrekvens och resistivitetsmätning med multielektrode-teknik (CVES). Vid magnetisk mätning utnyttjas en protonmagnetometer. Med en kortvarig strömpuls förmås protoner i en behållare att spinna eller processera och vid strömavslag ställer protonerna in sig i det rådande magnetfältets riktning. I normalfallet erhålls en mät-noggrannhet på cirka 1 nT. Vid HLEM utsänds ett elektromagnetiskt fält från en bärbar sändarspole. Det utsända fältet inducerar virvelströmmar i elektriskt ledande material i berggrunden. Detta ger upphov till ett nytt sekundärt elektromagnetiskt fält som kan mätas upp i en bärbar mottagarspole placerad på ett visst avstånd (cirka 60 m) från sändarspolen. Genom att bära spolarna längs med en profil och upprepa mätningarna punktvis erhålls information om ledande strukturer i berget eller i ovanliggande jordlager. Vid HLEM utnyttjas ett flertal olika frekvenser för att erhålla information från olika djup i jordlager och berggrund.

I samband med bergartskartering mäts radioaktiv strålning och magnetisk susceptibilitet med handburna instrument /Almén m fl, 1994/.

Refraktionsseismik över större dalgångar och jordtäckta områden ger information om regionala och lokala större sprickzoners karaktär och egenskaper. Den ger också information om bergkvalitet och jorddjup. Vid refraktionsseismik placeras ett stort antal mätcensorer (geofoner) ut på markytan med 5–20 m mellanrum. Med jämna mellanrum

både inom och utanför profilen placeras sprängladdningar från 50 gram upp till 2–3 kg i extrema fall. Dessa laddningar sprängs i tur och ordning. Vid sprängningen genereras en ljudvåg som fortplantas ner i jordlagren och ner i underliggande berggrund. Ljudvågen bryts (refrakteras) så småningom tillbaka till markytan där mätcensornerna har placerats. Om berggrunden innehåller sprickigt berg eller berg av lägre kvalitet kommer ljudvågen att fortplantas långsammare. Detta registreras i de markbaserade geofonerna. På motsvarande sätt registreras om jordlagren ökar i tjocklek eftersom ljudvågen fortplantas långsammare i jord.

Markradar ger information om jordlagerföljder och jorddjup ned till cirka 15 m i morän och friktionsjordar och detekterar ytliga sprickor om övertäckningen är homogen och tunn. Metodens förmåga att detektera jorddjup i leriga eller siltiga (och salta) sediment och jordarter är starkt begränsad. Med markradar utsänds en elektromagnetisk puls med hög frekvens, 25 MHz upp till 1 GHz, så vertikalt ner i marken som möjligt. Den elektromagnetiska vågen reflekteras mot ojämnheter i jordlagren och strukturer i berget. Efter reflektion och dämpning av vågen registreras den mottagna signalen i mottagarantennen placerad i samma enhet som sändarantennen. Markradarantennen kan med fördel dras av en person i promenadtakt längs med en profil. Utsändning av pulser sker kontinuerligt och resultat erhålls direkt på skärmen i en portabel dator ett sk radargram. Markradarantennen kan också dras med ett fordon.

Reflektionsseismiska undersökningar utförs för att upptäcka större flackt liggande sprickzoner i berggrunden som kan göra området olämpligt för djupförvaret. De reflektionsseismiska profilerna är några km långa. Vid reflektionsseismik placeras på samma sätt som vid refraktionsseismik markbaserade geofoner ut. Sprängladdningarna är som regel mindre, 25 g upp till 1 kg, än vid refraktionsseismik. Även avståndet mellan skottpunkterna är betydligt kortare, t ex 10 m. Vid registreringen fokuseras intresset till de reflekterade ljudvågorna. Den efterföljande processeringen och databehandlingen genomförs för att förstärka informationen från de reflekterade vågorna. Framförallt erhålls information från flackt liggande sprickzoner men information erhålls även från sprickzoner som lutar upp till 45° /Juhlin och Palm, 1997/.

#### **4.3.4 Geologiska metoder – ytmetoder**

Med hjälp av de geologiska metoderna ska såväl berggrund som jordtäckte undersökas, se tabell 4–6. Jordartsgeologin omfattar bestämning av jordarterna och deras utbredning. Vad gäller berggrunden undersöks såväl bergarter, bergartsfördelning som strukturer.

##### ***Lineamentstolkning***

Lineamentstolkning av digitala höjddata, flygfoton och flyggeofysiska kartor används för att erhålla information om storskaliga lineament som eventuellt kan utgöras av regionala eller lokala sprickzoner. Denna bildanalys görs i ett tidigt skede i de inledande platsundersökningarna.

##### ***Jordartskartering***

För jordartskartering används flygbildstolkning för översiktlig kartläggning. Denna ger information om jordtäcket utbredning i stort. Fältkartering görs av de olika jordarterna. Provtagning i form av grävning och jordborrning utförs för att studera jordarternas karaktär. Jordsondering utförs för att studera jordtäcket mäktighet. Grävning av djupa diken i sedimentområden under högsta kustlinjen utförs för att studera eventuella tecken

**Tabell 4-6. Beskrivning av geologiska metoder för att undersöka jordarter och den ytliga berggrunden.**

Metod	Parameter (information)	Kommentar
<b>Geologiska metoder</b>		
<b>Ytgeologiska metoder</b>		
<b>Bildanalys topografi/lineament</b> • flygbildstolkning • analys av digital höjddatabas	<b>Lineamentkarta</b> • storskaliga tektoniska strukturer • regionala och lokala strukturer	Dokumenterade metoder
<b>Jordartskartering</b> • flygbildstolkning • fältkartering • provtagning • undersökning av bottensediment (sjö, hav) • torvmossar • jordmån	<b>Jordartskarta med beskrivning</b> • jordarter, jordmån • jordtäckets mäktighet • identifikation av recipienter • neotektoniska indikationer • tolkningsunderlag för ytnära ekosystem • tolkningsunderlag för grundvattenbildning	Dokumenterade metoder  Av intresse för ytnära ekosystem
<b>Berggrundskartering (olika skalor)</b> • berghällar, bergskärningar • frilagda bergytter • provtagning • jord/bergborring med kärnprovtagning från bergyta	<b>Berggrundsgeologiska kartor med beskrivning</b> • bergartsfördelning • bergartsbeskrivning • plastiska strukturer • spröda strukturer • neotektoniska indikationer	Dokumenterade metoder

på neotektoniska rörelser. Jordarternas karaktär och egenskaper utgör ett tolkningsunderlag för ytnära ekosystem (i synnerhet torvmossar och jordmån) och grundvattenbildning för ämnesområdet hydrogeologi. Jordarterna beskrivs med avseende på utbredning, mäktighet, kornstorleksfördelning och dess variationer lateralt och vertikalt samt bildningssätt och stratigrafiska förhållanden. Detta kräver grävning och/eller borring med provtagning. Målet är att upprätta en modell för jordarternas egenskaper och utbredning i tre dimensioner.

### **Berggrundskartering**

Berghällar, bergskärningar, bergtäkter och frilagda bergytter kartläggs för bergartsbeskrivning och beskrivning av berggrundens uppbyggnad. Större plastiska och spröda strukturer, t ex regionala och lokala större sprickzoner kartläggs. Provtagning av bergyta genomförs som underlag för petrografisk och petrofysisk bestämning.

## **4.3.5 Geologisk borrhålsundersökning**

### **Hammarborrhål**

Med hjälp av hammarborrhål undersöks bergartsvariationer med hjälp av studier av borrhax och MWD, se tabell 4-7. För varje 0,5 m tas ett prov av borrhax i en plastpåse. Studierna av kaxet görs okulärt för observation av färgvariationer och kompletteras med mikroskopiska studier. Spolvattnets färg och vattenmängd registreras också. Measurements While Drilling (MWD) är en registrering av borrhaxparametrar direkt vid borring, t ex borrsjunkning, matartryck och rotationstryck. Efter borring TV-filmas hammarborrhålet med BIPS, som underlag för en geologisk borrhålsdokumentation (GBD).



**Tabell 4-7. Beskrivning av geologiska metoder för att undersöka berggrunden på djupet.**

Metod	Parameter (information)	Kommentar
<b>Geologiska metoder</b>		
<b>Geologiska borrhålsundersökningar</b>		
<b>Hammarborrning – undersökning av borrhax och MWD</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• okulär undersökning</li> <li>• provtagning för mineralogisk analys</li> <li>• MWD</li> </ul>	<b>Underlag för GBD</b> (se nedan) <ul style="list-style-type: none"> <li>• bergartsgränser</li> <li>• sprickzoner</li> </ul>	Dokumenterade metoder.
<b>Kärnborrning – kartering av borrhärlar med Boremap</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• bygger geometriskt på BIPS-loggning (om utfört)</li> <li>• geologisk beskrivning från borrhärlar</li> <li>• provtagning av bergmatris och sprickmineral för labanalyser (se nedan)</li> </ul>	<b>Underlag till GBD</b> (se nedan) <ul style="list-style-type: none"> <li>• bergartsfördelning</li> <li>• bergartsbeskrivning</li> <li>• plastiska strukturer</li> <li>• sprickors läge/orientering</li> <li>• sprickytors egenskaper</li> </ul>	Integrerad kartläggning från BIPS och borrhärlar. Metodik utvecklad av SKB.
<b>Analyser av prover</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mikroskopisk analys</li> <li>• kemisk analys</li> <li>• petrofysisk analys</li> <li>• bergmekanisk analys</li> <li>• åldersdatering</li> </ul>	<b>Provresultat</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mineralsammansättning</li> <li>• kemisk sammansättning</li> <li>• densitet, porositet, susceptibilitet, m m</li> <li>• se bergmekanik</li> <li>• ålder</li> </ul>	Dokumenterade metoder.
<b>Geologisk Borrhålsdokumentation (GBD)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geologisk karakterisering längs borrhål</li> <li>• Boremap-kartering</li> <li>• undersökning av borrhax</li> <li>• MWD</li> <li>• tolkningsstöd från geofysik</li> <li>• tolkningsstöd från provanalyser</li> <li>• statistisk bearbetning</li> </ul>	<b>Geologisk beskrivning längs borrhål</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• bergartsfördelning</li> <li>• bergartsbeskrivning</li> <li>• plastiska strukturer</li> <li>• sprickors läge/orientering</li> <li>• sprickytors egenskaper</li> <li>• sprickor statistisk analys</li> <li>• tolkade sprickzoner</li> </ul>	Bygger huvudsakligen på Boremap-karteringen och kompletterar densamma genom tolkningsstöd från geofysik (eventuellt radar, seismik). Enhåls-beskrivningar presenteras med WellCAD.

### **Kärnborrhål**

Borrhärlan som erhålls vid kärnborrning karteras med Boremap. Metoden bygger på att borrhålet tidigare har undersökts med BIPS, se avsnitt 4.3.6, och den digitala BIPS-bilden utnyttjas som underlag vid karteringen av borrhärlan. Metodiken bygger på att de geometriska komponenterna (bergartsgränser och vissa sprickors läge) tas från BIPS-bilden medan bergartsinformation och sprickytors egenskaper hämtas från borrhärlan. Vid kartering av borrhärlan bestäms bl a bergartstyp och såväl plastiska strukturer (t ex indikationer på skjuvrörelser) som spröda strukturer t ex sprickor och deras frekvens, orientering och karaktär. Sprickornas absoluta orientering och sprickmineral kan direkt matas in i karteringsunderlaget.

Bergprover tas från borrhärlar liksom prover från sprickmineral. Dessa prover analyseras mikroskopiskt (tunnslip) och t ex med röntgenspektrografi.

## Analys av prover

Under såväl fält- som borrhärnekartering tas prover på jord- och bergarter samt sprickmineral för laboratorieanalys. Jordarterna analyseras i första hand med avseende på kornstorleksfördelning. Av bergartsproverna prepareras tunnslip som undersöks i mikroskop för mer exakt bergartsbestämning. Bergarter och sprickmineral analyseras också med hjälp av t ex röntgenspektrografi för bestämning av deras kemiska sammansättning. För den geofysiska tolkningen tas bergartsprover för analys av petrofysiska parametrar som t ex densitet, porositet och magnetisk susceptibilitet.

### 4.3.6 Geofysiska borrhålsmetoder

Bland geofysiska borrhålsmetoder ger caliper information om borrhålets geometri, dvs borrhålsdiameter. En fyrarmad caliper kan dessutom mäta eventuell ovalitet i borrhålet vilket kan indikera anomala bergspänningar på stort djup, tabell 4-8.

**Tabell 4-8. Beskrivning av geofysiska metoder för att undersöka berggrunden på djupet.**

Metod	Parameter (information)	Kommentar
<b>Borrhålsgeofysiska metoder</b>		
<b>Geofysisk borrhålsloggning</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• caliper</li><li>• radiometrisk metod (naturlig gamma, neutron, gamma-gamma)</li><li>• elektriska metoder (resistivitet, punktresistans, vätskeresistivitet)</li><li>• magnetiska metoder</li><li>• sonic (fullvågs)</li><li>• temperatur</li></ul>	<b>Tolkningsstöd för GBD (se geologi)</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• borrhål status, geometri</li><li>• bergartsparametrar</li><li>• bergartsparametrar, strukturer, grundvattnets salthalt, hydrauliska ledare</li><li>• bergartsparametrar, strukturer</li><li>• bergartsparametrar, strukturer</li><li>• bergets temperatur, vattenflödande sprickor</li></ul>	Dokumenterade metoder. Optimering av tolkningsmetodik.  En metodstudie av fokuserad resistivitet med duallaterolog har utförts i borrhål KLX02 i Laxemar.  Fullvågssonic ger bergmekanisk information.
<b>Borrhålsradar</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• reflektionsmätning</li><li>• tomografi</li></ul>	<b>Tolkningsstöd för GBD (se geologi)</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• strukturer (lokala större och lokala mindre)</li><li>• dito (inom cirka 100 m från borrhål)</li></ul>	RAMAC-utrustningen genomgår vidareutveckling.
<b>Borrhålsseismik</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• VSP (vertical Seismic Profiling)</li><li>• reflektionsmätning</li><li>• tomografi</li></ul>	<b>Tolkningsstöd för GBD (se geologi)</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• strukturer (regionala, lokala större och lokala mindre), inom upp till 500 m från borrhål</li></ul>	Fullskaletest utförd i KLX02, Laxemar, i syfte att prova samtolkning med reflektionsseismik.
<b>Borrhåls-TV (BIPS)</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• BIPS-system</li></ul>	<b>Bild av borrhålsvägg</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• basunderlag för GBD (se geologi)</li><li>• bergarter</li><li>• sprickors orientering</li><li>• borrhålsstatus</li></ul>	Smärre tekniska kompletteringar pågår.

Radiometriska metoder som naturlig gamma, gamma-gamma och neutron-neutron ger information om bergartsvariationer. Naturlig gammasonden använder en NaI-kristall som detektor. Med sond för naturlig gamma mäts variationer i innehåll av uran, torium och kalium. Variationer i dessa element återspeglar variationer i bergarterna. Gamma-gamma (density) sonden använder Cs-137 som gammastrålande preparat och en NaI-kristall som detektor. Preparatet sänder ut gammastrålning som absorberas framförallt av mörka och tunga mineral. Neutron-neutron använder ett preparat som sänder ut neutroner (Am-241). De utsända neutronerna bromsas upp och absorberas av vattenmolekyler (egentligen väteatomer) och mörka mineral. Neutronsonden är därmed känslig för ökad porositet men även för förekomst av mörka mineral (Fe-silikater och Fe-oxider).

Elektriska metoder som resistivitet, punktresistans ger informationer om sprickor och sprickzoner samt borrhålsvattnets salthalt. Vid normal resistivitet utsänds elektrisk ström med en elektrod i sonden och en elektrod placerad på markytan. Potentialelektroden är i sonden placerad 1,6 m eller 0,4 m från strömelektroden och den andra potentialelektroden är placerad på markytan. Vid punktresistans utnyttjas en och samma elektrod som ström- och potentialelektrod både i sonden och uppe på markytan.

Sonic är en akustisk metod som är känslig för sprickor i berget. Sonic består av en akustisk givare placerad i en sond som utsänder en ljudvåg. Ljudvågen fortplantas i berget längs med borrhålet och registreras i två givare som sitter på ett inbördes avstånd av 30 cm eller 60 cm från varandra. Det finns också en fullvågssonic som registrerar både P-vågen och S-vågen. Metoden är användbar inom bergmekanik eftersom den ger elastiska parametrar om densiteten är uppmätt, t ex med gamma-gamma eller mätt på bergprover. Berg med ökad sprickighet eller berg med lägre kvalitet ger upphov till lägre gånghastighet för ljudvågen.

Magnetisk susceptibilitet ger information om bergartsvariationer och omvandling. Magnetisk susceptibilitet registrerar magnetiserbarheten i berget, framförallt förekomsten av magnetit påverkar susceptibiliteten. Magnetit förekommer i mer eller mindre grad i de flesta bergarterna.

Temperaturmätningar ger information om temperaturgradienten och vattenflöden i sprickzoner. Temperaturen mäts med en termistor placerad i en separat borrhålssond eller inbyggd i andra sonder, t ex någon flödessond.

Borrhålsradar med reflektionsmätning ger information om sprickzoners lutning mot borrhålsaxeln. Vid borrhålsradarmätning utsänds en elektromagnetisk puls med hög frekvens (20 MHz upp till 250 MHz) ut i berget. Radarvågen reflekteras mot ytor med avvikande elektriska egenskaper, t ex sprickzoner och bergartsgångar. De reflekterade vågorna registreras i en mottagarantenn. Borrhålsradar med riktantenn används för att beräkna sprickzoners absoluta orientering, dvs strykning och stupning. Då används en mottagarantenn med fyra separata mottagarlingor. Beroende på hur den reflekterade vågen infaller genom mottagarlingorna kan orienteringen till reflektorn bestämmas.

VSP i borrhål kan användas för samtolkning med reflektionsseismik. VSP (Vertical Seismic Profiling) bygger på att man alstrar en vibration eller ljudvåg i berget från ett ytligt borrar hål eller med vibrator och sedan med hjälp av s k geofoner (mikrofoner) placerade i borrhålet registrerar hur denna signal fortplantar sig i berggrunden. Ljudvågorna absorberas och reflekteras mot ytor i berget som har avvikande mekaniska eller elastiska egenskaper, t ex sprickzoner.

Videoinspelningen av borrhålsväggen med BIPS och bearbetningen av denna information tillsammans med borrhårnan är en av de viktigaste datakällorna för geologisk borrhålsdokumentation (GBD). BIPS består av en digital TV-kamera som filmar borrhålsväggen samtidigt som kameran sänks ner i borrhålet. BIPS har en konisk spegel framför kameran och en kompassnål som visar riktningen mot norr eller ett lod som visar borrhålets underkant. Borrhålsväggen presenteras uppvikt med t ex norrlinjen i mitten på bladet. En spricka uppvisar en mörkare sinusformad linje över bilden. Kameran registrerar i färg och har mycket god kontrast och hög upplösning. Sprickor med en vidd som överstiger cirka 1 mm detekteras med nuvarande utrustning men metoden kan komma att förbättras.

## 5 Bergmekanik

### 5.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs vilka bergmekaniska förhållanden och egenskaper som ska bestämmas och tänkbara karakteriseringsmetoder. I kapitlet beskrivs även hur den mätta informationen tolkas i den bergmekaniska modell som utgör en del av den platsbeskrivande modellen.

#### 5.1.1 Inledning

Bergets mekaniska egenskaper påverkar både djupförvarets isolerande och fördröjande funktioner. De bergmekaniska egenskaperna har dessutom stor betydelse för hur förvaret ska utformas och byggas.

Berget är ett mekaniskt system som normalt är i statisk jämvikt under de rådande lasterna. Störningar av jämvikten kan bero på lastförändringar, till exempel genom upp- tag av hålrum i berget, eller på att de mekaniska egenskaperna förändras. Instabilitet leder till att bergmassan deformeras och brott kan uppstå om hållfastheten överskrids. Brott som sådant behöver inte innebära allvarlig instabilitet. Små deformationer, utan konsekvenser för funktion och säkerhet, kan vara tillräckliga för att systemet ska åter- vinna jämvikten.

Bergets mekaniska egenskaper beror dels på det intakta bergets egenskaper, dels på frekvens av sprickor samt deras egenskaper. Den geometriska fördelningen av sprick- zoner, sprickor och bergarter avgör alltså bergets mekaniska egenskaper och kommer därmed att styra var deformation och eventuella brott kommer att ske. I första hand sker rörelser utefter sprickor och sprickzoner. Dessutom har olika bergarter olika hållfasthet och olika deformationsegenskaper.

Mekaniska störningarna kommer att ske vid olika tidsepoker under förvarets framtid och i olika delar av berget. Störningarna inverkar i olika skalor, som deponeringshål, tunnlar, hela tunnelsystemet och bergvolymen kring förvaret. Störningarna kan ge både små- skaliga och storskaliga förändringar. Störningens betydelse beror också på vid vilket specifikt lastfall störningarna inträffar. De bergegenskaper som har betydelse för djupförvarets funktion har således mening först när de analyseras för en viss tunnel- utformning i ett visst spänningsfält.

Det berguttag som sker vid själva djupförvarsbygget ger den relativt största förändring av den mekaniska jämvikten. Uttaget leder till spänningsomlagring och deformationer kring tunnlar. Om spänningsnivåerna är höga relativt bergets hållfasthet kan lokalt brott uppstå. Detta kan ske snabbt i spröda bergarter och benämns målande för "smällberg". Det finns därför flera anläggningstekniska krav och önskemål som kopplas till förutsätt- ningarna för bergbygget.

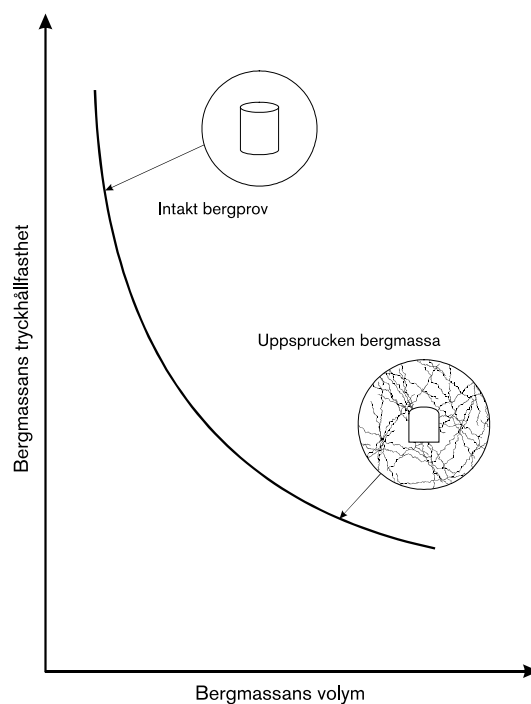
För den långsiktiga säkerheten är det främst frågan om förändringar av deponerings- hålets geometri skulle kunna skada buffert eller kapsel och om omfattande rörelser längs sprickor och sprickzoner eller omfattande nybildning av sprickor skulle kunna försämra

bergets retentionsegenskaper. De lastfall som behöver beaktas är i första hand förändringar i portryck vid återmättnad, svälltrycket från bentoniten, bergets värmeutvidgning, effekter av jordskalv och effekter av omfattande klimatförändringar som glaciationer. Dessutom är det nödvändigt att beakta att bergets mekaniska egenskaper kan förändras med tiden, t ex genom kemisk vittring.

Bergspänningstillståndet i en bergmassa beror dels på vikten av ovanliggande massor och dels på de tektoniska krafter som den studerade bergvolymen är eller varit utsatt för. I svensk kristallin berggrund är spänningarna i horisontalled vanligtvis större än spänningen i vertikalled. Spänningstillståndet är en tensor, och karakteriseras av tre sinsemellan vinkelräta huvudriktningar, var och en svarande mot en huvudspänning. Om alla tre huvudspänningarna är lika stora är spänningstillståndet isotropt och huvudriktningarna obestämbara. Om huvudspänningarna är olika stora är spänningstillståndet anisotropt (deviatoriskt).

Inom det bergmekaniska programmet bestäms de initiala bergspänningarna dels med direkta mätmetoder dels genom olika indikationer i borrhål och med ledning av strukturgeologisk modell. Närheten till sprickzoner påverkar spänningstillståndet i bergmassan. För att analysera fördelning och riktning på spänningsfältet kommer numeriska modelleringar att utföras med den strukturgeologiska modellen som grund.

I den bergmekaniska begreppsmodellen indelas berget i intakt berg (bergblock) och i diskontinuiteter (i huvudsak sprickor och sprickzoner). När bergmassan belastas deformeras dels de intakta blocken, dels sker skjuvrörelser, kompression eller expansion av diskontinuiteterna. Deformationsegenskaperna och hållfastheten hos bergmassan beror alltså inte bara på det intakta bergets egenskaper utan också på frekvensen, orientering och mekaniska egenskaper hos sprickorna. Deformation och hållfasthetsegenskaperna hos en bergmassa är skalberoende se figur 5-1. Förutsatt att en studerad bergvolym är tillräckligt stor att innehålla fyra eller fler spricksystem med likartade egenskaper kan den representeras som ett isotropt material. Egenskaperna hos en sådan bergvolym kan uppskattas med ledning av bergklassningssystem. Det finns inga allmänna och enkla samband för bergmassor med ett litet antal spricksystem (färre än tre).



Figur 5-1. Deformations- och hållfasthetsegenskaperna är skalberoende.

Deformationsegenskaperna och hållfastheten hos de enskilda sprickorna och det intakta berget kan tillfredställande beskrivas med töjning-spännings samband och brottvillkor. Inom det bergmekaniska programmet bestäms det intakta bergets och sprickornas mekaniska egenskaper i huvudsak på upptagna bergkärnor.

De bergmekaniska egenskaperna sammanfattas i en beskrivande *bergmekanisk modell* där de bergmekaniska egenskaperna för olika delar (sprickzoner, bergmassor, sprickor, intakt berg) beskrivs i olika skalor. För att analysera olika mekaniska processer dels vid byggandet och dels under lagrets livstid används bergmekaniska beräkningsmodeller. Även för tolkning och utvärdering av t ex bergspänningsmätningar kan bergmekaniska beräkningsmodeller komma till användning. Ofta utgörs dessa modeller av numeriska beräkningsverktyg.

### 5.1.2 Ämnesspecifika mål

De krav, önskemål och kriterier som identifierats för ämnesområdet bergmekanik redovisas av /Andersson m fl, 2000/. Det bergmekaniska programmet är inriktat på att ta fram underlag för att besvara dessa frågeställningar. Kraven och önskemålen kan i regel tillgodoses genom lämplig förvarsutformning, val av förläggningsdjup och val av utförandemetoder. För detta utförs bergmekaniska analyser integrerat med projektering. Med hänvisning till huvudmålen för de geovetenskapliga undersökningarna (avsnitt 2.2) är den bergmekaniska verksamheten inriktad mot att:

- avgöra om den utvalda platsen är tillräckligt stor för att rymma ett förvar,
- bestämma och bedöma fördelning av initiala bergspänningar inom prioriterat område,
- identifiera risken för omfattande smällbergsproblem eller annat bergutfall i deponeringstunnlar eller deponeringshål,
- bestämma mekaniska egenskaper hos sprickzoner och enskilda sprickor,
- bestämma mekaniska egenskaper hos intakt berg och olika bergmassor,
- identifiera eventuella problem där tunnlar måste passera sprickzoner.

#### ***Inriktning under den inledande platsundersökningen***

För att karakterisera bergets mekaniska egenskaper behövs information från borrhål. Valet av prioriterad plats styrs därför mer av den strukturgeologiska informationen. Mätresultat från de första borrhålen inom prioriterad plats, speciellt det första kärnborrhålet där spänningsmätning utförs, har dock stor betydelse för att kunna bedöma om utvald plats är lämplig för fortsatta undersökningar. Undersökningarna inriktas på:

- inledande mätning av initiala bergspänningar på tilltänkt förvarsnivå,
- inledande bestämning av det intakta berget och bergmassans hållfasthet på tilltänkt förvarsnivå,
- en första analys av risken för omfattande smällbergsproblem eller andra bergutfall.

Utifrån informationen upprättas en preliminär bergmekanisk beskrivning (modell) i lokal och regional skala.

### ***Inriktning under den kompletta platsundersökningen***

Under komplett platsundersökning kompletteras mätningar och karakterisering för att, framförallt, kunna påvisa genomförbarheten att bygga en djupförvarsanläggning vid prioriterad plats. Karakteriseringen koncentreras till det centrala undersökningsområdet, dvs runt och i den tilltänkta förvarsanläggningen. Undersökningarna inriktas på:

- bestämning av initiala bergspänningar och deras fördelning,
- bestämning av intakt bergs mekaniska egenskaper,
- bestämning av olika bergmassors mekaniska egenskaper,
- bestämning av enskilda sprickors och sprickzoners mekaniska egenskaper.

Utifrån informationen upprätta bergmekanisk beskrivning (modell) i lokal och regional skala som del av en samlad platsbeskrivning.

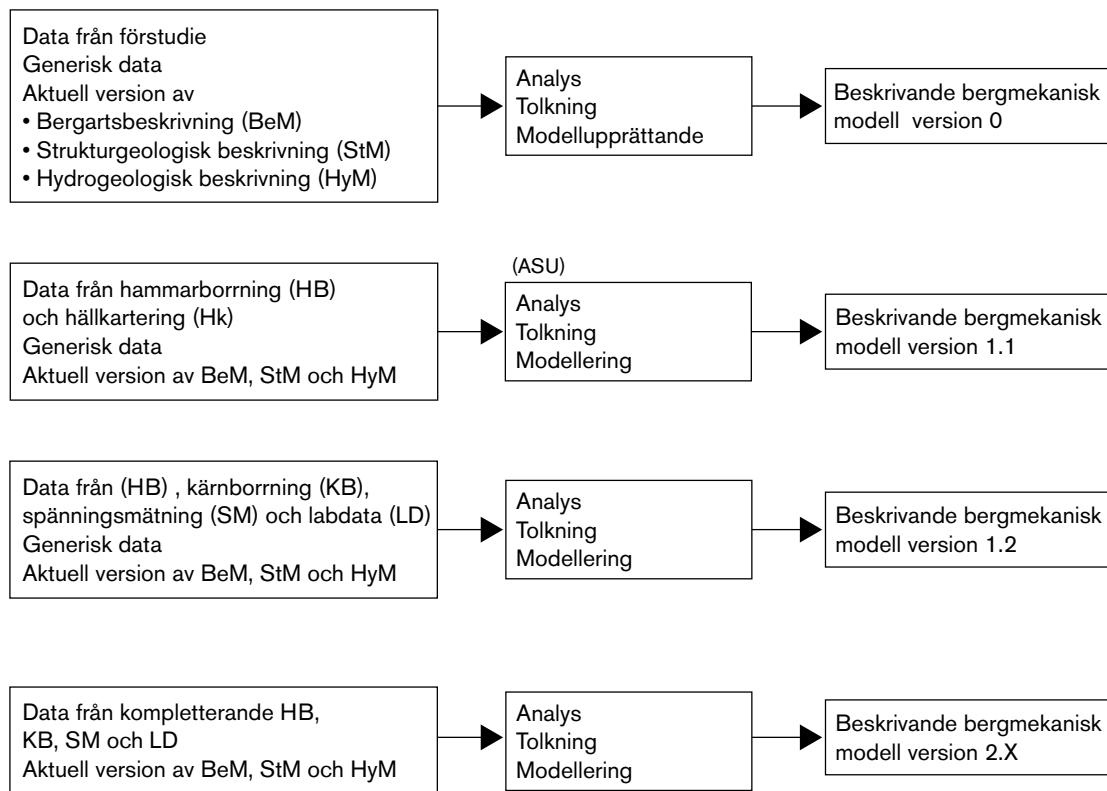
### **5.1.3 Arbetsmetodik och samordning**

Det bergmekaniska ämnesområdet omfattar undersökning och beskrivning av det aktuella områdets bergmekaniska egenskaper. I ett inledande skede används i huvudsak generiska data för att beskriva de bergmekaniska egenskaperna. De första bergmekaniska undersökningarna kommer först att utföras när en prioriterad plats valts.

Undersökningar och karakterisering genomförs stegvis (se avsnitt 2.3.1 och figur 2-5 i kapitel 2). En del av det bergmekaniska undersökningarna (bergspänningsmätning med överborrning) kommer att genomföras under borring av kärnborrhål. Placering av borrhål, borring och genomförande av undersökningar i borrhål som kan störa andra mätningar (t ex hydraulisk spräckning) kräver samordning med andra ämnesområden främst geologi, hydrogeologi och hydrogeokemi. Detta innebär, till exempel, att hydraulisk spräckning utförs sist i borrhålet. Prover för bergmekaniska laboratorieundersökningar tas ut efter det att den rutinmässiga karteringen av borrhåll utförts och de första strukturgeologiska och bergartsmodellerna tagits fram. Figur 5-2 visar att information även hämtas från andra ämnesprogram, främst geologi.

Samverkan krävs med angränsande ämnesområden, geologi, termiska egenskaper och hydrogeologi, såväl vad gäller undersökningarnas planering och utförande som samutvärdering och modellering. Ämnesområdet geologi ger de geometriska förutsättningarna för de strukturer och bergmassor som ska karakteriseras inom ämnesområdet. Samordning måste ske med geologi och hydrogeologi vad gäller fältstudier och placering av borrhål samt med geologi och hydrogeokemi vad det gäller provtagning av borrhåll. Med övriga ämnesområden måste samordning ske vad gäller i vilken ordning olika undersökningar i framförallt borrhål utförs så att de inte stör varandra eller omöjliggör viss provning. SKB /2000b/ redogör för hur den bergmekaniska informationen används inom projektering och säkerhetsanalys.





*Figur 5-2. Översikt över arbetsmetodik och informationsbehov för att ta fram den beskrivande bergmekaniska modellen över platsen och det regionala området.*

## 5.2 Modeller och parametrar

### 5.2.1 Modellernas uppbyggnad

Beskrivningen av de bergmekaniska förhållandena i den platsbeskrivande modellen omfattar bergets mekaniska egenskaper och fördelning i olika skalor. Den innehåller också en beskrivning av de initiala bergspänningarna och spänningens fördelning inom området. Det geometriska ramverket för denna modell utgörs av den geometriska modellen som huvudsakligen baseras på bergets struktur och bergarter (se kapitel 4). En samlad bild av den beskrivande bergmekaniska modellen finns i tabell 5-1.

Den information som tas fram inom det bergmekaniska ämnesområdet utgör indata till framförallt olika bergmekaniska beräkningsmodeller, dels för placering av förvar och geometrisk utformning av förvarets olika delar och dels för att studera långsiktiga mekaniska processer.

**Tabell 5-1. Kortfattad presentation av den bergmekaniska modellen.**

---

**Beskrivande bergmekanisk modell**

---

**Modellens syfte**

De parametrar som ingår i modellen ska utgöra underlag för projektering och säkerhetsanalys och de analyser som genomförs i dessa steg. Modellen ska för en given undersökt volym beskriva de initiala bergspänningarna samt fördelningen av bergmekaniska egenskaper såsom deformations- och hållfasthets-egenskaper dels hos det intakta berget, hos sprickor och svaghetszoner i bergvolymen samt hos bergmassan sedd som en enhet bestående av intakt berg och sprickor. Modellen ska också beskriva bergkvaliteten med hänsyn till byggbarhet.

**Processbeskrivning**

Beskrivning av de processer som givit upphov till nuvarande fördelningen av bergspänningar och egenskaper inom det aktuella området.

---

**Modellens beståndsdelar**

---

**Geometriskt ramverk**

Bas för det geometriska ramverket utgörs av den bergartsmodell och den strukturgeologiska modell som upprättas inom ämnesområdet geologi samt den hydrogeologiska modellen som tas fram inom hydrogeologi. Med utgångspunkt från de undersökningar som utförs på det intakta berget och sprickorna kan den geometriska modellen delas upp ytterligare för att få volymsenheter med likartade egenskaper.

**Parametrar**

Spänningar: magnitud och riktning på initiala bergspänningar, spänningar i relation till tektoniska strukturer.  
Intakt berg: deformations- och hållfasthetsegenskaper, densitet, porositet, dynamiska parametrar, vittringsgrad och omvandlingsgrad.  
Sprickor: deformations- och hållfasthetsegenskaper, statistisk fördelning av sprickgeometrier.  
Bergmassan: deformations- och hållfasthetsegenskaper, seismisk gånghastighet.  
Bergklassningssystem: som Q-index, RMR, GSI, RMI.  
Se vidare tabell 5-2.

**Datarepresentation**

En jämn fördelning av data eftersträvas inom den aktuella volymen. I huvudsak gäller dock att konstanta parametervärden och indexvärden knyts till utvalda objekt t ex zoner för att representera och karakterisera valt objekt i bergvolymen. Statistisk fördelning eftersträvas för representation.

**Randvillkor**

Initiala bergspänningar.

**Numeriska verktyg**

RVS används vid tolkning och redovisning av den upprättade modellen. Numeriska beräkningsmodeller typ 3DEC används för att simulera de processer som skapat nuvarande fördelning av bergspänningar och egenskaper.

**Beräkningsresultat**

Fördelning av egenskaper enligt ovanstående parameterlista samt fördelning, magnitud och orientering av initiala bergspänningar inom området.

---

## **5.2.2 Ingående parametrar**

Tabell 5-2 sammanfattar vilka parametrar som ingår i den mekaniska beskrivningen. Dessa parametrar behöver i regel tolkas från resultaten av de olika undersökningarna. Tabellen bygger på de tabeller som togs fram för parameterrapporten /Andersson m fl, 1996/ och den revision som skedde vid arbetet med krav och kriterier /Andersson m fl, 2000/ och vid framtagandet av det generella programmet /SKB, 2000b/. För att upprätta den bergmekaniska beskrivningen behövs dessutom information från flera andra ämnesområden, speciellt geologi (se avsnitt 5.2.3).

**Tabell 5-2. Sammanställning av bergmekaniska parametrar som ingår i den bergmekaniska modellen. Tabellen visar också när parametern huvudsakligen bestäms (se förklaring i tabell 2-3).**

Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för
		FS	IPLU	KPLU	DETU	
Sprickzoner	– Geometri (se geologitabell)		x	x	x	För att dela in berget i olika bergmassor i den beskrivande bergmekaniska modellen
Mekaniska egenskaper för sprickor i olika bergmassor	– Deformationsegenskaper i normalled			x	x	Diskret bergmekanisk modell, indata deformationsegenskaper för bergmassa
	– Deformationsegenskaper i skjuvled			x	x	
	– Hållfasthet vid skjuvning (JRC (sprickråhet), JCS (sprickväggens tryckhållfasthet), $\phi_b$ (basfriktion), $\phi_r$ (friktion efter brott))			x	x	
Mekaniska egenskaper för intakt berg i olika bergmassor	– Elasticitetsmodul (E-modul)		x	x	x	Diskret bergmekanisk modell, indata deformationsegenskaper för bergmassa
	– Poissons tal ( $\nu$ )		x	x	x	
	– Hållfasthet ( $\sigma_{ci}$ , $m_i$ , $s$ , $a$ enligt Hoek & Browns brottkriterium)		x	x	x	
	– Draghållfasthet		x	x	x	Bedöma borrarbarhet
– Inträngningsindex			x	x		
Mekaniska egenskaper för olika bergmassor	– Elasticitetsmodul (E-modul)			x	x	Bergmekanisk modell
	– Poissons tal ( $\nu$ )			x	x	
	– Bergklassning (RMR, Q) olika system		x	x	x	Bestämning av deformations- och hållfasthetsegenskaper
	– Dynamisk gånghastighet tryckvåg		x	x	x	Modell för dynamisk analys
	– Dynamisk gånghastighet skjuvvåg			x	x	Modell för dynamisk analys
– Hållfasthet ( $\sigma_{ci}$ , $m_b$ , $s$ , $a$ enligt Hoek & Browns brottkriterium)			x	x	Bergmekanisk modell	
Densitet och termiska egenskaper	– Densitet		x	x	x	Bergmekanisk modell
	– Temperaturutvidgningskoeff.		x	x	x	
Randvillkor och stödjande data	– In-situ-spänningar, magnitud och riktningar		x	x	x	Bedömning stabilitet
	– Observerade deformationer och seismisk aktivitet	x	x			Bergmekanisk modell "Validering"

### 5.2.3 Modellverktyg och planerade analyser

#### Tolkning och extrapolation av data

Det geometriska ramverket utgörs av den geometriska modellen som huvudsakligen baseras på bergets struktur och bergarter (se kapitel 4). Varje del i den geometriska modellen åsätts mekaniska egenskaper och initiala bergspänningar, se figur 2-4. Den geometriska fördelningen utgår från de deformationszoner och områden med olika bergarter som ges av den geologiska beskrivningen (se kapitel 4). Avsnitt 5.3 redogör mer detaljerat för hur de enskilda parametrarna bestäms utifrån olika undersökningsmetoder.

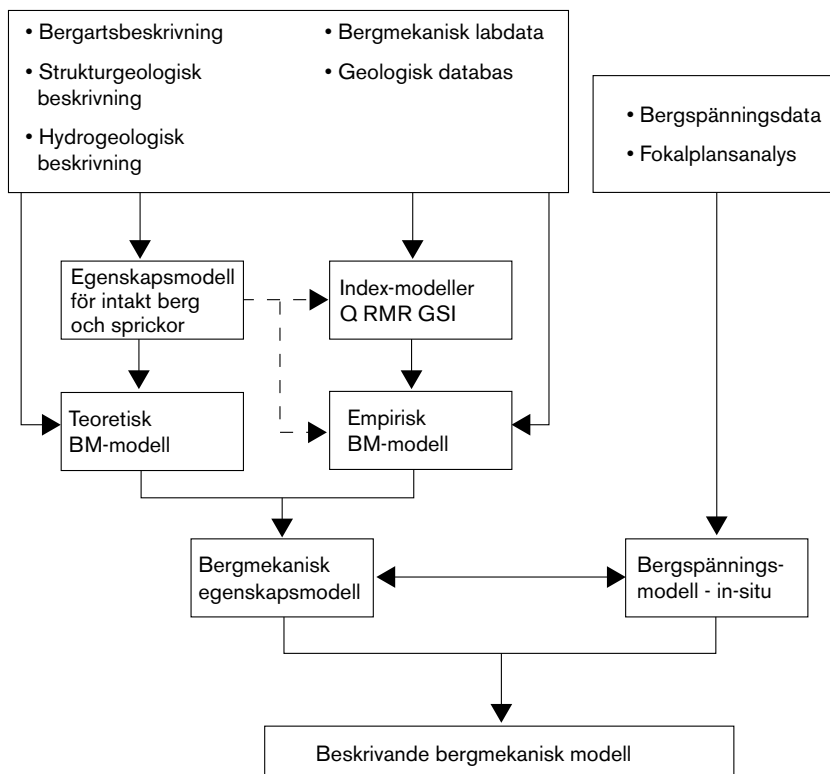
*Tolkning av egenskaper för intakt berg och sprickor:* En jämn fördelning av laboratoriedata eftersträvas inom den aktuella volymen. Statistisk fördelning eftersträvas för representation. I huvudsak gäller dock att konstanta parametervärden knyts till utvalda enheter t ex zoner och bergenheter för att representera och karakterisera vald enhet i bergvolymen. Indelningen kommer att utgå från den geologiska bergartsbeskrivningen. En ytterliggare uppdelning kan bli aktuell med hänsyn till t ex vittringsgrad.

*Tolkning av bergmassans egenskaper:* Baserat på en beskrivning av berggrundens geologi och tektonik samt en provning av ingående bergarters och sprickors egenskaper kommer bergmassans egenskaper att utvärderas. Flera olika tillvägagångssätt kan tänkas. Ett empiriskt sätt innebär att man med hjälp av geologisk beskrivning samt något klassificeringssystem, empiriska samband samt erfarenhet från liknande områden utvärderar egenskaperna hos bergmassan. Ett annat sätt är att man utifrån teoretiska överväganden baserat på mätresultat kan beskriva bergmassans egenskaper. Dessa överväganden bygger på en uppmätning av spricksystemets geometri, sprickorna och det intakta bergets egenskaper. Ett tredje sätt är att man genom in-situ-provning direkt provar bergmassans uppförande och därmed egenskaperna. Detta görs från undermarksutrymmen, och blir därför aktuellt först i detaljundersökningsskedet. Kombinationer av tillvägagångssätten kan givetvis förekomma. På grund av de svårigheter som föreligger vid utvärderingen av bergmassans egenskaper och därmed osäkerheten i utvärderingsresultaten kan en jämförande analys av resultaten från olika utvärderingssätt minska osäkerheten i förutsägelsen av bergmassans egenskaper. Genom in-situ-provning av bergmassans egenskaper i samband med att tunnarna till förvaringsnivån drivs minskar osäkerheten successivt och kunskapen om bergmassans egenskaper förbättras. Under platsundersökningsskedet kommer de två första alternativen att drivas parallellt och en sammanvägning görs när den bergmekaniska egenskapsmodellen tas fram.

*Tolkning av bergspänningsfördelning:* Den rådande bergspänningsfördelningen är effekten av yttre påverkan på området, strukturgeologiska förutsättningar och fördelningen av deformation- och hållfasthetsegenskaper inom området. För att ta fram en modell över bergspänningarna inom området kan numeriska modeller användas. Randvillkor tolkas med stöd av de strukturgeologiska förutsättningarna och fokalplansanalys från den seismiska monitoreringen. Egenskapsfördelningen utgör materialegenskaperna i den numeriska modellen. De punktbestämningar av spänningsfördelningen som görs i borrhål vid platsundersökningen används för att kalibrera den numeriska modellen. Den numeriska modellen kan under platsundersökningsskedet användas vid val av borrhåll samt för att göra prognoser för planerade mätningar. När de beskrivande bergmekaniska modellerna upprättas används den numeriska modellen för att beskriva den rådande fördelningen av bergspänningarna inom hela det studerade området.

Figur 5-3 visar ett flödesschema över arbetsmetodik vid framtagande av den beskrivande bergmekaniska modellen. I ett första steg upprättas modeller i RVS över det intakta bergets egenskaper, sprickornas egenskaper och klassningsindex. För att uppskatta bergmassans egenskaper följs två parallella linjer, en empirisk linje där man utgående från klassningsindex och empiriska samband uppskattar bergmassans egenskaper och en linje där man från teoretiska modeller och delegendskaper uppskattar bergmassans egenskaper. Vid upprättande av den slutliga egenskapsmodellen för bergmassan jämkas resultatet av dessa två linjer samman.

Parallellt som egenskapsmodellen tas fram upprättas en numerisk modell över området där olika initialspänningstillstånd kan genereras genom att påföra yttre last- och deformationsvillkor. När egenskapsmodellen är klar kalibreras bergspänningsmodellen mot de punktvis uppmätta bergspänningarna. Den numeriska modellen ger fördelningen av spänningsmagnituder och riktningar i hela modellområdet.



Figur 5-3. Flödesschema för framtagande av beskrivande bergmekanisk modell.

Vid upprättande av den beskrivande bergmekaniska modellen och som indata till kopplade analyser behövs indata från andra ämnesprogram. Kopplade analyser som kan bli aktuella är termo-mekaniska analyser där temperaturhöjningen påverkar spänningsfördelningen och deformationerna i den bergmassa som värms upp. En annan typ av koppling är termo-hydro-mekaniska analyser där temperaturhöjning och förändringar i det mekaniska systemet påverkar vattenströmningen genom sprickor och bergmassan som helhet. Tabell 5-3 ger en sammanställning av parametrar som hämtas från andra program.

Tabell 5-3. Översikt över parametrar som hämtas från andra program.

Parameter	Bestäms inom ämnesprogram
Läge av regionala och lokala sprickzoner	Geologiska programmet
Stokastisk fördelning av lokala mindre sprickzoner	Geologiska programmet
Stokastisk fördelning (storlek, riktning, densitet) av enskilda sprickor	Geologiska programmet
Termiska egenskaper hos intakt berg	Termiska programmet
Hydrauliska egenskaper hos sprickzoner	Hydrogeologiska programmet
Hydrauliska egenskaper hos olika bergmassor	Hydrogeologiska programmet
Regional seismisk aktivitet	Geologiska programmet

## **Beräkningsverktyg**

För analys av olika mekaniska processer kommer olika typer av bergmekaniska beräkningsverktyg att användas. Beräkningsverktygen kan vara allt från analytiska lösningar till numeriska beräkningsprogram. De numeriska beräkningsverktygen kan utgöras av randelement-, finita element- eller differensmetoder. Beroende på den process eller den problemställning som ska analyseras kommer berget att modelleras som ett kontinuummaterial eller modelleras med diskreta element för bergblock och sprickor. Möjligheten till komplexitet och detaljrikedom i sådana numeriska beräkningsmodeller kan begränsas av tillgänglig datakraft. Där sker dock en kontinuerlig utveckling.

## **Prognoser**

De bergmekaniska modelleringverkygen används inom layout och bygganalys för placering av förvar, utformning av tunnlar, orientering av tunnlar och placering av deponeringshål. Inom funktion och säkerhetsanalys används bergmekaniska beräkningsmodeller för modellering av långsiktiga processer. Dessa modeller kan även vara koplade t ex termomekaniskt, hydromekaniskt och hydrotermiskt.

I tabell 5-4 redovisas en sammanställning av problemställningar som ska analyseras och vilken typ av analyser som kommer att genomföras på det underlag som tas fram och presenteras i den bergmekaniska beskrivningen (modell). Själva analyserna genomförs inom projektering och säkerhetsanalys.

## **5.3 Karakteriseringsmetoder**

För bestämning av parametrarna enligt kapitel 5.2.2 krävs både fält och laboriemetoder. I tabell 5-5 sammanfattas dessa metoder och i följande delavsnitt kommenteras kort de metoder som kan komma att användas.

### **5.3.1 Bergspänningsmätning**

För att bestämma det ursprungliga spänningstillståndet i bergmassan på en kandidatplats kommer bergspänningsmätningar att utföras. Flera metoder för bergspänningsmätningar finns, mer eller mindre etablerade. De två vanligaste metoderna för direkt bergspänningsmätning är överborrning och hydraulisk spräckning.

Överborrning kan utföras i borrhål med en minsta diameter av 76 mm. Metoden ger de tre huvudspänningarna och deras riktning och kan användas i alla borrhålsriktningar.

Hydraulisk spräckning kan utföras i olika borrhålsdimensioner. Metoden ger spänningarna i planet vinkelrätt borrhålet. Mätningarna utförs i företrädesvis vertikala borrhål med en avvikelse från vertikalen på maximalt 30 grader. Mätningen ger bergspänningarna i horisontalplanet.

Vid höga spänningsnivåer minskar tillförlitligheten hos överborrningsmetoden på grund av mikrosprickbildning i borrhållarna. Mätning av P-vågshastigheten längs och tvärs borrhållarna ger en god indikation om mikrosprickbildning förekommer om resultaten kan jämföras med motsvarande mätningar in-situ. Har bergarten anisotropa deformationsegenskaper (minst 10 till 15 % skillnad i elasticitetsmodul i ortogonala riktningar)

**Tabell 5-4. Sammanställning av problemställningar som analyseras med modellberäkningar.**

Problemställning	Typ av analys
Tunnelorientering och bedömning av risk för smällberg	Numeriska analys med finita element och finita differensmetoder, analys av kilstabilitet
Avstånd mellan deponeringstunnlar	Kopplad termo-mekanisk analys
Utformning av tunnlar, bergrum och passage genom större sprickzoner	Numeriska analys med finita element- och finita differensmetoder, analys av kilstabilitet
Inverkan av svälltryck	Numeriska analys med finita element- och finita differensmetoder
Inverkan av glaciation	Numeriska analys med finita element- och finita differensmetoder
Inverkan av jordskalv	Dynamisk analys

**Tabell 5-5. Metoder och status för ämnesområdet Bergmekanik.**

Metod	Parameter	Kommentar (referens)
<b>Undersökning av bergspänningar</b>		
<b>Bergspänningsmätningar</b>	<b>Bergspänningsresultat</b>	
• överborring	• storlek och riktning; 3D-metod	Metodbeskrivning, Amadei och Stephansson, 1997.
• hydraulisk spräckning	• storlek och riktning; 2D-metod	Metodbeskrivning, Stephansson, 1983.
• hydraulisk test av existerande sprickor (HTPF)	• storlek och riktning; 3D-metod	Metodbeskrivning, Ljunggren och Raillard, 1987.
• överborring på hällytor	• riktning, 2D-metod	
• borehole break-outs, mätning med caliper	• riktning huvudspänningar i plan vinkelrätt borrhål	Metodbeskrivning, Dart och Zoback, 1987.
• kartering av core-discing (skivuppsprickning av borrhärna)	• höga bergspänningar i borrhållsväggen i förhållande till bergets hållfasthet	Karteringsinstruktion.
• fokalplansanalys från seismisk monitorering, lokalt nätverk	• spänningsfält (riktning)	Metodbeskrivning, Engelder, 1993.
<b>Undersökning av mekaniska egenskaper</b>		
<b>Bergmekaniska laborietester</b>	<b>Mekaniska egenskaper</b>	
• enaxliga tryckförsök	• hållfasthet, elasticitetsmodul och Poissons tal	Standard ISRM, 1978.
• bestämning av P-vågshastighet	• P-vågshastighet	Standard ISRM, 1977.
• treaxliga tryckförsök	• hållfasthet	Standard ISRM, 1983.
• brasilianskt test	• draghållfasthet	Standard ISRM, doc No 8 1977.
• normalbelastningsförsök på sprickor	• draghållfasthet, normalstyvhet	Standard ISRM, doc No 1 1974.
• skjuvförsök på sprickor	• skjuvhållfasthet, skjuvstyvhet	Standard ISRM, doc No 1 1974.
• kärnkartering	• RMR, Q-värde	Karteringsbeskrivning, Bieniawski, 1976, Grimstad och Barton, 1993.
<b>Övriga laborietester intakt berg</b>	<b>Övriga egenskaper</b>	
• bestämning av temperaturutvidgning	• längdutvidgningskoefficient	Standard ASTM D4535-85 eller ASTM D5335-92.
• densitetsbestämning	• densitet	Standard DIN 52102-RE VA.
• röntgendiffraction	• lermineralbestämning	
<b>Bearbetning av geofysikdata</b>	<b>Tolkningsunderlag</b>	
seismiska mätningar och sonarloggning	dynamisk gånghastighet	Metodbeskrivning (referens saknas).

**Tabell 5-6. Parametrar för att beskriva spänningstillståndet i bergmassan.**

<b>Parameter</b>	<b>Undersökningsmetod</b>
Huvudspänningarnas orientering, stupning och stupningsriktning	Bestämning genom överborrning Brott i borrhålsväggar
Storlek på huvudspänningarna	Bestämning genom överborrning eller hydraulisk spräckning Hydrauliska tester på befintliga sprickor

ger metoden också felaktiga resultat om man rutinmässigt vid utvärderingen av överborrningsdata antar att kärnan har isotropa egenskaper. Metoder för utvärdering som tar hänsyn till anisotropi i deformationsegenskaper finns framtagna /Amadei, 1996/.

Tabell 5-6 sammanfattar de parametrar som används för att beskriva spänningstillståndet och hur de bestäms.

### **5.3.2 Laboratoriemetoder för bestämning av mekaniska egenskaper hos intakt berg**

#### ***Allmänna egenskaper***

Densitet hos det intakta berget bestäms på upptagna borrhärlor enligt standard DIN 52102-RE VA.

#### ***Termisk längdutvidgningskoefficient***

Det intakta bergets termiska längdutvidgningskoefficient bestäms vid olika temperaturer genom laboratorieförsök på upptagna borrhärlor. Provnings ska ske på prover med olika orientering i förhållande till bergartens struktur eftersom längdutvidgningskoefficienten kan vara olika i olika riktningar.

Provningsmetod där mätning sker med mekaniska dilatometer finns beskriven i ASTM D4535-85 och provningsmetod där mätning sker med trådtöjningsgivare i ASTM D5335-92.

#### ***Deformationsegenskaper***

Elasticitetsmodul,  $E$  och Poissons tal,  $\nu$  bestäms vid enaxliga belastningsförsök på borrhärlor. Belastning, axialtöjning och radielltöjning mäts. Provnings utförs enligt standarden "Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression, ISRM Committee on Laboratory Tests, September 1978." I standarden finns krav på provpreparering, krav på mätnoggrannhet, belastningshastighet och utvärderingsmetodik. För att studera uppförandet efter brott utförs försöket med konstant deformationshastighet i en styv belastningsmaskin.



## Hållfasthet

Hoek och Brown /1980/ och Hoek /1983/ föreslog ett empiriskt samband för intakt bergs hållfasthet känt under namnet Hoek-Browns brottkriterium. Under årens lopp har kriteriet modifierats och den senaste versionen presenterades av Hoek m fl /1992/. Det modifierade kriteriet har följande utseende:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c ( m_i \sigma_3 / \sigma_c + s )^a \quad (5.1)$$

där  $\sigma_1$  är största huvudspänningen vid brott

$\sigma_3$  är minsta huvudspänningen vid brott

$\sigma_c$  är den enaxliga tryckhållfastheten hos det intakta berget

$m_i$ ,  $s$  och  $a$  är materialkonstanter.

För bestämning av tryckhållfastheten ska försöken utföras på prov med en diameter av cirka 50 mm och en längd av cirka 100 mm. Både  $\sigma_c$  och  $m_i$ ,  $s$  och  $a$  bestäms genom att anpassa brottenvelopen till resultat från triaxialförsök. Försök bör utföras vid minst tre olika sidotryck,  $\sigma_3$ , där ett försök utförs med  $\sigma_3 = 0$ . För intakt berg kan  $a$  sättas lika 0.

Tabell 5-7 redovisar en sammanställning av vilka parametrar som ska bestämmas på det intakta berget och vilka provningsmetoder som ska användas.

**Tabell 5-7. Egenskaper hos intakt berg och metoder för bestämning.**

Parameter	Undersökningsmetod
Densitet	Bestäms på borrhävar
Längdutvidgningskoefficient	Bestäms på borrhävar
Tryck- och skjuvhållfasthet	Bestäms på borrhävar vid enaxliga- och triaxiella tryckförsök
Draghållfasthet	Bestäms på borrhävar med brasilianskt prov
Elasticitetsmodul	Bestäms på borrhävar vid enaxliga- och triaxiella tryckförsök
Poissons tal	Bestäms på borrhävar vid enaxliga- och triaxiella tryckförsök
P-vågens gånghastighet	Bestäms på borrhävar vid enaxliga tryckförsök

### 5.3.3 Bestämning av mekaniska och hydromekaniska egenskaper hos sprickor

#### Allmänt

En bergmassas mekaniska egenskaper karakteriseras av de sprickor som genomkorsar berget. De faktorer som påverkar sprickans mekaniska egenskaper är bland annat ytråheten, vågigheten, spricköppningen, sprickutbredning, sprickfyllnad och det omgivande bergets hållfasthet och spänningar. Dessutom finns ett antal faktorer att beakta vid bestämning av de sprickmekaniska egenskaperna såsom skaleffekter, begränsad styvhet, omatchade eller matchade sprickytor, höga spänningar och dynamiska belastningar.

#### Sprickors skjuvhållfasthet

Barton och medförfattare /1973, 1976, 1977, 1990/ har studerat uppförandet hos naturliga bergsprickor och har föreslagit följande samband för att beskriva sprickornas skjuvhållfasthet.

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan (\phi_b + JRC \cdot \log_{10} (JCS / \sigma_n)) \quad (5.2)$$

I detta samband ingår ett antal olika parametrar som måste bestämmas. I tabell 5-8 redovisas en sammanställning av dessa parametrar och hur de kan bestämmas. Finns det fyllnadsmaterial i sprickan blir sprickans skjuvhållfasthet lika med fyllnadsmaterialets skjuvhållfasthet. I detta fall bestäms fyllnadsmaterialets skjuvhållfasthet genom direkta skjuvförsök

**Tabell 5-8. Parametrar för att beskriva sprickors skjuvhållfasthet.**

Parameter	Metod för bestämning
JRC, sprickans råhetskoefficient	Tilttest, geologisk beskrivning, jämförelse med standardprofiler, uppmätning med profilometer, utvärdering av direkta skjuvförsök
JCS, sprickväggens tryckhållfasthet	Test med Schmidthammare
$\phi_b$ , basfriktionsvinkel	Tilttest, direkta skjuvförsök på torra sågade ytor
$\phi_r$ , friktionsvinkel efter brott	Empiriska samband, direkta skjuvförsök
Eventuellt fyllnadsmaterial i sprickan	BIPS, identifiering av material vid kärnkartering

**Tabell 5-9. Parametrar för beskrivning av sprickors deformationsegenskaper.**

Parameter	Metod för bestämning
$k_n$ , sprickans normalstyvhet	Normalbelastningsförsök i skjuvbox, empiriska samband med JRC och JCS
$k_s$ , sprickans skjuvstyvhet	Direkt skjuvförsök, empiriska samband med JRC och JCS

### **Sprickors deformationsegenskaper**

Deformationen kan förenklat beskrivas i tre steg: först en elastisk deformation med små rörelser sedan med en skjuvning längs sprickklackarna med en normaldeformation och skjuvrörelse och slutligen en glidning längs ytan med i huvudsak skjuvrörelser. Innan skjuvbrott är deformationerna små och sambandet mellan normalspänning,  $\sigma_n$ , och normaldeformation,  $u_n$ , respektive skjuvspänning,  $\tau$ , och skjuvrörelse,  $u_s$ , kan tecknas

$$\sigma_n = k_n u_n \quad (5.3)$$

$$\tau = k_s u_s \quad (5.4)$$

där  $k_n$  är sprickans normalstyvhet och  $k_s$  skjuvstyvheten. Bandis /1980/ och Bandis m fl /1981/ har angivit empiriska samband för sprickors normalstyvhet. För skjuvstyvheten har Barton och Choubey /1977/ angivit empiriska samband. I tabell 5-9 redovisas parametrar för beskrivning av enskilda sprickors deformationsegenskaper och metoder för att bestämma dessa.

### **Sprickors hydromekaniska egenskaper**

De hydromekaniska beteendet redovisas vanligtvis som sprickans hydrauliska konduktivitet mot den effektiva normalspänningen eller skjuvrörelsen och bestäms genom laboratorieprov. I laboratorieförsöken erhålls normalt en minskande hydraulisk konduktivitet vid en ökande normalspänning och en ökande hydraulisk konduktivitet vid en större skjuvrörelse.

Sambandet mellan hydraulisk konduktivitet och den effektiva normalspänningen eller skjuvrörelsen kan erhållas vid direkta skjuvförsök genom att mäta vattenströmmen genom sprickan.

### **Direkta skjuvförsök**

Skjuvförsök i laboratorium kan utföras med konstant normalbelastning, CNL, eller med konstant normalstyvhet, CNS. CNS-försök simulerar verkliga förhållanden bättre men är svårare att analysera och tolka. Båda typerna av försök kan utföras med vattentryck och vattenströmning genom sprickplanet för att studera de hydromekaniska kopplingarna.

Skjuvförsöket startas normalt med en på- och avlastningscykel i normalled och därefter påförs en skjuvkraft med konstant deformationshastighet. Flera försök görs med varierande normalspänning. Under försöket registreras normal- och skjuvkraften samt normal- och skjuvrörelsen. Resultaten redovisas vanligtvis i  $\tau - \sigma$ ,  $\tau / \sigma - \mu_s / \mu_n$  och  $\mu_s - \mu_n$  diagram. Diagrammen analyseras tillsammans med annan information från exempelvis tilttester.

Resultaten från CNL- och CNS-försök kan avvika från varandra samt skilja sig från andra sätt att beräkna hållfastheten och styvheterna, Olsson /1998/.

### 5.3.4 Metoder för bestämning av mekaniska egenskaper hos olika bergmassor

När bergmassan belastas deformeras dels de intakta blocken, dels sker skjuvrörelser, kompression eller expansion av sprickor. Deformationsegenskaper och hållfasthet hos bergmassan beror alltså inte bara på det intakta bergets egenskaper utan också på frekvens, orientering och mekaniska egenskaper hos sprickorna. Deformation och hållfasthetsegenskaper hos bergmassan är skalberoende; i en stor bergvolym är det större sannolikhet att det finns stora sprickzoner.

Deformationsegenskaper och hållfasthet hos enskilda sprickor och det intakta berget kan tillfredställande beskrivas med töjning-spännings samband och brottvillkor enligt tidigare kapitel. Att i fält testa och bestämma de mekaniska egenskaperna för en större bergvolym är ofta inte praktiskt möjligt. Vanligen uppskattas därför en bergmassas mekaniska egenskaper med hjälp av empiriska samband mellan egenskapen och något bergklassnings-system. Förutsatt att en studerad bergvolym är tillräckligt stor att innehålla fyra eller fler spricksystem fungerar detta bra. Detta kan också användas i ett inledande skede för att uppskatta bergmassans kvalitet.

För en bergvolym med få sprickor finns inga allmänna och enkla samband. En sådan bergmassa uppvisar vanligen anisotropa egenskaper beroende på sprickornas riktning. För några renodlade fall kan en sådan bergmassas egenskaper beräknas om det intakta bergets och sprickornas egenskaper är kända.

I bergmekaniska beräkningsmodeller för lokala studier kan enskilda sprickor och det intakta berget modelleras men i storskaliga modeller kan inte sprickorna modelleras explicit utan deras närvaro måste inkluderas i materialmodellen för bergmassan.

#### **Bergmassans hållfasthet**

Antalet spricksystem i bergmassan och sprickornas mekaniska egenskaper påverkar huvudprinciperna för bestämning av bergmassans hållfasthet. I en bergmassa med ett eller två spricksystem påverkas bergmassans hållfastheten främst av sprickornas egenskaper. Bergmassans hållfasthet baseras då på sprickornas skjuvhållfasthet /Hoek, 1994/. I ett mer uppsprucket berg med flera spricksystem fås ett mer isotropt förhållande och de mekaniska egenskaperna kan bestämmas ur empiriska relationer. Hållfastheten kan t ex beskrivas med Mohr-Coulombs brottkriterium:

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi' \quad (5.5)$$

där  $c'$  och  $\phi'$  är bergmassans kohesion respektive friktionsvinkel baserade på effektivspänningar. Dessa parametrar kan uppskattas med empiriska relationer baserade på något bergklassningssystemen.

Hållfastheten vid en mer uppsprucken bergmassan kan också beskrivas utifrån Hoek-Browns brottkriterium /Hoek och Brown, 1997/:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (5.6)$$

där  $m_b$ ,  $s$  och  $a$  är materialkonstanter och som kan bestämmas med hjälp av något bergklassningssystem.  $\sigma_{ci}$  är det intakta bergets tryckhållfasthet.

Mohr-Coulombs parametrar ( $c'$  och  $\phi'$  enligt ekvation 5.5), vilka används i många numeriska modeller men som är svårbestämda, kan uppskattas med linjär regression utgående från Hoek–Browns brottkriterium /Hoek och Brown, 1997/.

### **Bergmassans deformationsegenskaper**

Vid en mekanisk analys av ett bergrum i en bergmassa är deformationsbilden av bergrummet innan brott en viktig faktor. En bergmassas elasticitetsmodul,  $E_m$  och Poissons tal,  $\nu$  är svåra att direkt bestämma. Flera empiriska relationer finns mellan  $E_m$  och olika klassningssystem samt beskrivningar av bergmassan. Exempelvis på relationer med klassningssystem /Hoek och Brown, 1997/ är:

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (5.7)$$

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{GSI-10/40} \quad (5.8)$$

Där RMR är klassningstal enligt RMR-systemet, GSI är *geological strength index* och  $\sigma_{ci}$  är det intakta bergets tryckhållfasthet.

Ett annat sätt att bestämma  $E_m$  i fält är att mäta den seismiska gånghastigheten. Följande samband gäller mellan gånghastigheten för tryckvågen,  $v_p$ ,  $E_m$ ,  $\nu$  och bergmassans densitet,  $\rho$ .

$$E_m = v_p^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu) / (1 - \nu) \quad (5.9)$$

Poissons tal  $\nu$  antas i regel till samma värde i en bergmassa som i det intakta berget.

### **Empiriska bergklassningssystem**

Det finns ett antal bergklassningssystem. De bygger normalt på erfarenhetsvärden. De mest använda bergklassificeringssystemen är RMR-systemet, "Rock Mass Rating" /Bieniawski, 1989/ och Q-systemet "Tunnelling Quality Index" /Barton m fl, 1974/. Ingående parametrar i systemen framgår av tabell 5-10 och tabell 5-11.

**Tabell 5-10. Ingående delparametrar i RMR-systemet.**

<b>Delparameter</b>	<b>Variationsområde</b>
Hållfasthet hos intakt berg	0–15
RQD	3–20
Avstånd mellan sprickor	5–20
Sprickors egenskaper	0–30
Grundvattenförhållanden	Sätts lika med 15
Orientering av sprickor i förhållande till konstruktion	Sätts lika med 0
RMR är lika med summan av delparametrarna	23–100 (Gäller RMR <sub>99</sub> )

**Tabell 5-11. Ingående delparametrar i Q-systemet.**

Delparameter	Variationsområde
RQD, Rock quality designation	10–100
$J_n$ , Joint set number	0,5–20
$J_r$ , Joint roughness number	0,5–4
$J_a$ , Joint alteration number	0,75–24
$J_w$ , Joint water reduction	Sätts lika med 1,0
SRF, Stress reduction factor	Sätts lika med 1,0
Q-index = $RQD/J_n \cdot J_r/J_a \cdot J_w/SRF$	

Klassningen ska utföras på upptagna borrhävar. De i klassningssystemen ingående delparametrarna redovisas var för sig kontinuerligt längs borrhålet tillsammans med det resulterande klassningsvärdet.

För att kunna använda de empiriska sambanden mellan klassningsvärden och mekaniska egenskaper måste de ursprungliga Q- och RMR-systemen justeras. I Q-systemet sätts delparametrarna  $J_w$  och SRF lika med 1,0 dvs:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \quad (5.10)$$

I  $RMR_{89}$ -systemet måste värdet som tar hänsyn till vattenförhållandena sättas lika med 15 samt värdet som tar hänsyn till sprickornas orientering i förhållande till konstruktionen sättas lika med 0. Det justerade RMR-systemet benämns GSI (Geological Strength Index) enligt Hoek /1994/. För  $RMR_{89}$  större än 23 gäller:

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (5.11)$$

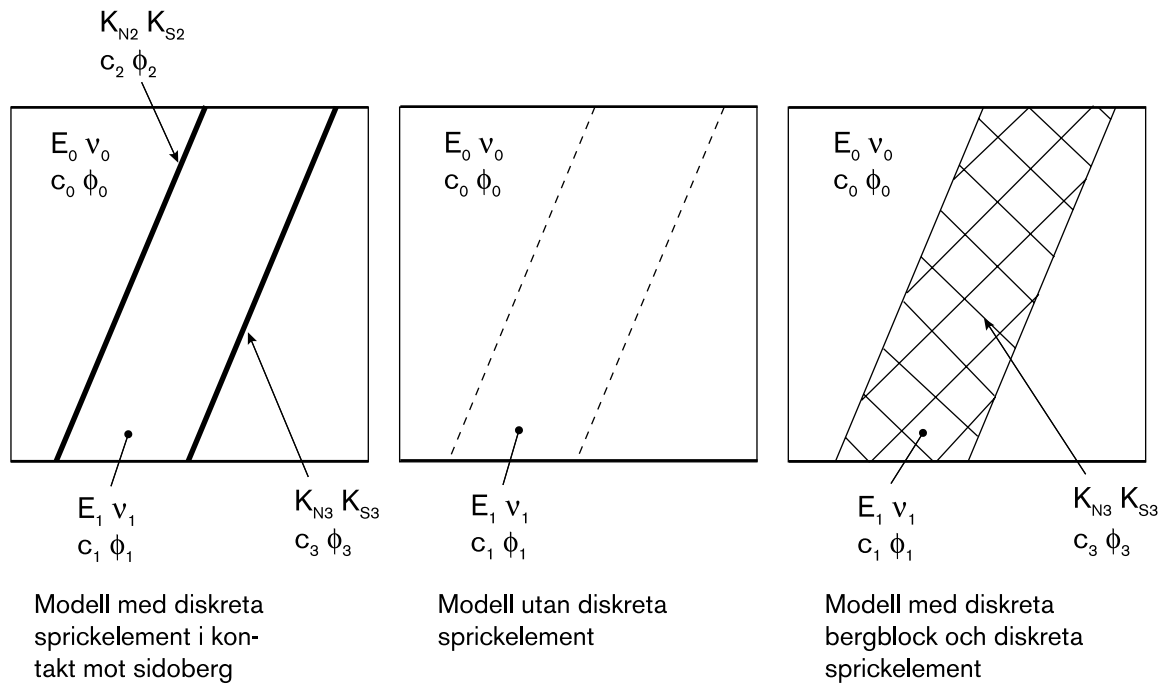
För  $RMR_{89}$ -värden mindre än 23 rekommenderas inte RMR-systemet, utan hänvisar till Q-systemet /Hoek, 1994/.

Förhållanden mellan GSI och  $Q'$  finns beskrivet som:

$$GSI = 9 \cdot \log_e Q' + 44 \quad (5.12)$$

### 5.3.5 Metoder för att beskriva mekaniska egenskaper hos sprickzoner

Beroende på zonen bredd i förhållande till den bergmekaniska modellens storlek modelleras zonen som en bergmassa med specifika egenskaper eller som en diskontinuitet. Se vidare figur 5-4. Det finns viss möjlighet att bestämma en sprickzons egenskaper i normalled i fält med trycktester och samtidig mätning av deformationen tvärs zonen.



*Figur 5-4. Olika metoder att beskriva de mekaniska egenskaperna hos bergmassan i olika sprickzoner. (Efter Andersson m fl /1996/)*

### 5.3.6 Analysstrategi för framtagande av hållfasthets- och deformationsegenskaper

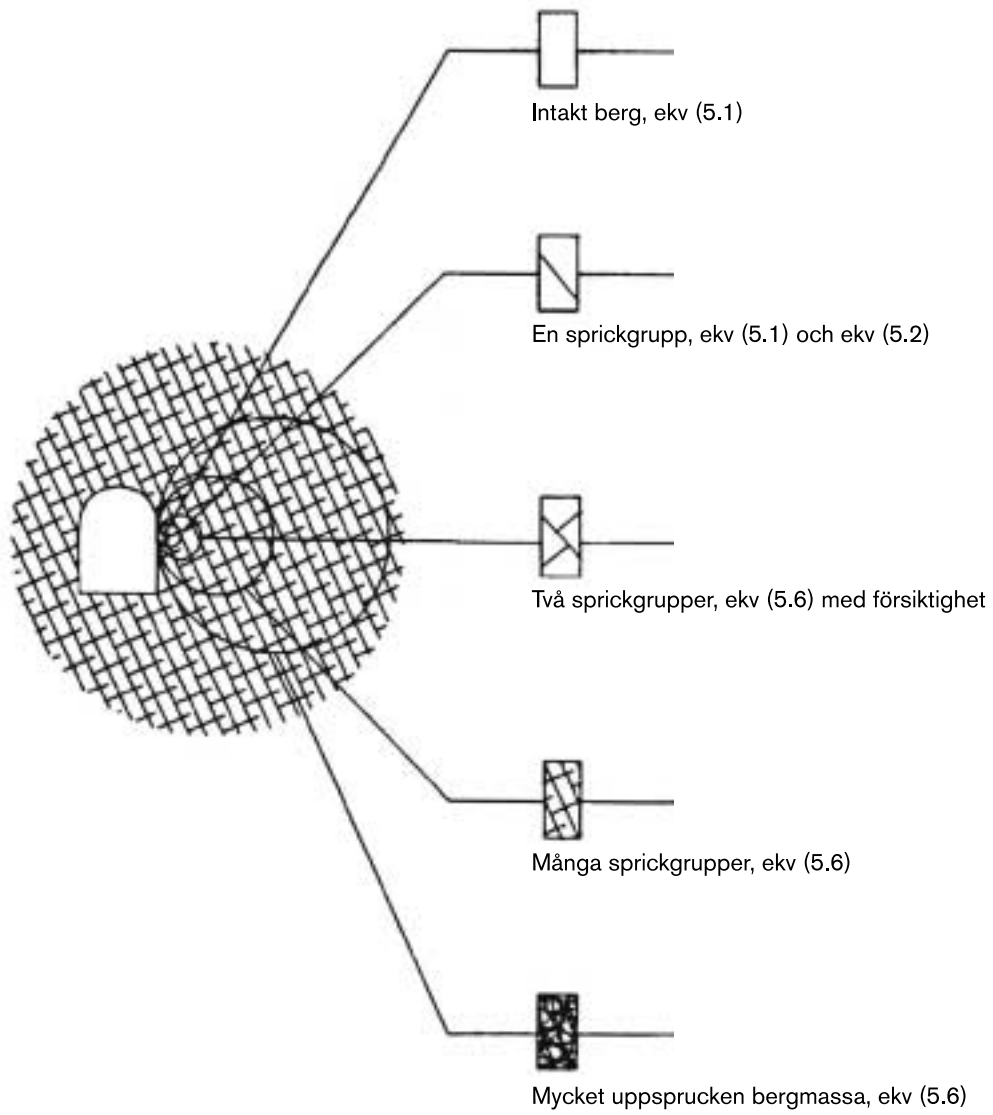
Hållfasthet i intakt berg och starkt uppsprucken bergmassa kan beskrivas med Hoek-Browns brottkriterium. För dessa typfall är egenskaperna isotropa dvs lika i alla riktningar. För övriga typer av bergmassor måste kriteriet användas med stor försiktighet. I figur 5-5 sammanfattas hur hållfastheten i olika typer av bergmassor kan beskrivas.

Hoek-Browns kriterium kan inte användas i en bergmassa med ett dominerande spricksystem. För detta fall kan kriteriet bara användas för det intakta berget medan sprickornas egenskaper måste beskrivas enligt ekvation (5.2).

För en bergmassa med två spricksystem måste Hoek-Browns kriterium användas med försiktighet förutsatt att inget av spricksystemen har ett avgörande inflytande på bergmassans uppförande. Om ett av spricksystemen är betydligt svagare än det andra måste hållfastheten för detta spricksystem behandlas separat enligt ekvation (5.2).

Bestämning av deformationsegenskaper för en bergmassa följer i princip samma riktlinjer som bestämning av hållfasthetsegenskaperna. För en starkt uppsprucken bergmassa kan ekvationerna (5.7) och (5.8) användas medan för en bergmassa med ett eller två spricksystem måste bergmassans egenskaper baseras både på egenskaperna hos det intakta berget och deformationsegenskaperna hos sprickorna.

I ett tidigt skede av platsundersökningen kommer uppskattningen av bergmassans egenskaper att i huvudsak vara baserade på empiriska relationer till bergklassningssystemen. Allteftersom mer data från laborierprovnings av intakt berg, sprickor och geometriska data för spricksystem kommer fram kommer detta att utgöra underlag för uppskattning av egenskaperna hos bergmassan.



*Figur 5-5. Bergförhållanden under vilka Hoek-Browns brottkriterium kan användas.*



## 6 Termiska egenskaper

### 6.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs vilka termiska egenskaper som ska bestämmas och tänkbara karakteriseringsmetoder. I kapitlet beskrivs även hur den mätta informationen tolkas i den termiska modell som utgör en del av den platsbeskrivande modellen.

#### 6.1.1 Inledning

Temperatur och temperaturfördelning är fundamentala tillståndsp parametrar i djupförvaret. Temperaturen påverkar den mekaniska stabiliteten, grundvattenströmningen och den kemiska/biologiska miljön. Bergets termiska egenskaper och temperaturförhållandena inverkar direkt på layout och övrig utformning av djupförvaret.

Bergets temperaturvariation beror av det använda bränslets restvärme, förvarsutformningen, bergets värmeledningsförmåga, värmekapacitet, initial temperatur och bentonitens vattenmättnad. Värmetransporten genom berget sker främst genom värmeledning, som bestäms av bergets värmekapacitet och värmeledningsförmåga. Värmetransport genom strålning och konvektion kan försummas. Värmetransporten genom berget påverkar temperaturen i de olika barriärerna. Vid temperaturförändringar påverkas även bergets volym vilket bestäms av temperaturutvidgningskoefficienten. Denna volymexpansion kan påverka vattenströmningen genom berget.

Temperaturökningen och efterföljande avsvälning medför, via den termiska volymförändringen av berget, spänningsomlagringar i berget i och omkring djupförvarsområdet. När djupförvaret väl är utbyggt utgör temperaturlasten den väsentligaste mekaniska påverkan på förvaret fram till och med mer dramatiska klimatdrivna händelser som permafrost och glaciation.

Goda korrelationer mellan värden baserade på modalanalys (mineralsammansättning) och värmeledningsmätning i fält har erhållits i tidigare studier /Ericsson, 1985 och Sundberg, 1988/. Skillnaden i mineralsammansättning medför olika värmeledningsförmåga hos förekommande bergarter. Kvarter har en värmeledningsförmåga som är 3–4 gånger högre än för andra mineraler och därför har kvartsinnehållet en avgörande betydelse för bergarternas värmeledning.

Storleken på förvarsområdet påverkas av bergets termiska egenskaper eftersom det finns krav på högsta temperatur (100 °C) på kapselytan, se Andersson m fl /2000/. Önskade nivåer kan dock alltid uppnås genom lämplig utformning. Under förutsättning att bergets termiska egenskaper och omgivande temperatur är kända kan problemställningen analyseras och deponeringshåls- och tunnelavstånd bestämmas för given effekt i kapslarna. God värmeledning och hög värmekapacitet ger förutsättningar till att ha ett mer tätt packat förvar.

De *termiska egenskaperna* (värmeledningsförmåga och värmekapacitet) hos berget bestäms med utgångspunkt från mineralsammansättningen samt genom laboratorieundersökningar av upptagna borrhärdar. Resultatet av den termiska parameterbestämningen sammanfattas i en *termisk beskrivning* (modell) där de termiska egenskaperna för olika delar i den geometriska modellen beskrivs, se figur 2-4. För att beräkna den termiska utvecklingen i förvaret och inverkan på förvarets funktion används termiska beräkningsmodeller. Enkla geometrier kan behandlas analytiskt. Vid mera komplicerade fall utnyttjas numeriska lösningsmetoder typ finita element- eller finita differensmetoder.

### **6.1.2 Ämnesspecifika mål**

Det finns inga krav beträffande bergets termiska egenskaper eller omgivande temperatur eftersom tillämpliga funktionskrav alltid kan tillgodoseas med lämplig utformning av förvaret. Andersson m fl /2000/ redovisar vilka önskemål och kriterier som ställs. Med hänvisning till huvudsyftet för de geovetenskapliga undersökningarna (avsnitt 2.2) är huvuduppgiften för det termiska programmet att:

- bestämma initialtemperaturen på förvaringsnivån och identifiera eventuell förekomst av hög geotermisk gradient,
- bestämma fördelningen av de termiska egenskaperna inom kandidatplatsen.

#### ***Inriktning under den inledande platsundersökningen***

Under den inledande platsundersökningen görs en översiktlig bedömning av platsens termiska egenskaper.

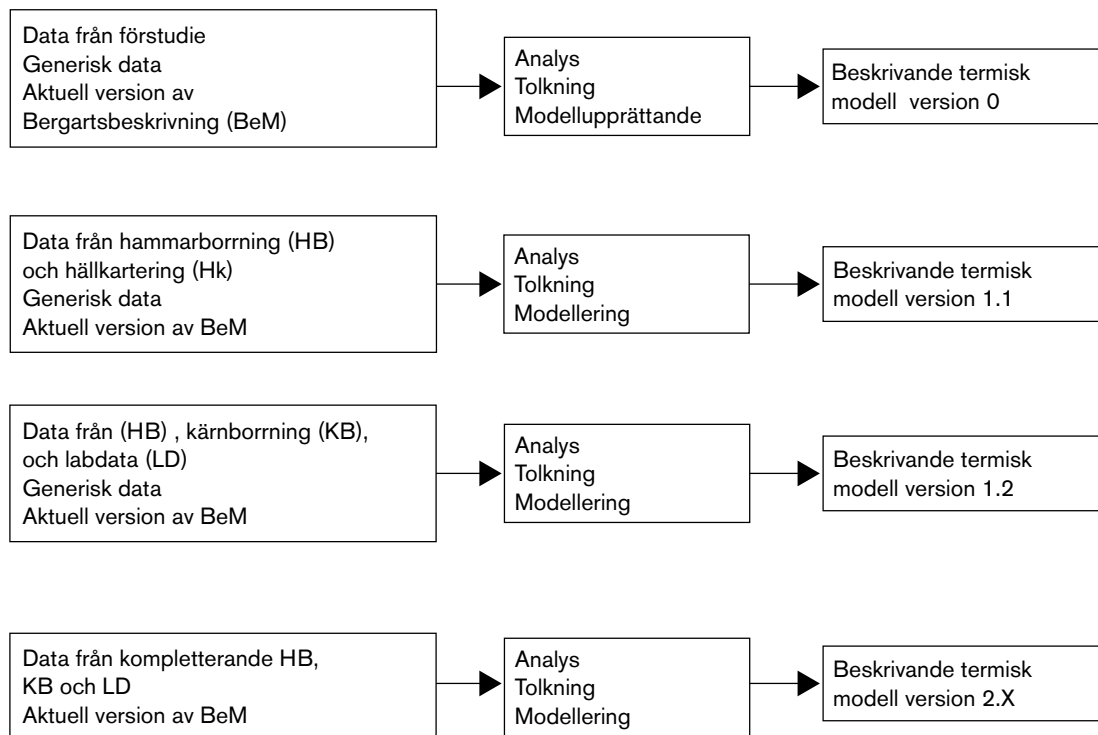
#### ***Inriktning under den kompletta platsundersökningen***

Under den kompletta undersökningen fördjupas karakteriseringen. Platsen ska undersökas och karakteriseras så väl att prognoser av den kommande temperaturutvecklingen i förvaret kan användas som underlag för planerad anläggningsbeskrivning (se SKB /2000b/).

### **6.1.3 Arbetsmetodik och samordning**

De första termiska undersökningarna kommer först att utföras när en prioriterad plats valts. Undersökningar och karakterisering genomförs stegvis (se avsnitt 2.3.1 och figur 2-5 i kapitel 2). Prover för termiska laboratorieundersökningar tas ut efter det att den rutinmässiga karteringen av borrhärdar utförts och de första strukturgeologiska och bergartsmodellerna tagits fram. Figur 6-1 visas att information även hämtas från andra ämnesprogram, främst geologi.

De termiska undersökningarna kommer att genomföras samtidigt med de geologiska och bergmekaniska undersökningarna. De termiska egenskaperna uppskattas främst utifrån kunskap om bergartsammansättning. Typiska värdeområden för de termiska egenskaperna hos den Fennoskandiska sköldens kristallina berggrund har sammanställts utifrån en modifierad bergartsgruppering samt utifrån en statistisk bearbetning av termiska egenskaper baserade på mineralsammansättningar enligt /Sundberg, 1988/.



**Figur 6-1.** Översikt över arbetsmetodik och informationsbehov för att ta fram den beskrivande termiska modellen över platsen och det regionala området.

Kunskapen om huvudbergarterna i den ytliga berggrunden är vanligen god under en förstudie. Under plastundersökningens olika steg sker en successiv uppbyggnad av kunskapsbasen om bergartsfördelningen på större djup. De termiska egenskaper som uppskattas med hjälp av bergartsammansättning kontrolleras med hjälp av laboratoriebestämning av de termiska egenskaperna på upptagna kärnprover från olika förekommande bergarter. Laboratorieundersökningarna kan komma att kompletteras med termiska responstester i borrhål.

Samverkan krävs med angränsande ämnesområden, framförallt bergmekanik och geologi, såväl vad gäller undersökningarnas planering och utförande som samutvärdering och modellering. Ämnesområdet geologi ger de geometriska förutsättningarna för de strukturer och bergmassor som ska karakteriseras. Bergartsmodellen ger förutsättningar för indelning av bergmassan i enheter med samma termiska egenskaper. Inom programmet behandlas bara termiska beräkningsmodeller som beskriver den termiska utvecklingen. Beräkningsmodeller för termomekanisk koppling behandlas inom ämnesområdet bergmekanik och beräkningsmodeller för hydrotermisk koppling behandlas inom ämnesområdet hydrogeologi.

## 6.2 Modeller och parametrar

### 6.2.1 Modellernas uppbyggnad

Beskrivningen av de termiska förhållandena i den platsbeskrivande modellen omfattar bergets termiska egenskaper och initiala temperaturförhållanden i den bergvolym som innesluter djupförvaret. Det geometriska ramverket utgörs av den geometriska modellen, som huvudsakligen baseras på bergets struktur och bergarter (se kapitel 4). En samlad bild av den beskrivande termiska modellen finns i tabell 6-1. Varje del i den geometriska modellen ska åsättas termiska egenskaper och termiskt initialtillstånd.

**Tabell 6-1. Kortfattad presentation av den bergmekaniska modellen.**

---

#### Beskrivande termisk modell

---

##### Modellens syfte

De parametrar som ingår i modellen ska utgöra underlag för projektering och säkerhetsanalys och de analyser som genomförs i dessa steg. Modellen ska för en given undersökt volym beskriva de initiala temperaturförhållandena samt fördelningen av termiska egenskaper i bergvolymen.

##### Processbeskrivning

Beskrivning av de processer som givet upphov till nuvarande fördelningen av initiala temperatur och egenskaper inom det aktuella området.

---

#### Modellens beståndsdelar

---

##### Geometriskt ramverk

Bas för det geometriska ramverket utgörs av den bergartsmodell och den strukturgeologiska modell som upprättas inom ämnesområdet geologi samt den hydrogeologiska modellen som tas fram inom hydrogeologi. Med utgångspunkt från de undersökningar som utförs på det intakta berget kan den geometriska modellen delas upp ytterligare för att få volymenheter med likartade egenskaper.

##### Parametrar

Initiala temperaturförhållanden.

Termiska egenskaper såsom värmeledningsförmåga, värmekapacitet och längdutvidgningskoefficient.

Se vidare tabell 6-2.

##### Datarepresentation

En jämn fördelning av data eftersträvas inom den aktuella volymen. I huvudsak gäller dock att konstanta parametervärden knyts till utvalda objekt i bergvolymen. Statistisk fördelning ska eftersträvas för representation.

##### Randvillkor

Initiala temperaturförhållanden och värmeflöde.

##### Numeriska verktyg

RVS används vid tolkning och redovisning av den upprättade modellen. Numeriska beräkningsmodeller används för att simulera de processer som skapat nuvarande fördelning av temperatur.

##### Beräkningsresultat

Fördelning av egenskaper enligt ovanstående parameterlista samt fördelning och magnitud av initial temperatur inom området.

---

**Tabell 6-2. Sammanställning av termiska parametrar som ingår i den termiska beskrivningen. Tabellen visar också när parametern huvudsakligen bestäms (se förklaring i tabell 2-3).**

Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för
		FS	IPLU	KPLU	DETU	
Bergets termiska egenskaper	– Värmeledningsförmåga – berg		x	x	x	Design, värmemodellering, kopplad analys
	– Värmekapacitet – berg		x	x	x	
Temperaturer	– Temperatur i berg och grundvatten		x	x		Modellering, design Begynnelsedata för modellering Randvillkor
	– Termiska randvillkor/gradient			x		

## 6.2.2 Ingående parametrar

Tabell 6-2 sammanfattar de parametrar som ingår i den termiska beskrivningen. Dessa parametrar behöver i regel tolkas från resultaten av de olika undersökningarna. Tabellen bygger på de tabeller som togs fram för parameterrapporten /Andersson m fl, 1996/, den revision som skedde vid arbetet med krav och kriterier /Andersson m fl, 2000/ och vid framtagandet av det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet /SKB, 2000b/. För att upprätta den termiska beskrivningen behövs dessutom information från flera andra ämnesområden (se avsnitt 6.2.3).

## 6.2.3 Modellverktyg och analyser

### *Tolkning och extrapolation av data*

Varje del i den geometriska modellen, se ovan, åsätts termiska egenskaper och termiskt initialtillstånd. De termiska egenskaperna fördelas utifrån den geologiska beskrivningens bergartsfördelning och generell kunskap om olika bergarters termiska egenskaper. Temperaturfördelningen bestäms genom interpolationsförfarande och termisk modellering (beräkningar) som kalibreras mot temperaturloggning i borrhål.

Vid stor variation i mineralsammansättningen kommer de termiska egenskaperna att variera mycket vilket försvårar indelningen av bergmassan i områden med samma termiska egenskaper.

För att bestämma de termiska parametrarna i tabell 6-2 behövs framförallt ingångsdata från geologiprogrammet i form av bergartsfördelningen. (Kopplade termo-hydro-mekaniska modeller diskuteras i avsnitt 5.2.3.)

### *Beräkningsverktyg och prognoser*

Data från den beskrivande termiska beskrivningen ska framförallt utgöra indata till olika termiska beräkningsmodeller för att beräkna den termiska utvecklingen i förvaret. Enkla geometrier behandlas analytiskt. Vid mer komplicerade fall utnyttjas numeriska lösningsmetoder. Förutsättningar för värmetransport i djupförvaret är viktig vid förvarsdesign och layout. De termiska modelleringsverktygen används inom projektering och säkerhetsanalys.

För modellering av långsiktiga termiska processer måste termiska beräkningsverktyg användas. Regionala modeller används för att studera termisk inverkan på sprickzoner i och kring förvaret. Lokala modeller används för att studera termisk inverkan på deponeringshål och deponeringstunnlar.

De termiska beräkningsverktygen kan vara allt från analytiska lösningar till numeriska beräkningsprogram. De numeriska beräkningsverktygen kan utgöras av randelement-, finita element- eller differensmetoder. Beroende på den process eller den problemställning som ska analyseras kommer berget att modelleras som ett kontinuummaterial eller modelleras med diskreta element för bergblock och sprickor. Kopplade termomekaniska modeller behandlas i samarbete med ämnesområdet bergmekanik och kopplade termohydrauliska modeller behandlas i samarbete med ämnesområdet hydrogeologi.

## **6.3 Karakteriseringsmetoder**

För bestämning av parametrarna enligt kapitel 6.2.2 krävs både fält- och laboratoriemetoder. I tabell 6-3 sammanfattas dessa metoder och nedan kommenteras kort de metoder som kommer att användas. Dessutom tillkommer den information som hämtas från geologiprogrammet.

### **6.3.1 Fältmetoder**

#### ***Temperaturloggning***

Det termiska initialtillståndet och termiska randvillkor bestäms genom temperaturloggning i vattenfyllda borrhål. Borrhålen måste stå orörda en viss tid (cirka 2 veckor) innan temperaturloggning utförs. Vattnet antas då ha samma temperatur som det omgivande berget.

#### ***Termiska responstester***

Termiska responstester i borrhål kan bli aktuella främst inom aktuellt förvarsdjup (400–700 m) för att i fält bestämma bergmassans termiska egenskaper. En känd mängd värme tillförs ett vattenfyllt kärnborrhål per tidsenhet och temperaturökningen i borrhålet mäts som funktion av tiden.

### **6.3.2 Laborariemetoder**

På upptagna borrhärnor kan följande parametrar bestämmas.

#### ***Densitet och porositet***

Bestämning av densitet sker enligt standard DIN 52102-RE VA på torr borrhärna. Porositeten antas lika med vattenabsorptionsförmågan. Denna bestäms enligt standard DIN 52103-A.

## **Kemisk och mineralogisk sammansättning**

Bestämningen av borrhärens kemiska och mineralogiska sammansättning utförs inom ramen för geologiprogrammet (se avsnitt 4.3.5). Den kemiska analysen kan utföras med ICP-analys (Inductively Coupled Plasma) och den mineralogiska sammansättningen kan bestämas med SEM (Scanning electron microscopy) och EDS (Energy dispersive spectroscopy) teknik.

## **Värmeledning och värmekapacitet**

För att beskriva värmeledningen i ett material behövs *värmeledning*,  $\lambda$ , W/(m, °K) som anger materialets förmåga att transportera värme och *värmekapacitet*, C, J/(m<sup>3</sup>, °K) som anger materialets förmåga att lagra värmeenergi. Värmekapaciteten är produkten av materialets densitet,  $\rho$ , kg/m<sup>3</sup> och materialets specifika värmekapacitet, c, J/(kg, °K). Förhållandet mellan värmeledning och värmekapacitet kallas värmediffusivitet,  $\kappa$ , m<sup>2</sup>/s

$$\kappa = \lambda / (\rho \cdot c) \quad (6.1)$$

Laboratoriemetod för bestämning av värmeledning finns beskriven i ASTM D5334-92 och metod för bestämning av värmekapacitet i ASTM D4611-86. Värmediffusivitet och värmeledning kan även bestämmas på laboratoriet med TPS-metod (Transient plane source), Gustafsson, 1991.

**Tabell 6-3. Termiska karakteriseringsmetoder.**

<b>Metod</b>	<b>Parameter</b>	<b>Kommentar (referens)</b>
<b>Undersökning av bergets termiska egenskaper</b>		
<b>Fältmetoder</b>		
• temperaturloggning	grundvattnets och (indirekt) bergmassans temperaturfördelning mot djupet	Metodbeskrivning (referens saknas).
• termisk responstest i borrhål	fältbestämning av termiska egenskaper hos bergmassan	Metoden studeras vad gäller lämplighet att använda.
<b>Laboratoriemetoder</b>		
• bestämning av värmeledningsförmåga	<b>Termiska egenskaper</b> värmeledningsförmåga	Metodbeskrivning, TPS, Gustafsson, 1991.
• bestämning av värmekapacitet	värmekapacitet	Metodbeskrivning, TPS, Gustafsson, 1991.
• bestämning av densitet	densitet	Standard DIN 52102-RE VA.
• bestämning av porositet	porositet	Standard DIN 52103-A.
• bestämning av kemisk och mineralogisk sammansättning	kemisk och mineralogisk sammansättning	Metodbeskrivning för ICP, SEM och EDS.

# 7 Hydrogeologi

## 7.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs vilka hydrogeologiska förhållanden och egenskaper som ska bestämmas och tänkbara karakteriseringsmetoder. I kapitlet beskrivs även hur den mätta informationen tolkas i den hydrogeologiska modell som utgör en del av den platsbeskrivande modellen.

### 7.1.1 Inledning

Nederbörden är det som ytterst driver grundvattenflödet medan topografin och geosfärens flödesegenskaper styr flödesmönstret. I Sverige är vanligen grundvattenytans läge nära kopplad till topografin. Orsaken är den relativt rikliga nederbörden och den relativt låga vattengenomsläppligheten i berggrunden. Nära markytan bildas vanligen lokala flödessystem som styrs av den lokala topografin, se figur 7-1.

Drivande kraften för vattenflödet i geosfären orsakas av skillnader i lägesenergi, där lägesenergin i en punkt bestäms av vattentrycket, vattnets densitet och punktens läge i vertikalled. Vattnets densitet är i huvudsak beroende av rådande temperatur och vattnets kemiska sammansättning, framförallt salthalten.

Vattenflödets storlek beror dels av drivande kraftens storlek, dels av geosfärens vattenledande förmåga. Den vattenledande förmågan beror av porstrukturens flödesegenskaper och vattnets flödesegenskaper. I lösa avlagringar bestäms porstrukturens flödesegenskaper av kornstorleksfördelningen samt kornens form och packning.

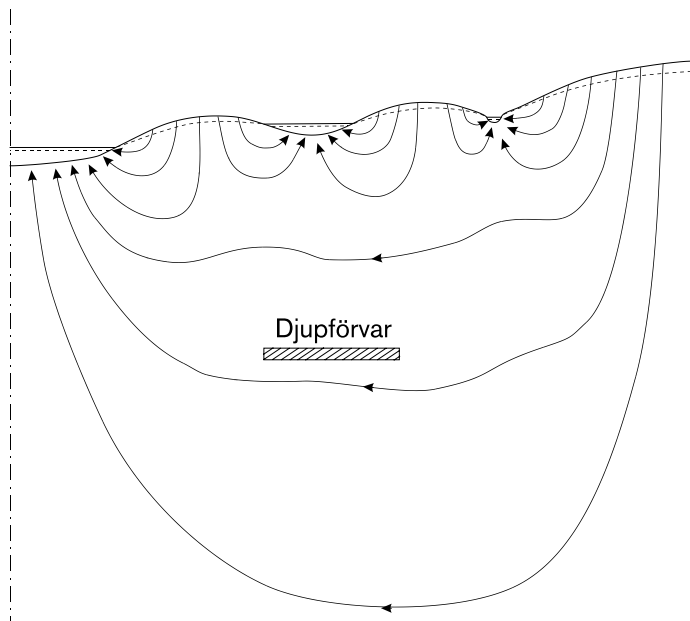
I kristallint berg bestäms porstrukturens flödesegenskaper av sprickstrukturen. Flödesegenskaperna beror både av varje sprickas flödesegenskaper och av hur sprickorna är sammankopplade. En sprickas flödesegenskaper beror framförallt på dess spricköppning men även dess ytstruktur. Frekvensen av sprickor, deras rumsliga fördelning, storleksfördelning, form samt orienteringsfördelningar avgör hur hydrauliskt sammanbundna sprickorna är. Sprickornas flödesegenskaper påverkas av den rådande effektivspänningen i geosfären och eventuell gasförekomst i spricksystemet.

Vattnets flödesegenskaper styrs av viskositeten, vilken påverkas av framförallt temperatur och av vattnets kemiska sammansättning. Vattnets flödesegenskaper varierar inom ett relativt litet intervall medan porstrukturens flödesegenskaper uppvisar en mycket stor variationsbredd.

Huvuddelen av grundvattenflödet sker i en del av porstrukturen, vilket definierar flödesporositeten i geosfären. Med hjälp av flödesporositeten kan grundvattenflödets medelhastighet beräknas. Porsystemets kompressibilitet och porsystemets förbindelse med atmosfären avgör geosfärens magasinsförmåga. Magasinsförmågan har betydelse för beräkning av tidsförloppet av en hydraulisk störning i geosfären, t ex tiden det tar att återfå liknande grundvattennivåer ovanför ett djupförvar som innan förvaret byggdes.

De hydrogeologiska processerna beskrivs mer i detalj i SR 97 /SKB, 1999b/.





**Figur 7-1.** Principbild av topografiskt betingade flödesmönster. Förekomsten av vattenförande sprickor och sprickzoner kan dock ge ett betydligt mera komplicerat flödesmönster än det som visas i figuren. (Skalan i horisontalled är mindre än i vertikalalled.)

Ämnesområdet kan uppdelas i meteorologiska och hydrologiska undersökningar, hydrauliska borrhålsundersökningar, monitorering samt tolkning, analys och modellering.

*Meteorologiska och hydrologiska undersökningar* omfattar framförallt mätningar av nederbörd, temperatur och flöden i vattendrag samt kartering av i huvudsak kvartär- och berggrundsgeologi samt källor, våtmarker och bäckar. Undersökningarna omfattar även kartläggning av markanvändning som diknings- och dämningföretag, vattentäkter etc samt områden intressanta ur naturskyddssynpunkt.

Med olika typer av *hydrauliska borrhålsundersökningar* kan jordlagrens och bergets vattengenomsläpplighet mätas längs borrhålen. Vattentryck och salthaltsfördelning registreras.

Efter erforderliga undersökningar sektioneras normalt alla borrhål med manschetter. I de avgränsade sektionerna kan därefter olika typer av undersökningar (*hydraulisk monitorering*) göras i sektionerna vid fastställda tidsintervall. Monitoreringen kommer att fortsätta även efter platsundersökningskedet.

*Hydrogeologisk tolkning, analys och modellering* utförs med syfte att beskriva den rumsliga fördelningen av jordlagrens och bergets hydrauliska egenskaper. För att beräkna grundvattenflöde och tryckfördelning i berget används vanligen olika numeriska *beräkningsmodeller* (se vidare avsnitt 7.2).

### 7.1.2 Ämnesspecifika mål

De övergripande målen för platsundersökningen och dess två etapper redovisades i kapitel 2. Hydrogeologiska krav och önskemål kopplat till funktionskraven för djupförvaret redovisades i Andersson m fl /2000/. Inga krav har formulerats, men det finns starka önskemål beträffande bergets vattengenomsläpplighet. Baserat på detta och de huvudmål som anges i kapitel 2 kan ett antal huvuduppgifter för det hydrogeologiska programmet formuleras.

Målet för det hydrogeologiska programmet är i korthet att:

- upprätta en hydrogeologisk beskrivning i regional och lokal skala som är tillräckligt detaljerad för kunna bedöma platsens lämplighet med avseende på önskemål på hydrogeologiska funktioner och även i övrigt svara mot de behov som finns inom säkerhetsanalys och projektering,
- uppnå en hydrogeologisk förståelse i regional skala som är tillräcklig för att avgränsa och ge underlag till egenskaper och randvillkor för regionala grundvattenflödesmodeller och uppnå en hydrogeologisk förståelse i lokal skala som är tillräcklig för att motivera den lokala hydrogeologiska beskrivningen.

Detta innebär bland annat att:

- platsens bergvolym beskrivs vad avser större sprickzoners rumsliga position, utbredning och egenskaper samt mindre strukturers frekvens, storlek och egenskaper (rumsliga fördelningar)
- vattengenomsläpplighet (storlek och variabilitet) på förvarsdjup bestäms med en precision som möjliggör bedömning av funktions- och säkerhetsfunktioner,
- den ytnära hydrogeologin kartläggs (i samråd med ämnesprogrammet för ytnära ekosystem).

Den ytnära hydrogeologin och hydrogeologin är väsentlig för den hydrogeologiska förståelsen både i regional och lokal skala. De ytnära förhållandena påverkar randvillkoren för grundvattenflödesmodellerna och är väsentliga för beräkningar av spridning i biosfären. Trovärdiga grundvattenflödesmodeller kräver en förståelse av såväl ytnära som djupare liggande grundvattenflödessystem. Dessutom krävs en tillgång till bergmassans hydrauliska egenskaper samt stödjande data för modellering såsom bland annat grundvattentryck och kännedom om in- och utströmningsområden.

### ***Inriktning under inledande platsundersökning***

De hydrogeologiska huvudaktiviteterna under den inledande platsundersökningen är att:

- preliminärt bestämma utsträckning på regionalt område som bedöms krävas för grundvattenflödesmodelleringen,
- översiktligt bestämma regionala sprickzoners och bergmassans hydrauliska egenskaper nära markytan inom regionalt område och plats,
- kartlägga den ytnära hydrogeologin i form av in- och utströmningsområden, topografi samt markanvändning och områden ur naturresurssynpunkt,
- etablera (om nödvändigt) hydrologiska mätstationer för nederbörd, temperatur och avrinning i vattendrag,
- etablera mätsystem för registrering av grundvattentryck i borrhål,
- översiktligt bestämma bergets hydrauliska egenskaper ner till cirka 1 000 m med några få djupa borrhål inom prioriterad plats,
- ytnära undersöka möjliga större sprickzoners lägen och egenskaper inom prioriterad plats (i samverkan med geologi).

Efter de inledande undersökningarna ska en översiktlig förståelse uppnås för de hydrogeologiska förhållandena ned till ett djup av 100–200 m inom det regionala området. Den första hydrogeologiska beskrivningen ska vara upprättad och skyddsvärda områden ska vara identifierade.

Efter den inledande platsundersökningen ska en översiktlig förståelse uppnås för de hydrogeologiska förhållandena ned till ett djup av cirka 1 000 m inom den prioriterade platsen. En hydrogeologisk beskrivning över platsen ska vara upprättad som bland annat översiktligt beskriver vattengenomsläppligheten i statistiska termer på tänkbart förvarsdjup.

### ***Inriktning under komplett platsundersökning***

De hydrogeologiska huvudaktiviteterna under den kompletta platsundersökningen är att:

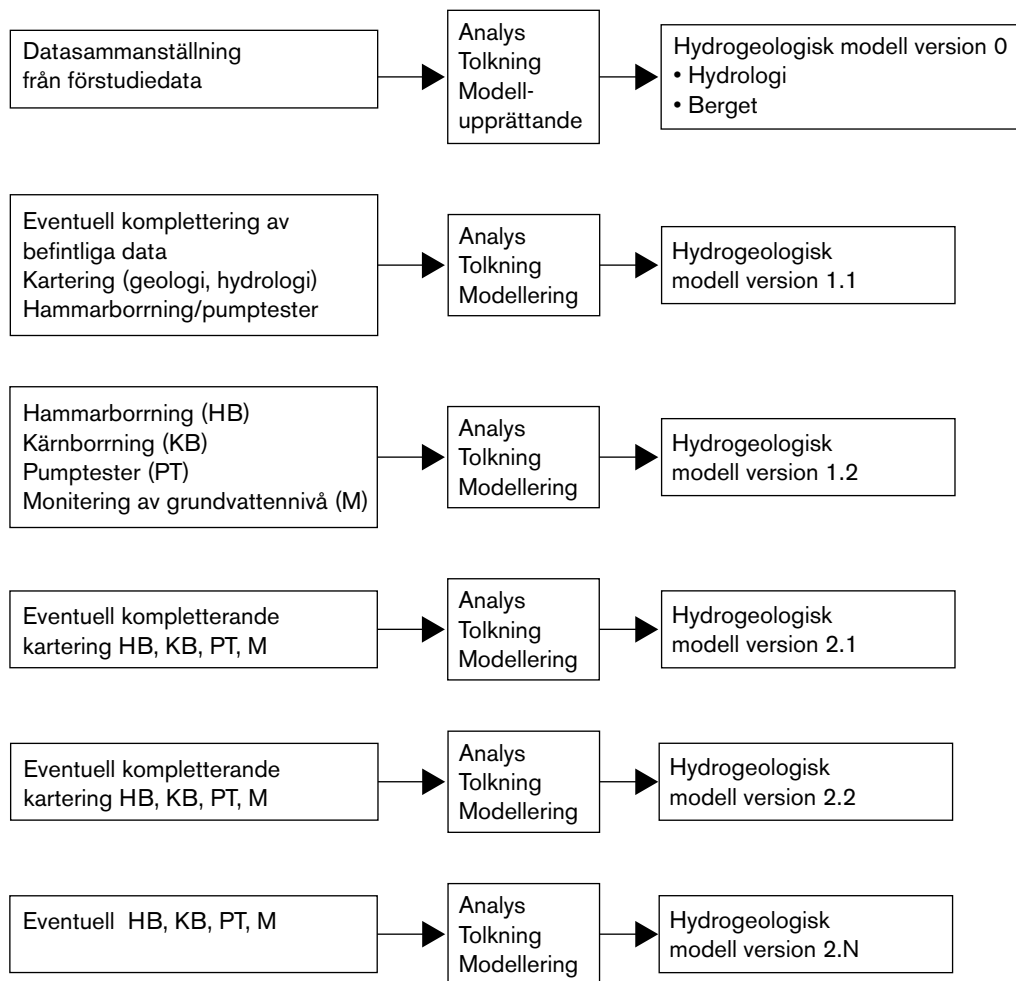
- bestämma utsträckning på regionalt område som bedöms behövas för grundvattenflödesmodelleringen,
- undersöka relevanta rand- och initialvillkor till den regionala grundvattenflödesmodellen med några djupa borrhål,
- undersöka bergets hydrauliska egenskaper från markytan och ner under förvarsdjup med djupa borrhål inom prioriterad plats,
- mer detaljerat undersöka möjliga lokala större sprickzoners egenskaper, position och utsträckning vid den prioriterade platsen,
- komplettera kartläggningen av den ytnära hydrologin i form av in- och utströmningsområden inom och nära prioriterad plats,
- komplettera undersökningen av den ytnära hydrogeologin (berg och jord) inom och nära prioriterad plats.

Bergets egenskaper längs flödesvägar till och från förvaret behöver beskrivas på ett mer detaljerat sätt än vad de regionala undersökningarna ger underlag till. Det medför att undersökningarna för att karakterisera platsen måste täcka en yta som är större än själva förvaret. Det är också viktigt att det finns borrhål nära regionalmodellens ränder för att relevanta rand- och initialvillkor ska kunna bestämmas. Områdena indelas dock så att det i första hand är möjligt att identifiera "naturliga" randvillkor.

När den kompletta platsundersökningen har genomförts ska en god förståelse ha uppnåtts för de hydrogeologiska förhållandena ned till ett djup av cirka 1 000 m inom den prioriterade platsen. En hydrogeologisk beskrivning av det regionala området och av platsen ska vara upprättade.

### **7.1.3 Arbetsmetodik och samordning**

Arbetsmetodiken och stegen för att upprätta de hydrogeologiska modellerna illustreras i figur 7-2. Geologisk och hydrologisk kartering ger grunden för de ytnära delarna av den hydrogeologiska modellen. Största underlaget till den hydrogeologiska modellen erhålls från hydrauliska tester och mätningar i borrhål. Den beskrivande hydrogeologiska modellen utnyttjas sedan t ex av projektering för att upprätta beräkningsmodeller för grundvatteninläckning i tunnlar eller av säkerhetsanalys för att upprätta beräkningsmodeller av den framtida grundvattenomsättningen.



**Figur 7-2.** Översikt över metodik och steg för att upprätta den hydrogeologiska modellen över platsen och det regionala området.

Angränsande ämnesområden där samverkan är mest omfattande är geologi, hydrogeokemi, transportegenskaper samt ytnära ekosystem. Samverkan med geologi omfattar framförallt fältstudier och borrning med syfte att karakterisera jordlager, bergmassa samt konduktiva strukturer. Samverkan krävs också vid analys och modellering av regionala och lokala större sprickzoner. Underlag från den hydrogeologiska karakteriseringen påverkar även den geometriska tolkningen och bedömningen av olika osäkerheter. Samverkan med hydrogeokemi rör i huvudsak undersökningar i borrhål, under och efter borrning. Planering av ytliga karteringar och provtagningar samt utformning av borrhålsinstrumentering för monitering sker också i samverkan med hydrogeokemi. Samverkan med ämnesprogrammet för bergets transportegenskaper rör den karakterisering av berget som görs vid borrhålundersökningar samt vid utformning av borrhålsinstrumentering för monitering. Samverkan med ytnära ekosystem omfattar fältstudier, borrning och långtidsmätningar. Syftet är att karakterisera jordlager, sediment i sjöar och hav, ytnära delar av bergmassa samt nederbörd, temperatur, avrinning och grundvattentryck. Samverkan med bergmekanik rör i huvudsak undersökningar i borrhål. Den bergmekaniska modellen har också i vissa avseenden (till exempel vid bedömning av anisotropi eller analys av borrhålstester) betydelse för analysen av hydrogeologiska data.

## 7.2 Modeller och parametrar

### 7.2.1 Modellernas uppbyggnad

Beskrivningen av platsens hydrogeologiska egenskaper och tillstånd ska sammanfatta den hydrogeologiska förståelsen av platsen och dess regionala omgivning. Beskrivningen utgör underlag för projektering och säkerhetsanalys av djupförvaret. För att upprätta beskrivningen formuleras en hydrogeologisk modell baserad på hydrogeologisk och geologisk information (modell) och på de hydrologiska processer som kan anses vara relevanta för djupförvarets funktion. Den hydrogeologiska modellen beskrivs utförligare nedan och sammanfattas i tabell 7-1.

Den hydrogeologiska beskrivningen kan delas upp i *hydrologisk beskrivning*, hydrogeologisk beskrivning av *jordlager* och hydrogeologisk beskrivning av *berget*. Den hydrogeologiska beskrivningen är starkt kopplad till den geologiska beskrivningen. De hydrogeologiska processerna i jord och berg är kopplade till de hydrologiska processerna som sker i markytan och atmosfären. En utförligare beskrivning av de relevanta hydrogeologiska processerna ges i Processrapporten för SR 97 /SKB, 1999b/. Det bör dock observeras att även om platsundersökningarna strävar efter att ta fram en tredimensionell beskrivning av både jordlager och berggrund, kan det i olika applikationer inom säkerhetsanalys och projektering vara väl motiverat att införa förenklingar och t ex beskriva jordlagren som ett randvillkor till grundvattenströmningen på djupet.

**Tabell 7-1. Kortfattad presentation av den hydrogeologiska modellens uppbyggnad och innehåll.**

---

#### Hydrogeologisk modell

---

##### Modellens syfte

Att för en given volym kunna beräkna grundvattenflöde inom volymen under naturliga förhållanden (ostörda) och med ett öppet djupförvar.

##### Processbeskrivning

$$\text{Konstitutiv ekvation: } q = -\frac{k}{\mu} \cdot (\text{grad}(p) + \rho \cdot g \cdot \text{grad}(z))$$

$$\text{Massflödesekvation: } \text{div}(\rho \cdot q) + \frac{d(\rho \cdot n)}{dt} + \rho \cdot Q = 0$$

$$\text{Tillståndsekvationer: } \rho = f(T, C, p), \quad \mu = f(T, C, p)$$

$q$ : flödet per ytenhet,  $k$ : permeabilitet,  $\mu$ : dynamisk viskositet,  $p$ : vattentryck,  $\rho$ : vattnets densitet,  $g$ : gravitationskonstanten,  $z$ : datumhöjd,  $n$ : porositet (total),  $Q$ : tillförd eller uttaget flöde per volymenhet,  $t$ : tid,  $T$ : temperatur,  $C$ : koncentration av lösta ämnen (framförallt salt).

---

#### Modellens beståndsdelar

---

##### Geometriskt ramverk

3D beräkningsvolym med yttre begränsningar: övre rand är topografi, vertikala ränder och undre horisontell rand på stort djup under förvarsnivå.

3D volym som uppdelas i:

- Hydrauliska StrukturEnheter (HSE): större sprickzoner som definieras till läge, utsträckning och orientering.
- Hydrauliska BergEnheter (HBE): bergvolymerna mellan HSE som definieras av bergvolymernas begränsningsytor.
- Hydrauliska JordEnheter (HJE): jord/sedimentvolymerna på bergytan som definieras av jordvolymens begränsningsytor.

Indelning av geosfären i HSE-, HBE- och HJE-enheter baseras på resultat från hydrauliska tester, ytkartering samt framförallt den geologiska modellen. Samutvärdering med övriga ämnesområden är väsentligt. 3D beräkningsvolymens yttre begränsningar delas in i olika områden med definierade randvillkor. Topografi samt geologisk och hydrogeologisk kartering och tolkning definierar områden som lämpar sig för olika typer av randvillkor.

#### **Parametrar**

HSE: Transmissivitet (T), Magasinkoefficient (S).

HBE: Hydraulisk konduktivitet (K) och Specifik magasinkoefficient ( $S_s$ ), alternativt sprickdatabeskrivningar med T samt S.

HJE: Hydraulisk konduktivitet (K), Specifik magasinkoefficient ( $S_s$ ).

T: temperatur, C: koncentration av lösta ämnen,  $p$ : vattentryck bestäms vid tester där K och T utvärderas.

T, S, K,  $S_s$  bestäms vid hydrauliska tester. Permeabiliteten  $k$  kan härledas från T eller K med hjälp av  $g$ , vattnets  $\mu$ ,  $\rho$ : samt vid T även strukturens tjocklek: S,  $S_s$  och  $d(\rho)/dt$  utgör skattning av  $d(\rho n)/dt$ . S,  $S_s$  beror av bergets och vattnets kompressibilitet samt totala porositeten. Relationen mellan  $\rho$ , salthalt och temperatur bestäms i laboratorium på vattenprov.

#### **Parameterrepresentation**

HSE: T, S, konstant, alternativt statistiska fördelningar, inom enhet.

HBE: Statistiska fördelningar av K och  $S_s$ , alternativt statistiska fördelningar av rumsliga fördelning av sprickor, sprickstorlek, sprickorientering och sprickornas T och S.

HJE: K,  $S_s$ , konstant, alternativt statistiska fördelningar, inom enhet.

#### **Randvillkor**

Övre rand: Variabel infiltration beroende av avsänkning (land) eller specificerat tryck som är konstant eller variabelt med tid (sjöar, hav samt framtidsscenarioer med kustlinjeförskjutning och istid). Metrologiska och hydrologiska data samt uppgifter om in- och utströmningsområden används för definition av randvillkor på övre rand.

Sidoränder: Tryckfördelning och salthaltsfördelning.

Undre rand: Nollflödesrand.

Inre ränder (tunnlar): flöde eller tryck.

Initialvillkor: Tryck och salthalt inom 3D beräkningsvolym.

Tryck mäts sektionvis i borrhål och nivå på vattenyta mäts i sjöar och hav. Salthalt mäts på vattenprov från borrhålssektioner eller hav samt skattas från loggning i borrhål. Hydrologiska mätningar ger gränser på nuvarande flödesförhållanden på övre rand.

#### **Numeriska verktyg**

Kontinuummodeller: NAMMU, PHOENICS m fl. Diskreta spricknätverksmodeller: FracMan/Mafic m fl.

#### **Beräkningsresultat**

Grundvattentryck, grundvattenflöde, salthalt inom 3D beräkningsvolym.

---

## **Beskrivning av hydrologi**

Den hydrologiska beskrivningen omfattar fördelningen av nederbörd, avdunstning och temperatur i tid och eventuellt rum samt rumslig fördelning av sjöar, havsområden, vattendrag, avrinningsområden och markanvändning. Den omfattar även in- och utströmningsområden och topografi. Beskrivningen är grunden för att definiera lämpliga randvillkor på markytan i hydrogeologiska beräkningsmodeller.

## **Beskrivning av jordlagren**

Den hydrogeologiska beskrivningen av jordtäckets baseras på att jordlagren kan delas in i hydrauliska enheter, Hydrauliska JordEnheter (HJE), där man inom varje enhet kan anse att de hydrauliska egenskaperna är likartade (absolut eller statistiskt), se figur 7-3. Grunden för indelningen är den geometriska uppdelningen i den geometriska modellen, den geologiska beskrivningen av jordarterna inom varje enhet och den hydrogeologiska karakteriseringen av jordlagren.

## Beskrivning av berget

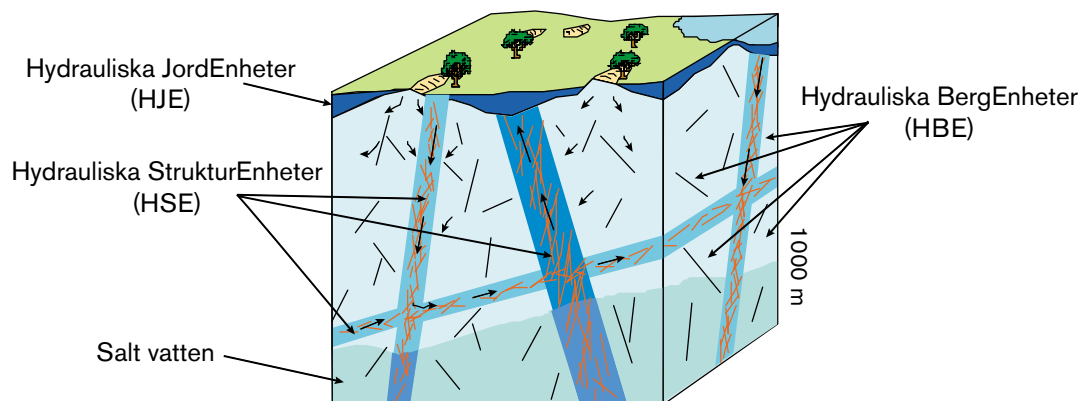
Den hydrogeologiska beskrivningen av berget baseras på att berget kan delas in i olika enheter. Enheterna ska vara en praktisk indelningsgrund för att rumsligt fördela hydrauliska egenskaper i bergmassan. Inom varje enhet anges hydrauliska egenskaper t ex i form av vattengenomsläpplighet, statistisk beskrivning av vattengenomsläpplighet eller som ett statistiskt diskret spricknätverk med tillhörande hydrogeologiska parametrar, se figur 7-3.

Indelningen i enheter baseras på det gemensamma geometriska ramverket, och den geologiska beskrivningen av dessa enheter, se kapitel 4 och figur 2-4. Av dessa är de spröda strukturerna väsentligast för den hydrogeologiska modellen eftersom de erfarenhetsmässigt har högre vattengenomsläpplighet än det övriga berget. Analysen av strukturmodellens uppbyggnad och egenskaper samt de hydrauliska tester i dessa syftar till att hydrauliskt beskriva de spröda strukturerna, vilket är en grund för att rumsligt fördela egenskaper i bergmassan. Sprickorienteringar, sprickfrekvenser och spricklängder (mätta på orienterade bergytor) redovisade i den geologiska modellen är mycket väsentlig information som ska kombineras med de hydrauliska borrhålsmätningarna.

I olika skeden av undersökningar kommer ett antal av de större spröda strukturerna, främst regionala sprickzoner och lokala större sprickzoner, att definieras till position, orientering, utsträckning och vidd. Dessa områden kallas Hydrauliska StrukturEnheter (HSE). Det övriga berget indelas i olika Hydrauliska BergEnheter (HBE). Indelningen i olika hydrauliska enheterna utgår från indelningen i den geometriska modellen, men en Hydraulisk Bergheter kan, principiellt, bestå av flera olika geometriska enheter representerande både sprickzoner och övrigt berg. I de fall mer detaljerad kunskap nås om strukturer som ligger inom Hydrauliska Bergheter kan den hydrauliska enhetsindelningen komma att uppdateras.

Grunden för indelningen i HSE och HBE är de hydrauliska tester som utförts på ett likvärdigt sätt (testsektionslängd, testtid, testteknik) och kan separeras på struktur- och bergmasseenheter innan statistisk analys av de hydrauliska egenskaperna görs. Interferenstester är ett annat viktigt underlag för att definiera struktureenheter. Samutvärdering mellan ämnesområdena är väsentlig för att få ett brett underlag för både indelning och karakterisering av de olika enheterna.

### Hydrogeologisk modell



**Figur 7-3.** Jordlagren och berggrunden delas in i olika enheter. Inom varje enhet anges hydrogeologiska förhållanden som medelvärden eller som statistiska fördelningar.

## 7.2.2 Ingående parametrar

Tabell 7-2 sammanfattar de parametrar som utgör den hydrogeologiska beskrivningen i den platsspecifika modellen. Dessa parametrar behöver i regel tolkas från resultaten av de olika undersökningarna. Tabellen bygger på de tabeller som togs fram för parameter-rapporten /Andersson m fl, 1996/, den revision som skedde vid arbetet med krav och kriterier /Andersson m fl, 2000/ och vid framtagandet av det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet /SKB, 2000b/. För att upprätta den hydrogeologiska beskrivningen behövs dessutom information från flera andra ämnesområden, speciellt geologi (se avsnitt 7.2.3).

**Tabell 7-2. Sammanställning av hydrogeologiska parametrar som ingår i den hydrogeologiska beskrivningen. Tabellen visar också när parametern huvudsakligen bestäms (se förklaring i tabell 2-3).**

Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för
		FS	IPLU	KPLU	DETU	
Deterministiskt modellerade sprickzoner	– Geometri – regionala och lokala större sprickzoner	x	x	x	x	Beräkningsmodeller
	– Deterministisk eller statistisk fördelning av transmissivitet eller av hydraulisk konduktivitet		x	x	x	Beräkningsmodeller
	– Magasinskoefficient		(x)	x	x	Transienta beräkningsmodeller
Stokastiskt modellerade sprickzoner och sprickor samt bergmassa	– Geometri – bergvolymen med likartade hydrauliska egenskaper	(x)	x	x	x	Beräkningsmodeller
	– Statistisk beskrivning av sprickzonernas och sprickors rumsliga fördelning och geometriska egenskaper. Statistiska fördelningar på transmissivitet		x	x	x	DFN-modeller
	– Statistiska fördelningar på hydraulisk konduktivitet		x	x	x	SC-modeller
	– Statistiska fördelningar på specifik magasin-koefficient och magasin-koefficient		(x)	x	x	Transienta beräkningsmodeller
Jordlager	– Geometri – jordvolymen med likartade hydrauliska egenskaper		x	x		Beräkningsmodeller
	– Hydraulisk konduktivitet		(x)	x		Beräkningsmodeller
	– Specifik magasin-koefficient		(x)	x		Transienta beräkningsmodeller
Grundvattnets hydrauliska egenskaper	– Densitet, viskositet och kompressibilitet		x	x	x	Beräkning av parametrar
	– Salinitet		x	x	x	Beräkning av parametrar och ingår i beräkningsmodeller
	– Temperatur		x	x		Beräkning av parametrar



Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för
		FS	IPLU	KPLU	DETU	
Randvillkor och stödande data	– Meteorologiska och hydrologiska data	x	x	x	(x)	Definition av randvillkor samt kalibrering av grundvattenmodeller (gvm) och biosfärmodeller (bm)
	– In/utströmningsområden		x	x	x	Definition av randvillkor samt kalibrering av gvm och bm
	– Tryck eller tryckhöjd i borrhåsektioner och ytvattendrag		x	x	x	Definition av randvillkor samt kalibrering av gvm och bm
	– Salinitet		x	x	x	Definition av randvillkor samt kalibrering av gvm
	– Gv-flöde genom borrhål		(x)	x	x	Kalibrering av gvm
	– Regionala randvillkor (tolkade), historisk och framtida utveckling		x	x	(x)	Definition av randvillkor (Nuvarande förhållande, paleohydrogeologiskt perspektiv, analys av möjliga scenarier)

### 7.2.3 Modellverktyg och planerade analyser

Hydrogeologisk analys och modellering är den aktivitet som knyter samman alla resultat från undersökningarna till en hydrogeologisk beskrivning i regional- och lokal skala. Den kan delas in i två delar:

- modellering med syfte att ge underlag (tolka data) till en beskrivande hydrogeologisk modell,
- modellering (numeriska beräkningsmodeller av olika uppbyggnad) med syfte att beskriva grundvattenflödet till storlek och flödesvägar som underlag för att tolka data inom andra ämnesområden (främst hydrogeokemi och transport) och som underlag för de prognoser som görs inom säkerhetsanalys och projektering.

#### Tolkning av data

Under platsundersökningarna upprättas dels en beskrivning i regional skala och dels en i lokal skala. Området för den regionala beskrivningen ska vara tillräckligt stor för att kunna ge tillräckligt med information till den geologiska utvecklingsmodellen (se kapitel 4). Ur hydrauliskt hänseende bör området anpassas till vad som förväntas ge tydliga randvillkor och bör vara väsentligt större än det lokala området för att kunna beräkna flödesmönster, med in- och utströmningsområden. Långtidsscenarioer och plats-specifika salthaltsförhållanden i grundvattnet kan också kräva att större områden inkluderas i den regionala beskrivningen.

I jämförelse med regionalmodellen kommer lokalmodellen att vara mer tillförlitlig på grund av en högre undersökningsintensitet men innehåller samma komponenter i beskrivning som den regionala modellen. Indelningen i HSE och HBE kan dock varieras så att detaljerade enheter i den lokala beskrivningen slås samman till större enheter i den regionala. Vid denna omfördelning behöver egenskaper som beskrivs i lokal skala modifieras så att de korrekt representerar de samlade egenskaperna hos de större enheterna (se även Rhén m fl /1997a/ och Rhén m fl /1997c/).

Tolkningen baseras framförallt på analys av hydrauliska borrhålsmätningar. Analysen av borrhålsmätningarna ger hydrauliska parametrar som tillsammans med den geologiska beskrivningen (se kapitel 4) ligger till grund för att rumsligt dela upp jordlager och berggrund i hydrauliska enheter. För att bestämma de hydrogeologiska parametrarna behövs även ingångsdata från andra ämnesprogram. Tabell 7-3 visar en sammanställning av parametrar som hämtas från andra program. Integreringen och samutvärderingen av geologiska och hydrogeologiska data är mycket viktig för att få tillförlitliga och konsistenta modeller.

Utifrån mätningar i fält och analys av data görs en bedömning om begreppsmodellen är lämplig som grund för att göra en beskrivande modell (kvantitativ modell) som rumsligt beskriver ett områdes egenskaper och förhållanden. Den beskrivande hydrogeologiska modellen är underlag för den geovetenskapliga förståelsen och analys som rör säkerhetsanalys och projektering. Numeriska beräkningsmodeller baseras på den beskrivande modellen men används inte bara för prognoser utan den testas mot olika mätningar i fält, bland annat tryckresponser vid interferenstester. Till viss del innebär detta att parametrar "trimmas in" (kalibrering av beräkningsmodellen) men det ger även en kontroll av den beskrivande modellen som kan medföra att t ex den geometriska modellen av en eller flera sprickzoner justeras.

Analysen av spricknätverket, som måste beskrivas från enskilda sprickor och upp till regionala sprickzoner, är viktig. Den detaljerade beskrivningen kan dock bara göras statistiskt. Grunden är de geologiska undersökningarna och en gemensam analys av sprickartering och lineament krävs för att upprätta en strukturmodell. Sprickorienteringar i borrhål och på hällar, sprickfördelningar längs borrhål, längder på sprickspår, trunkeringar av sprickspår och lineament används för att identifiera sprickgrupper ("sprickset") och deras egenskaper. Egenskaperna för varje sprickset innefattar främst (rumslig fördelning av) sprickdensitet, sprickradiefördelning samt orienteringsfördelning. De hydrauliska egenskaperna erhållna från de hydrauliska testerna, används för att definiera de hydrauliska egenskaperna för struktur och spricknätverket. Det är framförallt injektionstester med korta mätsektioner och detaljerade flödesloggningar som ger grunden för skapandet av sprickgruppernas transmissivitetfördelningar. Fler egenskaper kan sedan tilldelas sprickorna beroende på vad som ska beräknas. Spricknätverket med sina hydrauliska egenskaper är sedan basen, tillsammans med den geologiska beskrivningen, för att upprätta dels enheter i

**Tabell 7-3. Översikt över parametrar som hämtas från andra program.**

Parameter	Bestäms inom ämnesprogram
Läge, orientering, utsträckning av regionala och lokala större sprickzoner	Geologiska programmet (Delvis i samverkan med hydrogeologiska programmet)
Längdfördelning av lineament ner till sprickspår (angivande av orientering på sprickor och på karterad yta)	Geologiska programmet
Orientering och läge av sprickor i borrhål med tolkning av vilka som bedöms vara öppna	Geologiska programmet
Stokastisk fördelning av lokala mindre sprickzoner (orientering, rumslig fördelning, storlek, densitet)	Geologiska programmet
Stokastisk fördelning av enskilda sprickor (orientering, rumslig fördelning, storlek, densitet)	Geologiska programmet
Jordlager- och sedimentlager följdsbeskrivningar samt kornstorleksanalyser av dessa lager	Geologiska programmet
Huvudspänningsriktningar i berggrunden	Bergmekanik programmet
Vattnets salthaltsfördelning (densitet)	Hydrokemiska programmet

den beskrivande modellen (se avsnitt 7.2.1 ovan), som kan anses ha likartade egenskaper inom enheten, och dels tilldela dessa enheter hydrauliska egenskaper.

De flesta hydrauliska testmetoderna bygger på att en störning skapas, t ex genom att förändra trycket momentant eller genom att pumpa i en sektion, och därefter mäta responsen i vattentrycket och/eller vattenflödet i sektionen som störs och ibland även i andra sektioner. Metoderna för tolkning och analys av främst vattengenomsläpplighet kan grovt delas in i två grupper; metoder för transienta förhållanden och metoder för stationära förhållanden. I det första fallet nyttjas en tidsserie av tryck och flöde för tolkning och i det andra fallet utnyttjas värden på tryck och flöde som kan anses representera ett fortvarighetstillstånd (konstanta med tiden).

Vissa hydrauliska tester kan endast utvärderas med metoder för stationära förhållanden. För att tolka flödesloggar måste man anta stationära förhållanden. Injektionstester kan tolkas genom att anta stationära förhållanden. Pågår en interferenstest under en lång tid kan det vara aktuellt att tolka vissa data med metoder som antar stationära förhållanden. Vid tolkningen antas vanligtvis att flödet är radiellt eller att det är radiellt närmast borrhålssektionen och sfäriskt en bit ut i bergmassan. Dessa grundantaganden på flödesdimension kommer preliminärt att nyttjas.

Hydrauliska tester som ger en tidsserie med flöde och tryck ger ett underlag för att bedöma flödesdimensionen, vilket i sin tur ger en vägledning för val av tolkningsmodell och vilken tidsperiod som ska nyttjas för att tolka parametrar. Vid både injektionstester och interferenstester är det aktuellt med att nyttja metoder för transienta förhållanden.

### **Beräkningsverktyg**

Beräkningsmetoder som används inom hydrogeologin kan delas upp i två delar; beräkningsmetoder för att tolka/analysera hydrauliska tester samt numeriska beräkningsmetoder för att modellera grundvattenflöde. Ett flertal beräkningsmetoder finns för tolkning och analys av hydrauliska tester och de bygger på olika begreppsmodeller om det hydrauliska systemet som testas samt hur testerna utförts tekniskt. Grundstegen vid tolkning och analys är att först väljs begreppsmodell och därefter tillämpas en eller flera modeller på de mätta data. Modellerna analyseras och tolkningsmetod väljs varefter parameter utvärderas.

Beräkningsmetoder och begreppsmodeller för grundvattenflöde som är lämpliga för kristallin berggrund kan i huvudsak delas upp i diskreta spricknätverk (DFN, Discrete Fracture Network) och stokastiska kontinuummodeller (SC, Stochastic Continuum). Parameterfälten som används i dessa beräkningsmetoder härrör från de geologiska och hydrogeologiska beskrivningarna och i vissa fall nyttjas mätdata direkt för att härleda vissa parametrar, eller parameterfördelningar, som ingår i modellerna. Interferenstester är ett mycket viktigt underlag för kalibrering och kontroll av dessa numeriska modeller.

Beskrivningen av HSE och HBE rumsliga fördelning och dessa enheters egenskaper är grunden för att skapa både DFN och SC modeller. Varje HSE ges en definierad position och utsträckning samt egenskaper som ansätts som ett värde eller som fördelning inom respektive enhet. Primärt kommer spricknätverket med hydrauliska egenskaper för varje HBE att användas för att skapa egenskaperna i såväl DFN som SC. I SC kan inte sprickdata användas direkt utan ingår i tolkningsunderlaget för att erhålla egenskaper i kontinuummodellen som motsvaras av spricknätverket. Spricknätverkets och sprickegenskapernas statistiska fördelningar ger den rumsliga variabiliteten i de hydrauliska egenskaperna. Effekterna av den rumsliga variabiliteten i de hydrauliska egenskaperna på flöde- och tryckfält i beräkningsmodellerna kan studeras genom att göra flera realiseringar av spricknätverket.

## 7.3 Karakteriseringsmetoder

För bestämningen av parametrar och upprättande av modeller enligt avsnitt 7.2 används flera metoder. I detta avsnitt kommenteras de metoder som troligen kommer att användas vid en platsundersökning. Metoderna sammanfattas också i tabeller.

### 7.3.1 Meteorologiska och hydrologiska undersökningar

Meteorologiska och hydrologiska undersökningar utgör ett väsentligt underlag för att definiera randvillkor till beräkningsmodellerna. Metoderna sammanfattas i tabell 7-4.

Vanligtvis kan man påräkna att det i ett område finns tillgängligt meteorologiska och hydrologiska data. Det omfattar information som kan erhållas från rapporter, kartor eller i digital form. Kompletterande data erhålls från nyuppybyggda mätstationer för insamling av meteorologiska och hydrologiska data. Informationen kan delas upp i meteorologiska observationer och yhydrologiska observationer.

Meteorologiska observationer i form av nederbörd, snödjup, temperatur, avdunstning, lufttryck erhålls framförallt från befintliga meteorologiska mätstationer som drivs av SMHI. En översikt över tillgängliga klimat- och oceanografiska data redovisas av Lindell m fl /2000/. Redovisningen i förstudien kompletteras med aktuella data. Insamlingsarbetet samordnas med ytnära ekosystem (se avsnitt 10.3.10). Evapotranspiration beräknas normalt utifrån meteorologiska- och avrinningsdata. Lufttryck kan vara av betydelse för de vattentryck som mäts och måste därför mätas.

**Tabell 7-4. Beskrivning av meteorologiska och hydrologiska metoder.**

Metod	Information (parameter)	Kommentarer/referenser
<b>Meteorologiska och hydrologiska metoder</b>		
<b>Analys av befintliga hydrologiska och meteorologiska data</b> Meteorologi <ul style="list-style-type: none"> <li>• nederbörd, snödjup</li> <li>• temperatur, avdunstning</li> <li>• lufttryck</li> </ul> Topografi, vattendrag, källor m m	<b>Översiktlig grundinformation, underlag för randvillkor</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• meteorologi och flöden</li> <li>• avrinningsområden</li> <li>• inströmnings-/utströmningsområden</li> </ul>	Dokumenterade metoder Lindell m fl /2000/
<b>Meteorologisk och hydrologisk kartläggning och långtidsmonitoring</b> Meteorologi <ul style="list-style-type: none"> <li>• nederbörd, snödjup</li> <li>• temperatur, avdunstning</li> <li>• lufttryck</li> </ul> Yhydrologi <ul style="list-style-type: none"> <li>• topografi</li> <li>• flöden i större vattendrag</li> <li>• källor, läge och eventuellt flöde</li> <li>• in/utströmningsområden</li> <li>• små vattendrag, läge och eventuellt flöde</li> <li>• nivå på sjöar och havsnivå fluktuationer</li> <li>• (kartering-kvartärgeologi)</li> </ul>	<b>Tolkningsunderlag för randvillkor</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• meteorologi och flöden: långtidsregistrerade parametrar</li> <li>• avrinningsområden</li> <li>• inströmnings-/utströmningsområden</li> <li>• för beskrivning av lokalklimat</li> <li>• för modellering av grundvattenbildning</li> <li>• (se geologi)</li> </ul>	Dokumenterade metoder

Ythydrologiska observationer i form av topografi, lägen för vattendrag, sjöar, och i vissa fall, källor erhålls initialt från befintligt kartmaterial och kan i allmänhet erhållas i digital form. Kartmaterialet ger också en möjlighet att bedöma befintliga in- och utströmningsområden. Flöden i vattendrag inom eller i närheten av det regionala området kan i vissa fall erhållas av SMHI. De befintliga mätserier som finns för näraliggande vattendrag ger ett underlag för att bestämma avrinning från det eller de avrinningsområden som finns i undersökningsområdet. Nivåer på sjöar kan i allmänhet approximativt erhållas från befintligt kartmaterial och mätserier på havsnivåfluktuationer kan finnas tillgängliga vid t ex hamnanläggningar. Flyg- och satellitbilder är också underlag för att definiera avrinningsområden, vattendrags sträckning, (i vissa fall) källors position, olika biotopers utbredning samt naturskydds- eller naturresursområden.

Under platsundersökningen kommer dels kartering att kompletteras, dels mätstationer att upprättas för att erhålla mer detaljerade ythydrologiska observationer. Kompletteringen av karteringen består dels i flygfotografering, dels kartering på mark. Om nödvändigt tas det fram topografiska kartor med bättre upplösning än befintligt material. Kartering på mark kan krävas för att finna källor, mindre bäckar och för att kunna bestämma biotoper och deras utbredning. Denna kartering samordnas med den geologiska karteringen.

Ett flertal mätstationer upprättas med syfte att mäta framförallt flöden i större vattendrag och nivåer i större sjöar. I ett kustnära område etableras en mätstation för havsnivå, om befintliga mätstationer inte kan anses ge tillräckligt representativa värden. Om behov finns etableras mätstationer för mätning av flöden i mindre vattendrag och källor samt nivåer i mindre sjöar.

Flertalet av ovanstående mätningar är också väsentliga för ämnesprogrammet ytnära ekosystem och utförs därför i samarbete med detta program. Inom hydrogeokemi-programmet insamlas vattenkemiska data för såväl nederbörd som för vattendrag.

### **7.3.2 Undersökningar/dokumentation av brunnar och anläggningar**

Data från befintliga brunnar och anläggningar utgör ett viktigt underlag för en första uppskattning av ett områdes egenskaper. Till viss del har sådana data sammanställts redan under förstudierna. I vissa avseenden kan dataunderlaget förbättras genom att göra kompletterande undersökningar i de befintliga borrhålen/brunnarna. Metoderna sammanfattas i tabell 7-5.

Befintliga data från brunnar och anläggningar analyseras. Till viss del erhålls parametrar och områdesbeskrivningar från rapporter. Ur brunnsarkivet kan flöden m m erhållas digitalt och dessa data kan bearbetas för att skatta bergets vattengenomsläpplighet.

Vid inventering av befintliga brunnar och observationsrör inom det regionala området insamlas uppgifter om kapacitet (flöde mot avsänkning) och årligt grundvattenuttag för ett urval av brunnar. Vattenprov tas. Grundvattennivå i brunnar och observationsrör mäts. I alla observationsrör som ska användas för grundvattennivåobservationer utförs lämpligen slugtest. Kapacitetstest genomförs vid behov.

**Tabell 7-5. Beskrivning av metoder för undersökningar/dokumentation av brunnar och anläggningar.**

Metod	Information (parameter)	Kommentarer/referenser
<b>Undersökningar/dokumentation av brunnar</b>		
<b>Analys av befintliga data för brunnar och anläggningar</b> Brunnsarkiv Anläggningsdokumentation	<b>Översiktlig grundinformation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• jordlagrens och ytbergets hydrauliska och grundvattenkemiska egenskaper</li> <li>• markanvändning</li> <li>• K-värden, trycknivåer, flöden</li> <li>• dämningföretag, dränering etc</li> </ul>	Dokumenterade metoder
<b>Datinsamling från befintliga brunnar och observationspunkter</b> Befintliga brunnar <ul style="list-style-type: none"> <li>• kapacitetsuppgifter</li> <li>• uppgifter grundvattenuttag</li> <li>• grundvattennivåer</li> <li>• vattenprov</li> </ul> Observationsrör <ul style="list-style-type: none"> <li>• kapacitetsuppgifter</li> <li>• grundvattennivåer</li> </ul>	<b>Grundinformation inom intresseområde</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrauliska parametrar för jordlager/ytberg (som ovan, men mer detaljerat inom ett begränsat område)</li> <li>• underlag för monitoringsprogram</li> <li>• tillsammans med meteorologiska och ytvattenhydrologiska data utgör insamlade data under denna punkt ett första underlag för konceptualisering av grundvattenbildning och modellering</li> </ul>	Dokumenterade metoder

### 7.3.3 Hydrogeologiska borrhålsundersökningar

Undersökningar i borrhål ger det viktigaste underlaget för att dels beskriva bergets hydrauliska egenskaper, dels vattnets tryck- och salthaltsfördelning i bergmassan. Resultaten från undersökningarna ger också underlag till kalibrering av numeriska beräkningsmodeller. Metoderna sammanfattas i tabell 7-6.

#### **Mätningar och tester under borrhning**

Vid hammarborrning skattas flödet ur borrhålet, spolvattenfärg bedöms och kaxprov tas för bergartsbestämning. Bergartsvariationer studeras med hjälp av kaxprover och vid mätningar under borrhning (MWD, "Measurement While Drilling"). I MWD ingår preliminärt borrhjunkning, matartryck och rotationstryck. Med i förväg fastställda längdintervall (preliminärt 100 m) avbryts hammarborrningen, för att genomföra en transient hydraulisk test av det sist borrhade intervallet (pumptid cirka 1h, återhämtning cirka 1h). Alternativt används manschetter för att kunna hydrauliskt testa 100 m sektioner efter att borrhålet borrhats. Finns observationhål inom cirka 500 m från det pumpade hålet mäts tryckresponser i dessa.

MWD under kärnborrning omfattar dessutom mätning av spolvattentryck, spolvattenflöde, returvattenflöde, spolvattenhalt, avsänkning och elektrisk konduktivitet. Med i förväg fastställda längdintervall (preliminärt 100 m) avbryts kärnborrningen, för att genomföra en transient hydraulisk test av det sist borrhade intervallet (pumptid cirka 1h, återhämtning cirka 1h). Finns observationhål inom cirka 500 m från det pumpade hålet mäts tryckresponser i dessa. Inom vissa gränser anpassas intervallen efter byte av borrhkrona för att underlätta borrhning men så att de fastställda intervallen approximativt erhålls.

**Tabell 7-6. Beskrivning av metoder för hydrogeologiska borrhålsundersökningar.**

Metod	Information (parameter)	Kommentarer/referenser
<b>Hydrauliska borrhålsundersökningar</b>		
<b>Registrering av spolvattenparametrar vid borring</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• spolvattentryck, spolvattenflöde, returvattenflöde, spolvattenhalt, avsänkning (MWD), elektrisk konduktivitet</li> <li>• provtagning av borrkax</li> <li>• registrering i befintliga närliggande borrhål</li> </ul>	<b>Tolkningsunderlag</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• spolvattenbalans</li> <li>• hydrauliska strukturer</li> <li>• hydrauliska förbindelser/samband</li> </ul>	Metodik för kärnborring provad och i huvudsak utvecklad. Metodförbättringar testas under år 2000.
<b>Hydrauliska tester vid borring</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tryckregistrering</li> <li>• pumptest</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (vattenprovtagning)</li> </ul>	<b>Hydrauliska parametrar</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• naturligt grundvattentryck</li> <li>• hydraulisk konduktivitet (K-värde) skala <math>\geq 100</math> m</li> <li>• transmissivitet (T-värde) för större hydrauliska strukturer</li> <li>• (se kemi)</li> </ul>	Optimal metodik för tester/provtagning under kärnborring, identifierad. Utrustning för wire-line under framtagning och testas under 2000. Testernas utförande för övrigt följer i stort Almén och Zellman /1991/, Almén m fl /1994/, Rhén m fl /1997b/.
<b>Absoluttryckmätning/beräkning</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• under borring</li> <li>• indirekt från tester</li> <li>• från separat mätning</li> <li>• från monitorering</li> </ul>	<b>Absoluttryck</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• naturligt grundvattentryck; för kontroll och kalibrering av grundvattenmodellering</li> <li>• kontroll av cirkulation i öppet borrhål</li> </ul>	Tester under borring är under utveckling men för övrigt betraktas testmetodiken som utvecklad (Almén och Zellman /1991/, Almén m fl /1994/, Rhén m fl /1997b/). Hur naturligt grundvattentryck bäst bestäms utreds.
<b>Analys av geofysiska metoder</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• temperatur</li> <li>• vätskeresistivitet</li> <li>• single point resistansmätning</li> <li>• caliper</li> </ul>	<b>Tolkningsunderlag för</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrauliska strukturer</li> <li>• grundvattnets densitet</li> </ul>	Dokumenterade metoder. Metodstudie kopplat till differensflödesloggning pågår. (Almén och Zellman /1991/, Almén m fl /1994/, Rhén m fl /1997b/).
<b>Flödesloggning</b> Spinner, UCM <ul style="list-style-type: none"> <li>• ackumulerat flöde längs borrhål under konstant avsänkning</li> <li>• flöde</li> <li>• temperatur</li> <li>• vätskeresistivitet</li> </ul>	<b>Hydrauliska parametrar</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrauliska strukturer: läge och T (uppskattning baserat på helhålstest)</li> <li>• frekvens av större hydrauliska ledare (10 m-skala)</li> <li>• grundvattnets densitet</li> </ul>	Metodens användning i PLU ännu ej till fullo fastställd. (Almén och Zellman /1991/, Almén m fl /1994/, Rhén m fl /1997b/).
<b>Differensflödeslogg</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• sektionsvis inflöde under konstant avsänkning</li> <li>• olika sektionslängder och avsänkningar</li> <li>• flöde</li> <li>• temperatur</li> <li>• vätskeresistivitet</li> <li>• single point resistansmätning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• K/T-värdesfördelning för bergmassa och hydrauliska strukturer (lokala större och lokala mindre sprickzoner)</li> <li>• frekvens av hydrauliska ledare (m till dm-skala)</li> <li>• naturligt grundvattentryck</li> <li>• grundvattnets densitet</li> </ul>	Metodens användning i PLU ännu ej till fullo fastställd. Tester pågår under 2000. (Rouhianen /1995/)

Metod	Information (parameter)	Kommentarer/referenser
<p><b>Grundvattenflödesmätningar</b></p> <p>Utspädningssond (SKB)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ostörda förhållanden</li> <li>• störda förhållanden (pumptester eller dylikt)</li> </ul> <p>Temppulsmetod (Posiva)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ostörda förhållanden</li> <li>• störda förhållanden (pumptester eller dylikt)</li> </ul>	<p><b>Beräkningsunderlag för</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• naturligt grundvattenflöde (modellkalibrering)</li> <li>• om K- eller T-värde bestämts med oberoende metod kan tryckgradient beräknas</li> <li>• flödesrespons vid pumptester (förståelse av hydraulisk konnektivitet vid utvärdering av tester)</li> </ul>	<p>Metoderna (SKB:s och Posivas metoder) ännu ej till fullo utvärderade.</p> <p>Metodval därför inte gjort.</p> <p>(Rouhianen /1993/)</p>
<p><b>Hydrauliska injektionstester</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• enkel sluten testsektion</li> <li>• konstant tryck, anpassade testtider</li> <li>• transient registrering</li> <li>• olika sektionslängder och injektionstryck</li> <li>• (eventuell interferens mellan sektioner)</li> </ul>	<p><b>Hydrauliska parametrar</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• K-värdesfördelning för bergmassa och hydrauliska strukturer (lokala större och lokala mindre sprickzoner) (skin, utvärderingsbarhet)</li> <li>• frekvens hydrauliska ledare (&gt;m-skala)</li> <li>• Flödesdimension</li> <li>• (naturligt grundvattentryck)</li> <li>• (eventuell konnektivitet)</li> </ul>	<p>Metodens användning i PLU ännu ej specificerad i detalj. Metodik betraktas som utvecklad men befintlig utrustning ska förbättras. (Almén och Zellman /1991/, Almén m fl /1994/, Rhén m fl /1997b/).</p>
<p><b>Enhålpumptester</b></p> <p>Enkel öppen testsektion (oftast hela borrhålet)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• konstant flöde, anpassade testtider</li> <li>• transient registrering (flöde, avsänkning, elektrisk konduktivitet)</li> </ul> <p>Enkel avgränsad testsektion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• konstant flöde, anpassade testtider</li> <li>• transient registrering (flöde, avsänkning, elektrisk konduktivitet)</li> <li>• olika sektionslängder</li> </ul>	<p><b>Hydrauliska parametrar</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• K-värde för bergmassa, eller T-värde för dominerande hydraulisk struktur</li> <li>• flödesdimension</li> <li>• (naturligt grundvattentryck)</li> <li>• (eventuell konnektivitet)</li> </ul>	<p>Testmetodiken betraktas som färdigutvecklad (Almén och Zellman /1991/, Almén m fl /1994/, Rhén m fl /1997b/).</p> <p>Metodik för effektiva hydraultester i hammarborrhål ska optimeras.</p>
<p><b>Hydrauliska interferenstester</b></p> <p>Pumphål</p> <p>öppna eller sektionerade borrhål</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• konstant flöde</li> <li>• anpassade testtider</li> <li>• transient registrering (flöde, avsänkning, elektrisk konduktivitet)</li> </ul> <p>Observationshål</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• öppna eller sektionerade borrhål</li> <li>• transient registrering (avsänkning, eventuellt elektrisk konduktivitet)</li> <li>• flödesförändring (option, i vissa bh-sektioner grundvattenflödesmätning med utspädningsteknik eller termisk puls)</li> </ul>	<p><b>Hydrauliska förhållanden och parametrar</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• verifiering av väsentliga strukturers geometri och konnektivitet</li> <li>• K-värde för bergmassa, eller T-värde hydrauliska strukturer (lokala större och lokala mindre sprickzoner)</li> <li>• flödesdimension</li> <li>• (magasinskoefficient)</li> </ul>	<p>I huvudsak betraktas testmetodiken som färdigutvecklad (Almén och Zellman /1991/, Almén m fl /1994/, Rhén m fl /1997b/).</p>



Vid kärnborrning avbryts också borrningen vid förmodad vattenförande sprickzon, för vattenprovtagning av den senast borrade delen för hydrogeokemiska analyser. I samband med denna provtagning genomförs också en hydraulisk test med främsta syfte att bestämma provtagningssektionens vattenledande förmåga och i andra hand dess absoluttryck.

Vid kärnborrning kan också absoluttrycket mätas i den senast borrade delen vid eventuella borrhåll. Mätningen utförs med samma eller liknande utrustning som nyttjas för vattenprovtagning och hydrotester.

### **Absoluttryckmätning/beräkning**

I akviferer där vattnets densitet varierar, t ex i kustnära områden med en ökad salthalt mot djupet, är det nödvändigt att skatta vattnets absoluttryck för att kunna ange initial- och randvillkor i beräkningsmodellerna. Absoluttrycket är relativt svårt att mäta vid de stora borrhållsdjup som planeras. Det finns dock möjligheter att genomföra mätningar med flera metoder.

De mest ostörda tryckförhållandena kan troligen erhållas under borrningen. Som nämndes i föregående avsnitt kan en tryckprofil längs borrhålet upprättas genom att mäta trycket i den sektion som senast borrats.

Utförs de hydrauliska testerna transient och utvärderas med de modeller som tar hänsyn till det transienta förloppet är det vanligtvis möjligt att utvärdera det ostörda trycket. Det kan emellertid vara betydande osäkerheter i utvärderingen om tidigare aktiviteter i borrhålet påverkat tryckbildningen i berget.

Differensflödesloggning, som redovisas i ett av avsnitten nedan, ger också en möjlighet att skatta tryckfördelningen approximativt längs borrhålet.

Ovanstående tre metoder ger också underlag för att beräkna cirkulationen i öppna borrhål vilket är ett underlag för den hydrokemiska karakteriseringen (planering av vattenprovtagning och tolkning av hydrokemiska analyser).

För monitoringsprogrammet avgränsas sektioner i borrhålet med manschetter. En tid efter installation av manschetterna kan de ostörda trycken mätas. I detta fall blir upplösningen av tryckfördelningen längs borrhålet begränsad på grund av att endast ett mindre antal mätsektioner kan installeras i varje borrhål. Se vidare avsnittet nedan som behandlar hydrogeologisk monitoring.

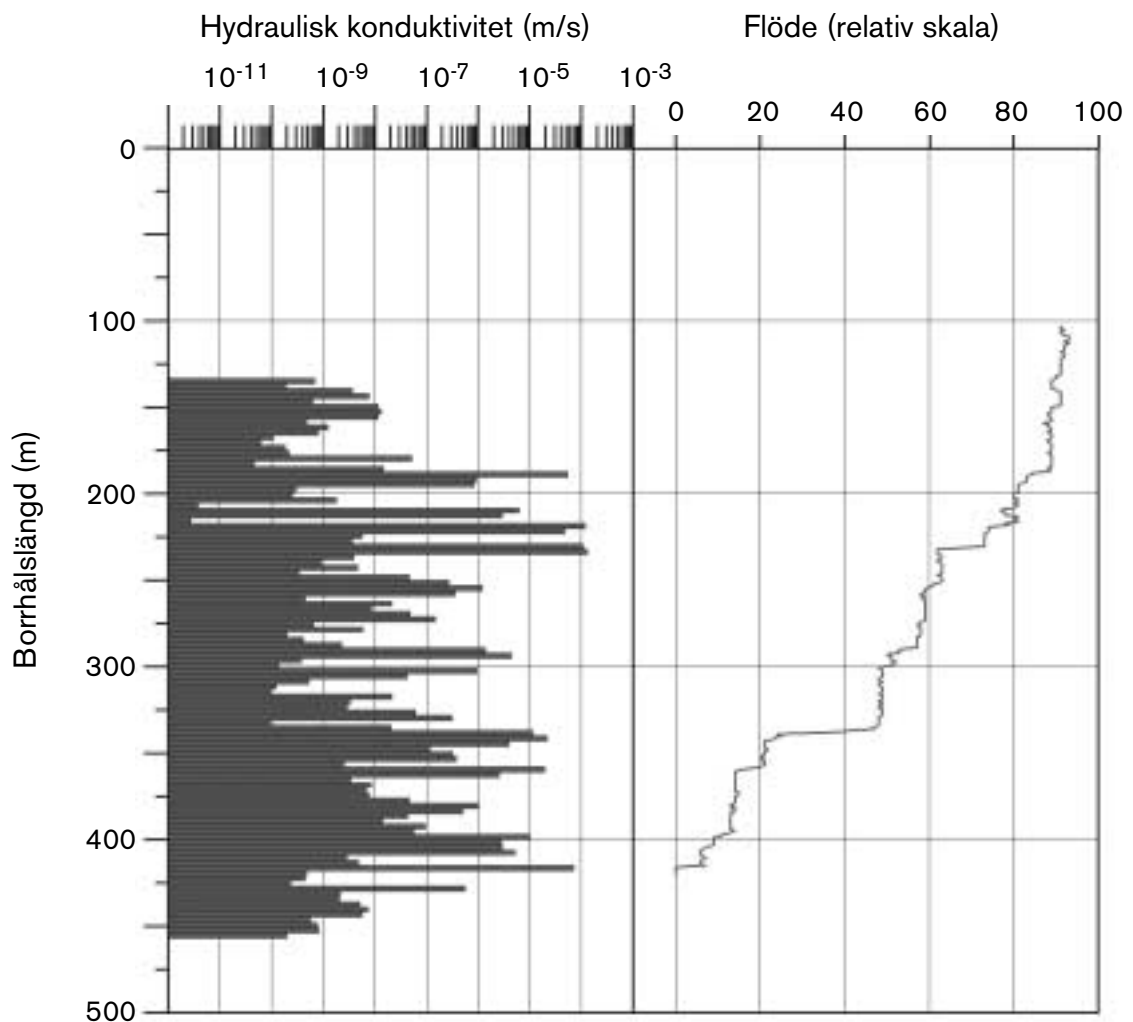
### **Analys av geofysiska metoder**

Den geofysiska borrhållsloggningen som utförs under det geologiska programmet är till viss del användbar för den hydrogeologiska modellen. Bland annat kan temperatur och vätskeresistivitet ligga till grund för en densitetsbestämning av vattnet i ett borrhål. Single point resistivitetsmätningar ger indikationer på öppna (potentiellt vattenförande) sprickor. Caliper kan ge indikationer på mer uppsprucket berg. BIPS-loggningen ger en bild (och orientering av bild) av borrhållsväggen som är mycket användbar för orientering av borrhåll. I bilden kan även större öppna sprickor vanligen observeras.

## Flödesloggning

För att bestämma hydrauliska strukturers position och approximativa egenskaper längs ett borrhål kan borrhålet flödeslogggas (figur 7-4), dels med en metod utvecklad av SKB; UCM, och dels två snarlika metoder som utvecklats av Posiva; differensflödesloggning och kontinuerlig flödesloggning. Vid alla metoderna pumpas borrhålet under loggning och vanligtvis använder man två olika flöden vid differensflödesloggningen.

Den första metoden, UCM, ger flödesfördelningen, temperatur och vätskeresistivitet längs borrhålet. Den andra metoden, differensflödesloggning, ger med två pumpflöden möjligheten att bestämma transmissivitet och ostört tryck i testsektion med flöde. Utvärderingsmetoden baseras på ett antagande om stationära förhållanden. Med kontinuerlig flödesloggning används bara ett flöde och loggningen genomförs snabbare och med en god detaljupplösning längs borrhålet, men med en högre mätgräns för flöde jämfört med differensflödesloggningen. Vid både differensflödesloggning och kontinuerlig flödesloggning mäts kontinuerligt vattnets temperatur och elektriska konduktivitet. Dessutom används "single point resistance"-metoden för att lokalisera sprickor.



Figur 7-4. Exempel på resultat från injektionstest (vänster) och från flödesloggning (höger).

## **Hydrauliska injektionstester**

Hydrauliska injektionstester med en mätsektion som begränsas av två manschetter, utförs med förutbestämda intervall längs ett flertal borrhål. Testerna utförs transient och utvärderas med modeller som tar hänsyn till det transienta förloppet. Det ger en möjlighet att utvärdera transmissivitetfördelning (se figur 7-4), flödesdimension och den hydrauliska resistansen närmast borrhålet (vanligen kallt "skin" i den hydrogeologiska litteraturen).

Transmissivitet/hydraulisk konduktivitet som baseras på stationära förhållanden medför att eventuellt "skin" kan påverka storleken på den utvärderade parametern. På grund av detta betraktas utvärderingsmetoder som nyttjar det transienta förloppet som mer pålitliga jämfört med metoder som baseras på stationära förhållanden. Metoder som baseras på stationära förhållanden kan emellertid i många fall ge acceptabel noggrannhet på vattengenomsläppligheten i berget.

Sektionslängderna för injektionstesterna planeras att bli 5 m (kapselskala) och 20 m, vilket motsvarar en preliminär upplösning i SC modeller i lokal skala. Preliminärt blir injektionstid cirka 15 min, återhämtning cirka 10 min för 5 m-sektioner och injektionstid cirka 30 min, återhämtning cirka 20 min för 20 m-sektioner.

## **Enhålpumptester**

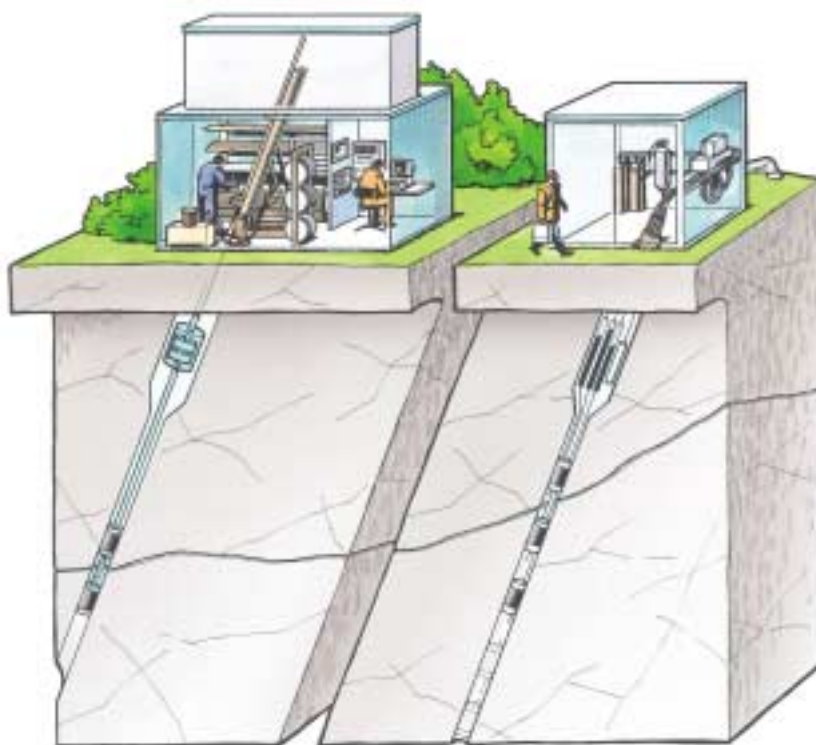
Enhålpumptester utförs för att testa hela borrhålet, pumptid cirka 1 dygn, återhämtning cirka 0,5 dygn. Utvärderad transmissivitet från en sådan test är en förutsättning för att kunna transformera flödesloggningen med UCM till en approximativ transmissivitetfördelning längs borrhålet. Finns borrhål inom cirka 500 m mäts tryckresponser i dessa under hydraultesten för att få en indikation på större konduktiva strukturer.

## **Hydrauliska interferenstester**

Hydrauliska interferenstester ger information till beskrivningen av de deterministiska hydrauliska strukturerna (HSE i avsnitt 7.2) och randvillkor. Testerna är också ytterst värdefulla för kalibrering av numeriska beräkningsmodeller.

Interferenspumptest utförs genom att en borrhålssektion begränsad av två manschetter eller hela borrhålet pumpas och tryckresponser mäts i omgivande borrhålssektioner samt den pumpade sektionen, se figur 7-5. Pumtid kan vara cirka 3 dygn med återhämtning cirka 1 dygn. Under testerna utförs i vissa fall också grundvattenflödesmätningar, se ovan. Testerna utförs när ett flertal av borrhålen manschetterats och testerna ger information om större konduktiva strukturers egenskaper (framförallt den struktur som den pumpade sektionen omfattar) och hydrauliska förbindelser mellan större konduktiva sprickzoner. Resultaten är viktiga för att i samråd med geologi bygga upp den plats-specifika strukturmodellen av de större sprickzonerna. Resultaten från mätningarna är också mycket väsentliga för kalibreringar av beräkningsmodellerna.

Det kan vara aktuellt med 1 till 2 interferenspumptest med längre varaktighet i slutskedet av den kompletta platsundersökningen. För dessa tester gäller en pumptid cirka 3 till 6 månader, återhämtning cirka 1 till 2 månader. Ett av de längre testerna bör utföras som ett storskaligt spårförsök, se nedan. Syftet med en långtidsprovpumpning är att skapa en störning som omfattar en stor bergvolym och som på ett bättre sätt kan belysa randvillkor än interferenstesterna med kort varaktighet. I och med att den/de



*Figur 7-5. Hydrauliska interferenstester.*

utförs i slutet av den kompletta platsundersökningen är monitoringsystemet sannolikt väl utbyggt. Dessa långvariga tester är värdefulla interferenstester för kalibrering av numeriska beräkningsmodeller. Interferenstester som ej nyttjats för kalibrering används som oberoende dataset för kontroll av beräkningsmodellerna.

### **Hydrauliska interferenstester – storskaliga spår försök**

Med storskaliga spår försök kan dels transportparametrar bestämmas för någon eller några få större sprickzoner, dels erhålls en tillförlitligare bild av hur de större sprickzonerna är hydrauliskt sammanbundna (se även avsnitt 9.3.2). Ett storskaligt spår försök genomförs i slutet av den kompletta platsundersökningen, eller som en kompletterande undersökning efter avslutad platsundersökning. Dessa spår försök måste genomföras innan detaljundersökningarna startas eftersom större hydrauliska störningar från byggandet av förvaret sannolikt omöjliggör en djupare analys av resultaten.

Ett storskaligt spår försök utförs enligt beskrivningen ovan av interferenstester med några tillägg. Pumpningen pågår några dagar varefter flera spårämnen injiceras i valda borrhålssektioner. Vatten provtas sedan regelbundet i såväl det pumpade borrhålet som borrhålssektioner där spårämne injicerats. Interferenspumptestens varaktighet beräknas till flera månader för att kunna få genomslag av spårämnen, dvs en pumptid om cirka 3 till 6 månader med återhämtning cirka 1 till 2 månader. Rhén m fl /1992/ ger ett exempel på hur ett storskaligt spår försök kan genomföras.

## Grundvattenflödesmätningar

Grundvattenflödet genom en borrhålssektion kan bestämmas med flera metoder. Om testsektionen i borrhålet är lämpligt utformad och i god kontakt med berget är det mätta grundvattenflödet i samma storleksordning som grundvattenflödet i berget. Metoderna kan dels nyttjas för mätningar av ostörda förhållanden och dels under störda förhållanden, t ex under interferenstester. I det senare fallet ger förändringen i flödet på grund av testen värdefull information om hur strukturerna är sammanbundna ur flödessynpunkt. Enbart tryckresponser i en sektion indikerar att strukturen i sektionen är hydrauliskt sammanbunden med andra strukturer, men om det flödar eller icke (mätsektionen befinner sig i en "dead end" av strukturen) går ej att avgöra.

SKB har utvecklat dels en sond (Utspädningssond) som kan användas i öppna borrhål, dels metodik för att utföra utspädningmätningar i manschetterade borrhål. Med utspädningmetoden mäts utspädningen av ett spårämne som tillförts borrhålssektionen. Posiva har också utvecklat en sond för grundvattenflödesmätningar i öppna borrhål ("Tvärsflödesmätning" (Cross Flow Measurements)), som mäter flödet mellan fyra sektorer som följer borrhålets riktning. Innan borrhålen manschetteras för långtidsmonitoring kan det bli aktuellt att nyttja Utspädningssonden och/eller "Tvärsflödesmätningssonden", se också avsnitt 9.3.2. I de flesta av de långa kärnborrhålen inrättas 1–2 borrhålssektioner där utspädningmätningar kan utföras under monitoringsperioden.

### 7.3.4 Hydrogeologisk monitoring

Hydrogeologisk monitoring utgör ett underlag till att beskriva grundvattnets tryck- och flödesfördelning i bergmassan. Syftet är dels att mäta naturliga grundvattenvariationer före byggandet av ett djupförvar, dels för att kunna mäta tryckresponser under enhålpumptester och interferenstester. Monitoringsystemet ska även kunna mäta tryckresponser under byggandet av djupförvaret. Med monitoringsystemet kan även andra hydrauliska störningar mätas, t ex från borrhålen, som i vissa fall kan ge ett underlag för den hydrogeologiska modellen. Monitoringen startas så snart som alla vattenprovtagningar, borrhålsloggningar och hydrauliska tester utförts i respektive kärnborrhål. Utformningen av monitoringen i ett borrhål framgår av figur 7-6.

Monitoringsystemet är mycket väsentligt vid interferenstester. Vid dessa anpassas mätfrekvensen till förväntat dynamiskt förlopp så att upplösningen i tid blir tillfredsställande för den efter följande analysen. Resultaten från monitoringen ger också viktigt underlag till kalibrering av numeriska beräkningsmodeller. Metoderna sammanfattas i tabell 7-7.

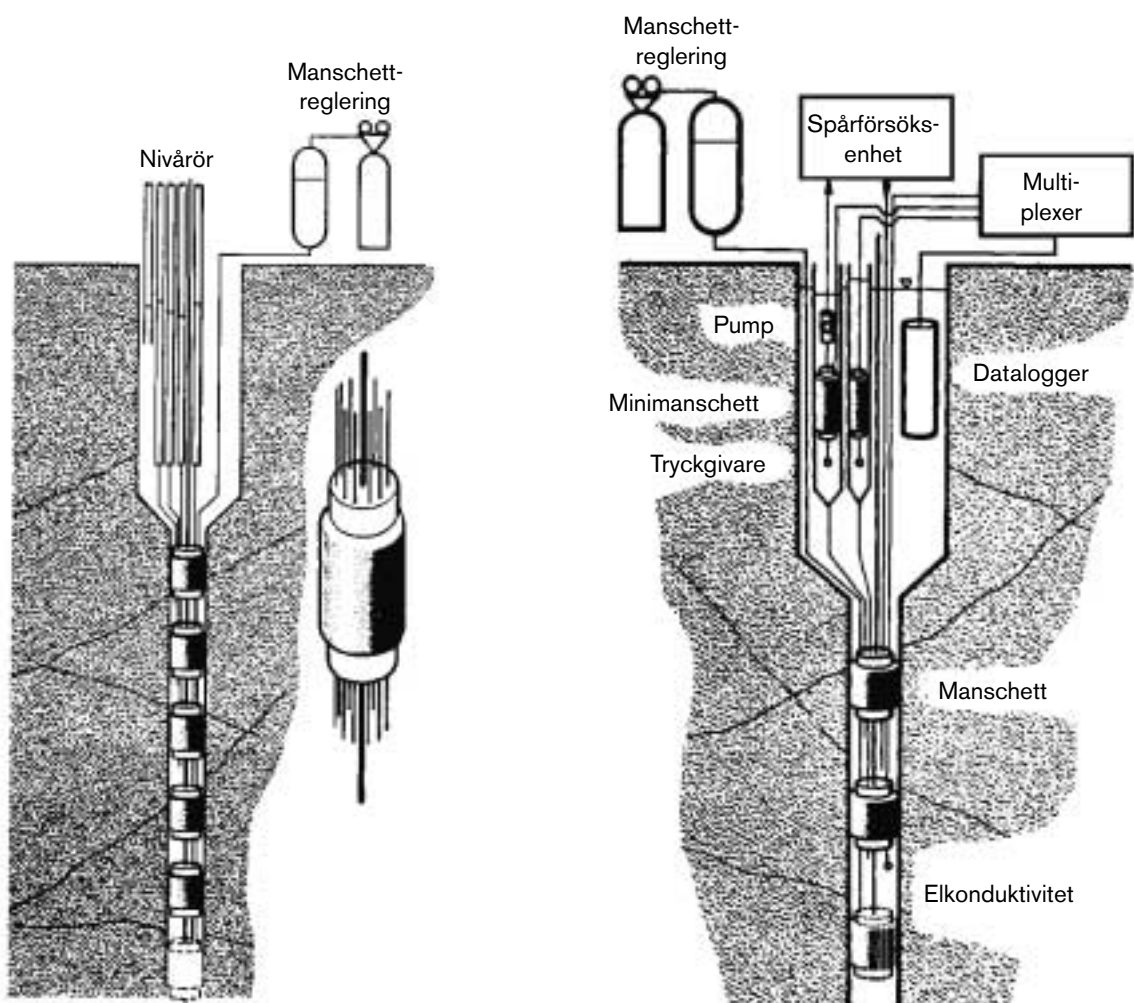
I djupa kärnborrhål sektioneras borrhålen med hjälp av manschetter så att trycknivåer i grundvattnet kan mätas på olika djup under markytan. Preliminärt kan det vara aktuellt med upp till cirka 8 sektioner. I hammarborrhål sätts normalt bara en manschett men i enstaka fall kan det vara aktuellt med 2 till 3 manschetter.

Instrumenteringen av borrhålen kommer att medge tryckmätning i alla manschetterade sektioner. Vissa sektioner utformas så att grundvattenflödesmätningar kan utföras och vattenprover kan tas. Det kan vara aktuellt att installera "dummies" i dessa sektioner för att minska vattenvolymen. Detta minskar erforderliga mättider och förbättrar möjligheterna till att få en homogen blandning av spårämnena i testsektionen. Antalet borrhålssektioner för grundvattenflödesmätningarna är betydligt mindre än för grundvattentryck. I de flesta kärnborrhål installeras 1 till 2 sektioner för grundvattenflödesmätningar.

I några hammarborrhål kan det eventuellt vara aktuellt att installera en sektion för grundvattenflödesmätningar.

Vattenprovtagning görs enligt beskrivning i det hydrogeokemiska programmet, se kapitel 8. Densiteten bestäms på ett flertal prov och den elektriska konduktiviteten bestäms för alla vattenprov. Dessa analyser är basen för att bestämma vattnets densitet i geosfären tillsammans med övriga mätningar av den elektriska konduktiviteten. Det ger också underlag till att bestämma densitet i slangar mellan mätsektion och tryckgivare, i det fall tryckgivare inte kan placeras i mätsektion.

Moniteringsystemet ger möjligheter till hög upplösning av mätningarna i tid och tryckförändringar, vilket gör det möjligt att mäta effekterna av gravitationsförändringar (tidaleffekt) och lufttryck (barometereffekt).



*Figur 7-6. Grundvattenmonitoring.*

**Tabell 7-7. Beskrivning av metoder för hydrogeologisk monitorering.**

Metod	Information (parameter)	Kommentarer/referenser
<b>Hydrogeologisk monitorering</b>		
<b>Långtidsmonitoring av grundvattentryck</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• grundvattennivåer i öppna brunnar/borrhål i jord och ytberg</li> <li>• grundvattentryck i borrhålssektioner (se även hydrauliska interferenstester)</li> </ul>	<b>Grundvattenvariationer i tid och rum</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• naturliga förhållanden</li> <li>• grundvattennivåkarta</li> <li>• randvillkor för grundvattenmodellering</li> <li>• kalibrering och kontroll av grundvattenmodeller</li> </ul>	Äspö-laboratoriets monitoringsmetodik utvärderas och eventuellt görs någon modifiering (Almén och Zellman /1991/, Almén m fl /1994/, Rhén m fl /1997b/).
<b>Långtidsmonitoring av grundvattenflöde</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• grundvattenflöde i borrhålssektioner</li> <li>• (se även hydrauliska interferenstester)</li> </ul>	<b>Grundvattenflödesvariationer i tid och rum</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• naturliga förhållanden</li> <li>• kalibrering och kontroll av grundvattenmodeller</li> </ul>	Använd Äspö-teknik möjliggör vattenprovtagning och grundvattenflödesmätning från isolerade sektioner (Almén och Zellman, /1991/, Almén m fl, /1994/).
<b>Analys av grundvattenfluktuationer</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tidaleffekt, korrelation mellan borrhål(sektioner)</li> <li>• barometereffekt</li> </ul>	<b>Tolkningsunderlag</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrauliska strukturers orientering och konnektivitet</li> <li>• egenskaper i grundvattenmagasin</li> </ul>	Metoder ännu inte tillämpade, oklart om användning i PLU.

## 8 Hydrogeokemi

### 8.1 Allmänt

Detta kapitel beskriver hydrogeokemisk karakterisering vid platsundersökningar. Programmet beskriver varför hydrogeokemin undersöks samt vilka kemiska parametrar som är viktiga för konstruktion av och säkerheten hos ett djupförvar. I kapitel 3 beskrivs genomförande av undersökningen avseende hela kedjan från insamling av hydrogeokemidata till kemimodellering. I avsnitt 8.3 ges en översikt över de metoder som avses bli använda för insamling och utvärdering av kemidata.

#### 8.1.1 Inledning

Kemiprogrammet syftar till att beskriva grundvattnets kemi i djupförvarsvolymen med omnejd ur ett säkerhetsanalytiskt perspektiv och ge det kemiska underlag som krävs för projektering av djupförvaret. Dessutom bidrar kemiprogrammet till en övergripande förståelse för hur grundvattensystemet fungerar på förvarsdjup. Hydrogeokemittillsammans med hydrogeologidata ger en beskrivning av vattenomsättningen inom området och dess påverkan på grundvattensammansättningen samt hur den varierar i den tilltänkta förvarsvolymen.

Grundvattnets sammansättning är i kombination med grundvattenflödet av stor betydelse för slutförvarets funktion, både på kort och på lång sikt. Växelverkan mellan ingenjörsbarriärerna och grundvattnet bestämmer hur länge det använda kärnbränslet kommer att förbli isolerat. Även i en situation då isoleringen brutits har grundvattnet en avgörande betydelse för upplösning och transport av radioaktiva ämnen i bränslet.

Mängden löst syre i vattnet och mängden sulfid som kan komma i direkt kontakt med kopparkapseln har betydelse för kopparkorrosion. Dessa ämnen korroderar kapseln på olika sätt. En attack av syre åstadkommer gropfrätning medan sulfidkorrosion fördelas jämt över ytan. Därför är reducerande förhållanden ett krav för djupförvarsplatsen.

För bufferten (bentonit) är det nödvändigt att grundvattnet innehåller en minimihalt av lösta salter. Förekomst av tvåvärda katjoner är väsentlig för att bentoniten inte ska bilda kolloider. Mycket höga salthalter kan eliminera bentonitens svällande förmåga och därmed omintetgöra dess funktion som diffusionsspärr mellan kapseln och berget.

För radionuklidtransport är vattnets pH och Eh viktiga. Under reducerande förhållanden förekommer många av de farligaste nukliderna i en reducerad form med mycket låg löslighet. Vid neutralt pH är lösligheten lägre än under sura och alkaliska förhållanden. Det normala för grundvatten är att pH är neutralt och att det råder reducerande förhållanden. Vattnets totala salthalt påverkar retentionen av svagt sorberande nuklider. Dessutom är vattnets innehåll av kolloider och mikrober av stor betydelse för nuklidtransport eftersom de kan fungera som bärare för radionukliderna. /SR 97, Processrapporten, SKB, 1999b/.



Grundvattnets sammansättning påverkar djupförvarets funktion på olika sätt för det vatten som befinner sig inne i förvaret, det som strömmar till förvaret och det som strömmar ifrån förvarsvolymen. *Vattenflöden in i förvarsvolymen* kan föra med sig löst syre eller höga salthalter vilket kan påverka djupförvarets isolerande förmåga. *Vatten som finns i förvarsvolymen* kan påverka stabiliteten hos bentonitbufferten genom höga salthalter. Salthalten på förvarsdjup har också betydelse för den totala kostnaden då högre salthalter kräver högre andel bentonitinblandning i återfyllnadsmaterialet. Sammansättningen av det *vatten som flödar från* förvaret påverkar transporten av radionuklider.

Grundvattnens kemiska sammansättning påverkas av fysikaliska och kemiska processer. De fysikaliska processer som påverkar sammansättningen är diffusion och blandning. Effekterna av dessa processer är direkt relaterade till grundvattnets flöde i bergets spricksystem.

De kemiska processer som påverkar grundvattnets sammansättning är reaktioner mellan ämnen som är lösta i vattnet, lakning av ämnen i bergets sprick- och matrismineral, utfällning på sprickytorna, samt de reaktioner som påverkas av mikrobiell aktivitet /SR 97, Processrapporten, SKB, 1999b/.

Ämnesområdet hydrogeokemi kan delas in i beståndsdelarna undersökningar av ytvatten och ytnära grundvatten, borrhålsundersökningar, långtidsmätning/monitoring, vatten- och sprickmineralanalyser samt utvärdering/modellering. Undersökningar av ytvatten och ytnära grundvatten omfattar provtagning av vatten i sjöar, hav, vattendrag, källor, brunnar och jordrör. Borrhålsundersökningar omfattar undersökningar i hammarborrhål och i kärnborrhål med avseende på grundvatten och sprickmineral. De olika borrhåls-teknikerna påverkar vattenkemiprovtagning på olika sätt. Sprickmineralanalyserna kompletterar bilden av grundvattnets nuvarande och tidigare kemiska förhållanden. Långtidsmätning/monitoring görs som en återkommande uppföljning i ett urval av provtagningspunkter för att följa upp eventuella långsiktiga förändringar i vattenkemin. Vattenanalyser i olika former och omfattning utgör viktiga redskap för att erhålla data som beskriver vattensammansättning. Bearbetning av hydrogeokemiska data resulterar i både kvalitativa och kvantitativa modeller. Dessa ger underlag till den hydrogeokemiska beskrivningen i den platsbeskrivande modellen, se figur 2-4.

### 8.1.2 Ämnesspecifika mål

De krav, önskemål och kriterier som identifierats för ämnesområdet hydrogeokemi redovisas av /Andersson m fl, 2000/. Med hänvisning till huvudmålen för de geovetenskapliga undersökningarna (avsnitt 2.2) är den hydrogeokemiska verksamheten inriktad mot att:

- karakterisera de ostörda grundvattenkemiska förhållandena på platsen samt beskriva vattnets ursprung och omsättning i berget som funktion av djup och utbredning,
- erhålla specifika data på parametrar som har betydelse för säkerhetsanalys och projektering, exempelvis pH, Eh, sulfid, kolloider och klorid,
- identifiera eventuell förekomst av fritt löst syre i grundvattnet på djupförvarsnivå.

Några av dessa parametrar har avgörande betydelse vid utvärdering om platsen är lämplig för ett djupförvar.

### ***Inriktning under inledande platsundersökning***

Efter inledande platsundersökning ska SKB ha uppnått en översiktlig förståelse för platsen med avseende på ytnära kemiska förhållanden, kemiförhållanden ned till 100–200 m djup samt de reaktioner som styr vattnets kemiska sammansättning. Olika *typvatten* (se avsnitt 8.2) såsom nederbörd, sedimentporvatten, havsvatten och biogent omvandlat vatten ska vara identifierade och karakteriserade. Dessa *typvatten* utgör utgångsläge för senare kommande blandningsberäkningar.

En första version (version 1.1) av den hydrogeokemiska beskrivningen i den platsbeskrivande modellen upprättas i ett tidigt skede. Beskrivningen uppdateras (version 1.2) efter avslutade inledande undersökningar.

Ytnära provtagningar genomförs i regional skala för att ge initialvärden för kommande utvärdering av djupa grundvatten. Därefter följer grundvattenundersökningar i hammarborrhål (cirka 0–200 m). Kemiprogrammet behöver också kemiprioriterade kärnborrhål. Kemidata från minst ett djupt kärnborrhål (1 000 m eller djupare) utgör ett väsentligt underlag för att bekräfta eller avfärda den valda platsen. Vidare ska ytterligare djupa *typvatten* vara identifierade och mätningar som kräver ostörda förhållanden, såsom redoxstatus och omsättningstid, ska vara genomförda.

### ***Inriktning under komplett platsundersökning***

Efter avslutad platsundersökning ska SKB ha nått en bred hydrogeologisk/hydrogeokemisk förståelse av platsen. Detta innebär kunskap om vattnets sammansättning, blandningsproportioner och uppehållstid i olika delar av förvarsvolymen. SKB ska ha erhållit data på de vattenkemiska parametrar som används för analys av förvarets långsiktiga säkerhet och ingenjörsbarriärernas funktion, samt för projektering.

Den hydrogeokemiska beskrivningen av de djupa förhållandena och den rumsliga variationen i konduktiva strukturer i bergmassa och i sprickzoner redovisas i olika versioner (2.1 till 2.x) och fastläggs när platsundersökningarna avslutats.

Kemiprogrammet behöver information från ytterligare minst ett kemiprioriterat kärnborrhål utöver det hål som borrarats och karakteriserats under den inledande platsundersökningen. Till detta kommer de provtagningar och analyser som görs i samband med interferenspumptesterna. Om behov föreligger kompletteras karakteriseringen av ytnära förhållanden genom provtagning i hammarborrhål och av ytvatten.

### **8.1.3 Arbetsmetodik och samordning**

Undersökningar och karakterisering genomförs stegvis (se avsnitt 2.3.1 och kapitel 3) och i samverkan med övriga ämnesområden. Figurerna 3-12, 3-20 och 3-29 i kapitel 3 visar arbetsgång och informationsbehov för att ta fram den hydrogeokemiska beskrivningen.

Undersökningar av ytvatten och ytnära grundvatten har stark koppling till programmet för ytnära ekosystem. Provtagning och analys kommer att samordnas vid genomförandet. Kartering av huvudbergarter, sprickmineral, sprickor och sprickzoner är väsentlig information som samordnas med eller hämtas från geologiprogrammet. Vattengenomsläpplighet, trycknivåer, elektrisk konduktivitet och flöde är viktig information som ges av hydrogeologiprogrammet. Val av borrhålssektioner samordnas med hydrogeologiprogrammet.

Under den inledande platsundersökningen är behovet av ostörda grundvattenprov av högsta prioritet och de hydrogeokemiska undersökningarna kommer att ha förtur till åtminstone ett av de planerade djupa borrhålen. Långtidsmonitoring samordnas med hydrogeologiprogrammet och programmet för ytnära ekosystem.

Val av borrhål för hydrogeokemisk karakterisering planeras i det gemensamma borrhållsprogrammet (se kapitel 11) och samordnas framförallt med behoven som framkommer vid beskrivningen av bergets transportegenskaper (kapitel 9).

## 8.2 Modeller och parametrar

### 8.2.1 Modellernas uppbyggnad

Hydrogeokemimodellerna har till uppgift att beskriva de kemiska förhållandena i och kring den bergvolym som innesluter förvaret. Det finns olika aspekter som behöver belysas, och därmed varierande behov av modeller och beskrivningar. För förvarets långsiktiga säkerhet är det väsentligt att känna värdet för vissa ämnens halter nu och i framtiden. För att nå denna kunskap behövs en god förståelse för de förhållanden som påverkat dessa halter. Vidare finns en uppdelning mellan kvalitativa (begreppsmodeller) och kvantitativa (beskrivande) modeller som möjliggör beräkningar. En samlad bild av de hydrogeokemiska modellerna finns i tabell 8-1.

Utifrån given begreppsmodell anger den beskrivande modellen de rådande förhållandena och identifierar de viktigaste processerna som bidragit till att skapa dessa förhållanden. Beskrivningen är uppbyggd utifrån data som samlats inom den undersökta bergvolymen.

Figur 8-2 illustrerar den antagna begreppsmodellen som utgör grund för den inledande utvärderingen/modelleringen. Begreppsmodellen kommer dock att utvecklas under arbetets gång. Den enklaste modellen är en rumslig fördelning av de viktigaste lösta ämnens halter i bergvolymen. Salthaltsfördelningen, de enskilda huvudkomponenterna, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> samt pH är de vanligast förekommande. Av stort värde är dessutom att beskriva de stabila och radioaktiva isotoperna <sup>2</sup>H, <sup>18</sup>O, <sup>34</sup>S, <sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C, <sup>3</sup>H och <sup>87</sup>Sr. I sig själva är fördelningarna av de lösta ämnens halter i vissa fall indikativa för pågående processer. Mer information erhålls genom statistisk bearbetning i så kallad multivariatanalys, som ger en uppdelning i olika klasser. De olika klasserna representerar vatten som genomgått en viss utveckling. Genom att jämföra de olika klasserna sinsemellan kan deras olika utvecklingsvägar identifieras oavsett var i volymen de förekommer.

Inom varje klass definieras ett typvatten (för den klassen). Dessa utgör grund för fortsatta beräkningar av reaktioner och blandningsförhållanden. I dessa beräkningar kan mätdata för t ex de tio viktigaste komponenterna ingå /Laaksoharju, 1999/. De framräknade blandningsproportionerna och den verkliga uppmätta sammansättningen utgör grund för att beräkna omfattningen av kemiska reaktioner i grundvatten/berg-systemet. Man utgår då ifrån att en avvikelse i halt hos någon av de ingående komponenterna är resultat av någon kemisk reaktion som inträffat efter det att vattnet blandats. Det kan vara fråga om upplösning eller utfällning av olika mineral eller mikrobiella processer som genererar t ex sulfid, karbonat, tvåvärt järn m m. På senare tid har kunskapen om de mikrobiella processerna ökat /Pedersen, 2000/. Det har visat sig att dessa har stort inflytande på den hydrogeokemiska utvecklingen och därmed den hydrogeokemiska tolkningen.

## Tabell 8-1. Kortfattad presentation av de hydrogeokemiska modellernas uppbyggnad och innehåll.

### Hydrogeokemisk beskrivning av försvarsplatsen

#### Modellens syfte

Grundvatten- och geokemi i nuläge och tidigare i den undersökta bergvolymen. Beskrivningarna avser förhållandena i de vattengenomsläppliga partierna av berget, dvs sprickzoner och enskilda vattenförande sprickor.

#### Processbeskrivning

Fysikaliska: Vatten av olika typer och av olika ursprung blandas på grund av flödesförhållanden i berggrunden. Även diffusiv transport kan förekomma där flödet är lågt.

Kemiska: Reaktioner mellan komponenter lösta i vattnet och mellan lösta komponenter och mineral i berggrunden, jämviktsreaktioner och vittringsreaktioner.

Biologiska: oxisk och anoxisk nedbrytning av organiskt material, reduktion av trevärt järn, sulfat, koldioxid, metanogenes m m.

### Modellens beståndsdelar

#### Geometriskt ramverk

Egenskaperna är fördelade i de konduktiva strukturerna i den undersökta bergmassan. Enheterna är de som identifierats av geologiprogrammet och verifierats i hydrogeologi- och hydrogeokemiundersökningarna.

#### Parametrar

Salthaltsfördelningen, de enskilda huvudkomponenterna (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>), stabila och radioaktiva isotoper (<sup>2</sup>H, <sup>18</sup>O, <sup>34</sup>S, <sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C, <sup>3</sup>H och <sup>87</sup>Sr), redoxkänsliga (spår)ämnen (Fe(II), Fe(III), Mn<sup>2+</sup>, S(-II), U(IV)), organiskt material (t ex fulvo- och humusämnen), kolloidinnehåll samt tillståndsvariablerna pH och Eh. Bestämningen av dessa parametrar görs i enlighet med standardiserade analysklasser, se avsnitt 8.3.

#### Datarepresentation

Kemidata som utvärderas ges primärt en endimensionell fördelning mot djupet. Interpolationsverktyg och statistik används för en tredimensionell fördelning. Utvärdering av processer görs med rumslig fördelning, eller med tiden som variabel.

#### Randvillkor

En hydrogeologisk förståelse av nuvarande vattenflödesförhållanden samt bakåt i tiden utgör den viktigaste grunden för att identifiera flödes- och cirkulationssystem. Detta används för att definiera typvatten.

#### Numeriska verktyg

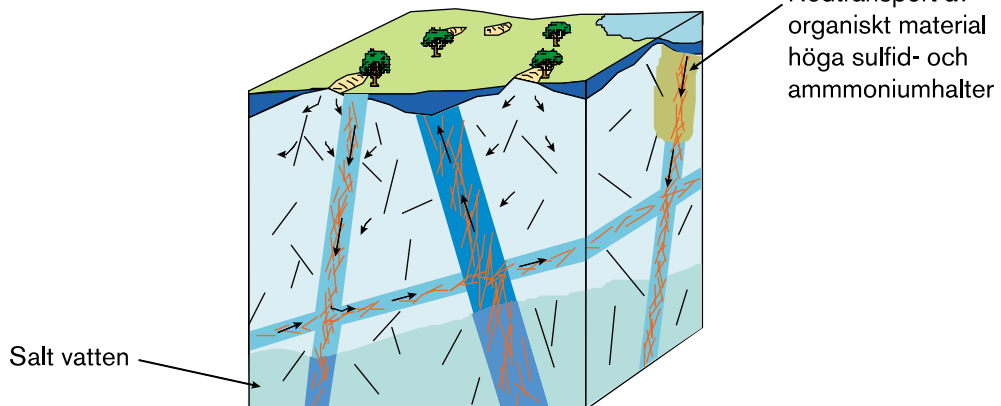
Geokemiska jämviktsprogram så som PHREEQE, WATEQ, NETPATH. Interpolationsprogram baserat på linjär regression, kriging, neurala nätverk.

Statistiska multivariatprogram kombinerat med blandningsberäkningar och massbalansberäkningar, M3.

#### Beräkningsresultat

Blandningsproportioner, jämviktsindex, jämviktskoncentrationer ur vilka man kan härleda omsättningstider.

### Hydrogeokemisk beskrivning



Figur 8-2. Exempel på begreppsmodell för hydrogeokemi.

De kvantitativa beräkningsverktygen kan utnyttjas för att beräkna vilka effekter varje enskild process/reaktion leder till. Till exempel påverkar kalcitupplösning/utfällning pH, karbonathalt och kalciumhalt. Eftersom flera processer samverkar och de dominerande processerna varierat under olika tidsperioder gör detta att modellerna får en begränsad förmåga att klargöra i vilken sekvens och vilken omfattning de olika processerna dominerat. Det vi ser idag är ett resultat av olika processer och reaktioner som pågått i varierande omfattning under lång tid.

De hydrogeologiska beräkningarna av nu rådande flödesförhållanden, används som grund för en kvalitativ tolkning av hydrokemiska data /Laaksoharju och Wallin, 1997/. Det går att se hur grundvattnet strömmar i dagsläget, och då utröna t ex vattenkemins variation mot djupet (i inströmningsområden) och vilken betydelse de mest konduktiva strukturererna har för blandning av olika vattenvolymer som kan skilja sig både i ursprung och sammansättning.

I nästa skede kan de hydrokemiska beskrivningarna användas för att granska de hydrogeologiska beräkningarna. Den nu rådande grundvattenkemin ger en bild av tidigare sannolikt rådande flödesförhållanden. Om de hydrogeologiska modellerna är riktiga ska också de kunna beskriva flödessituationen bakåt i tiden. En sådan korsvis modellgranskning har genomförts inom ramen för det internationella samarbete som utförs i Äspö Task Force för modellering av grundvattenströmning och transport av lösta ämnen, t ex /Molinero, 2000/.

### **8.2.2 Ingående parametrar i den beskrivande modellen**

För förståelsen av de hydrogeokemiska processerna och deras betydelse för långsiktig säkerhet behövs ett stort antal parametrar som kan indikera ursprung och utveckling. För säkerhetsanalysen och projekteringsarbetet är det vissa komponenter som är av speciell betydelse eftersom halterna direkt påverkar kapselkorrosion, bentonitfunktion, bränsleupplösning/löslighet eller radionuklidretention. Komponenterna finns sammanfattade i tabell 8-2. Tabellen bygger på de tabeller som togs fram för parameterrapporten /Andersson m fl, 1996/, den revision som skedde vid arbetet med krav och kriterier /Andersson m fl, 2000/ och vid framtagandet av det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet /SKB, 2000b/. Tabellen visar också när parametern huvudsakligen bestäms.

### **8.2.3 Modellverktyg och planerade analyser**

#### **Syfte**

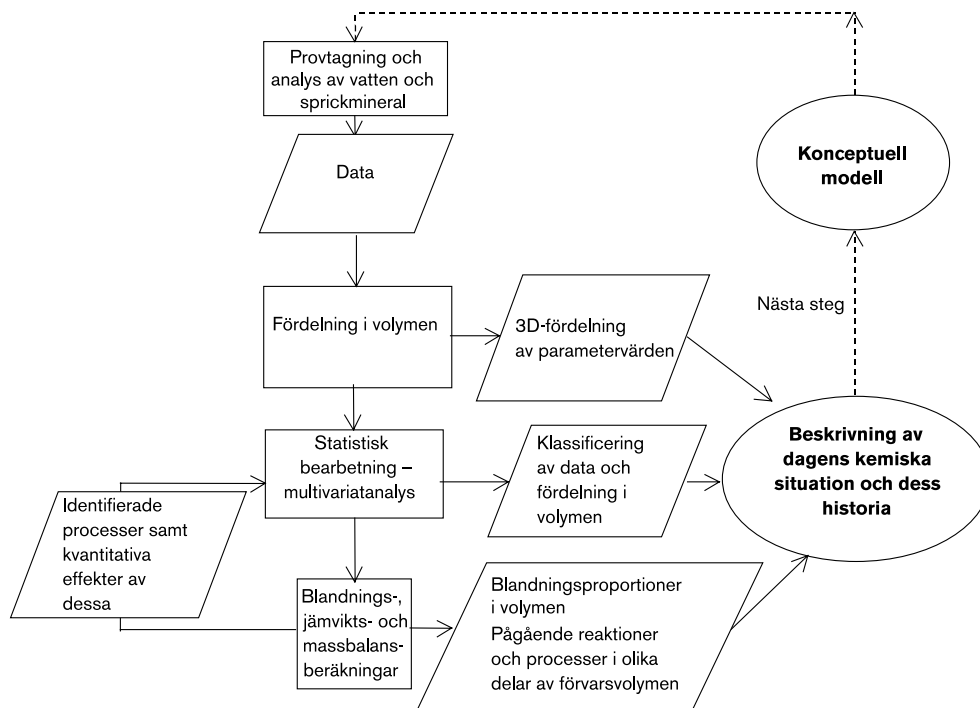
Den hydrogeokemiska modelleringen syftar primärt till att beskriva fördelningen av grundvattnets sammansättning i hela bergvolymen utifrån ett begränsat antal vattenprover. Dessutom utförs beräkningar eller kvalitativa analyser för att förstå grundvattenbildning, utveckling, ålder och blandning. Informationen ger underlag för prediktioner när det gäller tekniska barriärers långtidfunktion och ger kunskaper om kemiska förhållanden som kan påverka bygge och drift. Modelleringen ger även kompletterande bidrag

**Tabell 8-2. Sammanställning av hydrogeokemiska parametrar som ingår i hydrogeokemisk beskrivning. Tabellen visar också när parametern huvudsakligen bestäms (se förklaring i tabell 2-3).**

Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för
		FS	IPLU	KPLU	DETU	
Tillståndsvariabler	pH, Eh		x	x	x	Transportmodell Kapselkorrosion Bränsleupplösning, Bentonit
Huvudkomponenter	TDS (summan av huvudkomponenter), Na, K, Ca, Mg, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Cl, Si		x	x	x	Geovetenskaplig förståelse Projektering Kapselkorrosion Bentonitstabilitet
Spårämnen	Fe, Mn, U, Th, Ra, Al, Li, Cs, Sr, Ba, HS, I, Br, F, NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , HPO <sub>4</sub> , REE, Cu, Zr, Rb		x	x	x	Geovetenskaplig förståelse Transportmodell Kapselkorrosion
Lösta gaser	N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , Ar, He, C <sub>x</sub> H <sub>x</sub> , O <sub>2</sub>		x	x	x	Geovetenskaplig förståelse Transportmodell
Stabila Isotoper	<sup>2</sup> H i H <sub>2</sub> O, <sup>18</sup> O i H <sub>2</sub> O och SO <sub>4</sub> , <sup>13</sup> C i DIC och DOC, <sup>34</sup> S i SO <sub>4</sub> och HS, <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He, <sup>11</sup> B, <sup>37</sup> Cl, Xe-isotoper, Kr-isotoper		x	x	x	Geovetenskaplig förståelse Transportmodell
Radioaktiva Isotoper	T, <sup>14</sup> C i DIC och DOC, <sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U, <sup>36</sup> Cl, Rn, <sup>226</sup> Ra		x		x	Geovetenskaplig förståelse Transportmodell
Övrigt	DOC (Löst organiskt material), Humussyror, Fulvosyror, Kolloider, Bakterier		x		x	Transportmodell Bränsleupplösning
Sprickmineral	Huvud och spårämne i fasta faser, δ <sup>18</sup> O, δ <sup>13</sup> C, <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr, <sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U, morfologi i kalcit och järnoxider, <sup>34</sup> S i FeS, FeS <sub>2</sub>			x	x	Geovetenskaplig förståelse Transportmodell
Bergmatris	Total salthalt i porvatten			x	x	Transportmodell

för att förstå grundvattnets flödesförhållanden. Speciellt viktigt är det att spåra tidigare rådande flödesförhållanden, eftersom dessa kan användas för att identifiera framtida möjliga förhållanden. Modelleringssekvensen beskrivs översiktligt i figur 8-3.

Modelleringssekvensen som beskrivs nedan är baserad på erfarenheter från Äspöprojektet. Den kommer att vara likartad oavsett hur platsen ser ut. Däremot kommer innehållet och omfattningen av de olika modellstegen att variera beroende på de specifika förhållandena på platsen.



Figur 8-3. Dataflöde med utvärderingsmetoder och resultat (endast hydrogeokemi).

### Förutsättningar

De hydrogeokemiska undersökningarna/utvärderingarna ska fylla två olika behov. Det ena behovet gäller data om egenskaper (=parametervärden) som används i beräkningar för analys av förvarets långsiktiga säkerhet. Det andra gäller förståelsen för varför de kemiska förhållandena är sådana som de är och hur kemin kommer att utvecklas i framtiden.

För säkerhetsanalysen behövs parametervärden för pH, Eh, kolloider, fulvo- och humussyror, övrigt organiskt material, bakterier, kväveföreningar, sulfid, sulfat, karbonat, fosfat och total salthalt inklusive huvudsakliga katjoner. Det räcker med en uppfattning om vilka värden de antar på förvarsnivå samt över och under förvaret. För att fylla detta behov behövs ett fåtal prov av absolut högsta möjliga kvalitet för analys av dessa (känsliga) parametrar. Efter att nu rådande parametervärden fastlagts gäller det att på goda grunder prediktera möjliga förändringar i framtiden. För detta krävs även en god förståelse för vad som påverkat och skapat dagens förhållanden.

För att få kunskap om vattnets ursprung och omsättning, behövs kännedom om den rumsliga variabiliteten och koppling mot de hydrogeologiska mätningarna och tolkningarna. Det gör att ett stort antal mätpunkter behövs, men kravet på provens kvalitet är inte lika stort för detta syfte. Till exempel under borrningen kan vattenprov tas som är representativa för den plats där de tas. Det vatten som provtas är då starkt påverkat av spolvatten och borrhax men kan ändå användas för att bestämma huvudkomponenter och isotoper som indikerar vattnets ursprung. Ett viktigt komplement fås i samband med hydrauliska interferenspumptester där vatten representativt för de mest konduktiva strukturerna kan provtas över en längre tid. På så sätt får man en uppfattning om riktningen i flödesbanorna, dvs mot vilken vattentyp den testade ledaren går.

**Tabell 8-3. Översikt över parametrar som hämtas från andra program.**

Parameter	Bestäms inom ämnesprogram
Hydrologisk kartläggning av sjöar, vattendrag, brunnar, källor	Hydrogeologi
Indikation på konduktiva partier i hammarborrhål och kärnborrhål	Geologi och hydrogeologi (i samband med borrhåll)
Läge, orientering och utsträckning av sprickzoner	Geologi
Konduktiva sprickzoner i olika borrhål	Hydrogeologi
Transmissivitet för sprickzoner och sprickor	Hydrogeologi
Absoluttryck i provtagna borrhållssektioner	Hydrogeologi
BIPS-loggning och kärnkartering	Geologi

För att bestämma de hydrogeokemiska parametrarna behövs ingångsdata (tolkade eller uppmätta) från andra ämnesprogram. Tabell 8-3 visar en sammanställning av parametrar som hämtas från andra program.

En integrering av de hydrogeokemiska och de hydrogeologiska beskrivningarna är nödvändig. Det finns egentligen inga enkla jämförelser som möjliggör granskning av konsistensen hos de två modellerna. Det krävs en systematisk jämförelse som förutsätter att data finns tillgängliga från samma borrhållssektioner i berget. För de hydrogeokemiska förhållandena krävs dessutom att data måste tas i ett tidigt skede innan eventuella störningar förändrat den ursprungliga situationen /Smellie och Laaksoharju, 1992/.

### **Metoder**

Bearbetning av hydrogeokemiska data resulterar i både kvalitativa och kvantitativa tolkningar. De kvalitativa tolkningarna görs för att identifiera de väsentliga processer som påverkat grundvattenkemin. Kunskapen om dessa processer används för att uppdatera begreppsmodellen och utgör en grund för efterföljande beräkningar.

Exempel på en kvalitativ tolkning är karbonat-kolsyrasystemets utveckling mot djupet. I ytnära vatten är pH-värdet lågt på grund av att vattnet innehåller mycket löst koldioxid. Det sura koldioxidrika vattnet reagerar med mineral i sprickorna längre ner i berget, företrädesvis med kalcit. Effekten blir att vattnets innehåll av kalcium och vätekarbonat ökar samtidigt som pH-värdet stiger. Att detta är fallet kan man sluta sig till genom att korrelera pH, karbonathalt och kalciumhalt mot djupet. Kvantitativt, kan man beräkna i vilken omfattning karbonatsystemet står i jämvikt eller ej, vid olika tillfällen. Ju närmare jämvikt systemet befinner sig desto säkrare kan man vara på att de vattenprov som analyserats verkligen representerar ett grundvattensystem som är i balans. Eftersom kalcit-kolsyrasystemet innehåller snabba reaktioner så är varje avvikelse från jämvikt ett tecken på en naturlig eller onaturlig störning. I denna betraktelse är kalcitsystemet idealt och lättare att beskriva än övriga hydrogeokemiska processer men tillvägagångssättet är detsamma. Med enkla eller komplexa statistiska korrelationsverktyg kan man hitta samband dels mellan olika lösta komponenter sinsemellan och dels var och en för sig som t ex funktion av djupet. Detta kan leda till att man identifierar de kemiska eller biologiska processer som påverkar dessa parametervärden. Därefter kan man beräkna vattenblandningar, massbalanser och jämvikter. Blandningsproportioner och förekomst/frånvaro av jämvikt kan utnyttjas för att förutspå framtida förhållanden utifrån det generella antagandet att förekomst av jämvikt antyder att systemet är kemiskt stabilt och kommer att så förbli tills grundvattenflödesförhållandena markant förändras.



För att utröna effekter av blandningar och reaktioner definieras så kallade typvatten. Dessa typvatten har ett givet ursprung och en given kemisk sammansättning, se 8.2.1. Typvattnen är lokalt definierade, men är ofta snarlika på platser med likartad utveckling. Exempelvis utgör nederbörd i form av regn och snö ett typvatten liksom även havsvatten. Det är ofta lätt att identifiera yttnära typvatten, medan det är svårt att definiera djupa typvatten. Extremt salt grundvatten som påträffas på stort djup är ett typvatten, även om dess ursprung är okänt.

### **Verktyg**

Kombinerad interpolering och visualisering utförs med programvaran Voxel analyst. Figur 8-4 ger ett exempel /SKB, 1998/. Interpolerade bilder av denna typ har osäkerheter men ger ändå stor möjlighet att på ett enkelt sätt informera om hur vattenkemin är rumsligt fördelad.

Beräkningar utförs, dels som jämviktsmodellering, dels som reaktionsvägsmodellering /Smellie och Laaksoharju, 1992/. Jämviktsmodellering sker under antagande att systemet är stationärt och att det råder fullständig jämvikt i hela systemet. Tillförlitliga koder som används för jämviktsmodellering är EQ 3, EQUIL, WATEQ, PHREEQE, med flera. Reaktionsvägsmodellering efterliknar en transport där vattnet successivt kommer i jämvikt med olika mineraler. Användbara reaktionsvägskoder är EQ 6, PHREEQEF och NETPATH. Samtliga nämnda jämviktskoder och reaktionsvägskoder för beräkningar i vatten-mineralsystem är försedda med en egen termodynamisk databas.

Med M3 koden som hanterar alla/många parametrar samtidigt, utförs samtidiga blandnings- och massbalansberäkningar för att beskriva blandningsförhållanden och massbalanser. Beräkningar med M3 utgör en väsentlig del i modelleringsarbetet eftersom det har visat sig att ett grundvattens kemiska sammansättning till stor utsträckning kan beskrivas som ett resultat av blandningar där fler än två vattentyper ingår /Laaksoharju, 1999/.

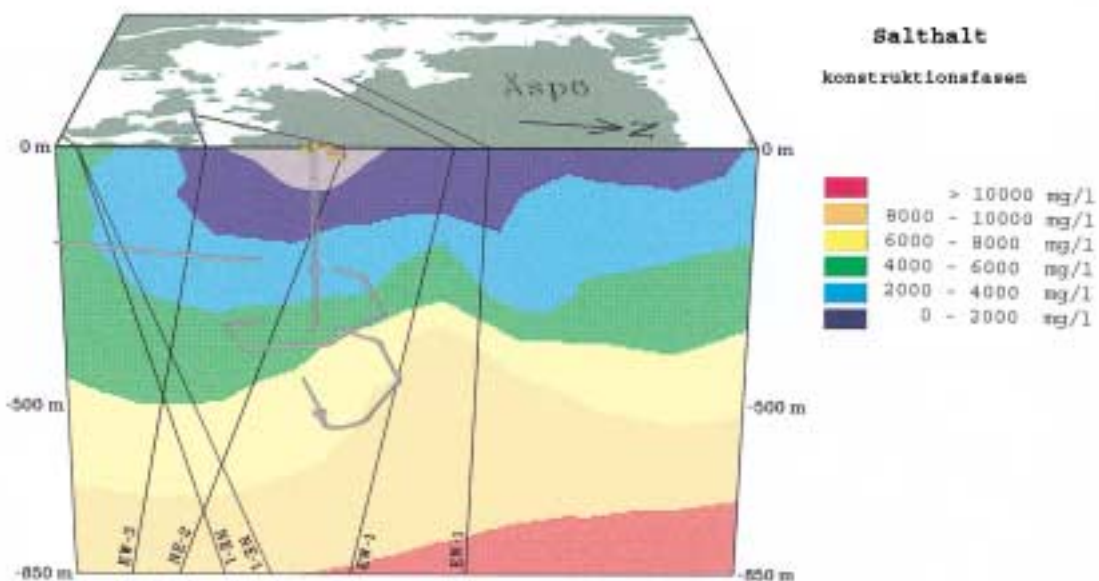
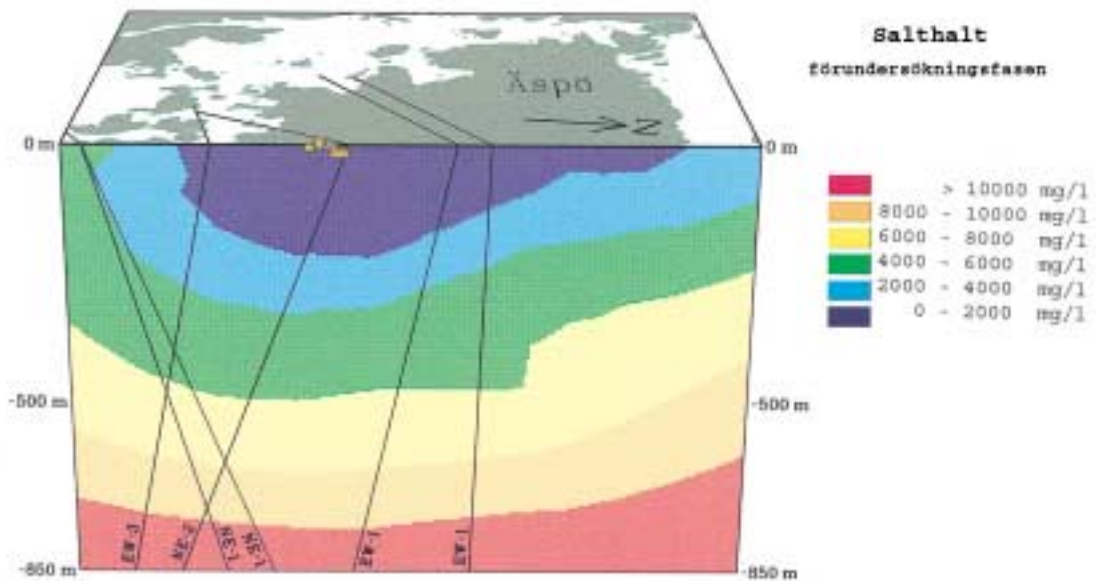
### **Eftersträvat resultat**

Modelleringen resulterar i en enkel beskrivning av uppdelningen och fördelningen av de olika vattentyperna. Emellertid finns det osäkerheter i resultaten. Till detta bidrar bl a det faktum att det är svårt att avgöra hur stor del av den observerade blandningen av olika vattentyper som i själva verket är förorsakad av störningar från de genomförda undersökningarna. Det är borring som ger de största störningarna. Det första målet med hydrogeokemisk modellering är därför att identifiera och om möjligt korrigera för naturliga och artificiella störningar.

Vattnets kemiska sammansättning i kombination med olika stabila och radiogena isotoper ger information om grundvattnets omsättningstid. Olika isotoper är lämpade för att identifiera olika processer. Därför ger en kombination av en stor mängd olika isotopbestämningar den bästa bilden. Tidsserier av utvalda högkvalitativa data från olika punkter underlättar tolkningen och minskar osäkerheterna (möjliga förklaringar till mätdata).

Utöver den allmänna förståelsen av dagens kemiska förhållanden på platsen/i området ges kvantitativ kunskap om:

- elektrokemiska parametrar som pH och Eh,
- huvudkomponenter som direkt påverkar ingenjörsbarriärerna,



*Figur 8-4. Illustration av salthaltsfördelningen i Äspö gjort med visualiseringsprogrammet Voxel analyst.*

- spårämnen som indikerar redoxförhållanden,
- stabila respektive radioaktiva isotoper som ger en indikation om vattnets omsättningstid,
- kolloider, bakterier och organiska ämnen,
- gasinnehåll och sammansättning.

Med kunskap om vilka kemiska processer som påverkar dessa förhållanden är det möjligt att prediktera utvecklingen kortsiktigt och långsiktigt vid ett bygge av ett djupförvar/slutförvar.

### 8.3 Karakteriseringsmetoder

De olika metoderna för att samla in hydrogeokemiska data kan delas in i följande fyra kategorier:

- Metoder för vattenprovtagning och analys inkluderande: ytvatten, sedimentporvatten, brunnar, jordrör, hammarborrhål, vattenprovtagning under kärnborrning (kärnborrhål), hydrokemisk loggning (kärnborrhål), fullständig kemikaraktisering (kärnborrhål), vattenprovtagning vid pumptester (kärnborrhål) och långtidsmonitoring av kemiska parametrar (olika typer av provtagningsobjekt).
- Sprickmineralanalys.
- Utvärderingsmetoder.

Samtliga metoder beskrivs kortfattat i följande avsnitt. För mer ingående och detaljerad information hänvisas till de metodbeskrivningar som kommer att tas fram. Erfarenheter från tidigare liknande undersökningar på Äspö har rapporterats i /Almén m fl, 1994/.

Hur borrhningsaktiviteter genomförs har stor betydelse för de hydrogeokemiska undersökningarnas tillförlitlighet. Av särskild vikt är spolvattenhantering, tvätt av ”i hålet utrustning” och val/hantering av kemiska produkter som drivmedel, smörjmedel etc. Dessa aspekter behandlas i borrhprogrammet, kapitel 11.

I praktiken är det svårt att provta grundvatten som är fritt från störningar. Anledningen är att de åtgärder som krävs för att borra och undersöka berggrunden har stor påverkan på grundvattnet. Man kan skilja mellan kemiska och hydrologiska störningar. Kemiska störningar förorsakas i första hand av själva borrhningen. Borrkax det vill säga det mjöl som bildas vid borrhningen reagerar med vattnet och påverkar de lösta ämnena och partikelbundet material. Restprodukter i form av olja, metallfragment och annat förekommer också sporadiskt och påverkar ämnen och parametrar som är betydelsefulla för analys av långsiktig säkerhet. Genom omfattande pumpning kan de kemiska störningarna minskas. Därmed får man en god uppfattning om det kemiskt ostörda vattnets sammansättning, men till priset av en mer omfattande blandning. De hydrologiska störningarna förorsakas av borrhning, borrhålsundersökningar och intern vattenströmning i borrhålet. Det spolvatten som används vid borrhning kan märkas för att ge möjlighet till korrigerigering av de resultat som erhålls vid provtagning under borrhning. Dessa är då de hydrologiskt minst störda, men kemiskt mest störda resultaten, se /Smellie m fl, 1999/. Provtagnig vid alla övriga tillfällen ger en större hydrologisk störning.

#### 8.3.1 Kemiklasser

SKB har definierat olika kemiklasser för vattenprovtagning och analys, se tabell 8-4.

**Tabell 8-4. Beskrivning av SKB:s kemiklasser för vattenprovtagning och analys.**

Klass	Beskrivning
Klass 1:	<b>Enkel provtagning för kontroll av tidsstabilitet</b> – Elektrisk konduktivitet, pH, uranin*, temperatur
Klass 2:	<b>Enkel provtagning för typklassning</b> – Elektrisk konduktivitet, pH, Cl, HCO <sub>3</sub> , uranin*, temperatur <b>Tillval: a, b</b> – a = Arkivering av frysprov – b = δ <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> H, δ <sup>18</sup> O
Klass 3:	<b>Enkel provtagning för bestämning av huvudkomponenter (ej redox)</b> – Elektrisk konduktivitet, pH, Cl, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Br, uranin*, temperatur, katjoner (utom Fe, Mn)** och SO <sub>4</sub> analyserat som svavel med ICP-AES <b>Tillval: a, b, c, d</b> – a = Arkivering av frysprov – b = δ <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> H, δ <sup>18</sup> O – c = δ <sup>34</sup> S (i SO <sub>4</sub> ), δ <sup>37</sup> Cl, δ <sup>87</sup> Sr, δ <sup>10</sup> B – d = <sup>14</sup> C pmc (procent modernt kol), δ <sup>13</sup> C promille PDB (avvikelse från standarden Peedee Belemnite)
Klass 4:	<b>Omfattande provtagning för fullständig kemisk karakterisering</b> – Elektrisk konduktivitet, pH, Cl, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Br, uranin*, temperatur, DOC, katjoner** och SO <sub>4</sub> analyserat som svavel med ICP-AES, δ <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> H, δ <sup>18</sup> O – HS <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> – Arkivering av surgjorda samt okonserverade frysprov <b>Tillval: e</b> – e = NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> och/eller NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , F <sup>-</sup> , I <sup>-</sup>
Klass 5:	<b>Omfattande provtagning för fullständig kemisk karakterisering inklusive specialanalyser</b> – Elektrisk konduktivitet, pH, Cl, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Br, uranin*, temperatur, DOC, katjoner** och SO <sub>4</sub> analyserat som svavel med ICP-AES – <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> H, <sup>18</sup> O – F <sup>-</sup> , I <sup>-</sup> – HS <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> och/eller NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> – Arkivering av surgjorda samt okonserverade frysprov <b>Tillval: c, d, f, g, h, i, j, k, l, m</b> – c = Isotoperna δ <sup>34</sup> S (i SO <sub>4</sub> ), δ <sup>37</sup> Cl, δ <sup>87</sup> Sr, δ <sup>10</sup> B – d = <sup>14</sup> C pmc (procent modernt kol), δ <sup>13</sup> C promille PDB (avvikelse från standard, Peedee Belemnite) – f = Isotoperna <sup>226</sup> Ra, <sup>228</sup> Ra och <sup>222</sup> Rn – g = U och Th isotoper – h = spårmetaller (ICP-MS, AAS och/eller INAA) – i = Löst gas (inklusive δ <sup>18</sup> O, δ <sup>13</sup> C, <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He), bakterier – j = Kolloider – k = Humus- och fulvosyror – l = pH- och Eh-mätningar on-line

\* Bestäms endast då Uranin använts som markör för borratten (spolvatten).

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

\*\*\* Spårmetaller: U, Th, lantanoider, tungmetaller eller eget val.

### **8.3.2 Provtagning av ytvatten och nederbörd**

#### **Syfte**

Kemidata från ytvatten och nederbörd utgör en delmängd av de data som behövs för att kunna beskriva vattenomsättningen i ett område och dess påverkan på grundvattensammansättningen. Dessa data behövs som initialvärden och randvillkor i modellberäkningar. I inledningsskedet av platsundersökningarna genomförs sammanhängande provtagningskampanjer där alla typer av ytvatten ingår för att skapa en helhetsbild av ytvattensystemen i området innan borrningsaktiviteterna blivit alltför omfattande.

#### **Förutsättningar**

Provtagningsaktiviteterna behöver påbörjas tidigt innan området har blivit påverkat av andra aktiviteter som t ex vägbyggen och borrning. Provtagning av ytvatten ska där det är tillämpligt utföras vid samma tillfällen som provtagning av jordrör, brunnar och hammarborrhål. Eftersom ytvattensammansättningen är starkt tidsberoende är det viktigt att punkterna provtas vid samma tillfällen för att skapa en helhetsbild av området.

Om möjligt bör även meteorologisk och hydrogeologisk information samlas in vid samma tillfällen och från samma punkter.

#### **Utrustning och utförande**

Provtagningen av ytvatten kräver i regel ingen särskild utrustning förutom Ruthnerhämtare till sjö- och havsvatten och meteorologisk utrustning av standardtyp för uppsamling av nederbördsprov.

Vid den första kartläggande provtagningen samlas prov in från många och olika typer av provtagningspunkter inom ett område under en kort och sammanhängande tidsperiod. Provtagningsobjekten utgörs av vatten i sjöar, hav, källor och vattendrag.

Upprepade provtagningar utförs preliminärt cirka sex gånger per år under en tvåårsperiod för att ge information om storleken på de naturliga variationerna. Provtagningsobjekten omfattar nederbörd samt sjövattnen, havsvatten och källor.

#### **Resultat**

Analyserade parametrar för nederbörd och ytvattendrag motsvarar klass 3 medan källor och havsvattenprov analyseras enligt klass 5. I sin helhet resulterar metoden i en kemisk översikt över förekommande ytvatten i området med översiktlig kontroll även över de naturliga variationernas storlek.

### **8.3.3 Provtagning av sedimentporvatten**

#### **Syfte**

Provtagning av sedimentporvatten görs för att karakterisera det vatten som transporterats genom sedimentlager och därför innehåller höga halter av restprodukter från organisk nedbrytning.

### **Förutsättningar**

Den enstaka provtagningen föregås av en kartläggning av havs- eller sjöbotten genom att ta ett antal sedimentproppar alternativt "skopprov" spridda över området och eventuellt från olika djup. Detta för att hitta en eller flera representativa provtagningspunkter.

Provtagningen samordnas med biosfärsprogrammet. Det gäller såväl prov av sedimentporvatten som material för analys av den fasta fasen. Samarbete bör också ske med geologi och hydrogeologiprogrammen.

### **Utrustning och utförande**

Speciella provtagare används för att ta ut prov i form av sedimentproppar. Det finns flera olika typer att tillgå, till exempel den som använts vid Äspö /Landström m fl, 1994/ och finska sedimentprovtagare som Niemistö eller Gemini.

Provtagning av sedimentporvatten sker dels i form av enstaka provtagning i flera provtagningspunkter och dels i form av upprepade provtagningar i en eller två av dessa punkter cirka fyra gånger per år under en tvåårsperiod, för att bestämma de naturliga variationernas storlek.

### **Resultat**

Analysomfattning och analysmetoder måste anpassas efter den begränsade volymen porvatten som finns att tillgå. En strävan är att analysomfattningen ska motsvara klass 5.

## **8.3.4 Provtagning av brunnar**

### **Syfte**

Provtagning av brunnar utförs för att få en heltäckande bild av olika typer av ytnära grundvatten. Kemidata från ytnära grundvatten behövs för beskrivningen av grundvattensystemet i dess helhet.

### **Förutsättningar**

Provtagning av brunnar ska utföras vid samma tillfällen som provtagning av ytvatten, jordrör, och hammarborrhål.

I samband med provtagningar görs grundvattennivåmätningar inom hydrogeologiprogrammet. Eventuellt analyseras också dricksvattenkvaliteten.

### **Utrustning och utförande**

Provtagningen av brunnar kräver ingen särskild utrustning. Några av brunnarna (cirka tre) väljs för att bestämma storleken på de naturliga variationerna. Dessa provtas preliminärt cirka sex gånger per år under en tvåårsperiod.

## **Resultat**

Metoden ger brunnsvattendata enligt klass 3 och kompletterar den kemiska översikt-bilden över ytnära grundvatten.

### **8.3.5 Provtagning i jordrör**

#### **Syfte**

Syftet med provtagning i jordrör är dels att identifiera utströmningsområden och dels att ge ett underlag som kan öka förståelsen för de processer som sker i gränssnittet mellan geosfären och det ytnära ekosystemet. Metoden är användbar för att få en översiktlig beskrivning av kemin i ytnära grundvatten på platser som är jordtäkta.

#### **Förutsättningar**

Provtagningen i jordrör utförs vid samma tillfällen som provtagning av ytvatten, brunnar och hammarborrhål.

#### **Utrustning och utförande**

Utrustningen i form av PEH-rör (bottenplugg, filterrör och förlängningsrör) installeras i markhål som t ex kan borraras med hjälp av skruvborr. Huvar monteras på rören för att förhindra att regnvatten, skräp och dylikt tränger ner. Vattenståndet i rören mäts och vatten hämtas upp med en vattenhämtare och filtreras omedelbart på plats. Vissa jordrör väljs för upprepad provtagning för att bestämma de naturliga variationernas storlek. Provtagning sker preliminärt cirka sex gånger per år under en tvåårsperiod.

## **Resultat**

Metoden ger data enligt klass 5 samt variationer i grundvattennivån och kompletterar den kemiska översikt-bilden över ytnära grundvatten.

### **8.3.6 Provtagning i hammarborrhål**

#### **Syfte**

Syftet med provtagning av hammarborrhål är att ge grundvattendata för området ner till cirka 200 meters djup.

#### **Förutsättningar**

Konduktiva sprickzoner identifieras med hjälp av borrsjunkningsdata under borrhningen.

En första tidig provtagning i varje hammarborrhål ska ske så snart som möjligt efter borrhningen och eventuellt före mätning av hydrauliska parametrar.

Upprepade provtagningar för att bestämma eventuella naturliga variationer i hammarborrhålen ska utföras vid samma tillfällen som provtagning av ytvatten, brunnar och jordrör.

## **Utrustning och utförande**

För provtagning av grundvatten i hammarborrhål finns flera utrustningsalternativ. En utrustning som använts tidigare i hammarborrhål beskrivs i /Laaksoharju och Nilsson, 1989 och i Laaksoharju m fl, 1995a/. Ett system som bygger på kommersiellt tillgänglig pump och en enkel eller dubbel manschett kommer att utvecklas.

Provtagningen sker i en sektion som är avgränsad med dubbelmanschett eller från manschett och till botten av borrhålet. Sektionslängden varierar beroende på de vattenförande sprickzonernas utsträckning.

Flöden, tider och tryck i sektionen registreras kontinuerligt under pumpningen. Pumphastigheten anpassas för den valda borrhålssektionens vattenföring.

Tidiga prov tas ut genast efter borrhållning innan grundvattnet har hunnit bli alltför påverkat av borrhålets kortslutande effekt. Två eller tre prov tas ut. Det första provet tas ut genast efter etableringen av provtagningsutrustningen. Det andra och tredje provet tas ut efter det att systemets volym omsatts tre och/eller fem gånger. Systemets volym innebär sektionsvolymen plus slangens volym.

Upprepade provtagningar görs i ett fåtal av borrhålen för att urskilja eventuella naturliga variationer. De upprepade provtagningarna i hammarborrhålen kan även komma att ske med hjälp av permanent installerade manschetter och pumpar.

## **Resultat**

Metoden bidrar med hydrokemiska data enligt klass 3 och klass 5 ner till cirka 200 meters djup. Resultaten inkluderar de flesta tillvalen.

### **8.3.7 Provtagning under kärnborrhållning**

#### **Syfte**

Syftet med provtagning under kärnborrhållning är att få en tidig bild av vattensammansättningen i borrhålet /Smellie och Laaksoharju, 1992/. En fördel med tidig provtagning redan under pågående borrhållning, är att grundvattnet är mindre påverkat av borrhålets kortslutande effekt än vid senare provtagningstillfällen. Vattenproven motsvarar befintligt vatten i den aktuella borrhålssektionen eller i omedelbar närhet och med en ofta betydande spolvatteninblandning. Spolvattenhalter på mellan 5 % och 50 % i proven kan förväntas. Halterna på de dominerande huvudkomponenterna är möjliga att korrigera genom att räkna bort spolvatteninblandningen.

#### **Förutsättningar**

Kärnborrhål delas in i kemiprioriterade kärnborrhål och övriga kärnborrhål, se kapitel 11 i borrhållningsprogrammet. Kemiprioriterade borrhål hammarborras i cirka hundra meter och därefter sker kärnborrhållning med wireline-teknik. Hammarborrhållning används för att minska spolvattenkontamination i genomsläppliga jordlager och ytnära berg. Provtagnings-tekniken för kemiprover skiljer beroende på borrhållningsmetod.



Provtagningarna utförs när större vattenförande sprickzoner penetreras eller när man borrar 100 meter utan indikationer på vatten. Indikationer på vattenförande sprickzoner ges av registrerade spolvatten- och borrarparametrar som:

- spolvattenförlust eller tryckfall på spolvattnet,
- ökad borrsjunkning,
- förhöjd sprickfrekvens hos borrhålet.

Provtagning och analys av det spolvatten som går ner i borrhålet och det returvattnet som kommer upp vid mammutpumpningen är nödvändig information för att göra en vattenbudget och beräkna inblandningen av spolvatten i proven.

I samband med vattenprovtagning med wireline-sond utförs hydrotester inom programmet för hydrogeologi.

### **Utrustning och utförande**

Under den inledande hammarborrningen i kemiprioriterade kärnborrhål tas vattenprov upp på markytan med hjälp av en standardutrustning bestående av pump och manschett.

Vid kärnborrning tas proven ut nere i borrhålssektionen med en speciell vattenprovtagare utvecklad för wireline-borrning. Provtagningssektionen avgränsas uppåt av en manschett och neråt av det som för tillfället är botten av borrhålet. Sektionslängden kan varieras beroende på den vattenförande zonens utsträckning. Provtagningen utförs när vattnet i sektionen har omsatts tre gånger (kan komma att ändras beroende på erfarenheter från nu pågående tester).

Under kärnborrning genomförs även ett separat program för kemisk kontroll av ingående vatten till spolvattentank, spolvatten och returvatten. I programmet ingår regelbundna provtagningar och analyser av vattensammansättning i ingående vatten till spolvattentank enligt klass 3, inkluderande isotoper och bakgrundsfluorescens. Efter uranintillsats och avluftning med kvävgas mäts/kontrolleras uraninnehåll och syrehalt i spolvattnet. I returvattnet görs regelbundna mätningar av elektrisk konduktivitet och uraninnehåll.

### **Resultat**

Metoden bidrar till en tidig hydrogeokemisk översikt. Provtaget vatten representerar avsnitt av bergmassa och hydrauliska strukturer. Resultaten i form av analysdata är:

- Vattensammansättning (huvudkomponenter enligt klass 3) i ett antal av de större vattenförande sprickzonerna i kärnborrhålet under själva borringen.
- Korrigerade värden på vattensammansättningen där effekten av spolvatteninblandningen är borträknad.
- Isotopdata och isotopkvoter enligt klass 3 i den omfattning som den begränsade provvolymen tillåter.

Det separata programmet för kemisk kontroll av spolvatten och returvatten under borrning ger:

- Kemisk sammansättning och bakgrundsfluorescens i ingående vatten till spolvattentank.
- Kontroll över syrehalt och uraninnehåll i spolvatten innan användning.
- Returvattnets halt av spolvatten och dess elektriska konduktivitet.
- Beräknad vattenbudget utgående från använd volym spolvatten samt uppumpad volym returvatten och dess spolvattenhalt.

### **8.3.8 Hydrokemisk loggning**

#### **Syfte**

Syftet med hydrokemisk loggning är att få en snabb översikt över vattensammansättningen längs borrhålet och påvisa eventuella koncentrationsprång /Laaksoharju m fl, 1995b och Laaksoharju, 1999/. Loggningen innebär provtagning av befintlig vattenpelare i borrhålet under ”öppet hål”-förhållanden. Den hydrokemiska loggningen utförs i regel i nära anslutning till avslutad kärnbörning och sker därmed innan borrhålet hunnit komma i jämvikt efter borrningen. I vissa borrhål (i första hand de kemiprioriterade) upprepas loggningen vid ett senare tillfälle, dels för att provta under stabila förhållanden och dels för att få en uppfattning om hur stora förändringarna är.

#### **Förutsättningar**

Efter genomförd borrning och eventuell efterföljande mammutpumpning utförs slangprovtagningen innan övrig borrhålsloggning.

#### **Utrustning och utförande**

Provtagning sker med en slangprovtagare som består av polyamidslang i längder om 50 meter (yd = 10 mm). Varje slangsektion har en ventil och en koppling i varje ände. Längst ned i slangkedjan sitter en backventil. Det totala djupet bestäms av antalet slangenheter. Tidigare provtagningar har skett på djup ned till 1 700 m.

Slangsektion efter slangsektion sänks i borrhålet. Det är viktigt att genomförandet kan ske utan att vattnet i borrhålet rörs om alltför mycket. Varje ny enhet kopplas ihop med den föregående med den mellanliggande ventilen öppen. När slangsträngen nått det önskade djupet och fyllts med borrhålsvatten börjar upptagningen. Slangsektionerna lyfts en efter en, ventilerna stängs och enheterna kopplas isär. Varje slangenheter rymmer 2,5 liter vatten.

I normalfallet används en slangsektion per 100 meter för analys och det andra sparas som reservprov. Analyserna sker enligt klass 3 med de tillval som den begränsade vattenvolymin i provtagaren tillåter. Analyserna kan förtätas i vissa avsnitt. Det är även möjligt att utnyttja två slangenheter till ett fullständigt klass 3-prov med alla tillval.

## **Resultat**

Metoden ger data enligt klass 3 med samtliga tillval inkluderade och bidrar med en tidig hydrokemisk översikt längs hela kärnborrhål under ”öppet hål”-förhållanden. Därmed ges möjligheter att identifiera gränsskiktet mot salt grundvatten.

### **8.3.9 Fullständig kemikarakterisering med mobilt fältlaboratorium**

#### **Syfte**

Syftet med metoden ”Fullständig kemikarakterisering med mobilt fältlaboratorium” är att få en så fullständig bild som möjligt av grundvattenkemin i enskilda sprickor och lokala mindre sprickzoner. Metoden är den i särklass viktigaste av de kemiundersökningar som sker i kärnborrhål. Stora insatser görs för att erhålla representativa prov från en begränsad bergvolym. Försiktig pumpning under kontinuerlig kontroll av tryck i, under och över sektionen ska säkerställa att risken för blandning med vatten från andra spricksystem blir minimal.

#### **Förutsättningar**

Metoden används i första hand i kemiprioriterade kärnborrhål där kraven på bland annat borrhållens genomförande är höga och där endast ett fåtal undersökningsmetoder får utföras före kemiprovtagningen, se kapitel 3 och kapitel 11.

Kemikarakteriseringen ska påbörjas inom en månad efter det att borrhållens avslutats. Spolvattenhalten måste komma ner till en nivå under en procent för att resultaten ska kunna anses pålitliga. Detta uppnås vanligtvis efter en veckas pumpning i sektionen.

Sektionerna och sektionslängderna väljs i samarbete med ämnesområdet hydrogeologi eftersom det är viktigt att det finns hydrogeologidata och hydrogeokemidata från exakt samma sektioner i borrhållen. För att välja de borrhållssektioner (ett riktmärke är fem sektioner per borrhål) som ska undersökas behövs information från metoder inom ämnesområdena geologi och hydrogeologi. Beslutsstegen är som följer:

1. En preliminär identifiering av alla intressanta vattenförande sprickzoner görs på grundval av information från borrhållsdiagram, BIPS-filmning, flödesloggning samt geofysikloggning av temperatur och elektrisk konduktivitet.
2. Undersökningen startar i en av de identifierade sprickzonerna. Den sprickzon som bedöms ha största risken att kontamineras med borrhållsvatten prioriteras.
3. Under pågående undersökning fortsätter utvärderingen av data från ovanstående metoder.
4. Ett slutligt val av de borrhållssektioner som ska undersökas görs utifrån den fortsatta utvärderingen. Kriterier för detta val är: vattenbudget beräkningar, djup, lämplig mineralogi samt att täcka in hydraulisk variation och hydrokemisk variation.

## **Utrustning och utförande**

Vid fullständig kemikaraktisering används ett mobilt fältlaboratorium bestående av slangvagn för hantering av borrhålsutrustning och laborativagn för provhantering och analyser /Almén m fl, 1986; Axelsen m fl, 1986; Almén m fl, 1994/. Kemikaraktiseringen innebär förutom ett omfattande analysprogram, att kemiska parametrar mäts dels in-situ i borrhålssektioner (Eh, pH och temperatur) och dels på uppumpat vatten i en flödescell på markytan (elektrisk konduktivitet, löst syre, Eh, pH, temperatur och flöde). Det uppumpade vattnet leds in till laborativagnen där prov tas ut för egna analyser och för analyser som utförs av externa laboratorier.

Pumpningen sker med ett flöde på mellan 60 till 300 ml per minut och utförs i avmanschetterade sektioner med en hydraulisk konduktivitet mellan  $K=10^{-8}$  m/s och  $K=10^{-6}$  m/s. Sektionslängderna är i regel i storleksordningen 2 till 15 meter. Minsta möjliga längd är 0,5 meter.

Förloppet av en kemisk karakterisering i en vattenförande borrhålssektion är som följer:

- Vatten pumpas upp till ytan under samtidig mätning av parametrarna pH, Eh, elektrisk konduktivitet, löst syre, temperatur och flöde. Förändringen av vattensammansättningen följs via registrerade mätvärden (konduktivitet) och/eller regelbundet uttagna och analyserade prov enligt klass 2.
- När konduktiviteten har stabiliserat sig sker regelbundna uttag av provvatten för analys enligt klass 4 och 5. Pumpning och mätning i borrhålssektionen sker kontinuerligt och om möjligt tills även redoxpotentialen (Eh) har stabiliserat sig på en rimlig nivå. Normalt rör det sig om en tidsperiod på mellan två och fyra veckor.
- I slutet av mätsekvensen, inför byte till ny borrhålssektion sker en provtagning enligt klass 5. I detta skede utlöses provtagningsenheten nere i borrhålssektionen för uttag av ett trycksatt prov. Provet kan vara uppdelat i två eller fler behållare och analyseras med avseende på gas- respektive bakterieinnehåll /Pedersen, 1997a/. Även kolloidprovtagning kan ske under tryck i sektionen, beroende på vilken uppsättning av utrustning som används. I den sista klass 5-provtagningen i sektionen ingår provtagning för bestämning av humus- och fulvosyror samt eventuellt för kolloider i fall detta inte sker in-situ i borrhålssektionen /Laaksoharju m fl, 1994; Laaksoharju m fl, 1995c; Ledin m fl, 1995/.
- Man bör kontrollera den hydrogeokemiska provtagningen med geofysisk loggning av salinitet, före och efter den kemiska provtagningen, för att få en uppfattning om den omrörning provtagningen ger upphov till och därmed provernas representativitet för ett visst borrhålsdjup.

Analysprogrammet anpassas beroende på tidigare resultat från vattenprovtagning under borrhåls- och slangprovtagning. Exempelvis kan provtagningen förtätas/utökas i sektioner som ligger vid koncentrationssprång eller för att bekräfta oväntade resultat.

## **Resultat**

Metoden ger fullständiga uppsättningar analysdata enligt klass 4 och 5 inklusive gas, bakterier, kolloider, fulvo- och humussyror samt mätvärden på pH och Eh, elektrisk konduktivitet, löst syre och vattentemperatur. Data representerar den hydrogeokemiska situationen i enskilda sprickor och begränsade sprickzoner.

### **8.3.10 Provtagning vid pumptester**

#### **Syfte**

Syftet med metoden ”Provtagning vid pumptester” är i första hand för att komplettera och förtäta mängden kemidata från kärnborrhål genom att genomföra provtagningar samtidigt som pumptester utförs inom ämnesområdet hydrogeologi. Kompletteringen och förtätningen utförs dels för att täcka in flera och mer högkonduktiva sprickzoner i redan undersökta kemiprioriterade borrhål (i form av fullständig kemikarakterisering) och dels för att täcka in flera kärnborrhål (även icke kemiprioriterade) spridda över ett större område. De vattenprov som tas ut representerar vatten från en större bergmassa och/eller en mer dominerande hydraulisk struktur än de prov som tas ut vid fullständig kemikarakterisering.

#### **Förutsättningar**

Provtagningen genomförs i samarbete med ämnesområde hydrogeologi vid enhåls pumptester och interferenstester där  $K > 10^{-6}$  m/s.

Spolvatten utgör inget problem eftersom pumpningen utförs med så högt flöde att inblandningen minskar och blir försumbar mycket snabbt.

#### **Utrustning och utförande**

Vid provtagningen används det mobila fältlaboratoriets laboratorieenhet tillsammans med hydrogeologisk utrustning. Den hydrogeologiska utrustningen utnyttjas för själva pumpningen.

Pumpningen sker med ett flöde som kan röra sig om tiotals liter per minut dvs kapaciteten på pumpningen är betydligt högre än vid den fullständiga kemikarakteriseringen. Provtagningen utförs i borrhålssektioner med hög hydraulisk konduktivitet ( $K > 10^{-6}$  m/s) och sektionslängderna är normalt något längre än vid kemikampanjerna. Pumpning och återhämtning sker i intervall som styrs av ämnesprogrammet för hydrogeologi.

I fältlaboratoriet sker on-line-mätning av pH, elektrisk konduktivitet, redoxpotential (Eh), löst syre och temperatur. Mätningarna sker endast på markytan och inte in-situ i borrhålssektionen. Vattenprov för dagliga analyser tas ut på samma sätt som vid den fullständiga kemikarakteriseringen, dvs enligt klass 4, och klass 5 men gas- och bakterieprovtagning samt kolloidprovtagning kommer inte att ingå. Däremot ger det höga flödet goda möjligheter för humus- och fulvoprovtagning. Halterna av dessa komponenter är ofta mycket låga och eftersom stora vattenvolymer kan passera provtagarkolonnerna finns det större möjligheter att få tillräckliga mängder material för analys.

#### **Resultat**

Metoden ger omfattande uppsättningar analysdata enligt klass 4 och 5 samt parametrarna pH, Eh, elektrisk konduktivitet och löst syre mätta på markytan. Tillval som gas, bakterier och kolloider kommer att saknas. Data representerar en kemisk karakterisering av en större bergmassa eller dominerande hydrauliska strukturer.

### **8.3.11 Långtidsmonitoring av kemiska parametrar**

#### **Syfte**

Långtidsmonitoring innebär återkommande uppföljning av vattensammansättningen i ett antal observationspunkter bestående av brunnar, jordrör, hammarborrhål och sektioner i kärnborrhål. Syftet är framförallt att se om och hur verksamheten under platsundersökningsskedet påverkar grundvattensammansättningen. Varje genomförandesteg identifierar ett antal observationspunkter som lämpar sig för denna kontinuerliga uppföljning och antalet observationspunkter kommer att öka successivt.

#### **Förutsättningar**

Observationspunkter väljs i samarbete med ämnesprogram för hydrogeologi. Automatisk och kontinuerlig registrering av elektrisk konduktivitet och grundvattennivå bör ske i de observationspunkter som utgörs av borrhål.

#### **Utförande**

Långtidsmonitoringen genomförs i sammanhängande kampanjer två gånger per år. Alla typer av provtagningsobjekt provtas samtidigt under en kort och sammanhängande period.

Provtagningen av de brunnar som ingår i programmet beskrivs i avsnitt 7.4.3. Analyserna sker enligt klass 3.

Vissa av hammarborrhålen kommer att vara utrustade med permanenta manschettinstallationer som kan utnyttjas vid provtagning. I annat fall används utrustning enligt 7.4.5. Analyserna sker enligt klass 5.

I kärnborrhålen görs permanenta installationer av manschetter med mera för långtidsmätningar av tryck och för provtagning inom program för långtidsmonitoring. Minst två borrhålssektioner från varje borrhål kommer att ingå i långtidsmonitoringen. Analyserna sker enligt klass 5.

#### **Resultat**

Metoden ger tidsserier med analysdata enligt klass 3 respektive klass 5 och utgör underlag för bedömning av kemisk stabilitet.

### **8.3.12 Vattenanalys enligt kemiklasserna 1 till 5**

#### **Förutsättningar**

De metoder för vattenanalys som används på SKB:s vattenkemiska analyslaboratorium i de mobila fältlaboratorierna ska uppfylla kraven för ackreditering av Swedac. Där det är möjligt kommer även anlidade externa laboratorier att vara ackrediterade för de analyser som ska utföras.

## Analysmetoder och utförande

Alla prov analyseras enligt fastlagda rutiner och enligt SKB:s klassindelning i fem olika kemiklasser se tabell 8-4. De analyser som kräver omedelbart utförande sker i ett mobilt fältlaboratorium medan övriga analyser utförs i kemilaboratoriet på Äspö eller av externa laboratorier. I de flesta fall används väl vedertagna analysmetoder för att bestämma de olika parametrarna. Många parametrar analyseras med mer än en metod och/eller mer än ett laboratorium. Flera av bestämningarna utgörs av så kallade specialanalyser som kräver avancerad utrustning samt speciell kompetens och utförs av mycket specialiserade laboratorier. De metoder som kommer att användas kan variera eller förändras beroende på olika förutsättningar eller metodutveckling. I tabell 8-5 listas vanligt förekommande analysmetoder.

**Tabell 8-5. Komponenter/parametrar och analysmetoder.**

Komponenter /Parametrar	Metoder
PH	Potentiometri
Elektrisk konduktivitet	–
Cl, HCO <sub>3</sub>	Titring (SIS 028120, SIS 028135)
Na, K, Ca, Mg, S, Mn, Fe, Si, Li, Sr	ICP-AES
SO <sub>4</sub> , Cl*, Br, F	Jonkromatografi
Fe (tot), Fe(+II), HS <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> _N, NO <sub>3</sub> _N, PO <sub>4</sub> _P	Spektrofotometri (Ferrozinemetoden och SIS-metoder)
DOC	UV oxidation, IR
<sup>3</sup> H	Naturligt sönderfall
<sup>2</sup> H, <sup>18</sup> O	MS
PMC, <sup>13</sup> C	Acceleratormätningar
U, Th, Ra och Rn isotoper	Kemisk separation, Alfa- och/eller Gamma spektrometri
Isotoperna δ <sup>34</sup> S (i SO <sub>4</sub> ), δ <sup>37</sup> Cl, δ <sup>87</sup> Sr, δ <sup>10</sup> B	
Spårmetaller	ICP-MS (högupplösande) och/eller INAA
Gas (specialutvecklad provtagningsteknik med trycksatta prov)	Gaskromatografi
Humus och fulvosyror (specialutvecklad provtagningsteknik)	/Pettersson m fl, 1990/
Kolloider (specialutvecklad provtagningsteknik)	Analys av filter med EDXRF
Bakterier (specialutvecklad provtagningsteknik med trycksatta prov)	Beräkning av antal, klassificering

\* Vid kloridhalter < 10 mg/l

Förkortningar och förklaringar

ICP-AES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy
DOC	Dissolved Organic Carbon (filtrerat prov)
IR	Infraröd-spektroskopi
MS	Masspektroskopi
INAA	Instrumentell neutronaktiveringsanalys
EDXRF	Energidispersiv röntgenfluorescens

## **Kvalitetskontroll**

Analysresultaten kvalitetsgranskas i sin helhet med avseende på rimlighet, jämförelse mellan olika analysmetoder/laboratorier och jonbalans. Kvalitetsgranskningen sker i samband med datainlagring i databasen SICADA och påföljande rapportering. Vid provtagningar lagras regelmässigt reservprov som kan användas för kontrollanalyser.

### **8.3.13 Sprickmineralanalys**

#### **Syfte**

Sprickmineralanalyser kompletterar bilden av grundvattnets nuvarande och tidigare kemiska förhållanden /Landström och Tullborg, 1995/. Förekomst eller avsaknad av kalcitmineral visar till exempel om infiltrationen av ytvatten varit kraftig eller ej. Förekomst av järnhydroxider i kombination med avsaknad av pyrit visar hur långt ner ett oxiderande vatten kan ha nått. Isotopanalyser av sprickmineral visar grundvattenflödesmönster som råder eller som tidigare rått. En del isotopkvoter, t ex  $^{234/238}\text{U}$  och  $^{87/86}\text{Sr}$  kan bestämmas både i vattenlösning och i mineral. Likheter och olikheter används för att identifiera graden av jämvikt och/eller stabilitet i dagens grundvattenmineralsystem.

#### **Förutsättningar**

Eftersom kemiprioriterade kärnborrhål hammarborras till cirka 100 meters djup kan det behövas kompletterande korta kärnborrhål i nära anslutning till dessa borrhål. Detta för att få tillgång till borrhärna för kärnkartering och sprickmineralanalyser från jämförbara avsnitt av bergvolymen.

Kärnkarteringen som utförs av geologiprogrammet utgör grund för sprickmineralanalysen och efterföljande provtagning av borrhärnor.

#### **Utförande**

Analysen av sprickmineral innefattar detaljstudier av de mineral som utgör störst kontaktyta mot vattnet och/eller som kan ge väsentlig information om den hydrogeokemiska miljön i sprickorna. Tre mineralgrupper framträder som speciellt intressanta baserat på tidigare erfarenheter /Tullborg, 1997/:

- Mineral som lätt löses upp eller fälls ut i sprickorna och därför ofta står i jämvikt med grundvattnets sammansättning. Denna grupp består främst av karbonater (framförallt kalcit), sulfatmineral (till exempel gips och baryt) samt fluoriter (flusspat).
- Mineral som bildas genom vittring och omvandling in-situ, framförallt lermineral av olika typer.
- Mineral som är styrda av redoxprocesser, framförallt Fe(II)/Fe(III) mineral och sulfider.

Analyserna utförs för att identifiera mineralerna och för att bestämma den kemiska sammansättningen. I analysprogrammet ingår huvudkomponenter och spårelement (inkluderande U, Th, REEs, Sr och Cs) samt Mössbauer-analyser för bestämning av Fe(II)/Fe(III).



Kalciter och sulfider analyseras med avseende på stabila isotoper ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  och  $\delta^{34}\text{S}$ ). På kalciter och lermineral görs  $\delta^{87}\text{Sr}$ -bestämning. Uranisotopbestämningar görs på FeOOH-utfällningar och på finkornigt lerrikt material. Studier av uranseriens isotoper är av stort värde dels för att belägga vilka sprickor som är vattenförande och dels som ett komplement till olika redoxstudier.

Sekventiell extraktion av sprickläkningar för att identifiera vilka spårelement som sorberats/medfällts på sprickytorna eller krossmaterial som fyller sprickorna är ett viktigt komplement till laboratoriestudier av sorption och diffusion.

Datering av sprickor/sprickmineral är av stort intresse men är dessvärre ofta svårt att genomföra på grund av brist på daterbart material. U-Th-datering och/eller  $^{14}\text{C}$  ska göras i de fall där det finns lämpliga kalciter. Även lermineral kan vara lämpliga för radiometrisk datering.

Icke-litifierat material (så kallat gouge) i form av fyllning i sprickor och sprickzoner skall undersökas noga med avseende på kemisk och mineralogisk sammansättning, kornstorleksfördelning, jonbyteskapacitet och specifik yta.

## **Resultat**

Metoden ger resultat i form av identifierade mineraler samt detaljerade mineral-sammansättningar med avseende på huvudkomponenter, spårelement och isotoper. Sprickmineral representerar alltid det provtagna djupet, vilket inte behöver vara fallet med grundvattenproven. Därför är det värdefullt att få en jämförelse mellan grundvattenkemin och sprickmineralsammansättningen. Flertalet sprickor i det svenska urberget har initierats tidigt i bergartens historia och de sprickor som nu är vattenförande har varit detta under lång tid vilket innebär att det finns sprickmineral av varierande ålder. Genom att studera sammansättningen hos olika generationer av sprickmineral ges en uppfattning om stabiliteten/instabiliteten hos grundvattnets sammansättning i historiskt perspektiv (paleohydrologi). En jämförelse mellan grundvattnets och sprickmineralens innehåll av spårelementen Uran, Thorium, Cesium och Strontium ger information om radionuklidens rörlighet.

## 9 Bergets transportegenskaper

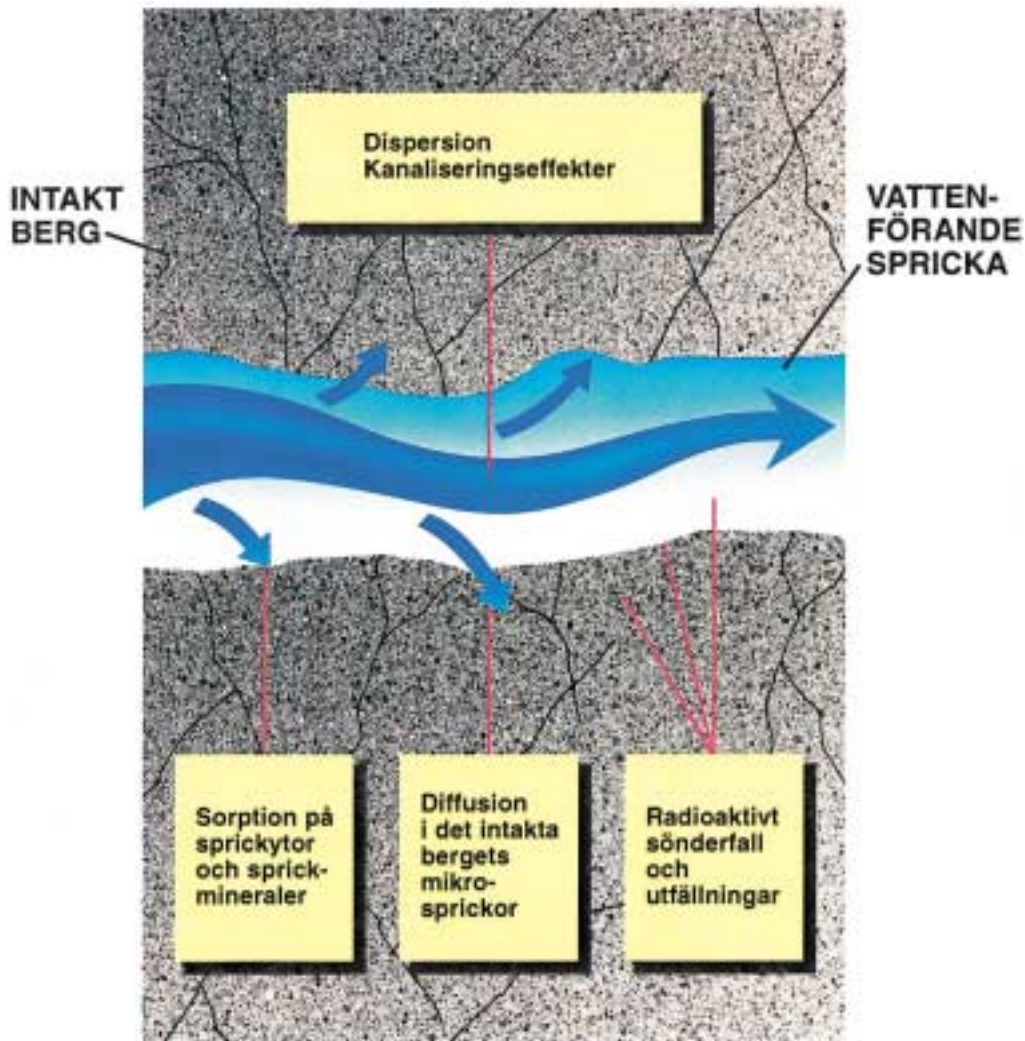
### 9.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs de av bergets transportegenskaper som ska bestämmas och tänkbara karakteriseringsmetoder. Undersökningarna omfattar bestämningar av transportegenskaper för både bergmatris och strömningsvägar. I kapitlet beskrivs även hur den mätta informationen tolkas i den modell av bergets transportegenskaper som utgör en del av den platsbeskrivande modellen. Med ordet transport avses i detta kapitel transport av i grundvattnet lösta ämnen.

#### 9.1.1 Inledning

Figur 9-1 visar översiktligt vilka processer som inverkar på transport av radionuklider genom berget. Radionuklider kan transporteras med det strömmande grundvattnet, advektion. Även diffusion längs strömningsvägarna kan vara betydelsefull, speciellt under stagnanta förhållanden. En viktig aspekt av detta är matrisdiffusion dvs att radionuklider diffunderar in i bergets mikrosprickor och på så sätt transporteras långsammare än det flödande vattnet i sprickorna. Tidsskalan för advektion relativt tidsskalan för matrisdiffusion bestämmer den senare processens relativa betydelse. Av avgörande betydelse för radionuklidtransporten är även sorption, dvs att radionuklider kan sorbera (fastna) på spricksystemets och bergmatrisens ytor. Matrisdiffusion och sorption är de två viktigaste retentionsprocesserna för radionuklider i geosfären. En annan faktor som kan ha betydelse för retentionen är sorption på kolloidala partiklar och transport med dessa, forskning pågår inom detta område. Den kemiska miljön i vattnet bestämmer vilken speciering (kemisk form) radionukliderna kommer att ha, vilket är avgörande speciellt för sorptionsprocesserna. Vissa nuklider kan också transporteras i gasfas. Det radioaktiva sönderfallet påverkar slutligen innehållet av radionuklider i grundvattnet och måste därför inkluderas i beskrivningen av transportprocesserna. En noggrannare beskrivning av transportprocesserna finns i SR 97, Processrapporten /SKB, 1999b/.

Ämnesprogrammet omfattar de nödvändiga delar som erfordras för att uppnå målet att karakterisera bergets transportegenskaper på de platser där platsundersökningar ska genomföras. En viktig bas för ämnesprogrammet är SR 97 /SKB, 1999b/ samt TRUE-projektet vid Äspö /Winberg m fl, 2000/. Inom ramen för det senare kommer spår försöksteknik att vidareutvecklas för markbaserade borrhål så att platsspecifika transportparametrar kan erhållas redan under den kompletta platsundersökningen. Programmet för bergets transportegenskaper uppdelas i tre delar: fältmätningar för framtagning av platsspecifika transportparametrar, laboratoriemätningar på platsspecifikt bergmaterial samt modellering av transportegenskaper.



*Figur 9-1. En illustration av de mekanismer som påverkar transport av nuklider från ett förvar till biosfären.*

### 9.1.2 Ämnesspecifika mål

Djupförvarets isolerande och fördröjande funktion beror till stor del av bergets transportegenskaper. I /Andersson m fl, 2000/ identifieras de lämplighetsindikatorer som kan komma i fråga i olika delar av platsundersökningsprogrammet. De för ämnesområdet viktigaste egenskaperna är:

- grundvattenflöden i deponeringshållsskala,  $q$ ,
- transportmotståndet,  $F$ ,
- bergmassans diffusivitet och matrisporositet,  $D_e$  och  $\epsilon_r$ ,
- sorptionsegenskaper (sorptionkoefficienter) för de olika ämnen som kan komma att transporteras med grundvattnet.

Med hänvisning till huvudmålen för de geovetenskapliga undersökningarna (avsnitt 2.2) och de ovan angivna lämplighetsindikatorerna är transportprogrammets huvudinriktning att med de planerade undersökningarna ge de erforderliga data för bergets transport-

egenskaper som krävs för en analys av djupförvarets långsiktiga funktion och radiologiska säkerhet. Mer specifikt innebär detta att:

- bestämma platsspecifika parametrar för transport av reaktiva (sorberande) ämnen (matrisdiffusivitet, matrisporositet, sorptionskoefficienter, transportmotstånd) av betydelse för säkerhetsanalys av ett djupförvar.
- bestämma platsspecifika parametrar för transport av vattentrogna (icke sorberande) ämnen (dispersivitet, flödesporositet, gångtid, sprickapertur) att användas för beräkningar med och kalibrering av flödes- och transportmodeller vilka ska bidra till en geovetenskaplig förståelse av platsen.

### ***Inriktning under inledande platsundersökning***

För att undersökningarnas gemensamma mål under inledande platsundersökning ska uppnås inriktas programmet för bergets transportegenskaper på:

- att påbörja tidskrävande laboriemätningar på borrhärnbitar och annat geologiskt material för bestämning av platsspecifika transportparametrar (matrisdiffusivitet, matrisporositet, sorptionskoefficienter),
- att genom en integrerad analys av resultat från grundvattenkemisk provtagning, tryckregistreringar, grundvattenflödesmätningar och flödesfördelning identifiera förhållanden som är ogynnsamma, t ex höga grundvattenflöden, löst syre i vattnet eller hög frekvens av stora vattenförande sprickzoner.

Under den inledande platsundersökningen kommer en ämnesspecifik beskrivning (transportmodell) av platsen att utarbetas baserad på ovanstående integrerade analys.

### ***Inriktning under komplett platsundersökning***

För att undersökningarnas gemensamma mål under komplett platsundersökning ska uppnås inriktas programmet för bergets transportegenskaper då på:

- att bestämma platsspecifika transportparametrar för vattentrogna ämnen och ett urval av moderat sorberande ämnen för de två till tre dominerande bergarterna inom undersökningsområdet så att en analys av djupförvarets långsiktiga funktion och radiologiska säkerhet kan göras,
- att genom jämförelser mellan platsspecifika transportdata och befintliga generiska data och, med beaktande av platsens hydrokemiska förhållanden, bestämma vilka generiska data som bäst beskriver transportprocesser på den valda platsen.

Transportmodellen uppdateras med platsspecifika transportparametrar.

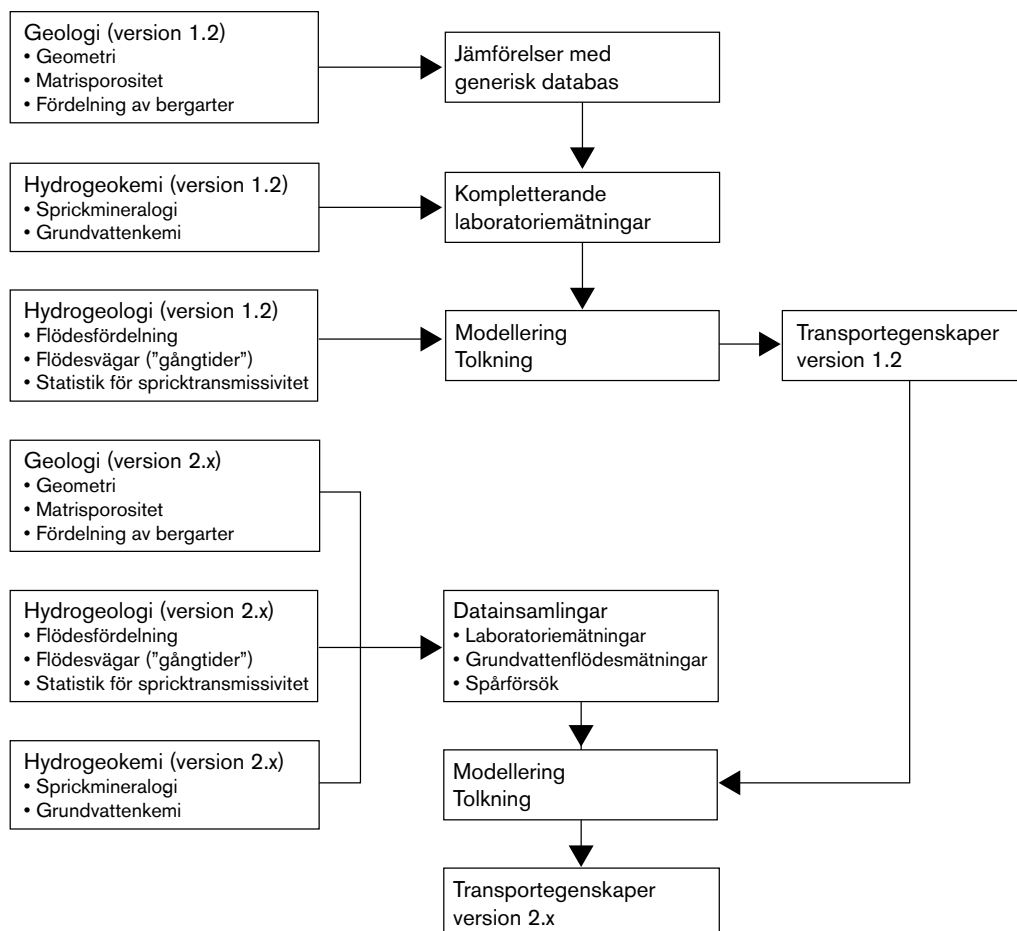
### **9.1.3 Arbetsmetodik och samordning**

Programmet för bergets transportegenskaper är beroende av en relativt stor mängd platsspecifika indata innan en meningsfull modellering av transport kan göras. Under de inledande platsundersökningarna kommer därför arbetet att inriktas på att bygga upp en databas över parametrar viktiga för transport baserad på de laboriemätningar som initieras och det arbete som görs inom angränsande ämnesområden, främst geologi, hydrogeologi och hydrogeokemi.

Under den kompletta platsundersökningen kommer transportmodellering och fältmätningar/labororiemätningar att utföras i en iterativ process enligt de huvuddrag som gäller för alla ämnesprogram (se avsnitt 2.3 och figur 2-4). Specifikt gäller att planeringen av undersökningarna görs gemensamt för samtliga ämnesområden så att optimal samordning kan ske och risker för störningar minimeras. Den gemensamma planeringen omfattar även kvantifiering och rumslig fördelning av undersökningarna för att undvika/utnyttja hydrauliska störningar.

Inom platsundersökningen begränsas programmet till stor del av möjligheterna att utföra undersökningar inom rimliga tidsramar. Platsspecifika transportparametrar kommer därför att bestämmas på ett urval av bergmaterialprover och strömningsvägar i berget och med ett urval av radionuklider. Den befintliga databas som finns från olika fält- och labororiemätningar är därför av stor vikt. Platsspecifika data på grundvattenkemi och sprickmineralogi gör det möjligt att bestämma vilka befintliga transportdata som bäst representerar platsen. Transportegenskaper i deponeringshålsskala och i strömningsvägar i deponeringshålens närhet bestäms i detaljundersökningsskedet.

Ämnesprogrammet gäller specifikt för bergets transportegenskaper men integration med framförallt ämnesområde geologi, hydrogeologi och hydrogeokemi är central. Bidragen från de olika ämnesområdena beskrivs i figur 9-2. Geologi bidrar med data på bergarter och sprickmineralfördelning vilket är väsentligt för bergets och sprickornas sorptions-egenskaper. Resultat från geologiprogrammet utgör också bas för val av prover för



**Figur 9-2.** Arbetsmetodik för uppbyggnad av transportmodell samt kopplingar till angränsande ämnesområden.

laboratoriemätningar inom transportprogrammet. Hydrogeologi bidrar med data på flödesfördelning i berget. Hydrogeokemi bidrar med vattenkemiska och geokemiska data av stor vikt för bedömning och beräkningar av bergmassans och sprickytornas retarderande egenskaper. Resultat från hydrogeologiprogrammet och hydrogeokemi-programmet bidrar också till val av lämpliga borrhålssektioner för spår försök.

Programmet för bergets transportegenskaper bidrar med platsspecifika transportparametrar att direkt eller indirekt användas i säkerhetsanalysen av platsen. Spår försök inom programmet bidrar till verifiering av den strukturgeologiska modellen samt med data för kalibrering av den hydrogeologiska modellen.

## **9.2 Modeller och parametrar**

Modelleringen inom ämnesområdet är inriktad på att erhålla en geovetenskaplig förståelse av platsen samt att leverera platsspecifika transportparametrar för säkerhetsanalysen. Flera olika typer av modeller används: dels modeller som används för utvärdering och tolkning av spår försök och laboratorietester och dels av beskrivande transportmodeller baserade på den geologiska, hydrogeokemiska och hydrogeologiska modellen över platsen. För att möjliggöra ett brett underlag används flera olika modellkoncept för att beskriva fördelningen av grundvattenflödet, exempelvis spricknätverksmodeller, kanalnätverksmodeller och stokastiska kontinuummodeller. De beräknade flödesfördelningarna och beskrivningen av bergets retentionsegenskaper längs dessa kan sedan användas som underlag för de modeller som används inom säkerhetsanalysen för att beräkna radionuklidtransport. I säkerhetsanalysens modeller kan svårkaraktäriserade mekanismer förenklas i konservativ riktning. Slutnålet för ämnesprogrammet är att leverera platsspecifika transportparametrar till säkerhetsanalysen.

### **9.2.1 Modellernas uppbyggnad**

Beskrivningen av bergets transportegenskaper ska ge underlag för de modeller som behandlar transport av vatten, partiklar och lösta ämnen i vattnet. Beskrivningen bygger huvudsakligen på de hydrogeologiska och hydrogeokemiska beskrivningarna samt viss information från den geologiska beskrivningen. Transportmodelleringen delas in i tre olika delar, närzon (kapselskala), berggrund (fjärrområde) och biosfär. Tabell 9-1 ger en översiktlig beskrivning av transportmodellernas syfte, uppbyggnad och beståndsdelar.

#### ***Transport i närzonen***

Grundvattenströmningen, bergets retentionsegenskaper och grundvattenkemin i närheten av deponeringshålen påverkar, tillsammans med bränslets, kapselns och bentonitens egenskaper, storleken på utsläppet för det fall en kapsel har gått sönder. På motsvarande sätt kan dessa egenskaper även påverka stabilitet hos kapseln genom att grundvattnet kan tillföra korrodanter till kapseln. Modellering av transport i närzonen diskuteras inte vidare i detta dokument utan utgör en del av de analyser som utförs inom ramen för en säkerhetsanalys. Databehovet tillgodoses med de hydrogeologiska parametrar och de övriga transportegenskaper som diskuteras i detta dokument.

**Tabell 9-1. Kortfattad presentation av transportmodellernas uppbyggnad och innehåll.**

---

**Beskrivning av transport på förvarsplatsen**

---

**Modellens syfte**

Utvärdering av transportrelaterade tester (spårförsök, grundvattenflödesmätningar, laborietester) samt beskrivning av transport av sorberande och icke-sorberande ämnen på förvarsplatsen.

**Processbeskrivning**

Advektion, hydrodynamisk dispersion (mekanisk dispersion och molekylär diffusion), retention (sorption och diffusion i bergmatrisen).

---

**Modellens beståndsdelar**

---

**Geometriskt ramverk**

Tredimensionell geometrisk fördelning, orientering och utsträckning av geologiska strukturer samt strukturers konnektivitet erhålls från geologi samt hydrogeologiprogrammen. Det tredimensionella flödesfältet beskrivs dock i regel som en fördelning av strömvägar i den tredimensionella geosfären. Längs strömvägarna är transportbeskrivningen oftast endimensionell med matrisdiffusion vinkelrätt den advektiva transportriktningen.

**Parametrar**

Flödesfördelning i berget. Bergmatrisens och sprickyornas porositet, diffusivitet och sorptionsegenskaper samt flödesvägarnas flödesporositet och dispersivitet.

**Datarepresentation**

Varierar beroende på modellkoncept (stokastisk, deterministisk).

**Randvillkor**

Fördelning av vattenkemi, källtermer vid spärförsök, utläckage från närområde vid säkerhetsanalysmodellering. (Samtliga randvillkor gäller för reaktiv transport; för grundvattenflöde och advektiv transport hänvisas till hydrogeologiavsnittet.)

**Numeriska verktyg**

Modelleringen av flöde och advektiv transport respektive reaktiv (nuklid)transport är separerade. Grundvattenflöde och advektiv transport modelleras med de grundvattenflödesmodeller som definierats inom hydrogeologiprogrammet. Här kan olika modellkoncept såsom kontinuummodellering (ex NAMMU, PHOENICS) eller diskreta sprickmodeller (ex FracMan/Mafic/PAWorks) användas. Den reaktiva transporten modelleras oftast med semianalytiska verktyg såsom LaSAR (Lagrangian Stochastic Advection Reaction) konceptet för spärförsök eller med modellen FARF31 för säkerhetsanalysens behov.

**Beräkningsresultat**

Grundvattenflödesmodellerna ger en statistisk beskrivning av flödesvägarnas rumsliga fördelning samt av de tillhörande advektiva gångtiderna och transportmotstånden (transportmotståndet enbart i diskreta modeller). Denna information kombinerad med de mätta transportparametrarna utgör underlag för reaktiv transportmodellering. Resultaten från denna senare modellering utgörs av t ex genombrottskurvor för spärförsök eller av doskurvor vid säkerhetsanalysmodellering.

---

### **Transport av radionuklider i berget**

Bergets retentionsegenskaper har betydelse vid säkerhetsanalysens beräkningar av transport av radionuklider som frigjorts från förvaret. Sådana transportberäkningar utgör en väsentlig del av säkerhetsanalysen.

Kraven på noggrannhet varierar mellan transportparametrarna. Endast vissa retentionsegenskaper har förmåga att åstadkomma en stor fördröjning av utsläppta radionuklider. Av de processer som idag modelleras är det i första hand sorptionen på mikrosprickornas ytor i samband med matrisdiffusionen som har förutsättningar att resultera i signifikant fördröjning. Storleken på inverkan av matrisdiffusionen och därtill kopplad sorption, beror på ett samspel mellan grundvattenflöde, flödesgeometri, bergmatrisens porositet och diffusivitet och grundvattnets och bergmassans kemiska egenskaper.

Det finns inte en helt entydig, allmänt accepterad syn på hur transportparametrarna ska beskrivas i detalj eller relateras till tänkbara mätningar i fält. I säkerhetsanalysens migrationsberäkningar hanteras detta problem genom att analysera olika konceptuella ansatser och genom konservativa val av parametervärden. Detta innebär att information om retentionsegenskaper som erhållits i fält sammanvägs med kunskap som erhållits från tidigare undersökningar, olika forskningsprojekt eller teoretiska överväganden. Detta gäller speciellt skattningar av parametrar motsvarande det s k transportmotståndet /Andersson m fl, 1998; Andersson, 1999; Moreno och Neretnieks, 1993; Cvetkovic m fl, 1999/.

En utförlig redovisning av alla processer som påverkar djupförvarets utveckling inklusive transportprocesserna finns i den s k processrapporten som tagits fram inom ramen för SR 97 (Processrapporten /SKB, 1999b/).

### ***Transport i jordlagren***

Databehovet för biosfärstransportmodeller diskuteras i kapitel 10. I stor utsträckning är databehovet av hydrogeologisk natur. För att kunna bedöma omsättningen i olika delar behöver dock dessa data kompletteras med transportegenskaper för jordlagren.

### ***Bedömning om förändringar av grundvattenkemi***

Kunskap om migration har också betydelse för att kunna bedöma den långsiktiga stabiliteten i grundvattenkemin i förvaret vid olika scenarier vilket redan diskuterats i kapitel 8. Det kan, till exempel, vara viktigt att känna till om förändringar av grundvattenkemin i mer ytnära grundvatten skulle kunna påverka grundvattenkemin på djupet. Sådana förändringar skulle kunna påverka både isolering och fördröjning. Förutom den geokemiska information kan även bergets retentionsegenskaper vara en viktig information vid sådana bedömningar.

## **9.2.2 Ingående parametrar**

Tabell 9-2 sammanfattar vilka data eller parametrar som behövs för att beskriva bergets förmåga att transportera radionuklider som lösts upp i grundvattnet (transportegenskaper) och vilka parametrar som behöver mätas för att bestämma dessa transportegenskaper. Tabellen visar också i vilket skede av platsundersökningarna parametern huvudsakligen bestäms. Tabellen bygger på de tabeller som togs fram för parameterrapporten /Andersson m fl, 1996/, den revision som skedde vid arbetet med krav och kriterier /Andersson m fl, 2000/ och vid framtagandet av det generella undersöknings- och utvärderingsprogrammet /SKB, 2000b/. För att upprätta beskrivningen av bergets transportegenskaper behövs dessutom information från flera andra ämnesområden, speciellt hydrogeologi (se avsnitt 9.2.3).



**Tabell 9-2. Sammanställning av transportparametrar som ingår i olika transportmodeller. Tabellen visar också när parametern huvudsakligen bestäms (se förklaring i tabell 2-3).**

Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för
		FS	IPLU	KPLU	DETU	
Egenskaper i deponeringshållsskala	Grundvattenkemi		x	x	x	Parametrar i källtermsmodell (lösligheter sorption) Bedöma stabilitet kapsel, bentonit, Källtermsmodell (Kapselkorrosion) Källtermsmodell (Kapselkorrosion)
	Grundvattenflöde		(x)	x	x	
	Sprickapertur, geometri			(x)	x	
Egenskaper för strömningsvägar	Strömningsvägar		(x)	x	x	Säkerhetsanalys
	Transportmotstånd längs strömningsvägar		(x)	x	x	Säkerhetsanalys
	Dispersivitet			x	x	Transportberäkningar
	Flödesporositet			x	x	Transportberäkningar
Egenskaper för berg	Sorptionskoefficienter			x	x	Säkerhetsanalys
	Matrisdiffusivitet			x	x	Säkerhetsanalys
	Matrisporositet			x	x	Säkerhetsanalys
	Max. penetrationsdjup			x	x	Säkerhetsanalys
	Grundvattenkemi			x	x	Bestämma relevanta sorptionsdata
Transportegenskaper för jordlagren/recipienten	Vattenomsättning			x		Biosfärmodeller, mark- och miljö, se ytnära ekosystem
	Flödeporositet			x		
	Sorptionskoefficienter			x		
	Biologisk aktivitet			x		
Stödjande data	Spårförsök			x	x	Validering/kalibrering
	Kemisk analys av sprickfyllnad			x	x	Geovetenskaplig förståelse
	Kemisk analys av sidoberg			x	x	Geovetenskaplig förståelse
	Grundvattenkemi, kolloider, gas m m i grundvattnet			x	x	Utesluta andra transportmekanismer
						Geovetenskaplig förståelse, prediktioner av förändringar

### 9.2.3 Modellverktyg och planerade analyser

#### Tolkning av data

Bergets transportegenskaper bestäms utifrån en tolkning av resultat från andra ämnesområden och de olika mätningar som genomförs inom ramen för programmet. Tabell 9-3 visar vilken information som behövs från andra ämnesområden.

Olika regionala studier eller förstudier tillför ingen ny kunskap om grundvattenomsättning eller spricköppningar på förvarsdjup jämfört med den generella kunskap som redan finns. Vid en platsundersökning kan grundvattenflödet beräknas numeriskt utifrån den vattengenomsläpplighet som kan skattas från hydrauliska test i borrhål, se kapitel 7. Modellresultaten ger statistisk information, som kan användas för att bedöma den rumsliga variationen av darcyhastigheten i deponeringshållsskala. Det finns även metoder för att direkt mäta grundvattenflödet i en del av ett borrhål /t ex Rouhianen, 1993/. Metoderna är användbara men ger endast information i ett antal punkter som kan användas som ett statistiskt underlag. Det är först vid detaljundersökningar eller senare som det finns möjlighet att bedöma enskilda kapselpositioner.

**Tabell 9-3. Översikt över parametrar som hämtas från andra program.**

Parameter	Bestäms inom ämnesprogram
Geometri för sprickor och sprickzoner	Geologi
Matrisporositet	Geologi
Fördelning av bergarter	Geologi
Flödesfördelning	Hydrogeologi
Flödesvägar ("gångtider")	Hydrogeologi
Statistik för sprickgeometri och spricktransmissivitet (eller direkt skattning av transportmotstånd) för diskreta nätverksmodeller	Hydrogeologi
Sprickmineralogi	Hydrogeokemi
Grundvattenkemi	Hydrogeokemi

För de flödesrelaterade transportparametrarna finns mycket lite information efter en förstudie. Kunskap om topografi och en uppskattning av den storskaliga grundvattenbildningen ger en viss information om grundvattenflöde och transportvägar. Eftersom data om hydrauliska parametrar i övrigt saknas i detta skede kan ingen detaljerad bild av grundvattenförhållandena erhållas.

Vid platsundersökningar tillkommer väsentlig kunskap om fördelningen av bergets vattengenomsläpplighet. Men det är oklart om det kommer att gå att uppskatta transportmotståndet ( $F$ ) för olika transportvägar med hög precision. Det kan inte mätas direkt utan måste uppskattas genom modellering eller genom enkla fältmätningar kombinerade med överslagsberäkningar. Resultatet blir en statistisk fördelning som beskriver den rumsliga variationen och osäkerheterna.

I diskreta sprickmodeller där de enskilda sprickgeometrierna är explicit beskrivna i modellen har man den bästa möjligheten att få en god uppskattning av transportmotståndet ( $F$ ). Modellresultatet blir en statistisk fördelning som beskriver den rumsliga variationen och osäkerheterna i transportmotståndet. Denna metodik för beräkning av transportmotståndet användes för kompletterande analyser inom SR 97 /Dershowitz m fl, 1999/ och utgjorde ett delunderlag för att uppskatta transportmotstånd, se Andersson /1999/ för ytterligare detaljer. Flödesmätningar i borrhål (se kapitel 7) kombinerade med antaganden om transportvägarnas utsträckning kan även ge överslagsmässig kunskap om transportmotståndets storlek.

Förutom att vara en viktig indataparameter för transportmodellering inom säkerhetsanalys kan kunskap om transportmotståndet även användas för att (inför förvarsutbyggnaden) anpassa förvarets utformning för att öka andelen kapselpositioner som är förbundna med transportvägar med högt transportmotstånd. Allmänt konstateras att ett visst utvecklingsarbete återstår med metodiken för uppskattning av transportmotstånd. Delvis öppna frågor är hur kopplingen mellan en regional/lokal kontinuummodell och en spricknätverksmodell på detaljskala ska ske, samt i vilken utsträckning det uppskattade transportmotståndet kan verifieras mot olika typer av fältdata.

Förstudier ger inget ytterligare bidrag till den generella kunskapen om diffusivitet och matrisporositet. Vid platsundersökningar kan matrisdiffusivitet och matrisporositet bestämmas genom laboratorieförsök på borrhärnor och eventuellt även in-situ i borrhål. In-situ-mätningar kan, om metoden fungerar, ge möjligeter att rumsligt fördela matrisdiffusiviteten. Metoden kräver dock stöd från laboratiemätningar. Idealt kan då

matrisdiffusivitet och matrisporositet extrapoleras till hela bergmassan baserat på bergart och grundvattenkemiska förhållanden. Sorptionskoefficienter för bergmassan kommer att baseras på ett mindre antal laboratoriemätningar samt möjligen någon verifierande in-situ-mätning. Härvid används några tidigare väl undersökta ämnen. Sorptionskoefficienter för samtliga ämnen fås genom koppling till befintlig databas genom jämförelser med erhållna laboratorieresultat och grundvattenkemi på platsen.

Resultat från spår försök är viktiga källor till indirekt information om bergets retentions-egenskaper. Tidigare utförda spår försök (Stripa, Äspö, m fl) har bara i begränsad omfattning använts för att indirekt uppskatta viktiga egenskaper hos migrationsmodellerna som flödesfördelning och "våta ytor" även om de använts för att motivera rimligheten hos vald modell och modellparametrar. TRUE-projektet på Äspö tillför viktig kunskap om kopplingen mellan laboratedata på platsspecifikt material och data från in-situ-tester, från enskilda sprickor i skalan 2–5 m upp till spricknätverk i 10–50 m-skalan. De spår försök som genomförs vid platsundersökningarna kommer att analyseras med den metodik som nu utvecklas inom TRUE-projektet /Winberg m fl, 2000/.

Som stöd för rimligheten hos tolkade transportparametrar på en vald plats kan kemiska analyser av sprickfyllnader och sidoberg väsentligt bidra. Dessa analyser kan ge information om naturlig mobilitet, naturliga bakgrundskoncentrationer och förekomsten av naturliga analoger till vissa av nukliderna. Det är därför av betydelse att gå igenom och analysera, i såväl vatten som mineral, de spårelement som liknar radionuklider kemiskt t ex U, Th, Ra, Se, Mo, Sn, Rb, Zr, Ni, Sr, Cs, lantanider, eller andra betydelsefulla komponenter från ett förvar t ex Cu. Men för att detta ska vara meningsfullt krävs det naturligtvis att det verkligen går att analysera ämnet ifråga. Sammanfattningsvis konstateras att geokemisk karakterisering av sprickfyllnad, sidoberg och grundvatten väsentligen kan bidra till den geovetenskapliga förståelsen. Informationen skulle också kunna bli direkt användbar för att skatta viktiga transportegenskaper, som transportmotståndet och sorptionskoefficienter, men en utvecklad metod för att göra skattningar utifrån detta material finns inte tillgänglig. Bergets transportegenskaper uppskattas med andra metoder.

### **Beräkningsverktyg**

Transportmodellering görs dels för utvärdering av utförda fältförsök där inverkan av olika transportprocesser bestäms och dels för förståelse av transporten på den utvalda platsen. Vidare görs slutligen en transportmodellering inom säkerhetsanalysen. Ett antal olika modellkoncept och beräkningsverktyg kommer att användas, se tabell 9-1. För utvärdering av utförda spår försök används modeller som inkorporerar samtliga de processer som bidrar till den uppmätta genombrottskurvas karaktär (t ex LaSAR). Vid säkerhetsanalysmodellering används modeller som enbart inkorporerar de processer som har störst betydelse för den slutliga retentionen. Bland dessa processer ingår bl a matrisdiffusion och sorption. Jämfört med transportmodellen för säkerhetsanalys som användes i SR 97 (FARF31) förväntas ett visst utvecklingsarbete ske inför kommande säkerhetsanalyser. Specifikt finns ett behov av att transportmodellen ska kunna utnyttja de fördelningar av transportmotståndet som beräknas i de diskreta sprickmodellerna eller som uppskattas från fältdata.

### 9.3 Karakteriseringsmetoder

Flertalet av de transportparametrar som används under platsundersökningsskedet är generiska och bestämda genom tidigare försök på olika bergmaterial, i fält och på laboratorier. Beträffande sorberande radionuklider, vars egenskaper används vid numerisk modellering för beräkning av nuklidtransport, förlitar man sig i än högre grad på generisk kunskap gällande retarderande egenskaper bestämda genom laboratorieförsök i liten skala eller genom teoretiska beräkningar. De generiska data platsanpassas genom att bedöma om platsens bergartssammansättning och hydrogeokemiska tillstånd motsvarar förhållandena som gäller för de generiska data. Vissa, kompletterande, platsspecifika undersökningar utförs också.

Ämnesområdets karakteriseringsmetoder uppdelade på laboratoriemätningar, fältmätningar och transportmodellering finns sammanfattade i tabell 9-4. Metoderna beskrivs kortfattat i avsnitten nedan.

**Tabell 9-4. Sammanfattning av ämnesområdets metoder, utvärderade parametrar samt litteraturreferenser.**

Undersökningsmetoder	Parametrar (information)	Kommentar (referens)
<b>Laboratoriemätningar</b>		
Genomdiffusionsmätningar	Sorptionskoefficienter, $K_a$ , $K_d$ , Matrisdiffusivitet, $D_e$ Matrisporositet, $\epsilon_p$	Byegård m fl (1998) Ohlsson & Neretnieks (1995, 1997)
Gasdiffusionsmätningar	Matrisdiffusivitet, $D_e$ Matrisporositet, $\epsilon_p$	Ny metod, utvärdering pågår Autio (1997), Laajalahti m fl (2000)
Porositetsmätningar	Matrisporositet, $\epsilon_p$	Byegård m fl (1998) Ohlsson & Neretnieks (1995, 1997)
Batchsorptionsmätningar	Sorptionskoefficienter, $K_a$ , $K_d$	Byegård m fl (1998) Ohlsson & Neretnieks (1995, 1997)
<b>Fältmätningar</b>		
Resistivetsmätning	Matrisdiffusivitet, $D_e$	Ny metod, utvärdering pågår
Radonmätning	Våt yta, $a_r$ , $a_w$	Glynn & Voss (1999) Ny metod, utvärdering pågår
Grundvattenflödesmätning	Grundvattenflöde, $Q$ Darcyhastighet, $q$ Verifiering av strukturmodell (i kombination med pumpning)	Jämförande studie mellan Posiva och SKB:s koncept pågår
Enhålsspårförsök (push-pull)	Flödesporositet, $\epsilon_f$ Våt yta, $a_r$ , $a_w$ Dispersivitet, $D$ Indikation på matrisdiffusion Jämförande sorptionsdata	Meigs m fl (eds) (2000) Elert (1997) Ej testad inom SKB programmet Studie av metoden initierad
Enhålsspårförsök (in-situ-sorption)	Sorptionskoefficient, $K_d$ Matrisdiffusivitet, $D_e$ (T)	Ny potentiell metod Studie av metoden initieras
Flerhålsspårförsök	Gångtid, $t_p$ Dispersivitet, $D$ Flödesporositet (effektiv sprickvidd), $\epsilon_f$ Våt yta, $a_r$ , $a_w$ Verifiering av strukturmodell (konnektivitet) Jämförande sorptionsdata Indikation på matrisdiffusion	Winberg m fl (2000), Rhén & Svensson (ed) m fl (1992)
<b>Transportmodellering</b>		
Transportmodellering	Geovetenskaplig förståelse Transportparametrar för säkerhetsanalysen	Flera olika modellkoncept används

### **9.3.1 Labororiemätningar**

Labororiemätningar på bergprover och borrhärdar ger direkt information om bergmatrisens och sprickytornas transportegenskaper. De parametrar som bestäms är bergmatrisens porositet, diffusivitet samt sorptionskoefficienter för ett antal nuklider. Dessa mätningar utförs på borrhärdar från flera olika delar av den tilltänkta bergvolymen under väl kontrollerade förhållanden. Vid analysen måste även beaktas i vilken utsträckning utvalda borrhärdar förändrats från in-situ-förhållandena på grund av de ändrade bergspänningsförhållandena efter uttag.

#### **Genomdiffusionsmätningar**

Diffusivitetmätningar utförs genom att mäta hur snabbt ett tillsatt ämne diffunderar genom en bit av en borrhärd, s k genomdiffusionsmätning /Ohlsson och Neretnieks, 1995; Byegård m fl, 1998/. Mätningen görs vanligen på en 1–5 cm tjock utsågad skiva av en borrhärd som placeras i en mätcell där ena sidan av kärnbiten är i kontakt med ett rent syntetiskt grundvatten och den andra med ett grundvatten märkt med de nuklider man vill studera. Prover tas sedan ut på den omärkta sidan och den effektiva diffusionskonstanten  $D_e$  för bergmatrisen kan beräknas. Denna mätning ger även indirekta bestämningar av matrisporositet (genom mätning och modellering av genomdiffusion av tritium) och sorptionskoefficienter (genom mätning och modellering av genomdiffusion av utvalda sorberande ämnen).

#### **Gasdiffusionsmätningar**

Posiva har utvecklat en ny snabbare metod för bestämning av matrisdiffusivitet och matrisporositet där man låter heliumgas diffundera genom bergbitar /Autio, 1997; Laajalahti m fl, 2000/. Metoden har fördelen att vara mycket snabb men kan inte kombineras med bestämning av sorptionskoefficienter. Jämförande studie mellan metoderna pågår.

#### **Porositetsmätningar**

Bergmatrisens porositet kan bestämmas på flera olika sätt genom labororiemätningar på skivor av borrhärdar. Den vanligaste metoden är vattenmättnadstekniken som bestäms enligt standard DIN 52103-A. På senare tid har en ny metod,  $^{14}\text{C}$ -PMMA-metoden, givit goda resultat /Hellmuth m fl, 1993/. Metoden innebär att skivor av borrhärdar torkas och impregneras med en  $^{14}\text{C}$ -märkt methylmetaakrylat varvid både matrisporositeten och dess rumsfördelning i bergmatrisen bestäms. Detta ger information för skattning av penetrationsdjup för radionuklider. En tredje metod är att genom modellering av genomdiffusionsmätningar med tritierat vatten (HTO) (se ovan) beräkna matrisporositeten. En jämförande studie av de tre metoderna /Byegård m fl, 1998/ visar på god överensstämmelse. Vattenmättnadstekniken används som standardmetod men vissa utvalda prover mäts även med de övriga metoderna som även ger annan viktig information enligt ovan.

#### **Batchsorptionsmätningar**

Sorptionskoefficienter ( $K_a$ ,  $K_d$ ) bestäms vanligast genom s k batchförsök där ett vatten med ett urval av nuklider är i kontakt med krossat berg i olika fraktioner under en tid av dagar till månader. Vattenlösningens nuklidinnehåll mäts som en funktion av tiden. Mätningen kan även göras genom att ersätta nuklidlösningen med omärkt vatten och

mäta desorptionsfasen varvid data på sorptionens reversibilitet erhålls. Vissa transportmodeller hanterar även så kallad ytsorption ( $K_a$ ) där det antas att sorptionen kan uppdelas i en snabb jämviktssorption på ytan av mineralkornen och en långsammare diffusionskontrollerad sorption på de inre ytorna. Ytsorptionskoefficienten  $K_a$  kan också bestämmas ur batchförsök med antaganden om storleken på kontaktytan.

Jämförelser mellan metoderna /Byegård m fl, 1998/ visar att batchförsök på små fraktioner av bergmaterial ger signifikant högre sorptionskoefficienter än genomdiffusionsmätningar. Större fraktioner kommer därför att användas.

Platsspecifika sorptionskoefficienter kommer endast att bestämmas för ett urval av nuklider. Övriga data hämtas från generiska databaser, exempelvis Ohlsson och Neretnieks /1995, 1997/, Byegård m fl /1998/ eller Carbol och Engkvist /1997/.

### **9.3.2 Fältmätningar**

#### ***Resistivitetmätning***

En metod som för närvarande studeras är att använda resistivitetsloggningar i fält för att bestämma matrisdiffusivitet på liknande sätt som gjorts i laborieförsök. Metoden är under utveckling (Löfgren m fl, in prep).

#### ***Radonmätning***

Mätning av radioisotopen  $^{222}\text{Rn}$  i vattenprover kan med vissa antaganden utnyttjas för att uppskatta den "våta ytan" per volym vatten /Glynn och Voss, 1999/.  $^{222}\text{Rn}$  analyser finns med som tillval i vattenanalyserna beskrivna i kemiavsnittet (kapitel 8) och bör göras vid ett tillfälle på varje provtagningsnivå.

#### ***Grundvattenflödesmätning***

Grundvattenflödesmätningar genomförs i ett flertal borrhålssektioner under olika skeden i platsundersökningen. När borrhålen instrumenteras för monitorering bör flera sektioner utrustas för utförandet av grundvattenflödesmätningar. Grundvattenflödet kan därigenom följas från ostörda förhållanden till kontrollerade störningar (långtidsprov pumpningar, LPT), konstruktionsfas och slutligen inom kontrollprogram under driftskedet.

Det finns för närvarande två olika koncept för grundvattenflödesmätningar. SKB och Posiva har utvecklat varsin metod för loggning av grundvattenflödet i djupa borrhål. SKB:s metod bygger på utspädningen av ett tillsatt spårämne medan Posivas metod mäter flödet med en termisk metod. Utspädningmätning är en enhålsmetod där mycket låga grundvattenflöden ( $Q$ ) kan bestämmas genom att i en avgränsad sektion av ett borrhål mäta ett tillsatt spårämnes utspädning med tiden. Genom ett väl definierat samband mellan utspädning och tid erhålls grundvattenflödet direkt. Genom vissa antaganden om geometri och i kombination med andra mätningar kan även darcy-hastighet ( $q$ ) och hydraulisk gradient ( $I$ ) beräknas. Posivas metod kan även användas för att bestämma riktningen på flödet tvärs borrhålssektionen inom en kvadrant. Utspädningstekniken kan också utnyttjas för att mäta i fasta sektioner av borrhål med avsikten att följa förändringar i tiden, t ex orsakade av olika aktiviteter inom platsundersökningsområdet. Erfarenheter från TRUE Block Scale-projektet visar att metoden ger värdefull information om konnektivitet och geometri för hydrauliska strukturer genom att göra kontrollerade tryckstörningar och mäta förändringar i grundvattenflödet.

### **Enhålsspårförsök (push-pull)**

Enhålsspårförsöken (push-pull) utförs genom att först injicera en spårämnespuls med ett övertryck, låta den vara i kontakt med sprickytorna under en kortare tid, och slutligen åter pumpa tillbaks spårämneslösningen. Denna metod har fördelen att inte vara beroende av flera borrhål som skär samma geologiska struktur vilket kan vara avgörande då borrhålen i allmänhet är placerade relativt långt ifrån varandra. Metoden ger in-situ värden på dispersivitet och flödesporositet. Data från push-pull-tester kan potentiellt även användas för skattningar av den våta ytan samt sorptionsparametrar för ett urval av svag-medelsorberande ämnen.

Inom SKB-programmet finns ingen direkt fälterfarenhet av push-pull-tester, men en inventering av potentialen hos push-pull-tester pågår inom TRUE-projektet. Däremot finns det god erfarenhet av enhålsspårförsök för bestämning av dispersivitet, flödesporositet, matrisdiffusivitet och sorptionskoefficienter inom andra platsundersökningsprogram såsom WIPP i USA /Meigs m fl (eds), 2000/ och Leuggern i Schweiz /McNeish m fl, 1990/.

### **Enhålsspårförsök (in-situ-sorption)**

Inom ett flertal olika projekt för bestämning av transportegenskaper har konstaterats att det finns ett behov att verifiera att laboratoriebestämda värden på matrisdiffusivitet och sorptionskoefficienter är representativa, bl a TRUE-projektet /Winberg m fl, 2000/ och vid URL i Kanada /Vilks m fl, 1999/. Ett skäl till detta är att då prover tas upp till ytan kan tryckavlastningen och förändringen i kemi medföra att även transportegenskaperna förändras, bl a genom att mikrosprickor kan bildas. En ny metod för platsspecifik in-situ-bestämning och verifiering av laboratoriebestämda värden på matrisporositet ( $\epsilon_p$ ), matrisdiffusivitet ( $D_m$ ) och sorptionskoefficienter ( $K_d$ ) har därför föreslagits. Metoden bygger på att i en avgränsad sektion av sprickfritt berg (matrisberg) cirkulera en blandning av utvalda spårämnen (reaktiva och icke-reaktiva). Efter en viss tid (månader) ersätts lösningen med formationsvatten och återdiffusionen av spårämnena registreras. En utredning av de praktiska möjligheterna att kunna genomföra dessa in-situ-tester har initierats.

### **Flerhålsspårförsök**

Den vanligaste spårförsöksmetoden är det radiellt konvergerande spårförsöket där ett centralt beläget borrhål eller borrhålssektion pumpas och spårämne injiceras i ett antal omkringliggande borrhål. Längd- och tidsskalan beror på strukturernas hydrauliska transmissivitet, men ligger normalt i intervallet 10 m till 200 m respektive timmar-månader. En variant är att injicera med ett övertryck så att en så kallad dipolgeometri erhålls. Erhållna genombrottskurvor kan därefter utvärderas med ett antal olika modellansatser för att bestämma transportparametrar i enlighet med tabell 9-4.

Flerhålsspårförsök används för att kalibrera transportmodeller i den större skalan (gällande vattentransport och transportvägar) och för att verifiera rimligheten i de beräknade resultaten. Ett exempel är användandet av det kombinerade storskaliga spårförsöket och propumpningen LPT-2 på Äspö som använts för kalibrering av flödes- och transportmodeller inom Äspö Task Force /Gustafson m fl, 1997/. Storskaliga spårförsök i samband med långtidspumptester (LPT) beskrevs tidigare under hydrogeologiska undersökningar (se avsnitt 7.3.3) och bör utföras under de kompletta platsundersökningarnas avslutande etapp, eller som en kompletterande undersökning efter det att de egentliga platsundersökningarnas slutförts.

I en platsundersökning finns möjlighet att bestämma dispersiviteten i flera skalor. Om enhåls spårförsök (push-pull-test) kan utvecklas kan dispersiviteten i liten skala i enskilda sprickor bestämmas. Om två borrhål placeras nära varandra kan dispersiviteten i en enskild struktur bestämmas och slutligen kan den storskaliga dispersiviteten bestämmas vid ett kombinerat interferenstest och spårförsök (LPT).



# 10 Ytnära ekosystem

## 10.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs vilka förhållanden och egenskaper hos de ytnära ekosystemen, som ska bestämmas och tänkbara karakteriseringsmetoder. I kapitlet beskrivs även hur den mätta informationen redovisas i form av modeller för platsens ytnära ekosystem. Vidare behandlas förhållanden och förutsättningar för ett områdes yta vad gäller biologiska, geologiska och hydrologiska parametrar. De parametrar som är av vikt för bedömning av de ytnära ekosystemen är redovisade i detta kapitel även om de inte specifikt tillhör ämnesområdet.

### 10.1.1 Inledning

De ytnära ekosystemen eller biosfären är den delen av jorden där de flesta organismer, djur, växter och människor, lever. De utgörs av vattendragen, jordbruksområden, skog och städer samt de ytnära jordlagren och grundvattenreservoarerna. De ytnära ekosystemen kan definieras på flera olika sätt /se t ex Lindborg och Schüldt, 1998/. Praktiskt har SKB definierat dem som området ovanför berggrunden. Det betyder att de förutom växter, djur, människor och klimat, innehåller de lösa avlagringarna och den ytnära hydrologin och har därför snarare en rumslig avgränsning än en avgränsning i ämnesområden.

Först vid ytan får ett eventuellt läckage av radioaktiva ämnen betydelse. Det är där effekterna, dvs dosen av radioaktiva ämnen kan mätas eller beräknas. Därför baseras föreskrifter om säkerhet och strålskydd till stor del på doser till människor i biosfären och de beräknade doserna används som ett jämförelsemått mellan olika förvarsalternativ eller platser. Det är de eventuella konsekvenserna i de ytnära ekosystemen som vållar störst oro och är det mest närliggande att fundera över för de flesta befolkningsgrupper.

För att kunna bedöma de radiologiska konsekvenserna av eventuella radioaktiva utsläpp från ett slutförvar, behöver transporten från berget till människan och till andra organismer beskrivas och beräknas. Det övergripande målet är att kunna genomföra trovärdiga konsekvensberäkningar i säkerhetsanalyserna i enlighet med myndigheternas föreskrifter. Förutom att ta fram de metoder och data som behövs för att beräkna radiologiska doser och risker förknippade med eventuella utsläpp ska programmet för ytnära ekosystem beskriva händelser och processer på ett realistiskt sätt med en motivering varför vissa processer är betydelsefulla och likaså en utförlig motivering varför andra processer har utslutits.

Eftersom generella platser används vid de tidigare säkerhetsanalyserna har också de ytnära ekosystemen varit generaliserade. I SR 97 /SKB, 1999a/ genomfördes en platsjämförelse och försök till att använda platsspecifika data för ytnära ekosystem. De visar att en stor del av osäkerheterna vid dosberäkningar i säkerhetsanalysen är beroende av det bristande underlaget i de ytnära ekosystemen. SR 97 och den pågående säkerhetsanalysen av SFR visar också att med platsspecifika kunskaper kan osäkerheterna om dagens och framtidens förhållande reduceras avsevärt. Ett av de övergripande målen med undersökningarna är att reducera osäkerheterna vid beräkningarna och med aktuell

vetenskaplig kunskapsbas kunna beskriva de ur radiologisk synpunkt viktigaste processerna. Ett annat mål är att en placering av djupförvar ska påverka miljön och naturen i minsta möjliga mån. För att kunna bedöma påverkan på miljön, planera djupförvar, platsundersökningar samt få underlag för miljökonsekvensbeskrivningar, behövs omfattande dokumentation av de ytnära ekosystemen.

SKB har tidigare inte genomfört omfattande undersökningar av ytnära ekosystem, men erfarenheter och metoder av detta finns i samhället från andra projekt, miljöövervakning och forskning. Dessutom styrs mängden parametrar och metoder i stor utsträckning av den valda platsen och därför är vissa beskrivningar enbart mycket generella i denna rapport. Det betyder att de metoder och parametrar som beskrivs i detta kapitel kan förändras när arbetet påbörjas vid en bestämd plats.

Ämnesområdet ytnära ekosystem omfattar både den levande miljön (biotiska) dvs djur, växter samt deras interaktioner och den icke levande (abiotiska) miljön, t ex klimat och vatten. De biotiska och abiotiska förhållandena påverkar varandra, där de abiotiska faktorerna, t ex klimat styr ekosystemen medan de biotiska återverkar med att reglera de abiotiska, t ex genom förändrad avdunstning på grund av vegetation. De ytnära ekosystemen regleras även av människan t ex genom markanvändning.

Kunskap om mänskliga aktiviteter är nödvändiga för att kunna göra relevanta dosberäkningar och diskutera osäkerheter i säkerhetsanalysen. Många av de företeelser som förknippas med mänskliga aktiviteter påverkar ekosystemen, men ekosystemen skapar de grundläggande förutsättningarna till hur människan kan utnyttja området. Beroende på aktivitet och biosfärförhållanden skiljer sig graden av påverkan mellan olika ekosystem. Generellt styr människans beteende ekosystemens utformning och utgör bitvis den dominerande faktorn för skapande av ekologiska förutsättningar och förändringar inom många områden, t ex jordbruk, skogsbruk, friluftsliv /t ex Götmark m fl, 1998; Gustavsson och Ingelög, 1994/.

Klimatet påverkar direkt vattenomsättningen i ett område. Vattenomsättningen är en av de viktigaste funktionerna som påverkar spridningen av radionuklider i ekosystemen. Områdets klimat är reglerande och därmed en begränsande funktion för ekosystemen och utbredningen av olika ekosystem /Schulze and Mooney, 1994/. Kunskap om klimatet ger en förståelse för ett områdes biologiska förutsättningar, t ex förutsättningarna för olika vegetationstyper och markanvändning, och är nödvändiga som bakgrundsdata för platsundersökningarna.

Avlagringar syftar här till områdets geomorfologi och kvartärgeologi. Genom kunskap om områdets stor- och småskaliga landskapsformer samt förekomst och typ av avlagringar kan förutsättningarna för ekosystemens struktur (t ex vegetation) beskrivas. Områdets topografi och lagringsföljder är viktiga för de ytnära hydrologiska modellerna som beskriver spridningen av radionuklider vid ytan. Lagerföljden ger kunskaper om de storskaliga processer som verkat i området vilket är viktig som utgångspunkt för projiceringar av eventuella framtida förändringar i området /Chambers, 1999/.

Begreppet biota innefattar alla levande organismer, dvs både växter och djur. Kunskapen om områdets biota är en förutsättning för att kunna förstå och beräkna spridningen och upplagringen av radionuklider i ekosystemen samt i människans föda. Information om och registreringar av biota är en grundsten för att kunna värdera förändringar i ekosystemen.

Ämnesområdet beskriver vattenförhållanden i sjöar, hav och rinnande vatten. Dessa parametrar ger en förståelse för processer i limniska och marina ekosystem (t ex sedimentation, vattenströmmar och partikelhalt) och fungerar dessutom som gränssyta till övriga ämnesområden. För dosberäkningar i säkerhetsanalysen är denna kunskap väsentlig för att kunna beräkna spridning och spädning av radionuklider inom ekosystemen.

### **10.1.2 Ämnesspecifika mål**

Ämnesprogrammet syftar till att identifiera vilken kunskap som krävs om de ytnära ekosystemen för att kunna genomföra en heltäckande bedömning av områdets biosfärförhållanden. Detta utgör underlag för framförallt säkerhetsanalysen men även för projektering av anläggningen och då främst anläggningens infrastruktur på marken. Platsundersökningarna av ytnära ekosystem ska även ge den information om områdesförhållanden som möjliggör att platsundersökningarna kan genomföras med hänsyn till natur- och miljövård. Detta betyder att undersökningarna kommer att fortlöpa under lång tid och starta redan i början av den inledande platsundersökningen. Tidig datainsamling är av stor vikt när det gäller att få tillgång till bakgrundsdata för parametrar som kan påverkas av ingrepp i samband med undersökningarna.

Med hänvisning till huvudmålen, se kapitel 2, är huvuduppgiften för det ytnära ekosystemsprogrammet att:

- karakterisera de ostörda ekosystemsförhållandena i kandidatområdena,
- insamla relevant dataunderlag för säkerhetsanalys och projektering,
- få en allmän förståelse för kandidatområdets ytnära ekosystem för att kunna utveckla och berättiga modeller samt kunna göra prognoser över områdets framtida utveckling,
- med hjälp av insamlad data presentera underlag för undersökningarnas vidare genomförande vad gäller natur- och miljöhänsyn.

#### ***Inriktning under inledande platsundersökning***

Under den inledande platsundersökningen inriktas ämnesprogrammet på att:

- identifiera och karakterisera biologiskt känsliga områden i studerade kandidat-områden,
- identifiera de parametrar i de ytnära ekosystemen som behövs för att uppnå tillräcklig kunskap om området,
- sammanställa befintlig data över områdena,
- insamla data som kräver ostörda förhållanden,
- inleda övervakningsprogram för parametrar med krav på långa tidsserier.

En preliminär platsbeskrivning för ämnesområdet upprättas.

### **Inriktning under komplett platsundersökning**

Under komplett platsundersökning inriktas programmet på att:

- komplettera datainsamlingen så att den information som behövs för säkerhetsanalys, projektering och miljökonsekvensbeskrivning har inhämtats samt att grundläggande förståelse av områdenas ytnära ekosystem uppnås,
- fördjupade undersökningar av specifika parametrar,
- fortsatt långtidsmonitoring.

En platsbeskrivning för ämnesområdet upprättas.

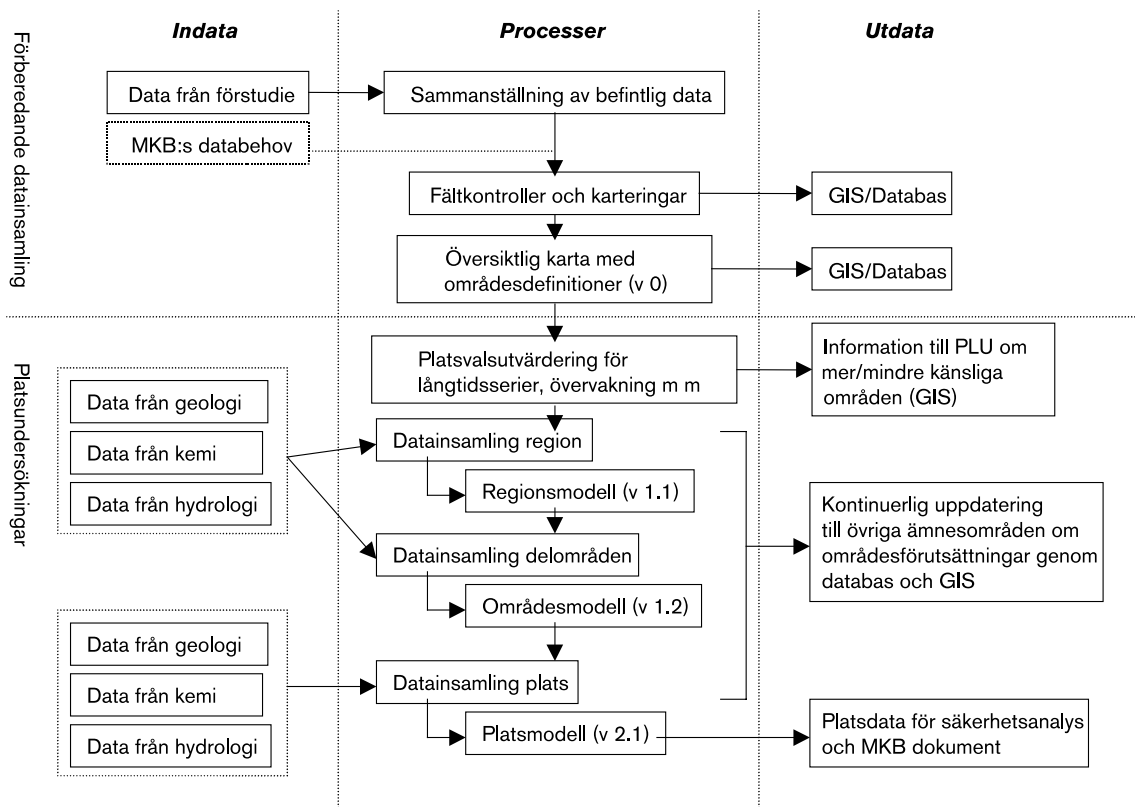
### **10.1.3 Arbetsmetodik och samordning**

Arbetet är indelat i tre huvudmoment: insamling, sammanställning och tolkning av data. Datainsamlingen görs genom att sammanställa befintligt material tillsammans med kompletterande fältinventeringar. Varje enskild parameters syfte och de insamlingskrav som ställs (t ex ostörda förhållanden), påverkar när i platsundersökningen som dokumentation av parametern bör genomföras /Lindborg och Kautsky, 2000/. Detta leder till att undersökningen av de ytnära ekosystemen styrs mer av de övriga aktiviteterna under platsundersökningen än den definierade uppdelning i genomförandesteg som huvudprogrammet har, när det gäller de krav som ställts på precision (regional omgivning och plats). Detta gäller dock inte de parametrar som kräver längre tidsserier eller som kommer att ingå i ett framtida övervakningsprogram för djupförvar.

När områdena för platsundersökning är bestämd inleds sammanställningar av befintliga data. Utifrån denna sammanställning och områdets läge (t ex kustnära, insjö eller inland) bedöms och utvärderas vilka parametrar som kommer att ingå i de platspecifika fältstudierna. Parametrar med krav på ostörda förhållanden och av parametrar där långa mätserier eftersträvas identifieras. Därefter inleds fältundersökningarna enligt parametrarnas respektive krav på säsong, områdesprecision och övrig undersökning på platsen. Löpande presentation av platsundersökningsdata kommer att göras med hjälp av GIS-applikationer. Syftet är att kunna bistå alla ämnesområden och arbetsprojekt som behöver information om parametrarna från ytnära ekosystem samt att fungera som ett arbetsverktyg vid insamling av andra parametrar. Efter inledande platsundersökning utvärderas insamlade data och arbetsmetodik. Under komplett platsundersökning görs kompletterande datainsamling och sammanställs den information som behövs för att kunna karakterisera området enligt de syften som ställts för ytnära ekosystem.

De ytnära ekosystemen är det mest heterogena ämnesområdet och angränsar i stort sett till alla övriga ämnesområden, speciellt hydrogeologi, hydrogeokemi och geologi. Detta innebär att en stor del av de uppgifter som behövs för ekosystemanalyser kommer att vara av intresse för flera ämnesområden, varför vissa parametrar kommer att tas fram under ansvar av andra ämnesområden i platsundersökningen. Informationsbehovet beskrivs i tabell 10-1 i avsnitt 10.2 och illustreras översiktligt i figur 10-1.

Ämnesprogrammet ska fungera under tiden för platsundersökningar. Vissa undersökningar kan sträcka sig längre än detta och ingår då även i ännu ej fastställt övervakningsprogram.



**Figur 10-1.** Arbetsgång och informationsbehov för att ta fram beskrivningen av de ytnära ekosystemen.

## 10.2 Modeller och parametrar

### 10.2.1 Modellernas uppbyggnad

För att på ett lätt och överskådligt sätt dokumentera och sammanställa data om de ytnära ekosystemen grupperas data till olika parametergrupper. Parametergrupperna är i sin tur uppdelade i parametrar, efter sina respektive funktioner i ekosystemen.

Eftersom mycket av informationen kommer att användas i säkerhetsanalysens modeller, som är under utveckling, är det i dagsläget svårt att avgöra hur parametrar kommer att utnyttjas och därför inte ännu möjligt att konkret beskriva de modeller som ska användas. I allmänhet är säkerhetsanalysens modeller enkla /se t ex Bergström m fl, 1999/, men de parametrar som används baseras på andra modeller, t ex baseras vattenomsättningen i en havsvik på en stor modell som bl a är beroende av områdets botten-topografi, avrinning, vind, temperatur, salthalt och vattenstånd /se Engqvist 1997; Engqvist och Andrejev 1999; 2000/.

För att kunna göra de förenklade platsspecifika modellerna används större modeller som beskriver materialflödet genom ekosystemen /t ex Kumblad, 1999/. Modellens struktur, dvs vilken modell som används i säkerhetsanalysen är beroende av områdets utseende.

Därför behövs mycket kunskap om hur det ser ut idag för att använda rätt modell. Det framtida utseendet av området modelleras i landskaps- och vegetationsmodeller som är beroende av landhöjningen, lösa avlagringar, vindstyrkor och öppenhet (fetch) /se t ex Brydsten, 1999a, 1999b; Påsse, 1997/. Erfarenheterna från pågående säkerhetsanalys av SFR visar att ju mer platsspecifik information det finns, desto mindre osäkerheter råder av både dagens men framförallt framtidens ekosystem till nästa istid. Det är av stor vikt att reducera osäkerheterna för ytnära ekosystem eftersom de bidrar till stora osäkerheter i säkerhetsanalyserna /SKB, 1999c; SKB, 1999a/.

De data som samlas in för monitorering, biologisk förståelse eller bakgrundsinformation om kandidatområdet kommer inte att i första hand bearbetas i modeller utan användas för jämförelser i tid och rum. För att kunna göra denna jämförelse behövs ett statistiskt tillräckligt stort material för att kunna med någon styrka (statistisk analys) bekräfta inträffade förändringar. Det betyder att vissa statistiska modeller kommer att användas för detta ändamål t ex BACI-design /Stewart-Oaten m fl, 1986/. För att få en översikt av området, samt för att visualisera områdets struktur kommer GIS användas i stor utsträckning. Flera olika GIS-modeller kommer att användas för att analysera och sammanväga flera parametrar /t ex Brydsten, 1999a/.

### 10.2.2 Ingående parametrar

Urvalet av parametrar som behöver bestämmas utgår från de olika syften (motiv) som finns för att beskriva de ytnära ekosystemen. En och samma parameter kan givetvis tillfredsställa flera syften.

Parametrar som används inom *säkerhetsanalys* ger data som förväntas vara viktiga och fungera som underlag för säkerhetsanalysen eller framtida analyser. Parametrar som används för bedömning av *natur- och miljöhänsyn* är data som direkt efterfrågas eller som kan utgöra underlag för att konsekvenser ska kunna beskrivas i underlag till en tillståndsansökan. Parametern utgör underlag för MKB-dokumentet (se avsnitt 2.1). (Det samråd som sker för att ta fram en miljökonsekvensbeskrivning sorterar under en egen aktivitet och beskrivs inte i denna rapport.) Även parametrar som eventuellt berörs av övrig miljölagstiftning t ex avseende skyddsområden och vattendomar. Även parametrar som är viktiga för miljöhänsyn och samhällsansvar och som inte regleras direkt av lagstiftning hör till denna grupp. Parametrarna används också vid planeringen av platsundersökningen för att minimera effekter på miljön.

Parametrar som används för *övervakning* ger viktig information om bakgrundsvärden för att påvisa eventuella förändringar i samband en eventuell lokalisering av djupförvaret och i viss mån även platsundersökningens aktiviteter. Hit hör också parametrar som måste insamlas för att resultat från andra mätningar ska kunna tolkas trots väderväxlingar och liknande (bakgrundsdata).

Vissa parametrar bestäms för att öka *förståelsen* för viktiga processer i ytnära ekosystem. Förståelse växelverkar med övriga syften och är väsentlig för bl a val av plats, modellering, design av övervakningsprogram, tolkningar av händelser samt ger perspektiv till arbetet med att ta fram en miljökonsekvensbeskrivning. Parametern ger också bakgrundsdata för vetenskapligt korrekta beskrivningar och tolkningar för bland annat säkerhetsanalysen.

Beskrivningen av de ytnära ekosystemen utnyttjar information från en mängd olika ämnesområden. I tabell 10-1 presenteras de parametrar som är relevanta att undersöka ur ett biosfärsperspektiv. Tabellen är uppdelad efter de berörda ämnesområden som ansvarar för metodbeskrivning och att datainsamlingen genomförs. För en mer detaljerad uppdelning av parametrarna och för ytterligare beskrivning, se Lindborg och Kautsky /2000/.

**Tabell 10-1. Sammanställning av parametrar som ingår i modellbeskrivning av ytnära ekosystem. Tabellen visar också när parametern huvudsakligen bestäms (se förklaring i tabell 2-3).**

Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under				Används för	
		FS	IPLU	KPLU	DETU		
<b>Geologi</b>	Topografi	x	x	x		Förståelse Säkerhetsanalys Natur- och miljöhänsyn Övervakning	
	Landhöjning						
	Jordlager						
	Berg i dagen						
<b>Hydrogeologi</b> Grundvatten	In/utströmningsområden		x	x		se ovan	
	Mark- och grundvatten						
	Grundvattennivåer						
	Brunnar						
<b>Hydrogeologi</b> Ytvatten, sjöar, vattendrag och hav	Bottentopografi		x	x		se ovan	
	Vattenstånd Vattenomsättning, volym, salthalt						
<b>Hydrogeologi</b> Metrologi	Nederbörd	x	x	x		se ovan	
	Avrinning						
	Evapotranspiration						
<b>Hydrogeokemi</b> Mark och sediment i sjö och hav	C (POC, DOC, DIC), N (NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , Tot N, Org N) P (PO <sub>4</sub> , Org P, Tot P) Si, I, K, Fe, Spårämnen Radionuklider Organiska gifter vattenhalt redoxzon		x	x		se ovan	
	<b>Hydrogeokemi</b> Mark- och grundvatten, sjöar, vattendrag och hav						
	C (POC, DOC, DIC, Alk.) N (NO <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , Tot N, Org N), P (PO <sub>4</sub> , Org P, Tot P) Si, I, K, Fe Spårämnen Radionuklider Organiska gifter pH, O <sub>2</sub> , Salthalt i ytvatten även klorofyll och partikelhalt		x	x			
	<b>Ekosystem</b> Skogsbruk						
	Mängd (m <sup>3</sup> sk/ha) Produktion Omloppstid Åldersstruktur		x				se ovan
	<b>Ekosystem</b> Jordbruk						
	Produktion grödor Djurhållning, köttproduktion Omfattning, position och areal		x	x			se ovan

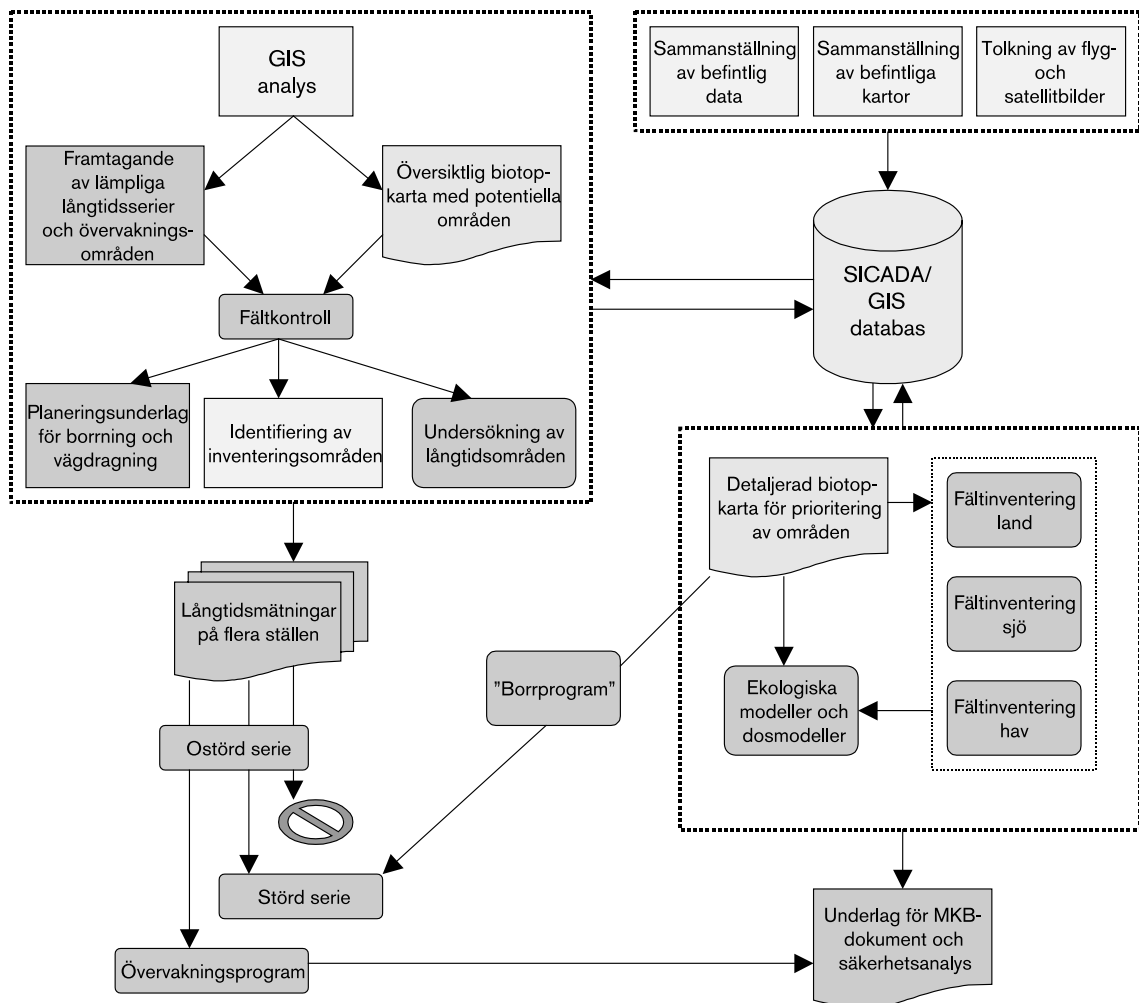
Parametergrupp	Parameter	Bestäms huvudsakligen under			Används för
		FS	IPLU	KPLU	
<b>Ekosystem</b> Fiske, jakt och friluftsliv	Omfattning av fiske och jakt Omfattning av svamp och bärplockning m m		x	x	se ovan
<b>Ekosystem</b> Miljögifter	Miljögifter i biomassa		x		se ovan
<b>Ekosystem</b> Flora	Vegetationstyp, nyckelbiotop, bestånd, dominerande arter, rödlistade arter	x	x	x	se ovan
<b>Ekosystem</b> Fauna	Arter, biomassa, produktion rödlistade arter	x	x	x	se ovan
<b>Klimat</b>	Tjäle (dagar, djup) Isförhållanden Vindar Luftryck Dagslängd Insolation Instrålningsvinkel Vegetationsperiod		x	x	se ovan
<b>Akvatiska parametrar</b> Sjöar, vattendrag och hav	Sjötyp Sedimenttyp Syrehalt Syresättning Skiktning Ljusförhållanden Temperatur Vattenomsättning  för hav även Strömmar Exponeringsgrad Salthalt		x	x	se ovan

Undersökningarna kommer att läggas upp så att parametrar som kan påverkas av undersökningarna genomförs tidigt, eftersom det finns ett behov av bakgrundsdata och initialvärden för senare jämförelser. De parametrar som kräver långa tidsserier eller behöver initialdata bör få en hög prioritet i arbetsordningen, medan de som blir aktuella först vid kompletterande undersökningar får lägre prioritet. Det kan dock vara praktiskt att göra viss insamling av olika parametrar samtidigt. Detta betyder att parametrar utan speciella krav på insamlingstid kan komma att undersökas i ett tidigare skede än vad som behövs.

### 10.2.3 Modellverktyg och planerade analyser

Hur det insamlade datamaterialet kommer att analyseras och tolkas beskrivs under respektive karakteriseringsmetod i avsnitt 10.3. Figur 10-2 ger en översikt av aktiviteter vid undersökningar av ytnära ekosystem samt de produkter och underlag som dessa resulterar i.





**Figur 10-2.** En översikt av aktiviteter vid undersökningar av ytnära ekosystem samt de produkter och underlag som dessa resulterar i.

### 10.3 Karakteriseringsmetoder

Eftersom ämnesprogrammet för de ytnära ekosystemen spänner över en mängd olika ämnesområden finns ingen generell metodik utarbetad för ämnesprogrammet. För att uppnå bästa resultat kommer specifika metoder och modeller för insamling och bearbetning av varje enskild parameter att användas. I möjligaste mån kommer redan etablerad teknik för datainsamling och bearbetning att användas för att underlätta jämförelser med andra områden för kalibrering /se t ex Lawesson, 2000/. I de fall där nya metoder utarbetas kommer dessa att tillämpas enligt strikt vetenskaplig metodik i fråga om upprepbarhet och objektivitet.

Vilka metoder som kommer att användas vid platsundersökningen kommer att beslutas när undersökningsplatserna är bestämda, eftersom parametrar och därmed mätmetoder ofta är specifika för olika miljöer. En sammanställning och utvärdering av tänkbara metoder pågår /se Blomqvist m fl, 2000; Lindell m fl, 1999; Kyläkorpi m fl, 2000; Haldorson, 2000/. Tabell 10-2 ger en översikt av de metoder som kan komma att användas. Metoderna beskrivs mer utförligt i delavsnitten nedan. Metoder för övriga parametrar presenteras under respektive ämnesområde, se kapitel 4 till 9.

**Tabell 10-2. Metoder för karakterisering av ytnära ekosystem vid platsundersökning.**

Metod	Parameter	Referenser
<b>Ytnära ekosystemmetoder</b>		
<b>Mark</b>		
Inventering av nyckelbiotoper	Nyckelbiotoper i skogs- och jordbruk samt generellt biotopsskydd	Eklund m fl manus
Vegetations- och biotopskartering <ul style="list-style-type: none"> <li>• Insamla befintligt material</li> <li>• Flygbildstolkning</li> <li>• Karttolkning</li> <li>• Fältkontroll och inventering av mark/buskskikt och kulturlandskap</li> </ul>	Vegetations- och biotopskarta Skogsbruk – mängd (m <sup>3</sup> sk/ha) – produktion – omloppstid – åldersstruktur Jordbruk – produktion av grödor Vegetationstyp – bestånd/produktion – arter av kärlväxter, svamp, lav, mossa och alg	Kyläkorpi m fl /2000/
Sammanställning av rödlistade arter	Rödlistade arter	
Biomassa- och produktion <ul style="list-style-type: none"> <li>• Insamla befintligt material</li> <li>• Områdesbedömning</li> <li>• Områdesinventeringar</li> </ul>	Jakt, tilldelning, fällstatistik Arter antal och förekomst Biomassa Produktion	Kyläkorpi m fl, 2000. Se även akvatisk parameterinsamling.
Provtagning av gifter och radionuklider i växter och djur	Miljögifter Radionuklider	
Provtagning av jordmån och mossar <ul style="list-style-type: none"> <li>• Befintligt material från SLU</li> <li>• Komplettering i fält</li> </ul>	Jordmån Markkemi Jordmån, typ och tjocklek Miljögifter/radionuklider	
Jordartskartering, se Geologiska metoder	Höjdskillnad Landhöjning/Strandförskjutning Stratigrafi Jordarter Berg i dagen	
<b>Akvatisk</b>		
Akvatisk parameterinsamling Bottenkartering <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetations- och djurzoneringar</li> <li>• Bottenfördelning</li> </ul>	Vegetationszoneringskarta Sjötyper Sedimenttyp Syrehalt/-sättning Skiktning Ljusförhållanden Omsättning/ Strömmar Exponeringsgrad	Blomqvist m fl, 2000
Akvatisk parameterinsamling Provtagning <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vattenhämtning</li> <li>• Håvning</li> <li>• Sonder, syre, salthalt, pH, ljus och temp</li> <li>• Bottenprov med skraphämtare, dykare etc</li> <li>• Produktionsmätning</li> </ul>	Artsammansättningar och mängd av fauna och flora Produktion Vattenkemi Vattenfysik Sjötyper Sedimenttyp Syrehalt/-sättning Skiktning Ljusförhållanden Temperatur Miljögifter/radionuklider Omsättning/Strömmar Exponeringsgrad	Blomqvist m fl, 2000

Metod	Parameter	Referenser
Akvatisk parameterinsamling Fiske • Sammanställning av befintlig kunskap • Nätfiske • Elfiske • Ekolod	Artsammansättning Miljögifter/radionuklider i fisk Fiskekort (n) Fångster Yrkesfiskare (n)	Kyläkorpi m fl, 2000
Akvatisk parameterinsamling Batymetrimätningar • Lodning • Bottensedimentsstratigrafi	Morfometri	Blomqvist m fl, 2000
Akvatisk parameterinsamling Vattenomsättningsmätningar • Modellering av avrinning • Flödesmätning • Strömmätning • Modellering av strömmar	Vattenflöden Strömmar	Blomqvist m fl, 2000; Engqvist, Andrejev, 1999; Lindell m fl, 1999
<b>Klimat/hydrologi</b> Se, meteorologiska och hydrologiska metoder	Tjäle/is Antal dagar med tjäle Tjäldjup Isläggning Islossning Vindstyrka Vindriktning Luftryck Solinstrålning Dagslängd Insolation, instrålningsvinkel Vegetationsperiod Säsongsutsträckning (dagar) Nederbörd Avrinning Temperatur Evapotranspiration Vattenstånd Luftfuktighet Vattendelare In-/utströmningsområden	Lindell m fl, 1999 Integrering med övriga ämnesområden
<b>Människan</b> Sammanställning av befintlig information	Friluftsliv Plockning av bär/svamp Djurhållning, köttproduktion Antal/position jordbruk Areal jordbruk Kostvanor Reservat, skyddsområde, riksintresse Industrier typ Industrier position Industrier yta (areal) Exploateringsplaner mark Boendeantal fast/fritid Boende sysselsättning Boende kostvanor Områdeshistoria, fornlämningar Transporter Samhällsutveckling, demografi	Haldorson, 2000

### 10.3.1 Inventering av nyckelbiotoper

#### Sammanställning av befintlig information

Nyckelbiotop är ett kvalitetsbegrepp som avser områden där man finner eller kan förväntas finna rödlistade (hotade) arter. Nyckelbiotoper är en biotop i vanlig mening, dvs en någorlunda enhetlig och avgränsningsbar livsmiljö som dessutom har en avgörande betydelse, en nyckelroll, för den hotade och sällsynta delen av fauna och flora. Begreppet nyckelbiotop har i sig ingen juridisk innebörd. Det innebär att inget automatiskt skydd för nyckelbiotoper existerar. Nyckelbiotopsinventeringen av skogsmark är en biologisk inventering av nationell omfattning.

För att identifiera potentiella skogsnyckelbiotoper i området inleds arbetet genom att med hjälp stereoinstrument tolka och analysera infraröda flygbilder. Om undersökningsområdet redan i förstudiestadiet har sammanställts på befintliga nyckelbiotopsinventeringar görs endast en komplettering av dessa. Kriterierna för en nyckelbiotop skiljer sig mellan skogsmark, jordbruksmark och övrigt biotopsskydd. För en skogsmark tar inventeraren ställning till om en biotop ligger över eller under kvalifikationsgränsen för en nyckelbiotop enligt Skogsvårdsstyrelsens normer. Beträffande jordbruksmark finns skyddsklassade biotopstyper redan identifierade av Naturvårdsverket /Bernes, 1994/, t ex åkerholmar, odlingsrösen och stengårdsgårdar.

#### Fältinventeringar

Huvudmomentet i nyckelbiotopsinventeringen utgörs av fältarbete. När intressanta områden är identifierade startar själva inventeringsarbetet, där biotopens karaktär och intressanta delobjekt identifieras, tabell 10-3. Arbetet delas upp i steg där noggrannheten ökar i takt med att undersökningsområdets yta specificeras.

**Tabell 10-3. Exempel på ifylld inventeringsblankett från nyckelbiotopsinventering av skogsmark.**

<b>Biotoptyp</b>	Lövängstyp	<b>Areal (ha)</b>	2.2		
<b>Biotopkaraktär</b>	Upphörd beteshävd Plockepinn, oregelbundet liggande stammar Ymnigt mosstäcke	Blockrikt eller storblockigt Rikligt med död ved			
<b>Ekonomiskt kartblad</b>	06H 4A	<b>Objekt-nummer</b>	01	<b>Delobjekt-nummer</b>	1
<b>Län</b>	Kalmar	<b>Kommun</b>	82	<b>Församling</b>	02
<b>X-koordinat</b>	6370543	<b>Y-koordinat</b>	1550414		
<b>Inventeringsdatum</b>	96-05-23	<b>Ändringsdatum</b>			
<b>Element</b>	Gammal skogslind Gammalt grovt ädellövträd Hamlat träd Innanmurket lövträd med mulm Senvuxet träd Mossblock Torrträd Låga av ädellövträd	<b>Frekvens</b>	Allmänriklig Tämligen allmän Tämligen allmän Enstaka-sparsam Enstaka-sparsam Allmänriklig Enstaka-sparsam Enstaka-sparsam		

### **Långtidsmätningar**

Nyckelbiotopsinventeringen görs endast i ett inledande skede av platsundersökningen och kommer inte att ingå i några långtidsstudier.

### **Arkivering och presentation**

Data från inventeringar och befintliga undersökningar läggs i SKB:s databas (SICADA) och kopplas till en GIS-applikation.

## **10.3.2 Vegetations- och biotopskartering**

### **Sammanställning av befintlig information**

En översiktlig vegetationskartering av områdets vegetationstyper kommer att genomföras i platsundersökningens inledande fas. Med hjälp av IR-flygbilder, nyckelbiotopsinventeringen (SVS) samt digitala satellitbilder av typ Swedish Land Cover (SLD) eller Swedish Terrain Type Classification (TTC) görs en uppskattning av områdets vegetation och biotoper, presenterat i GIS-format. För att bedöma områdets tidigare utnyttjande och potential kommer även historiska kartor, t ex skifteskartor att användas. Dessa kan även ligga till grund för bedömningar av framtida områdesutnyttjande baserat på tidigare utvecklingshastighet och -förlopp.

### **Fältinventeringar**

I ett inledande skede kommer endast kompletterande fältkarteringar att göras som en kontroll av den befintliga informationen. Eventuellt kan tidigare fältinventeringar utnyttjas som information beroende på undersökningsområde.

### **Långtidsmätningar**

Vegetationskarteringen görs i ett inledande skede av platsundersökningen och kommer inte att ingå i några långtidsstudier under platsundersökningen, men kan ingå i långtidsövervakningen och upprepas då med några års mellanrum.

### **Arkivering och presentation**

Data från inventeringar och befintlig information sammanställs i SKB:s databas (SICADA) och kopplas till en GIS-applikation.

## **10.3.3 Sammanställning av rödlistade arter**

### **Sammanställning av befintlig information**

Antalet rödlistade (hotade) arter i området behöver bestämmas. Centrum för biologisk mångfald (CBM) fungerar som värd för en databas över rödlistade arter i Sverige. Databasen beskriver fynd av arter som är klassificerade enligt uppsatta kriterier samt var dessa fynd är gjorda. Nyligen presenterades ett förslag till definitioner av nya rödlistekategorier. Det övergripande syftet med det nya systemet är att ge tydliga och objektiva regler för klassificering av arter enligt deras utdöenderisk.

Utdöenderisken under olika förutsättningar beräknas genom en kvantitativ analys PVA (Population Viability Analysis; överlevnads- eller riskanalys) eller andra kvantitativa analysmetoder med ledning av kunskapen om en arts biologi.

För mer information om rödlistade arter, metoder för listning och insamling av data, se Kyläkorpi m fl /2000/. En sammanställning av befintlig kunskap om hotade (rödlistade) arter i undersökningsområdet utförs av CBM.

### ***Fältinventeringar***

Fältinventeringar av området för att identifiera speciella arter kommer inte att genomföras i ett inledande skede. En indirekt bedömning av områdets potential för att hysa hotade arter kommer dock att göras i fält, t ex vid nyckelbiotopsinventeringen. Fynd av rödlistade arter under nyckelbiotopsinventeringen, vegetationskarteringen och övrig undersökning noteras och bifogas till sammanställningen.

### ***Långtidsmätningar***

Sammanställningen av rödlistade arter görs i ett inledande skede av platsundersökningen och kommer inte att ingå i några långtidsstudier, men fynd av rödlistade arter kan i vissa fall följas upp under längre tidsperiod.

### ***Arkivering och presentation***

Data från inventeringar och befintlig information sammanställs i SKB:s databas (SICADA) och kopplas till en GIS-applikation. För att skydda vissa sällsynta arter kommer exakta positioner eller artnamn att sekretessbeläggas i officiella sammanställningar.

## **10.3.4 Biomassabestämning**

Befintlig information om de dominerande arternas totala mängd (biomassa) sammanställs och beräknas från vegetationskartor och gjorda uppskattningar, t ex jordbruksavkastning eller skogsmängd. Mängderna integreras för varje objekt (t ex skogområde, åker, myr).

### ***Fältinventeringar***

Huvudsakligen kommer informationen från vegetationskartor användas på land, men materialet kompletteras med mängduppskattningar i fält för att kunna kalibrera informationen från kartorna. I vatten kommer informationen från de kvantitativa bottenundersökningarna användas (se nedan).

### ***Långtidsmätningar***

Biomassaberäkning görs i ett inledande skede av platsundersökningen och kommer inte att ingå i några långtidsstudier, förutom för akvatiska miljöer.

## **Arkivering och presentation**

Biomassan per ytenhet presenteras i GIS och beståndsuppskattningar lagras i SKB:s databas (SICADA).

### **10.3.5 Provtagning av gifter och radionuklider i växter och djur**

#### **Sammanställning av befintlig information**

Befintlig information från Naturvårdsverkets och SSI:s miljöövervakning kommer att sammanställas. Avståndet till övervakningsstationerna utvärderas för att kunna effektivt eventuellt komplettera pågående övervakning med platser i undersökningsområdet.

#### **Fältinventeringar**

Efter utvärdering av befintlig data i Naturvårdsverkets program för miljöövervakning kommer eventuella kompletteringar att göras i fält. Våvnadsprover från jakt och fiske kommer att kompletteras med egna fångster. I största möjliga mån kommer den metodik som används av Naturhistoriska Riksmuseet, Naturvårdsverket och SSI att användas.

I kemiprogrammet tas prover från vatten och mark. I platsundersökningsprogrammet kommer en kartläggning att göras för att erhålla en god uppfattning om bakgrundsnivåerna i området.

Vilka arter som kommer att insamlas i samband med platsundersökningarna och metoder för detta kan först bestämmas när plats för undersökning är bestämd.

#### **Långtidsmätningar**

Generellt innebär provtagningen av miljögifter i biomassa att material insamlas årligen från olika områden för kemisk analys av miljögifter. Efter den första kartläggningen av området kommer troligen provinsamling ske på flera ställen. Den största delen kommer att arkiveras i provbanker och ett fåtal analyseras årligen. Ett förslag till samarbete mellan Naturhistoriska Riksmuseet och SKB håller på att tas fram där metoder och eventuellt resurser kan samordnas.

Den nationella miljöövervakningen (Miljöprovbanken) hanterar och lagrar de prover som årligen insamlas från bestämda lokaler inom de terrestra, limniska och marina programmen. I Miljöprovbanken lagras även prover från tidigare forsknings- och undersökningsverksamhet. De enhetliga serier av material som där finns att tillgå kan användas för t ex retrospektiv analys för att belysa utvecklingen och koncentrationer av nyupptäckta miljöföroreningar.

## **Arkivering och presentation**

Resultaten från provtagning av biomassa kommer att presenteras i rapportform, SKB:s databas SICADA samt i GIS-applikationen.

### **10.3.6 Produktionsuppskattningar**

#### ***Sammanställning av befintlig information***

Med utgångspunkt från biomassabestämningen kommer den årliga produktionen av biomassa beräknas för att kunna bestämma materialflöden av kol, vatten och näringsämnen. Detta används sedan för att beräkna omsättningen av radionuklider i ekosystemen. För de flesta arterna kan generella litteraturvärden användas. Ett exempel på detta är presenterat i SAFE-projektet /Kumblad, 1999/. För terrestra områden kan primärproduktionen uppskattas med hjälp av skogs- och jordbruksdata samt vegetationsinventeringar /Eriksson, 1991; Lindborg och Schüldt, 1998/.

#### ***Fältundersökningar***

Vissa dominerande arter kan behöva kompletterande uppskattningar av produktionen och omsättningen av material. Det görs troligen i fält men metoderna är helt beroende av vilken typ av art och vilken miljö den lever i. Omfattningen är beroende av de använda flödesmodellerna.

#### ***Långtidsmätningar***

Troligen kommer inga långtidsmätningar att genomföras av produktionen, men beräkningarna baseras på regelbundna långtidsmätningar av vattenkemiska parametrar (t ex syre, pH, näringsämnen) och tillväxtmätningar under en säsong av vegetation.

#### ***Arkivering och presentation***

Data från inventeringar och befintliga information sammanställs i SKB:s databas SICADA för modelleringar av bl a kolflöde och radionuklider.

### **10.3.7 Provtagning av jordmån och torvmossar**

#### ***Sammanställning av befintlig information – jordmån***

Begreppet jordmån används av SLU primärt i bemärkelsen den övre delen av marken som påverkas av organismer, vatten, vind och klimat och därmed förändrats i något eller några avseenden. Denna påverkan har ofta resulterat i utbildning av synliga jordmåns-horisonter. Jordmånen inbegriper humuslagret men ej förnalagret.

Genom att använda ståndortskarteringen som utförs av Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) fås kunskaper om markens kemiska och fysikaliska egenskaper. Ståndortskarteringen ger även information om markfuktighet, ytblockighet, jorddjup, kulturpåverkan, jordart, jordmån och humusform, dessutom halten av 29 grundämnen och pH. Karteringen görs i permanenta provrutor (23 500 st i hela Sverige) genom insamling av jordprover, klassificering i fält och kemiska analyser.

#### ***Fältinventeringar – jordmån***

Eventuella kompletteringar av befintliga provytor och data kommer att utföras under platsundersökningen enligt SLU:s metoder, om informationen över området visar sig vara otillräcklig. Jordmån bedöms i en punkt per provyta, där provgrop grävs. Bedömning görs enligt vissa kategorier, se tabell 10-4.

På varje provyta görs även en grov bedömning av provytans ”genomsnittliga jorddjup”.



**Tabell 10-4. Typer och kategorier av jordmån som bestäms vid provtytor enligt SLU:s metoder.**

Typ	Kategori	Kommentar
Typer med utbildad B-horisont	Kulturjordmån	Profilen visar mer eller mindre tydliga spår av plöjning, s k "plogsula"
	Brunjord	Avser övergång brunjord>podsol eller podsol>brunjord
	Övergångstyp	
	Järnpodsol	
	Järnhumuspodsol	
	Humuspodsol	
Typer utan utbildad B-horisont	Sumpjordmån	Jordmånsbildning otydlig på grund av fin textur/dålig dränering
	Tät "jordart"	
	Grov "jordart"	
	Blockmark	
	Lithosol	
	Hällmark	

### **Långtidsmätningar**

Jordmånskartering görs i ett inledande skede av platsundersökningen och kommer inte att ingå i några långtidsstudier. Men resultaten måste följas upp om platsen väljs för djupförvar.

### **Torvmossar**

Eventuella torvmossar i området kommer att undersökas på mäktighet och stratigrafi. Med hjälp av lagertyp och lagerföljd kan områdets utveckling beskrivas tillsammans med landhöjnings-, klimat- och sedimenteringsmodeller. För metodbeskrivning se geologikapitlet.

### **Arkivering och presentation**

Resultaten från provtytor kommer att presenteras i rapportform, SICADA samt i GIS-applikationen.

## **10.3.8 Bestämning av markanvändning (växt- och djurodling)**

### **Sammanställning av befintlig information**

Den markanvändning som bedrivs inom området beskrivs med hjälp av uppgifter från Statistiska Centralbyrån (SCB), Skogsvårdsstyrelsen (SVS) och vegetationskarteringen. Satellitbilder över området kommer även att utnyttjas för bestämning av markanvändning. Exempel på två typer av databaser med satellitbilder som kan komma att användas är; Swedish Land Cover (SLD) och Swedish Terrain Type Classification (TTC) från Rymdbolaget. Data från sammanställningarna kommer att behandlas i GIS-applikation tillsammans med övrig parameterinsamling och även ingå i metoder för framtagande av övriga parametrar, se t ex 10.3.10, sjöar.

### **Fältinventeringar**

Insamlad befintlig information kommer att kontrolleras i fält i samband med annan fältundersökning, t ex vegetationskartering.

### **Långtidsmätningar**

Områdets markanvändning kommer att ingå i ett övervakningsprogram för att kunna konstatera eventuella förändringar av betydelse för annan parameterinsamling t ex skogsavverkning.

### **Arkivering och presentation**

Resultaten från sammanställningen kommer att presenteras i rapportform, SICADA samt i GIS-applikationen.

## **10.3.9 Bestämning av övrigt markutnyttjande**

### **Jakt**

Jaktstatistik används för uppskattningar av populationsstorlekar samt artsammansättning för vissa arter. Som underlag till säkerhetsanalysen behöver även områdets utnyttjande beräknas. Detta ger en uppfattning om graden av självförsörjning hos befolkningen.

Fällstatistik över jaktområden innehas av lokala jaktvårdsföreningar, jägarförbundet och länsstyrelserna och sammanställs över området. Inga fältinventeringar kommer att ske. Statistiken bör följas upp regelbundet samt eventuellt ingå i övervakningsprogram.

Resultaten från sammanställningen kommer att presenteras i rapportform, SICADA samt i GIS-applikationen. Beräkningarna kommer även att presenteras som ingångsvärden i säkerhetsanalysen.

### **Fiske**

Fiskestatistik används för uppskattningar av populationsstorlekar samt artsammansättning för vissa arter. Det ger en uppfattning om graden av självförsörjning hos befolkningen.

Befintlig fiskestatistik kommer att inhämtas från fiskevårds- och sportfiskeföreningar, länsstyrelser (regionala undersökningar), Fiskeriverket (professionellt fiske) och Sötvattenslaboratoriet (elfiskeregistret). Beroende på tillgången av befintlig data kan det bli aktuellt med provfiske för att få en uppfattning om fiskbeståndens storlek och kondition. I samband med provfiske tas prover för miljögifter och radionuklider. Statistiken bör följas upp regelbundet samt eventuellt ingå i övervakningsprogram med återkommande provfiske.

Resultaten från sammanställningen kommer att presenteras i rapportform, SICADA samt i GIS-applikationen. Beräkningarna kommer även att presenteras som ingångsvärden i säkerhetsanalysen.

## **Bär- och svamplockning**

Som underlag till säkerhetsanalysen behöver områdets utnyttjande beräknas. Mängden svamp och bär inom undersökningsområdet skattas utifrån vegetationstyp, se vegetations- och biotopskartering. Därefter beräknas den potentiella konsumtionen per person (vikt/person) utifrån regionala data om befolkningstäthet från SCB.

Fältinventeringar av området kommer inte att genomföras eftersom en bedömning av områdets potential för produktion av svamp och bär kan göras med hjälp av t ex vegetationskartor. Några långtidsstudier av svamp- och bärproduktion kommer inte att utföras, men provtagning av svamp och bär kan ske för att uppskatta innehållet av miljögifter och radionuklider.

### **10.3.10 Akvatisk parameterinsamling**

#### **Sjöar**

Insamling av limnologiska parametrar kommer att göras enligt de metoder som presenteras av Blomqvist m fl /2000/. Sjöns typ och ekologiska funktioner beskrivs sedan med hjälp av en modell som bygger på de ingående sjöparametrarna. Dessa är indelade i fem grupper: 1) områdets position i förhållande till styrande faktorer t ex klimatzoner och höjd över havet, 2) avrinningsområde och omgivande randvillkor, 3) sjöns morfometri, 4) sjöns ekosystem och 5) mänsklig påverkan på sjöns ekosystem. Inledningsvis karakteriseras sjöarna med hjälp av parametrar som beskriver sjöns omgivning (grupp 1 och 2). Analysen baseras på information om avrinningsområden, rinnande vatten, naturgeografiska regioner, jordar, landhöjning, vegetation, markanvändning, och sammanställs som teman i en GIS-applikation. Dessutom görs en sammanställning av tidigare undersökningar och regionala data för sjöparametrar. I dessa ingår information om rödlistade arter och mänsklig aktivitet i av- och tillrinningsområdet. Sammanställningen kommer att visa vilka sjöar i området som har liknande egenskaper och i vilka sjöar som fältinventeringar bör prioriteras.

Fältinventeringarna påbörjas med att fastställa strandlinjens karaktär när det gäller substrat och vegetation och tidigare påverkan av människan (t ex reglering, dikning, dämning). Vegetationens djuputbredning bestäms med hjälp av ekolodning och mätningar av ljusets genomsläpplighet (siktdjup). I samband med ekolodningarna kopplade till GPS kan sjöns bottenpografi mätas upp. En noggrann inventering av sjöarnas abiotiska parametrar t ex temperatur, skiktning, ljusförhållanden, pH, buffringsförmåga, färg, näringsämnen, syreförhållanden kommer också att genomföras under minst en årscykel. Denna information kompletteras med kvantitativa fauna- och florainventeringar av dominerande arter (grupper). Om sjön ligger vid intressant plats (ursprung) kommer en bestämning av bottenstratigrafin göras med sedimentborrningar i sediment under vintern under den kompletta platsundersökningen. Detta ger information om sedimentationsmiljön i sjön och dess utvecklingshistoria vilket behövs för säkerhetsanalysen och framtidsprognoser. Sjöns vattenomsättning och hydrologiska egenskaper bestäms i hydrologiska ämnesprogrammet.

De storskaliga faktorerna, grupp 1 och 2, samt ett flertal fysikaliska och morfometriska parametrar kommer att modelleras med hjälp av GIS utifrån befintliga digitala kartor och insamlad fältdata. GIS-applikationen används även till att beräkna parametrar som, t ex sjöns yta, volym, djup, kustlängd, öar, omsättningstid och markanvändning inom avrinningsområdet.

Troligen kommer sjöar i undersökningsområdet att ingå i långtidsserier för kemiska och fysikaliska parametrar. Beroende på platsspecifika förutsättningar kan andra typer av övervakningar vara av intresse, t ex förekomst av rödlistade arter (fisk och groddjur).

Resultaten från sammanställningen kommer att presenteras i rapportform, SICADA samt i GIS-applikationen. Beräkningarna kommer även att presenteras som ingångsvärden i säkerhetsanalysen.

### **Vattendrag**

Vattendragens egenskaper kommer att beskrivas på liknande sätt som sjöar, dvs 1) områdets position i förhållande till styrande faktorer t ex klimatzoner och höjd över havet, 2) avrinningsområde och omgivande randvillkor, 3) vattendragens längd och tvärsnitt, 4) vattendragens ekosystem och 5) mänsklig påverkan. Analysen baseras på information om avrinningsområden, sjöar, naturgeografiska regioner, jordar, landhöjning, vegetation, markanvändning, och sammanställs som teman i en GIS-applikation. Dessutom görs en sammanställning av tidigare undersökningar och regionala data. I dessa ingår information om rödlistade arter och mänsklig aktivitet i av- och tillrinningsområdet. Sammanställningen kommer att visa vilka vattendrag i området som har liknande egenskaper och var fältinventeringar bör prioriteras.

Fältinventeringar påbörjas med att fastställa strandlinjens karaktär när det gäller substrat och vegetation och tidigare påverkan av människan (t ex reglering, dikning, dämning). En noggrann inventering av vattendragens abiotiska parametrar t ex temperatur, ljusförhållanden, pH, buffringsförmåga, färg, näringsämnen och syreförhållanden, kommer också att genomföras under minst en årscykel. Denna information kompletteras med kvantitativa fauna- och florainventeringar av dominerande arter (grupper). Vattenomsättning och hydrologiska egenskaper bestäms i det hydrologiska ämnesprogrammet.

De storskaliga faktorerna, grupp 1 och 2, samt ett flertal fysikaliska och morfometriska parametrar kommer att modelleras med hjälp av GIS – utifrån befintliga digitala kartor och insamlad fältdata. Systemekologiska modeller kommer att användas för att beräkna omsättningstider i ekosystemen.

Troligen kommer vattendrag i undersökningsområdet kommer att ingå i långtidsserier för kemiska och fysikaliska parametrar. Beroende på platsspecifika förutsättningar kan andra typer av övervakningar vara av intresse, t ex förekomst av rödlistade arter (fisk, groddjur).

Resultaten från sammanställningen kommer att presenteras i rapportform, SICADA samt i GIS-applikationen. Beräkningarna kommer även att presenteras som ingångsvärden i säkerhetsanalysen.

### **Hav**

Befintlig information från miljöövervakningsprogram och tidigare studier sammanställs. Information från SMHI och andra regelbundna mätningar av havet temperatur, salthalt, strömmar och vattenståndsvariationer sammanställs. Bottenpografien läggs in i GIS från tillgängliga djupdatabaser och grundkort. Utifrån denna information görs en preliminär bedömning vilka zoner av fauna och flora som kan förväntas i djupled.

Om det inte finns pågående mätningar i övervakningsprogram startar en mätserie för säsongvariationer av framförallt vattenkemiska (t ex syresättning, näringsämnen, klorofyll) och fysikaliska parametrar (t ex ljusgenomsläpplighet och temperatur). Även vissa biologiska parametrar noteras som dominerande arter i vattnet samt på de grunda bottenarna. Under den kompletta platsundersökningen men före eventuella borrningar i havsområdet genomförs en översiktlig kvantitativ bottenkartering för att bestämma de dominerande växternas och djurens zoner samt bottenotyp i området. Sedimentproppar med längre sedimentprofiler genomförs också. Innehållet av radionuklider och miljögifter bestäms för fisk och i sedimentprofiler. Om det behövs för flödesmodellerna genomförs produktionsmätningar i fria vattnet och på botten.

Under den kompletta platsundersökningen beräknas vattenomsättningen i området samt bottenarnas exponering för vågverkan. Sedimentationsmiljön modelleras och jämförs med förhållanden de senaste 10 000 åren och i samband med detta görs även en bedömning av framtida sedimentationsmiljö. Dessutom används en systemekologisk modell för att beskriva flödet av material genom havsområdet och ekosystemen.

Säsongsmätningarna som startar i ett tidigt skede kommer att delvis övergå i en mätserie för långtidsmätningar. En del fauna- och florainsamling sker med regelbundna mellanrum, där tidsintervallen är beroende av hur området kommer att utnyttjas.

Resultaten från sammanställningen kommer att presenteras i rapportform, SICADA samt i GIS-applikationen. Beräkningarna kommer även att presenteras som ingångsvärden i säkerhetsanalysen.

### **10.3.11 Sammanställning av klimatinformation**

När plats är bestämd för undersökning kommer befintlig parameterdata för området att sammanställas utifrån SMHI:s databaser. De klimatparametrar där ämnesområdet ytnera ekosystem ansvarar för insamling och sammanställning, utgör bara en del av platsundersökningens totala klimatundersökning (se parametertabellen 10-1). Dock kommer mycket av insamlingen att göras samtidigt och av samma utförare (SMHI). Insamlingen av data kommer att ske med hjälp av dels befintligt material från mätstationer i kandidat-områdets närhet, och dels genom särskilda mätningar från fältstationer som utplaceras i samband med platsundersökningen. Data från eventuella lokala väderstationer utnyttjas. Dessutom kan vattenföringen mätas i rinnande vatten. Insamlingen samordnas med den hydrogeologiska datainsamlingen (se avsnitt 7.3.1).

Utifrån befintlig data kan en interpolering av klimatet göras med hjälp av Mesan-modellering. Resultatet från datainsamlingen och modelleringen kommer att avgöra om extra fältstationer behöver användas och var dessa ska placeras. Eventuellt kommer två eller fler mätstationer att användas i ett första steg för att sedan minskas till en vid val av prioriterad plats för undersökning. För ytterligare information om SMHI:s metoder för framtagande och beräkning av data och befintlig parameterdata över förstudiekommunerna hänvisas till Lindell m fl /1999/.

Klimatparametrar kommer att följas kontinuerligt i undersökningsområdet. Vilka mätserier som kommer att genomföras är beroende av undersökningsplats samt tillgången till befintliga stationer. Resultatet från sammanställningen av befintlig mätstationsdata kommer att presenteras som rapport och ingå i GIS. Data från mätstationer kommer kontinuerligt under platsundersökningen att loggas i SICADA.

# 11 Program för borrhning

## 11.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs det borrhprogram som SKB planerar att tillämpa vid platsundersökningarna. Ett antal borrhmetoder av såväl konventionellt som mer specialiserat slag beskrivs liksom deras tillämpning. I borrhprogrammet redovisas också metoder för spolvattenhantering, registrering av borrhparametrar samt rengöring av borrhnings- och annan borrhålsutrustning före användning i borrhålet. Borrhprogrammet är ett stödprogram och presenterar borrhmetoder, som är optimalt anpassade till de krav på undersökningsborrhål som ställs inom de olika ämnesprogrammen. Planering och genomförande av borrhningsinsatserna görs integrerat med ämnesprogrammen.

### 11.1.1 Inledning

Borrhålsundersökningarna planeras för ett djup om cirka 1 000 m, se kapitel 2. Borrhning möjliggör studium av berggrund och jordlager på tre sätt:

- Borrhningsprocessen i sig ger viss information om den genomborrade jord- och bergvolymen genom registrering av borrh- och spolvattenparametrar och genom de observationer av borrhförloppet som borrhpersonalen dokumenterar.
- Material (borrkärnor, borrhkax och grundvatten) från olika djup tas upp till ytan och studeras ur olika aspekter.
- Borrhålet erbjuder efter färdigborrhning en möjlighet att föra ner olika typer av mätinstrument i hålet, varvid geovetenskapliga parametrar kan bestämmas på olika nivåer.

Genom successiv sammanställning och utvärdering av data från borrhningen och efterföljande mätningar under platsundersökningarna byggs kunskapen om platsens geologiska karaktär och grundvattenförhållanden upp steg för steg.

Borrhningen och efterföljande mätningar innebär en viss störning. Hålet i sig innebär en artificiell dräneringskanal, dessutom kan nya sprickor induceras och andra sättas igen. Vid borrhningen kan även främmande ämnen, som spolvatten, smörjolja eller smuts komma att föras ner i berget. Det finns dock olika metoder för att begränsa eller i alla fall kvantifiera störningens omfattning. Vid utformning av borrhprogrammet ägnas därför betydande ansträngning åt att:

- minimera oönskade bieffekter av borrhningen,
- i möjligaste mån dokumentera de störningar och den kontaminering som är oundviklig, se också 11.3.1.

Borrhmarknaden erbjuder vissa specialmetoder som ur dessa aspekter är intressanta ur platsundersökningssynpunkt. Även SKB har i egen regi utvecklat metoder för bland annat spolvattenhantering som är speciellt anpassade efter kravet på så ostörd och väldokumenterad borrhning som möjligt.

Borrningsaktiviteten upptar tids- och kostnadsmässigt en betydande del av de totala resurserna vid platsundersökningen. Det är därför i hög grad motiverat att lägga stor omsorg vid planeringen och genomförandet av borrhningsinsatsen. Borrprogrammet måste vara anpassat till flera typer av undersökningar med olika geovetenskaplig inriktning, där den tillämpade metodiken i hög grad varierar.

Vid bergborrning används relativt tung utrustning, vilket kan medföra viss markpåverkan och andra miljöstörningar i form av exempelvis buller och avgaser. Genom motorval och bullerdämpande isolering kan denna störning hållas begränsad. Borrprogrammet genomsyras av allmänna miljöhänsyn liksom av hänsyn till markägare, närboende och övrig allmänhet.

Olika borrhningstekniker kommer att användas, främst *jordborrning*, *hammarborrning* och *kärnborrning*. Vid utförandet av borrhningarna ställs flera olika kvalitetskrav. Det gäller framförallt *renhetskrav*, speciella krav på *spolmedelshantering* samt *inmätning* och *riktning* av borrhål. Olika rutiner kommer att tillämpas för kemiprioriterade respektive övriga borrhål. Under borrhningen sker dessutom en parameterregistrering av borrhparametrar (t ex borrhjunkning) och spolvattenparametrar. Dessutom görs inledande mätningar av grundvattnets sammansättning.

### 11.1.2 Borrprogrammets mål

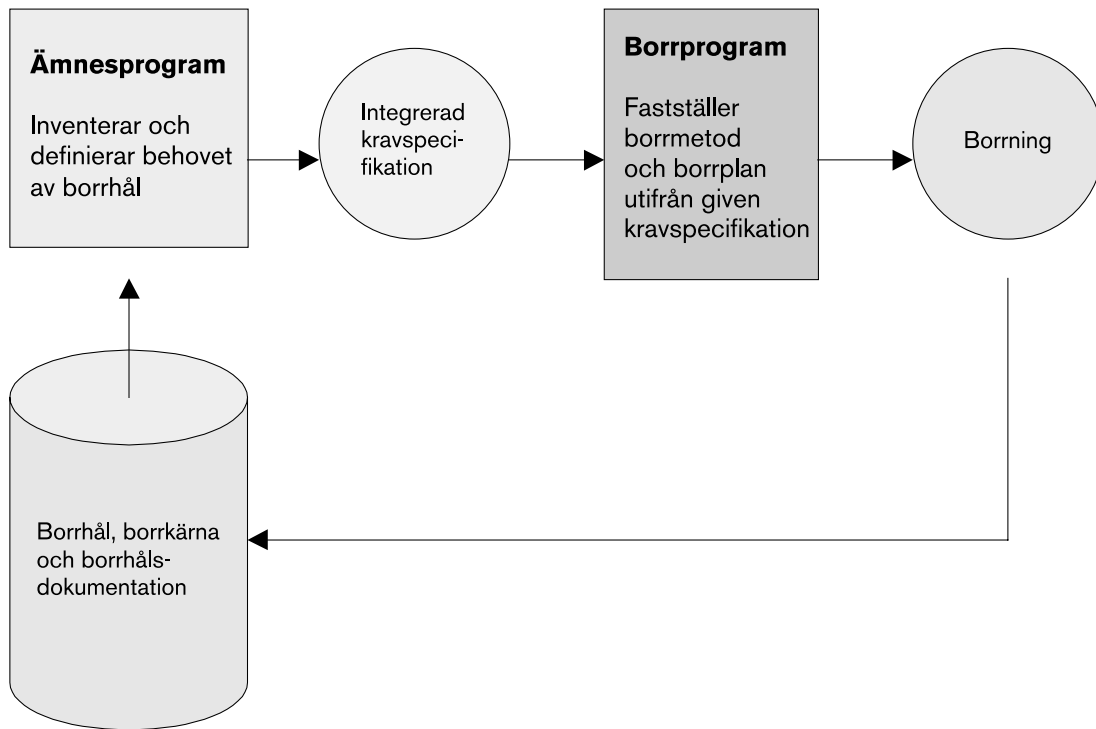
Med hänvisning till huvudmålen för undersökningarna (avsnitt 2.1.1) och med beaktande av att borrprogrammet utgör ett stödprogram för de olika ämnesprogrammen, är borrhningsinsatserna resultatmässigt sett inriktade mot:

- att producera det antal borrhål till sådana djup, med sådan geometri (diameter, längd, riktning, lutning, krökning) och följande de övriga kvalitetskrav som krävs för att de ämnesspecifika programmen ska kunna nå sina respektive undersökningsmål,
- att producera borrhålen i en ordningsföljd i förhållande till mätinsatserna som är nödvändig enligt kriterier och krav i de geovetenskapliga ämnesprogrammen,
- att använda sådan borrhningsteknik och sådan(a) kringåtgärder/-utrustning att den genomborrade formationen störs så lite som möjligt, och så att oundvikliga störningar kan kvantifieras och dokumenteras så utförligt att mätfel orsakade av dessa kan bestämmas.

Borrprogrammet kan sägas vara dels produktionsinriktat, dels styras av en skonsamhetsprincip. Båda dessa linjer kan följas genom borrprogrammet och även i tillhörande metodinstruktioner.

### 11.1.3 Arbetsmetodik och samordning

Borrprogrammet utgör en servicefunktion för ämnesprogrammen. Man kan se borrprogrammet som ett självständigt aktivitetsprogram med direkt koppling till ämnesprogrammen enligt rollfördelningen beställare-utförare, se figur 11-1.



*Figur 11-1. Kopplingen mellan ämnesprogram och borrarprogram i PLU.*

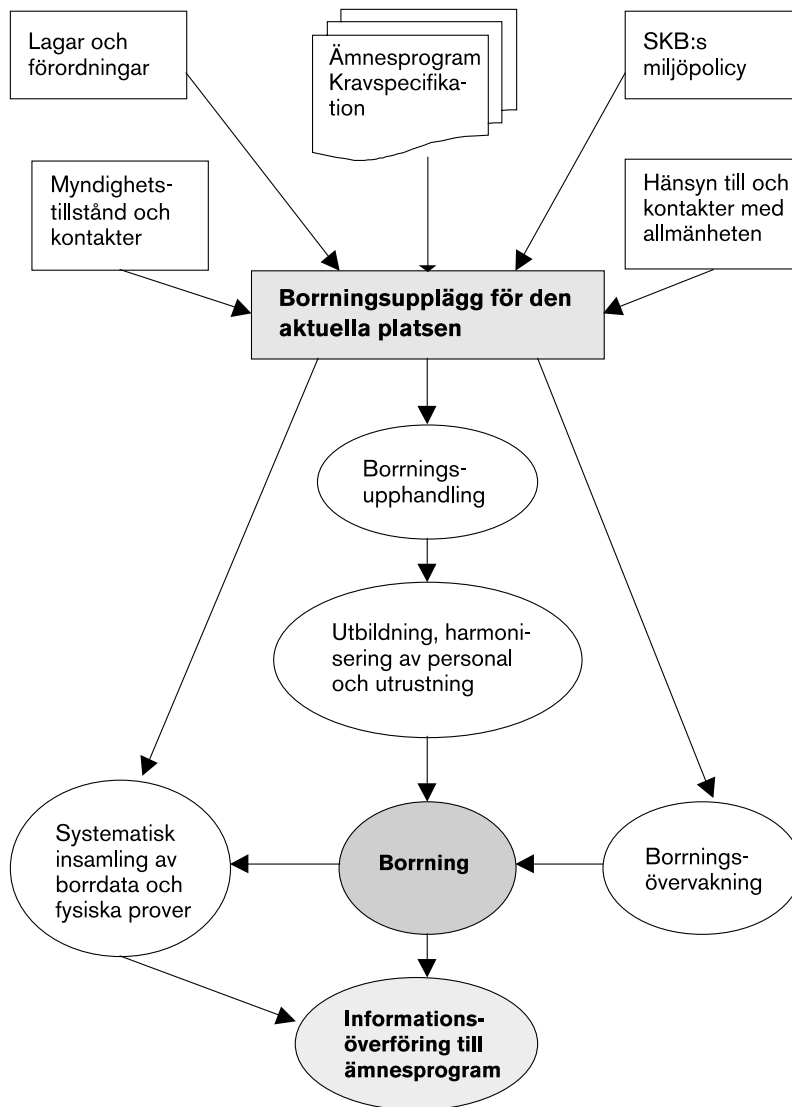
Förutom själva håltagningen insamlas prover av olika slag (borrkärnor, borkax, spolvatten och returvattnet) inom borrarprogrammets ram. Olika parametrar (bork- och spolvattenparametrar) mäts och vissa hydrauliska tester genomförs. Dessa aktiviteter initieras av de geovetenskapliga ämnesområdena, dit också data levereras, men genomförandet sker integrerat med borrarprogrammet.

En väsentlig del i planeringsarbetet inför borkningarna består i att upprätta upphandlingsunderlag som innefattar alla borktekniska och miljömässiga aspekter på utförandet, och inom ramen för SKB:s inköpsrutiner. I den mån konventionell borkning ska upphandlas är detta inte något större problem. En stor del av borkningen, speciellt kärnborkningen, innefattar dock en rad icke-konventionella moment, varför det ställs stora krav på att upphandlingsunderlagen blir väl genomarbetade.

När olika aktörers arbete ska koordineras vid borkning/mätning är bland annat tillämpningen av rutiner för kontraktsgenomgång, gemensamma planerings- och uppföljningsmöten viktiga kvalitetsaktiviteter. Då borkningen kommit igång måste kontinuerlig kvalitetskontroll utövas i enlighet med en i förväg upprättad aktivitetsplan.

I figur 11-2 illustreras översiktligt väsentliga sidor av planeringen och genomförandet av borrarprogrammet.





Figur 11-2. Flödesschema för planering och genomförande av borrrprogram.

## 11.2 Borrning

### 11.2.1 Jordborrning/sondering

Borrning/sondering i lösa jordlager utförs i syfte att:

- bestämma djupet till bergytan och att, i vissa fall, provta bergytan,
- bestämma jordlagerföljden,
- insamla jordprover,
- med rördrivning möjliggöra hydrauliska tester och grundvattenprovtagning.

För borrning i lösa jordlager finns flera standardiserade metoder. I allmänhet utförs borringen med maskiner av den typ som brukar betecknas som geoteknisk borrrutrustning och som är mindre och lättare än exempelvis sänkhammarutrustningar av

brunnsborrningstyp. Sådan sänkhammarutrustning kan vara ett alternativ för provtagning i djupare eller storblockiga jordlager.

Framställningen nedan ger en översikt över några vanligt förekommande jordborrningsmetoder som kommer att tillämpas vid platsundersökningarna. En platsspecifik anpassning kommer att ske, varför det inte är säkert att alla här beskrivna metoder kommer att användas.

### **Sonderande metoder**

Sonderande metoder kan indelas i statiska respektive dynamiska metoder. Vid platsundersökningen används i första hand dynamiska metoder eftersom de är lämpliga för att fastställa jordtäcket mäktighet, dvs bergytans läge, samt jordlagerföljden. De dynamiska metoderna kan indelas i:

- Slagsondering.
- Hejarsondering.
- Jb-sondering (jord-bergsondering).

Med sondering menas att ett borrstål drivs ner till bergytan genom slag, rotation eller med en kombination av dessa metoder.

Geoteknisk borrning är omgärdad av strikta regler för utförande och kvalitetssäkring och ett antal standardiserade metoder tillämpas rutinmässigt. Det gäller inte minst Jb-sondering (jord-bergsondering) som indelas i tre klasser med specificerade utföraninstruktioner för varje klass. Vid platsundersökningarna kommer i huvudsak standardiserade förfaranden att tillämpas.

Modern geoteknisk borrarutrustning med multifunktionella möjligheter utgörs oftast av rotationsborrmaskiner monterade på larvburna chassin. Denna maskintyp är toppmatad, dvs det hydrauldrivna rotationsaggregatet med slående hammare är monterat på toppen av borrarsträngen. Med de vanliga storlekarna på geotekniska bormaskiner utförs borrning i dimensioner upp till cirka 90 mm (foderrörsborrning). Utan foderrör är de vanligaste håldimensionerna 48–64 mm, varvid 44 mm borrstål används under borrningen. Jordborrhål med djup på flera tiotals meter klaras i allmänhet tämligen obehindrat.

Vilka dimensioner som ska appliceras vid platsundersökningarna avgörs i ett sent skede, då terrängförhållandena är kända, då tillfrågade entreprenörers utrustningsresurser har inventerats och då syftet för tester och provtagning i det enskilda borrhålet (eller grupp av borrhål) är fastlagt.

Med geoteknisk borrarutrustning är det möjligt att fortsätta borrningen ett stycke ner i berg. På så vis kan man försäkra sig om att bergytan verkligen nåts och inte bara ett större block. En någorlunda kraftig geoteknisk bormaskin klarar borrning flera tiotal meter i berg, förutsatt att överliggande jordlager inte är alltför mäktiga och/eller hårt packade. Vid normala geotekniska undersökningar borrar ner till 3–5 m under bergöverytan.

Bergytebestämning över större arealer görs med geofysiska markundersökningar, i första hand markradar eller refraktionssseismik, men borrningar utgör ett komplement. Sonderingsborrningar i mätprofilerna tjänar därvid som kalibreringspunkter vid utvärdering av de geofysiska mätningarna.

## **Jordprovtagning**

Geoteknisk borrhutrustning används även för jordprovtagning. Tekniken för jordprovtagning varierar i hög grad beroende på syftet med provtagningen och på karaktären av den formation som ska provtas. Att exempelvis ta ett jordprov i en djupt belägen, hårt packad bottenmorän kräver helt annan utrustning och teknik än då ett ytligt torvprov ska tas. Vid de flesta typer av jordprovtagning blir provet stört, dvs den lagring av mineralkornen eller de organiska skikten som föreligger in-situ kan inte bibehållas. Det har dock utvecklats metoder även för ostörd provtagning, främst för kohesionsjordar. Att fullt ut undvika att proverna störs är dock många gånger svårt även med sådana metoder. Det är särskilt svårt att ta prover av morän. Prospekteringsbolagen har på senare tid tagit fram förbättrad metodik för moränprovtagning.

Vid jordborrning krossas jordmaterial och pressar delvis undan, åt sidorna, från borrhålet. Mycket av jordmaterialet spolas dock upp till markytan med hjälp av det spolmedel, i allmänhet tryckluft eller vatten, som används vid borringen. Det uppspolade materialet, s k borrhax, är nedkrossat och omblandat. Det är därför svårt att relatera kaxet till exakta nivåer i borrhålet, men analys av uppfordrat material erbjuder ändå möjlighet till översiktliga bedömningar av genomborrade lager. Borrhaxet kan också sägas utgöra ett kontinuerligt prov från ytan till nivån för borrhåll.

I tabell 11-1 specificeras ett antal välkända provtagningsmetoder. Mångfalden i provtagningsteknik är en fördel, eftersom det ökar möjligheterna till anpassning efter olika jordlagerförhållanden. Vilka provtagningsmetoder som kan bli aktuella vid PLU är helt avhängigt karaktären på och variationen av jordlagren inom det aktuella undersökningsområdet.

### **Provtagning av bergyta**

I områden med dålig bergblottnings kan bergöverytan provtas med hjälp av borrhål genom jordlagren. Det är en klar fördel om man i ett sådant undersökningsområde i en och samma kampanj och med samma basutrustning kan kombinera sondering och jordprovtagning med provtagning av bergöverytan. Här finns ett antal olika möjligheter. Med tidigare nämnd geoteknisk borrhutrustning kan sondering utföras under samtidig kaxuppfordring. Ett mer eller mindre kontinuerligt prov erhålls därmed från markytan ner genom jordlagren till 3–5 m under bergöverytan.

**Tabell 11-1. Geotekniska provtagningsmetoder för jord.**

<b>Provtagning av störda prover</b>	<b>Provtagning av ostörda prover</b>
Skrubborr	Kolvborr
Kannborr	Folieborr
Genomströmningsprovtagare	
Jordprovtagningsspets	
Uppfordring av jord och kax vid roterande/slående borring med spolmedel	

Om jordprovtagning genom kaxuppföring bedöms som otillräcklig kan, som ovan nämnts, olika typer av provtagare monteras på borrarstålet (t ex skrubborr, genomströmningsprovtagare eller provtagningsspets). Från bergdelen kan man dock endast få borrhax. Mineralogiska bedömningar är därför möjliga att utföra, medan noggranna bergartsbestämningar är svårare att åstadkomma.

Förutom med geoteknisk borrarutrustning kan provtagning av bergytan utföras med tung hammarborrningsutrustning eller som kärnborrning. En variant är hammarborrning med grov kaxprovtagning som utvecklats inom malmprospektering för snabb provtagning av ytberget. Metoden fungerar så att ett foderrör drivs ner till bergytan. En rörformad provtagare försedd med en krysskrona sänks ner i borrhålet och borrar ett stycke ner i berg. Krysskronan låses därefter och den rörformade provtagaren, som har borrhax, drivs ner i sin fulla längd (cirka en meter) i berget. Kaxet, som delvis blir mycket grovt, packas in i provtagaren.

Ett annat alternativ är att utnyttja lätt, bandgående kärnborrningsutrustning för kombinerad bergytebestämning, jord- (uppföring med vatten) och kärnprovtagning. Fördelen med en sådan lösning är att bergproverna blir garanterat goda (t ex kärnor Ø 42 mm eller grövre), men den är å andra sidan långsammare eftersom kärnborrning endast är roterande, medan övriga metoder är såväl roterande som slående.

### **Rördrivning för grundvattenundersökningar**

Vid drivning av provtagningsrör förborras ett hål, varefter provtagningsröret bankas ner. Ett rörförsett borrhål av denna typ kan användas för grundvattenprovtagning, nivåmätning och hydraultester. För högkvalitativ hydrogeokemisk provtagning ska endast ofärgade PEH (polyetylen) plaströr användas. Då kemikraven är lägre kan stålrör användas. Rören kan förses med olika typer av slitsar och omges av sandfilter för att förhindra att finmaterial tar sig in i borrhålet. Tätningar med t ex bentonit för att förhindra inträngning av ytvatten är ofta nödvändigt att applicera.

En variant på grundvattenprovtagning, där tryckavlastning av provet inte sker, är provtagning med s k BAT-provtagare. För permeabilitetsbestämning av lågpermeabla jordlager (t ex finkornig morän) kan mätning med BAT-permeameter vara ett bra alternativ. För montage av BAT-systemet erfordras speciella rör.

Rördrivning kan utföras med såväl lättare borrarutrustning (t ex av geoteknisk typ) eller med tyngre borrarutrustning. Generellt kan sägas att ju grövre rördimensioner som används, desto högre är borrhax- och materialpriset. Vid mycket besvärliga förhållanden (mäktiga och/eller hårt packade jordlager, hög blockighet) eller om grövre borrhaxdimensioner önskas, kan det vara en fördel eller nödvändigt att utnyttja tung borrarutrustning, i första hand hammarborrningsutrustning av vanlig brunnsborrningsstyp. Om exempelvis åsmaterial ska karakteriseras hydrauliskt genom kort- eller långtidsprov-pumpning krävs oftast, för att tillräckligt kraftig pump ska få plats, ett relativt grovt, foderrörsbeklätt pumpborrhål med slitsat filter, vilket borrar och rörmonteras med hjälp av brunnsborrningsmaskin.

## 11.2.2 Hammarborrning

Hammarborrning kommer vid PLU att tillämpas för karakterisering av den yt nära berggrunden. Härmed avses i detta sammanhang bergrundsavsnittet ner till maximalt 200 m under markytan.

### **Konventionell hammarborrning**

Bergborrade hål med en längd av några tiotal meter till maximalt cirka 200 m utförs lämpligast med roterande, slående borrning, s k hammarborrning, se figur 11-3 (till vänster). Normalt används tryckluft som spolmedel, för drivning av hammaren och för uppföring av borrkaxet. De vanligaste borrhålsdimensionerna vid hammarborrning är 115 mm, 140 mm och 165 mm. För speciella ändamål utförs dock borrhål även i betydligt grövre eller klenare dimensioner.

Fördelarna med konventionell hammarborrning är att metoden producerar borrhål snabbt och billigt jämfört med kärnborrning. Den information om bergarts- och sprickfördelningen som kan uppnås direkt från borrhålen är dock mer begränsad, eftersom bergmaterialet krossas ner och någon bergkärna inte erhålls. Däremot kan kaxprover tas för mineralogisk analys. Det är dock relativt svårt att relatera kaxproverna till exakta nivåer i borrhålet.



**Figur 11-3.** Grundare hål hammarborras vanligen (till vänster i figuren), varvid berget krossas till borrkax, medan borrning av djupa borrhål görs med diamantborrkrona, varvid borrkärna tas upp för geologisk kartering. Figuren illustrerar diamantborrning enligt teleskopborrningsvarianten (se avsnittet om kärnborrning).

Hammarborrkronan slits under borringens gång. Slitaget är olika stort beroende på hur hårt berg som genomborras. Det går inte att genom byte till större, oanvänd borrkrona, ”fräsa upp” den avsmalnade delen av ett redan borrar hammarborrhål, som därför alltid blir något konformat. Denna diameterminskning är viktig att känna till vid de efterföljande borrhålsundersökningar och instrumentinstallationer som utförs. Den är dock i svenskt kristallint ”normalberg” begränsad till högst ett par millimeter per 100 m borrlängd.

Vid hammarborring tillämpas antingen topphammar- eller sänkhammarteknik. Med de relativt stora rakhetskrav som ställs kommer endast sänkhammarborring i fråga, eftersom topphammartekniken på den punkten ger sämre resultat. Sänkhammarborring kan medföra viss kontaminering i borrhålet, se även 11.3.1.

Slagfunktionen i borrhammaren drivs normalt med tryckluft, som alstras i en kompressor på markytan och förs ner till borrhammaren via borrhölen. Då tryckluften passerat hammaren når den borrhålet, där den åstadkommer en s k mammutpump-effekt. Luften stiger i bubblor mot markytan och tar därvid med sig vatten och borrhax, som kontinuerligt pumpas upp ur borrhålet. Tryckluften medför viss kontaminering av borrhålet och grundvattnet, men problemet reduceras av att borrhålet pumpas kontinuerligt.

### **Foderrör**

Alla hammarborrhål kommer att förses med en *foderrörsavslutning* vid markytan, oavsett om hålen borrar direkt på en berghäll eller om jordlager först måste genomborras. Foderröret drivs genom eventuella jordlager och ner i berg. I normalfallet drivs foderröret ner så långt att friskt, sprickfattigt berg nås och därefter ytterligare 9 m (tre foderrör) innan det gjuts fast. I undantagsfall, t ex om borrhålet karakteriseras av betydande stabilitetsproblem, kan foderröret behöva drivas betydligt djupare. Foderrörsborringen utförs med sådan dimension att en spalt av minst 10 mm lämnas mellan foderrörets yttervägg och borrhålsväggen för att spaltinjektering ska kunna utföras. Efter injektering kontrolleras tätheten. Fortsätter ytvatten att läcka in, måste antingen foderröret förlängas och/eller ytterligare injektering göras.

Foderrörsborringen utförs som s k ODEX-borring, alternativt NO-X-borring. Vid den förra metoden bereder en rymmare plats för foderröret, medan vid NO-X-borring foderröret roterar med borrhålet. Foderrören kan vara av stål, rostfritt stål eller plast. För alla borrhål, hammar- såväl som kärnborrhål, är det väsentligt att ytvatten inte tränger ner längs foderröret och in i borrhålet. Stor vikt läggs därför vid effektiv injektering av spalten mellan jord/berg och foderrör och av närmast anslutande sprickor.

Foderröret kommer att uppåt avslutas med ett låsbart lock, alternativt en låsbar huv. Runt foderröret ska finnas en yttlig tätning av bentonit som ligger an mot foderröret och har en cirkulär yta med minst 1,5 m radie som hinder mot ytvatteninläckage. Dessutom ska jordlagren konas av i riktning bort från foderröret. För hammarborrhål som borrar direkt på berg kan det vara nödvändigt att täta av foderröret med cement mot berget. Hammarborrhål som utnyttjas för längre mätinsatser förses med samma typ av borrhålscontainer som för teleskopborrhål, se avsnittet 11.2.3.

Om hammarhålen används för kemisk provtagning används foderrör av syrafast (rostfritt) material eller rör av ofärgad PEH-plast. Foderrörsborringen bör utföras med tekniken ejektor-ODEX, se nedan.

## **Omvänd spolning**

Metoden för omvänd spolning, som har utvecklats i första hand för prospekteringsborrning, skiljer sig gentemot konventionell borrning på så sätt att man använder sig av dubbla borrhör. Tryckluften som driver hammaren leds ner i spalten mellan ytter- och innerröret. Ett stycke ovanför sänkhammaren finns en s k "cross over sub" monterad, en anordning som styr den returnerande luften (efter passagen genom borrhammaren) och borrhaxen till det inre borrhöret. Denna "cross over sub" ligger an tätt mot borrhålsväggen för att förhindra borrhax att passera mellan borrhålsväggen och borrhöret. Returluften, kax och vatten leds därefter upp till markytan i det inre röret. På markytan separeras borrhaxen från luft och vatten i en cyklon, varefter kaxprov kan tas. Efter varje provtagningsintervall rensas rör och borrhål. I övrigt gäller samma teknik som vid konventionell hammarborrning.

Metoden har ett par fördelar jämfört med konventionell hammarborrning. För det första anses säkerheten bli större då det gäller att hänföra kaxproverna till specifika nivåer i borrhålet. För det andra blir syre- och oljekontamineringen av borrhålet mindre, eftersom tryckluften kommer i kontakt med formationen endast i anslutning till borrhäkronan och inte under upptransporten i borrhålet. Eftersom inte heller borrhax kan komma i kontakt med borrhålsväggen ovanför den tätning ovanför kronan som nämns ovan, är det sannolikt att även kaxinträngningen totalt sett blir mindre än vid konventionell hammarborrning.

Ejektor-ODEX är en metod för foderrörborrning med tryckluft, som medför mindre syre- och oljeexponering av formationen än vid vanlig ODEX-borrning, genom att tryckluftflödet på grund av munstyckenas speciella utformning tvingas upp innanför foderröret innan borrhålsväggen hunnit exponeras kraftigt för luftflödet. Hammarborrning med omvänd spolning kombinerat med foderrörborrning enligt metoden ejektor-ODEX har ett intresse, eftersom kontamineringen med syre, kompressorolja och borrhax är mindre än med konventionell hammarborrning.

### **11.2.3 Kärnborrning**

#### **Borrningsteknik**

Vid platsundersökningen kommer berget att behöva undersökas ner till cirka 1 000 m djup. Detta görs med kärnborrningsteknik, som är en form av rotationsborrning med ringformad, diamantförsedd borrhäkrona, se figur 11-3. När borrhäkronan arbetar sig neråt, produceras en cylinderformad borrhäkärna. Efter borrhäkronan följer ett s k kärnrör, vilket under borringen successivt fylls upp av borrhäkärnan. Då kärnröret, som i allmänhet är 3 m, 4,5 m eller 6 m långt, är fullt tas det upp till ytan och töms på sitt innehåll. Borrhäkärnan läggs försiktigt över i en kärnlåda. Det är mycket viktigt att lösa bitar hamnar exakt så som de satt i berggrunden före lossborrning. Kärnröret sänks åter och borringen fortsätter. Vid avslutad borring har, idealt, kontinuerliga kärnprover erhållits från bergytan till fullt borrhöjd. Då och då kan dock kärnförluster uppkomma, speciellt i sprucket, löst berg. Kärnförlusterna kan bero antingen på (smärre) hålrum i berget, dvs öppna sprickor, på att löst och uppkrossat berg inte kan fångas i kärnröret eller på icke fungerande kärntagningsutrustning.

För upptag av kärnröret förekommer två varianter, konventionell rörhantering respektive wire-line-teknik. Den förra innebär att samtliga borrhör måste lyftas upp för att kärnröret ska kunna tömmas, eftersom detta sitter monterat längst ner på rörsträngen. Tekniken med wire-line, däremot, innebär att kärnröret löper inuti rörsträngen och tas upp med ett wire-spel. Rörsträngen kan därvid stå kvar i borrhålet, vilket gör kärnupptaget betydligt snabbare. För platsundersökningen kommer framförallt wire-line-borring att tillämpas.

Kärnfångsten kan göras med olika tekniker. Vanligtvis används ett dubbelt kärnrör, som är konstruerat så att spolvattnet passerar mellan ytter- och inneröret på sin väg mot borrhäkronan. Den lossborrade kärnan omsluts av innerröret, vilket ofta är ytbehandlat för att minska friktionen. Det finns även teknik för tre kärnrör (trippelrörsteknik). Här består kärnröret av ett yttre och ett inre rör plus ett extra tudelbart inre stålör. Vid platsundersökningen kommer trippelrörsteknik huvudsakligen att användas.

Kärnborrhäkronor kyls med spolvatten som pumpas ner från markytan. I konventionella kärnborrhäkronor är spolkanalen cirkulär och placerad koncentriskt runt borrhäkran. Spolkanalen mynnar mycket nära kärnans nedersta del. Trippelrörsteknik kombineras ofta med s k frontmatad borrhäkrona vilket anses innebära att risken för bortspolning av löst material i kärnan minskar. Frontmatad häkrona vid kärnborring kan därför vara ett alternativ, speciellt vid kärntagning i mycket sprickigt berg.

Kärnborring utförs normalt i klenare dimensioner än hammarborring. Till skillnad från hammarborrhål bibehåller dock kärnborrhålet full dimension hela borrlängden. Detta åstadkoms med hjälp av en s k caliperring. Vid platsundersökningarna kommer kärnborring med diametrarna  $\varnothing$  56 mm och 76 mm att tillämpas, där 76 mm är den standardmässiga dimensionen, medan 56 mm tillämpas för speciella ändamål.

### **Teleskopborring**

Teleskopborring innebär att borrhålets översta del, cirka 100 m, utförs i en betydligt grövre dimension, t ex  $\varnothing$  165–215 mm (eller ännu grövre) än den övriga delen av kärnborrhålet, som utförs i dimensionen  $\varnothing$  56 mm eller 76 mm, se figur 11-3. Metoden har bland annat fördelen att den minskar inträngning av kax och spolvatten i berget. Om det finns stora krav på att undvika spolvatteninträngning, vilket i regel är fallet för kemiprioriterade hål, borrar den övre grova delen direkt med hammarborrteknik. En alternativ teknik, men som innebär spolvatteninträngning i den övre delen, är att först kärnborra den övre delen och sedan rymma hålet till önskad dimension.

I den grova delen av borrhålet rymms utrustning för s k mammutpumpning. Sådan utrustning består av tryckluftsslangar med munstycken och anslutningar som förs ner nära botten av den grova delen av borrhålet. Under den fortsatta kärnborringen i klenare dimension pumpas tryckluft ner i borrhålet, varvid de uppåtströmmande luftbubblorna för med sig vatten med uppslammat borrhäkax ur borrhålet. Genom att utföra kontinuerlig mammutpumpning under hela kärnborringssfasen, dvs vid borringen nedanför den upprymda borrhäkdelens, tvingas en större andel av spolvattnet och borrhäkaxet upp ur borrhålet än vad som annars skulle vara fallet.



Teleskoputförandet av borrhålet medför även att den övre delen av borrhålet efter färdigborrning erbjuder bättre möjligheter att installera olika typer av skrymmande utrustning, exempelvis pumputrustning för provpumpning, än vad ett konventionellt borrhål gör. Den normala längden på grovhålet är cirka 100 m. Vid övergången mellan den grova respektive den klenare delen av borrhålet monteras en rostfri stålkon, så att en jämn, avsmalnande övergång mellan de två partierna åstadkoms. Detta är nödvändigt för att mätutrustning ska kunna föras ner i och upp ur borrhålet utan problem.

### **Borrhålsavslutning**

Även kärnborrhålen förses alltid med borrhålsavslutning vid markytan i form av foderrör med låsning i form av en borrhålshuv. Foderröret måste drivas ner i friskt, sprickfattigt berg och gjutas fast. Inläckande ytvatten i borrhålet tolereras inte, varför injekteringsinsatser kan bli aktuella om detta skulle konstateras under borringen.

De åtgärder som måste vidtas för att eliminera inläckande ytligt vatten i såväl teleskopborrhål som i "vanliga" hammarborrhål betingas av främst grundvattenkemiska men även hydrauliska krav på borrhålen. Om stora mängder ytligt vatten läcker in i borrhålet försvåras hydraulisk testning av de djupare delarna av berget. Ur grundvattenkemisk synvinkel kan dock även injektering innebära ett kontaminationsproblem, eftersom alla injekteringsmedel består av för den geologiska formationen och grundvattnet främmande substanser. Endast vissa (skonsamma) injekteringsmedel är därför tillåtna i borrhål vid platsundersökningarna. Generellt gäller att endast cementbaserade medel är godkända. Injektering bör följas upp med pH-mätning i borrhålsvattnet före och efter insatsen.

Runt foderröret gjuts en cementplatta, dels för att bidra till att förhindra ytvatten att läcka in längs foderröret, dels för att underlätta uppställning av borrhålscontainer och mätutrustning. Efter gjutningen fylls omgivande mark upp med grus eller makadam så att eventuell nivåskillnad mellan plattan och omgivningen utjämnas.

Efter genomförda basmätningar monteras en specialanpassad stålcontainer med dimensionerna 2 x 2 x 2 m fast i foderröret som låsanordning under den tid platsundersökningarna befinner sig i ett aktivt skede. Borrhålscontainern utgör ett effektivt påkörnings- och övrigt skydd och lås för borrhålet och kan dessutom härbärgera mätutrustning med måttliga dimensioner. Det betyder att mätningar kan utföras utan bevakning. Om behov finns, kan någon container göras större för att kunna rymma mer skrymmande mätutrustning. Efter den aktiva fasen kan borrhålscontainrarna ersättas med huvlås av den typ (eller liknande) som tillämpas på Äspö och på andra äldre undersökningsområden. Borrhålsskyddet kan kompletteras med en för ändamålet utformad borrhålsmanschett som placeras ytligt i borrhål.

Till varje kärnborrhål kommer väg med bärlast för tunga fordon att byggas. Runt borrhålet bereds en avgrusad, jämn, bärlastig plan med så stor yta att tung lastbil kan vända och lasta av gods, att bormaskin och spolvattencontainrar lätt kan ställas upp och så att alla typer av mätutrustning senare kan etableras. Planen ska vara så horisontell som det är praktiskt möjligt.

## 11.3 Kvalitetsaspekter

För att borrhålen ska vara användbara för undersökningar ställs speciella krav på renhet, spolvattenhantering samt på inmätning, riktning och stabilisering av borrhålen.

### 11.3.1 Renhetskrav

Vid borring sänks borrkrona, borrhammare (vid sänkhammarborring) och borrhör ner i borrhålet. Om denna "i hålet-utrustning" är smutsig kan förorenande ämnen spridas också till grundvattnet, borrhålsväggarna och sprickyterna. Detsamma gäller vid borrhålsundersökningar efter borring, då olika typer av instrument, rör, slangar m m förs upp och ner i borrhålet. Smuts kan i detta sammanhang utgöras av t ex petroleumprodukter från borrutrustningen (smörj- och hydraulolja, bensin och dieselolja) kemikalier av diverse beskaffenhet, jordpartiklar, humusförorenat ytvatten etc. Även om nedsmutsningen är ringa kan den vara negativ ur undersökningssynpunkt, eftersom de grundvattenkemiska och mikrobiella förhållandena kan påverkas.

Främmande kemiska substanser försvårar den kemiska karakteriseringen av det ostörda grundvattnet, bl a genom att kemiska reaktioner kan initieras. Även mikrober, t ex bakterier, kan starta kemiska reaktioner som förändrar den ursprungliga grundvattenkemin. Såväl de kemiska som mikrobiella in-situ-förhållandena utnyttjas i säkerhetsanalysen, varför en korrekt kartläggning av dessa är av väsentlig betydelse.

Av dessa anledningar är det nödvändigt att uppfylla vissa renhetskrav vid arbete med borrhålsutrustning. Följande aspekter ska speciellt beaktas *i alla borrhål*:

- All lös smuts (lera, växtdelar, sandkorn osv) tvättas bort från borrhålsutrustning före användning i borrhålet.
- Petroleumprodukter används ofta vid borrhålet, speciellt under borring. Särskild uppmärksamhet måste ägnas åt detta, så att olja inte spiller ner i hålet och så att alla spår av oljerester tvättas bort från utrustningen.

För *kemiprioriterade* borrhål gäller dessutom:

- Borrhör och annan borrhålsmateriel som legat oanvänd en längre tid får ofta en ytbeläggning. Sådana beläggningar härbärger ofta bakteriekolonier. Det är därför viktigt att beläggningarna tvättas bort eller, om detta inte är möjligt, att de mekaniskt bearbetas så att de försvinner.
- Rör måste rengöras såväl ut- som invändigt.
- Mikrobiella föroreningar måste desinficeras bort, antingen med het ånga eller med desinficerande kemikalie. Om kemikalier används är det väsentligt att även alla rester av denna tvättas bort före användning av utrustningen i borrhålet.

Detaljerade instruktioner för rengöring av borrhålsutrustning ges i metodbeskrivningar och i speciell rengöringsinstruktion.

### 11.3.2 Spolmedelshantering

#### **Spolvatten**

Vid kärnborrning såväl som vid hammarborrning måste spolmedel användas, dels för kylning av borrhkronan (kärnborrning), drivning av borrhammaren (sänkhammarborrning) och för upptransport av borrhkax (båda metoderna). Vid kärnborrning är vattenkylning det enda realistiska alternativet. Vatten pumpas genom rörsträngen ner till borrhkronan där det pressas ut under relativt stort övertryck, 30–60 bar i förhållande till det hydrostatiska trycket på den aktuella nivån. Om borrhålet skulle sakna sprickor trycks allt vatten uppåt i borrhålet mellan borrhålsväggen och borrhöret. Om borrhålet däremot är mycket uppsprucket och högkonduktivt kan allt spolvatten pressas ut i formationen (s k total spolvattenförlust). Vid borring i tätare kristallint berg är det vanligt att en viss del av spolvattnet försvinner ut i formationen. Spolvatteninträngningen innebär också att borrhkax, som i fina fraktioner slammas upp i spolvattnet/grundvattnet, i viss utsträckning pressas ut i spricksystemet.

Vid platsundersökningarna är det väsentligt att minimera de negativa effekterna av spolvatten- och kaxinträngning i den genomborrade formationen. Den viktigaste insatsen som hittills gjorts av SKB för att hantera dessa svårigheter vid utförandet av djupborrhål är utvecklingen och tillämpningen av teleskopborrningskonceptet, se avsnitt 11.2.3. Utöver detta gäller särskilda krav på val och handhavande av spolvatten.

Spolvattnet tas från ett brunnsborrhål i närheten av det borrhål som ska borraras eller från kommunal tappkran, dvs vatten med en mer eller mindre avvikande fysikalisk-kemisk sammansättning jämfört med grundvattnet i formationen som genomborras. Det innebär att de grundvattenkemiska in-situ-förhållandena störs, när spolvattnet tränger in i formationen. Det är viktigt att det spolvatten som används inte innehåller organiska eller andra föroreningar. Helst bör spolvattnet ha dricksvattenkvalitet och pumpas från en bergborrad brunn från samma formation som den som genomborras vid kärnborrningen. I alla händelser måste spolvattnet analyseras noggrant ur hydrokemisk synpunkt före användning. Lämpliga brunnar väljs av hydrogeolog och hydrogeokemist.

Eftersom spolvattnet först måste pumpas upp i tankar före användning är risken stor att det exponeras för syre som därvid kan lösas i vattnet. Före användning genombubblas därför vattnet med kvävgas och förvaras därefter i tankar under kvävgasövertryck. Det kan också finnas anledning att beakta temperaturskillnaden mellan spolvatten och berget. Större temperaturskillnader skulle teoretiskt kunna åstadkomma dragsprickor i borrhålsväggen, men erfarenhetsmässigt är problemen obetydliga.

Grundvattenprovtagning för hydrokemisk karakterisering kommer att utföras såväl under borring (i anslutning till avbrott för hydraultester) som vid olika provtagningskampanjer efter borring. För att bestämma halten av spolvatteninblandning i grundvattnet tillsätts ett vattentroget, icke-giftigt organiskt färgspårämne, oftast uranin, till spolvattnet. Vid senare grundvattenprovtagning avslöjar spårämneshalten graden av spolvatten i grundvattenprovet.

För balansberäkningar av flödesförhållandena under borring är det väsentligt att mäta flöde och totalvolym av injicerat spolvatten och halten av spårämne, liksom flödet och totalvolymen av returvattnet, se vidare avsnitt 11.4.

## **Kompressorluft**

Även det normala spolmedlet vid hammarborrning, dvs tryckluft, orsakar viss kontamination av grundvattnet. Vid konventionell sänkhammarborrning blir borrhålsväggen, sprickytorna och grundvattnet därvid exponerade för syre. Effekten av denna syrekontaminering reduceras dock på grund av den permanenta inströmning av grundvatten mot och upp ur borrhålet som sker under borringen. Tidigare utredning /Smellie m fl, 1987/ redogör för kontamineringskonsekvenser avseende syre vid hammarborrning till större djup.

Den andra aspekten som här kan framhållas är kolvätekontaminering. Kompressorluften i en modern standardkompressor innehåller i storleksordning 3 mg olja/m<sup>3</sup>. Är kompressorn sliten kan det bli fråga om avsevärt mycket större oljemängder. Dessutom läcker vissa mängder smörjolja från borrhammaren ut i borrhålet. Det har tillverkats kompressorer för oljefri luft, men endast ett fåtal av dessa finns idag kvar på marknaden och kan vara svåra att uppbringa för större uppdrag. Däremot har effektiva oljefilter tagits fram under senare år, varför problemet med olja i kompressorluften kan hanteras.

Även jordborrning med geoteknisk borrhålsbandvagn, se avsnitt 11.2.1 är en form av hammarborrning. Dessa maskiner är dock topphammardrivna, dvs borrhammaren är monterad ovanpå borrhålssträngen och är dessutom oftast hydrauldriven, varför tryckluft för hamnardrivning inte är aktuellt. Inte heller smörjoljekontaminering kommer då ifråga. Spolmedel måste dock användas för kaxuppföring. Utnyttjas tryckluft uppkommer likafullt de tidigare nämnda problemen med syre och tryckluftsolja i borrhålet. Används i stället vatten har man samma kontamineringsproblem som vid kärnborrning. Denna problematik bör beaktas vid grundvattenkemiska undersökningar i jordlagren.

### **11.3.3 Inmätning av borrhål**

Foderrörets överkant (vid lutande borrhål undre delen av foderrörets överkant) ska utgöra borrhålets nollpunkt, dvs referenspunkten för alla borrhålsundersökningar. Det medför att all bergborrning, kärnborrning såväl som hammarborrning, ska inledas med drivning och fastinjektering av foderröret tills detta är, även långsiktigt, helt immobilt i höjd och sidled vid "normal" påverkan. Foderröret tillkåpas därefter till den längd det ska ha då borrhålet är färdigborrat.

Några meter vid sidan av borrhålet befästs en punkt av exakt samma höjd som foderrörets överkant. Den befästa punkten tjänar som reservnollpunkt, från vilken man ska kunna syfta mot borrhålet om foderröret senare skadas. All aktivitet i borrhålet refereras därefter till nollpunkten, vars absoluta nivå (i meter över havet) också dokumenteras i protokoll med millimeternoggrannhet. Om foderröret temporärt måste kapas eller förlängas, ska det snarast möjligt återställas till ursprunglig längd (och nivå) med hjälp av reservpunkten och/eller den avvägda nivån.

Samtliga tre koordinater på foderröret samt höjdkoordinaten på reservnollpunkten inmäts så snart som möjligt efter avslutad borring, x- och y-koordinaterna med cm-noggrannhet och z-koordinaten med mm-noggrannhet. Foderröret förses därefter med en bricka med borrhålsnamn, borrhålskoordinater och ytterligare data. Plankoordinaterna ska vara i rikets nät (RAK) om inte speciella omständigheter föreligger. Nollpunkten ska vara tydligt utmärkt med en påsvetsad liten klack av karakteristiskt utseende på foderrörets utsida.

För de flesta jordborrhål föreligger inte samma strikta inmättningsbehov som för kärn- och hammarborrhål. I det fallet tillämpas speciellt inmättningsprogram anpassat efter borrhålets läge, användningsområde etc.

### 11.3.4 Riktning av borrhål

Inom platsundersökningen önskas borrhål med en stupning (lutning) som varierar mellan 50 grader från horisontalplanet till nästan vertikalt (inte fullt 90 grader). Starkt lutande hål försvårar såväl borrhållning som mätning och risken för stabilitetsproblem ökar. Helt vertikala borrhål innebär också svårigheter för borrhållning och riktningsmätning av borrhålet, varför 85 grader kan vara att föredra framför 90 grader.

Stupning och riktning på ett borrhål avgörs från fall till fall av berörda ämnesansvariga. Borrhål som utförs för att bekräfta och karakterisera förmodade zoner riktas och lutas så att de förväntas penetrera zonen i ungefär rät vinkel, vilket ofta innebär relativt kraftig lutning på borrhålet. Vid undersökning av en bergenhets till stort djup kan ett nästan vertikalt borrhål vara bäst.

Då önskad riktning och lutning är kända riktas borrhållmaskinen in mycket noggrant med mätinstrument (kompass och gradskiva eller teodolit) och fixeras. Härmed kommer borrhålets botten idealt att nå en viss punkt med kända koordinater. Det finns emellertid ingen borrhållteknik som kan ge fullständigt raka borrhål, utan vid borrhållningen sker alltid viss avvikelse från utgångsriktningen. Av denna anledning måste upprepade avvikelsemätningar utföras under borrhållningens gång enligt särskild metodbeskrivning. På så vis upptäcks om borrhålet avviker mer än maximalt tillåten avvikelse (från krökningsradie och slutlig träffpunkt) enligt upphandlingsunderlag och kvalitetsplan. Genom avvikelsemätningen tilldelas varje mätpunkt en rumskoordinat, dvs hela borrhålets läge i rummet fastställs, vilket är nödvändigt för fastställande av en geometrisk strukturmodell, se även 4.3.1.

Upptäcks för stor avvikelse kan så kallad styrd borrhållning tillämpas, vilket innebär att man med speciell teknik återför borrhålet i rätt riktning och lutning. För hammarborrhållning finns system med noga kontrollerade styrrör som minskar risken för stor krökning av borrhålet. Om sådana ska användas eller ej avgörs från fall till fall.

### 11.3.5 Borrhållsstabilitet

I vissa borrhål, speciellt sådana som är borrhållade genom kraftigt deformerade zoner, kan stabilitetsproblem uppträda i sådan omfattning att borrhållsundersökningar är svåra eller omöjliga att utföra. Det kan då vara nödvändigt att söka stabilisera borrhålet. Utgångspunkten vid platsundersökningen är att injekteringsinsatser i stabiliserande syfte minimeras men att säkerhetsaspekterna vid borrhållsundersökningar ändå måste tillgodoses. Endast godkända injekteringsmedel får användas, och injekteringsinsatserna måste dokumenteras väl i enlighet med speciellt utarbetade protokoll.

Som nödvändiga injekteringsinsatser bedöms:

- Injektering för att eliminera vatteninflöde i borrhålet vid övergången mellan jord och berg och via ytliga bergssprickor.
- Injektering av instabila avsnitt av kärnborrhål, om det inte går att hålla borrhålet öppet med andra metoder, t ex rensning.

- Motsvarande stabilisering av sådana hammarborrhål som bedöms nödvändiga att stå öppna i framtiden; avgörs från fall till fall.

Fasta rutiner utarbetas för karakterisering av borrhålsavsnitt som senare ska stabiliseras.

## 11.4 Parameterregistrering under borrhning

Parameterregistrering under borrhning avser registrering av borrhparametrar i hammarborrhål samt registrering av borrhparametrar och spolvattenparametrar vid kärnborrhning. Insamlingen görs vanligen med hjälp av ett automatiserat system för parameterregistrering. Detaljerade rutiner för parameterregistrering beskrivs i metodbeskrivningar.

### 11.4.1 Borrhparametrar

Med borrhparametrar avses ett antal parametrar som är dels relaterade till det genomborrade materialet, dels maskinrelaterade. Hit hör matningstryck, vridmoment, och borrsjunkning. Mätning av borrhparametrar är primärt av intresse för bedömning av hur borrhningsarbetet framskrider rent tekniskt. Mätvärdena eller en del av dessa har dock även geovetenskapligt intresse, eftersom de direkt eller indirekt återspeglar egenskaper hos det genomborrade bergpartiet. Det gäller exempelvis parametern borrsjunkning, vilken visar med vilken hastighet borrhkronan rör sig genom berget. Sjunkhastigheten är en funktion av bergegenskaper som hårdhet och sprickighet, men är också beroende av matningstryck, rotationshastighet och av kronans beskaffenhet. Genom att mäta och analysera borrsjunkningen kan man således direkt under borrhning få viss information om det genomborrade partiet, vilket kan vara värdefull indata för flera av ämnesprogrammen.

### 11.4.2 Spolvattenparametrar

Spolvattenhanteringen under kärnborrhning har beskrivits ovan. Det är av stor betydelse för ämnesprogrammen hydrogeologi och hydrogeokemi att flera spolvattenparametrar mäts under hela borrhningsprocessen. De spolvattenparametrar som här är aktuella är:

- *Flödesparametrar*: Spolvattenflöde; Spolvattentryck; Ackumulerad volym spolvatten per borrhålssträcka och för hela borrhålet; Returvattenflöde; Ackumulerad volym returvatten per borrhålssträcka och för hela borrhålet, avsänkning i borrhålet på retursidan.
- *Fysikalisk-kemiska parametrar på spolvattnet*: Spårämneshalt; Syrehalt.
- *Fysikalisk-kemiska parametrar på returvattnet*: Spårämneshalt; Elektrisk konduktivitet.

Flödestillskott under borrhning ger en direkt indikation på förändringar i grundvattentillrinning vid genomborrhning av vattenförande sprickor.

Eventuellt kan mätning av pH på returvattnet komma ifråga, speciellt i samband med injektering i borrhålet. Elektrisk konduktivitet på spolvattnet mäts i samband med den initiella kemiska karakteriseringen av detta. Finns det anledning att befara att denna kan komma att ändras under borrhningens gång, t ex genom saltvattenpåverkan i spolvattenbrunnen, bör parametern mätas regelbundet eller till och med kontinuerligt.

## Referenser

**Almén K E, Andersson O, Fridh B, Johansson B-E, Sehlstedt M, Gustavsson E, Hansson K, Olsson O, Nilsson G, Axelsen K, Wikberg P, 1986.** Site investigation equipment for geological, geophysical, hydrological and hydrochemical characterisation. SKB TR 86-16. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Almén K, Zellman O, 1991.** Äspö Hard Rock Laboratory. Field investigation methodology and instruments used in the pre-investigation phase, 1986–1990. SKB TR 91-21. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Almén K-E (ed), Olsson P, Rhén I, Stanfors R, Wikberg P, 1994.** Äspö Hard Rock Laboratory. Feasibility and usefulness of site investigation methods. Experiences from the pre-investigation phase. SKB TR 94-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Amadei B, 1996.** Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol 33, No. 3, pp 293–325.

**Amadei B, Stephansson O, 1997.** Rock stress and its measurement. Chapman & Hall.

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

**Andersson J, Elert M, Hermanson J, Moreno L, Gylling B, Selroos J-O, 1998.** Derivation and treatment of the flow wetted surface and other geosphere parameters in the transport models FARF31 and COMP23 for use in safety assessment. SKB R-98-60. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Andersson J, 1999.** SR 97: Data and Data Uncertainties, Compilation of Data and Evaluation of Data Uncertainties for Radio-nuclide Transport Calculations. SKB TR-99-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Andersson J, Ström A, Svemar C, Almén K-E, Ericsson L O, 2000.** Vilka krav ställer djupförvaret på berget? Geovetenskapliga lämplighetsindikatorer och kriterier för lokalisering och platsutvärdering. SKB R-00-15. Svensk Kärnbränslehantering AB.

ASTM Standards, volume 04.08, Soil and Rock.

**Autio J, 1997.** Characterization of the excavation disturbance caused by boring of the experimental full scale deposition holes in the Research tunnel at Olkiluoto. SKB TR 97-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Axelsen K, Wikberg P, Andersson L, Niderfeldt K-G, Lund J, Sjöström T, Andersson O, 1986.** Equipment for deep groundwater characterisation: calibration and test run in Fjällveden. SKB AR 86-14. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Bandis S C, 1980.** Experimental studies of scale effects on shear strength, and deformation of rock joints. Ph.D. thesis, University of Leeds.

- Bandis S, Lumsden A C, Barton N R, 1981.** Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 19, pp 1–21.
- Barton N R, 1973.** Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Eng. Geol.*, 7, 287–332.
- Barton N R, Lien R, Lunde J, 1974.** Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* &(4), 189–239.
- Barton N R, 1976.** The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. R. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13(10), 1–24.
- Barton N R, Choubey V, 1977.** The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock. Mech.* Vol. 10 (1–2), 1–54.
- Barton N R, Bandis S C, 1990.** Review of predictive capabilities of the JCR-JCS model in engineering practice. In *Rock joints, Proc. Int.symp. on rock joints*, Loen, Norway, 603–610.
- Bergman T, Isacsson H, Johansson R, Lindén A, Person C, Stephens M, 1996.** Förstudie Östhammar, Jordarter, bergarter och deformationszoner. SKB PR-D-96-016. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bergman T, Johansson R, Lindén A, Lindgren J, Rudmark L, Wahlgren C-H, Isacsson H, Lindroos H, 1998.** Förstudie Oskarshamn. Jordarter, bergarter och deformationszoner. SKB R-98-56. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bergström U, Nordlinder S, Aggeryd I, 1999.** Models for dose assessments – Modules for various biosphere types. SKB TR-99-14. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bernes, C, 1994.** Biologisk mångfald i Sverige – en landsstudie. Monitor 14. Naturvårdsverkets förlag.
- Bieniawski Z T, 1976.** Rock mass classification in rock engineering. In *Exploration for rock engineering, proc. of the symp.*, 97–106. Cape Town.
- Bieniawski Z T, 1989.** *Engineering rock mass classifications*, Wiley, New York.
- Blomqvist P, Brunberg A-K, Brydsten L, 2000.** Lake and lake related drainage area parameters for site investigation program. SKB R-00-38. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, 1999a.** Change in coastal sedimentation conditions due to positive shore displacement in Öregrundsgrepen. SKB TR-99-37. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, 1999b.** Shore level displacement in Öregrundsgrepen. SKB TR-99-16. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Byegård J, Johansson H, Skålberg M, Tullborg E-L, 1998.** The interaction of sorbing and non-sorbing tracer with different Äspö rock types. Sorption and diffusion experiments in the laboratory scale. SKB TR-98-18. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carbol P, Engkvist I, 1997.** Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment. SKB R-97-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.



- Chambers F M, 1999.** Climate change and human impact on the landscape. Chapman & Hall, London.
- Cvetkovic V, Selroos J O, Cheng H, 1999.** Transport of reactive solute in single fractures. *Journal of Fluid Mechanics*, 318, 335–356.
- Dart R L, Zoback M L, 1987.** Well-bore breakout-stress analysis within the continental United States, in Proc. 2nd Int. Symp. on Borehole Geophysics for Minerals, Geotechnical, and Groundwater Applications, pp. 1–11.
- Dershowitz W, Follin S, Andersson J, Eiben T, 1999.** SR 97 Alternative Models Project. Discrete fracture modelling for performance assessment of Aberg. SKB R-99-43. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Elert M, 1997.** Retention mechanisms and the flow wetted surface – implications for safety analysis. SKB TR 97-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engelder T, 1993.** Stress Regims in the Lithosphere, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Engqvist A, 1997.** Water exchange estimates derived from forcing for the hydraulically coupled basins surrounding Äspö island and adjacent coastal water. SKB TR 97-14. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engqvist A, Andrejev O, 1999.** Water exchange of Öregrundsgrepen – A baroclinic 3D-model study. SKB TR-99-11. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engqvist A, Andrejev O, 2000.** Sensitivity analysis with regard to variations of physical forcing including two hydrographic scenarios for the Öregrundsgrepen – A follow-up baroclinic 3D-model study. SKB TR-00-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ericsson L O, 1985.** Värmeutbyte mellan berggrund och borrhål vid bergvärmesystem. Avhandling CTH.
- Eriksson, H, 1991.** Sources and sinks of carbon dioxide in Sweden. *Ambio* Vol. 20, 3–4.
- Glynn P, Voss C, 1999.** Site-94 – Geochemical characterization of Simpevarp groundwaters near the Äspö Hard Rock Laboratory. Swedish Nuclear Power Inspectorate. SKI Report 96:29.
- Grimstad E, Barton N, 1993.** Updating the Q-System for NMT. Proc. int. symp. on sprayed concrete – modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagernes. Oslo Norwegian Concrete Assn.
- Gustafsson S, 1991.** Transient plane source technique for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Rev. Sci. Instrum.* 62, p 797–804. American Institute of Physics, USA.
- Gustavsson R, Ingelög T, 1994.** Kunskaper och idéer om naturvård, skogsodling och planering i kulturbygd. Skogsstyrelsens förlag.
- Gustafson G, Ström A, Vira J, 1997.** The Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes. Evaluation report on Task No 3, the Äspö Tunnel drawdown experiment. SKB ICR 97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Götmark F, Gunnarsson B, Andrén C, 1998.** Biologisk mångfald i kulturlandskapet. Naturvårdsverket, rapport 4835, Naturvårdsverkets förlag.
- Haldorson M, 2000.** Statistics available for site studies in registers and surveys at Statistics Sweden. SKB R-00-25. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hellmuth K H, Siitari K M, Lindberg A, 1993.** Study of porosity and migration pathways in crystalline rock by impregnation with <sup>14</sup>C-polymethylmethacrylate. *Journal of Contaminant Hydrology* 13 (1-4), 403–418.
- Hoek E, Brown E T, 1980.** *Underground Excavations in Rock*. P. 527. London. Instn. Min. Metall.
- Hoek E, 1983.** Strength of jointed rock masses. Rankine Lecture. *Geotechnique* 33(3), 187–223.
- Hoeck E, Wood D, Shah S, 1992.** A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. Proc. rock characterization, symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock 92 (ed. J A Hudson), 209–214. London: Brit. Geol. Soc.
- Hoek E, 1994.** Strength of rock and rock masses. *ISRM New Journal* 2(2), 4–16.
- Hoek E, Brown E T, 1997.** Practical Estimates of Rock Mass Strength. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* Vol. 34. No.8. 1165–1186.
- ISRM, 1974.** Suggested methods for determining shear strength. Committee on field tests. Document No. 1.
- ISRM, 1977.** Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Committee on laboratory tests. Document No. 8.
- ISRM, 1977.** Suggested methods for determining sound velocity. Committee on laboratory tests. Document No. 4.
- ISRM, 1978.** Suggested Methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. Committee on laboratory tests.
- ISRM, 1983.** Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: Revised version. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.* Vol. 20. No. 6, pp 283–290.
- Juhlin C, Palm H, 1997.** Reflection Seismics Studies on the Island of Ävrö. SKB PR-D-97-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kumblad L, 1999.** A carbon budget for the aquatic ecosystem above SFR in Öregrundsgrepen. SKB R-99-40. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kyläkorpi L, Berggren J, Larsson M, Liberg M, Rydgren B, 2000.** Biological variables for the site survey of surface ecosystems – existing data and survey methods. SKB R-00-33. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Nilsson A-C, 1989.** Models of groundwater composition and hydraulic conditions based on chemometrical and chemical analysis of deep groundwater on Äspö and Laxemar. SKB PR 25-89-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Laaksoharju M, Vuorinen U, Snellman M, Allard B, Petterson C, Helenius J, Hinkkanen H, 1994.** Colloids or Artefacts? A TVO/SKB co-operation project in Olkiluoto, Finland. Report YJT-94-01. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, Finland.
- Laaksoharju M, Ahonen L, Blomqvist R, 1995a.** Handheld Double Packer Equipment for Water Sampling and Hydraulic Measurements in Deep Boreholes. Groundwater Monitoring & Remediation, Vol. XV, No. 2, Spring 1995.
- Laaksoharju M, Smellie J A T, Nilsson A-C, Skårman C, 1995b.** Groundwater characterisation of the Laxemar deep borehole KLX02. SKB TR 95-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Degueldre C, Skårman C, 1995c.** Studies of colloids and their importance for repository performance assessment. SKB TR 95-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Wallin B (eds), 1997.** Evolution of the groundwater chemistry at the Äspö Hard Rock Laboratory. Proceedings of the second Äspö International Geochemistry Workshop, June 6-7, 1995. SKB International Co-operation report ISRN SKB-ICR-91/04-SE. ISSN 1104-3210. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Andersson C, Tullborg E-L, Wallin B, Ekvall K, Pedersen K, Nilsson A-C, 1999.** Re-sampling of the KLX02 deep borehole at Laxemar. SKB R-99-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, 1999.** Groundwater characterisation and modelling: problems, facts and possibilities SKB TR-99-42. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laajalahti M, Aaltonen T, Kuoppamäki K, Maaranen J, Timonen J, 2000.** Measurements with the he-gas methods of the disturbed zone caused by boring. SKB IPR-00-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Landström O, Aggeryd I, Marthiasson L, Sundblad B, 1994.** Chemical composition of sediments from the Äspö area and interaction between biosphere and geosphere. SKB AR 94-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Landström O, Tullborg E-L, 1995.** Interactions of trace elements with fracture filling minerals from the Äspö Hard Rock Laboratory. SKB TR 95-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- LaPointe P, Cladouhos T, Follin S, 1999.** Calculation of displacements on fractures intersecting canisters induced by earthquakes: Aberg, Beberg and Ceberg examples. SKB TR-99-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lawesson J E (ed), 2000.** A concept for vegetation and monitoring in the Nordic countries. Nordic Council of Ministers. TEMA Nord 2000:517, Copenhagen.
- Ledin A, Duker A, Karlsson S, Allard B, 1995.** Measurements of colloid concentrations in the fracture zone, Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. SKB TR 95-17. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindborg T, Schüldt R, 1998.** The biosphere at Aberg, Beberg and Ceberg – a description based on literature concerning climate physical geography, ecology, land use and environment. SKB TR-98-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Lindborg T, Kautsky U, 2000.** Variabler i olika ekosystem, tänkbara att beskriva vid platsundersökning för ett djupförvar. SKB R-00-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindell S, Ambjörn C, Juhlin B, Larsson-McCann S, Lindquist K, 1999.** Available climatological and oceanographical data for site investigations of surface ecosystems. SKB R-99-70. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindell S, Ambjörn C, Juhlin B, Larsson-McCann S, Lindquist K, 2000.** Available climatological and oceanographical data for site investigation program. SKB R-99-70. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ljunggren C, Raillard G, 1987.** Rock stress measurements by means of hydraulic tests on pre-existing fractures at Gideå test site, Sweden. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, 24, 339– 345.
- Löfgren M, Ohlsson Y, Neretnieks I, in prep.** Rock matrix diffusivity determinations by in-situ electrical conductivity measurements. *Journal of Contaminant Hydrology*.
- McNeish J A, Andrews R W, Vomvoris S, 1990.** Interpretation of the tracer testing conducted in the Leuggern borehole. NAGRA Technical Report 89-27.
- Meigs L C, Beauheim R L, Jones T L (eds), 2000.** Interpretation of Tracer Tests Performed in the Culebra Dolomite at the Waste Isolation Pilot Plant Site, Sandia Report SAND97-3109, Sandia National Laboratory, USA.
- Molinero, 2000.** Testing and validation of numerical models of groundwater flow, solute transport and chemical reactions in fractured granite. PhD Thesis, Universidade da Coruna.
- Moreno L, Neretnieks I, 1993.** Fluid flow and solute transport in a network of channels. *Journal of Contaminant Hydrology*, 14, 163–192.
- Muir-Wood R, 1993.** A review of the seismotectonics of Sweden. SKB TR 93-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Hermanson J, 2001.** Metodik för geometrisk modellering. Presentation och administration av platsbeskrivande modeller. SKB R-01-15. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ohlsson Y, Neretnieks I, 1995.** Literature survey of matrix diffusion theory and of experiments and data including natural analogues. SKB TR 95-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ohlsson Y, Neretnieks I, 1997.** Diffusion data in granite SKB TR 97-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olsson O, Bäckblom G, Gustafson G, Rhén I, Stanfors R, Wikberg P, 1994.** The structure of conceptual models with application to the Äspö HRL Project. SKB TR 94-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olsson R, 1998.** Mechanical and hydromechanical behaviour of hard rock joints. A laboratory study. Thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology.

- Pedersen K, 1997.** Investigations of subterranean microorganisms and their importance for performance assessment of radioactive waste disposal. Results and conclusions achieved during the period 1995 to 1997. SKB TR 97-22. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pedersen K, 2000.** Microbial processes in radioactive waste disposal. SKB TR-00-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pettersson C, Ephraim J, Allard B, Boren H, 1990.** Characterization of humic substances from deep groundwaters in granitic bedrock in Sweden. SKB TR 90-29. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Påsse T, 1997.** A mathematical model of past, present and future shore level displacement in Fennoscandia. SKB TR 97-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rhén I (ed), Svensson U (ed), Andersson J-E, Andersson P, Eriksson C-O, Gustafsson E, Ittner T, Nordqvist R, 1992.** Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation of the combined long term pumping and tracer test (LPT2) in borehole KAS06. SKB TR 92-32. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rhén I (ed), Bäckblom G (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997a.** Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/2. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Comparison of prediction and observations. Summary report. SKB TR 97-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rhén I, Gustafson G, Wikberg P, 1997b.** Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/4. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Comparison of predictions and observations. Geohydrology, Groundwater chemistry and Transport of solutes. SKB TR 97-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rhén I, Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997c.** Äspö HRL. Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995. SKB TR 97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rouhianen P, 1993.** TVO-Flowmeter, Report YJT-93-01, Nuclear Waste Commission of Finnish Nuclear Power Companies, Helsinki, Finland.
- Rouhianen P, 1995.** Difference flow measurements at the Äspö HRL, May 1995. SKB ICR 95-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Saksa P, Nummela J, 1998.** Geological-structural models used in SR 97. Uncertainty analysis. SKB TR-98-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Schulze E-D, Mooney H A, 1994.** Biodiversity and Ecosystem Function. Springer-Verlag. Germany.
- Smellie J, Gustavsson E, Wikberg P, 1987.** Groundwater sampling during subsequent to air-flush rotary drilling: hydrochemical investigations at depth in fractured crystalline rock. SKB AR 87-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smellie J A T, Laaksoharju M, 1992.** The Äspö Hard Rock Laboratory: Final evaluation of the hydrogeochemical pre-investigations in relation to existing geologic and hydraulic conditions. SKB TR 92-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Smellie J A T, Laaksoharju M, Snellman M V, Ruotsalainen P, 1999.** Evaluation of the quality of groundwater sampling: Experience derived from radioactive waste programmes in Sweden and Finland during 1980–1992. Posiva Tech. Rep. 99-29, Helsinki, Finland.
- SKB, 1998.** FUD-program 98, Kärnavfallets behandling och slutförvaring. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1999a.** SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Djupförvar för använt kärnbränsle. Huvudrapport (två volymer). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1999b.** SR 97 – Processer i förvarets utveckling, Underlagsrapport till SR 97. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1999c.** Deep repository for long-lived low- and intermediate-level waste. Preliminary safety assessment. SKB TR-99-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2000a.** Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2000b.** Geovetenskapligt inriktat program för undersökning och utvärdering av platser för djupförvaret. SKB R-00-30. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stanfors R, Olsson P, Stille H, 1997.** Äspö HRL. Geoscientific evaluation 1997/3. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Comparison of prediction and observations. Geology and mechanical stability. SKB TR-97-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephansson O, 1983.** State of the art and future plans about hydraulic fracturing stress measurements in Sweden, in Proc. Hydraulic Fracturing Stress Measurements, Monterey, National Academy Press, Washington DC, pp 260–267.
- Stewart-Oaten A, Murdoch W W, Parker K R, 1986.** Environmental impact assessment: "pseudoreplication" in time? Ecology, 67: 929–940.
- Sundberg J, 1988.** Thermal properties of soil and rocks. Report No 35, Swedish Geotechnical Institute.
- Tullborg E-L, 1997.** Recognition of low-temperature processes in Fennoscandian shield. Ph.D. thesis at Geological Department at the Institution for Geosciences, Geovetärcentrum, Göteborgs Universitet.
- Vilks P, Cramer J J, Melnyk T W, Stanchell F W, Miller N H, Miller H G, 1999.** In-situ diffusion in granite. Phase I Final Report, Report No: 06819-REP-01200-0087-R00, Ontario Power Generation, Nuclear Waste Management, Toronto, Canada.
- Walker D, Rhén I, Gurban I, 1997.** Summary of hydrogeological conditions at Aberg, Beberg, Ceberg. SKB TR 97-23. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Winberg A, Andersson P, Hermanson J, Byegård J, Cvetkovic V, Birgersson L, 2000.** Final Report of the First Stage of the Tracer Retention Understanding Experiments. SKB TR-00-07. Svensk Kärnbränslehantering AB.