

Berättelsen om **Forsmark**



Berättelsen om **Forsmark**

ISBN 978-91-977862-3-2

Foto: Göran Hansson, Alf Linderheim, Curt-Robert Lindqvist, Lasse Modin,
Alf Sevastik, William Shilts, Björn Ullhagen, SKB:s arkiv

Illustrationer: Jan Rojmar, Hans Sjögren, LAJ Illustration

Produktion: EnaInfo/Edita, augusti 2009



Berättelsen om Forsmark handlar om arbetet med att analysera alla de data som platsundersökningen för ett slutförvar i Forsmark har genererat. Den är en populärversion av den platsbeskrivande modellen, SDM-Site för Forsmark. Förkortningen SDM står för den engelska termen för platsbeskrivande modell – Site Descriptive Model.

Den platsbeskrivande modellen väver samman data och analyser av olika ämnesområden till en helhet. Det är helt enkelt berättelsen om Forsmark. Mycket förenklat handlar platsmodellering om att förstå hur en plats fungerar samt om att överföra och tolka de resultat som erhållits i olika mätpunkter vid platsundersökningen till att gälla även ytor och volymer, så att vi får en mer sammansatt bild av området. Så skilda ämnesområden som geologi, termiska egenskaper, bergmekanik, hydrogeologi, hydrogeokemi, berggrundens transportegenskaper och ekologi ingår i modellen.

Den platsbeskrivande modellen har till uppgift att ge en samstämmig bild av platsen baserad på underlaget för alla ämnesområden. Främst är det två frågor vi vill ha svar på. Hur ser samspelet ut mellan olika långsiktiga förändringsprocesser på den aktuella platsen i dag? Och vilka faktorer är det som styr att platsen under historiens gång har förändrats till vad den är i dag? De olika ämnesområdena bidrar här med sina respektive pusselbitar för att vi ska få en

övergripande kunskap och förståelse för hur platsen fungerar. Platsmodellen blickar bakåt och sträcker sig fram till dagens förhållanden. Den gör däremot inga prognoser när det gäller framtiden.

Vi har valt att dela in berättelsen om Forsmark i fyra delar:

■ PLATSEN

■ PÅ DJUPET

■ PÅ YTAN

■ SLUTSATSER

Inför fortsättningen är det viktigt att påpeka att den här skriften är just en populärversion. Av nödvändighet är innehållet därför avsevärt förkortat och förenklat. Populärversionen följer inte heller upplägget i originalrapporten och innehåller dessutom mer grundläggande förklaringar för att öka läsbarheten och förståelsen. Konsultera därför alltid SDM-Site vid tveksamheter eller om du vill få djupare kunskap om ett speciellt ämnesområde. Rapporten har titeln Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase – SDM-Site Forsmark (SKB TR-08-05) och kan laddas ner från SKB:s webbplats www.skb.se. Till SDM-Site hör också ett stort antal underlagsrapporter.

INNEHÅLL

5 PLATSEN

17 PÅ DJUPET

61 PÅ YTAN

105 SLUTSATSER



5



17



61



105



PLATSEN

- Att finna en plats
- Forsmark då och nu
- På plats i Forsmark
- Bilden av Forsmark

Att finna en plats

Det är SKB:s uppgift att finna en plats för slutförvaret för använt kärnbränsle. Efter flera års undersökningar av berget har vi kommit fram till att Forsmark är den lämpligaste platsen att bygga ett slutförvar på.

Kraftindustrin i Sverige har producerat el med hjälp av kärnkraft sedan 1972. Liksom andra energiformer har kärnkraften sina för- och nackdelar. Den ger nästan inga utsläpp som påverkar klimatet, men däremot uppkommer olika typer av radioaktivt avfall, så kallat kärnavfall.

Ansvar regleras i lag

Hantering av kärnavfallet regleras genom lagstiftning. Kärnkraftsindustrin fick redan på 1970-talet ansvaret för att ta hand om allt radioaktivt avfall från sina anläggningar på

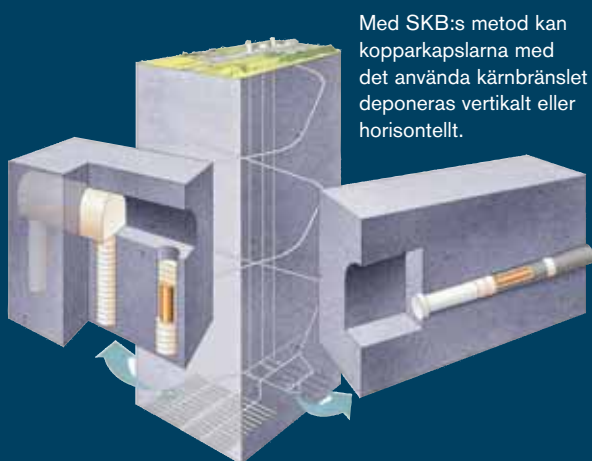
ett säkert sätt. För att lösa denna uppgift bildade kärnkraftsföretagen det gemensamma bolaget Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).

SKB:s verksamhet har lett till att Sverige i dag har ett mycket väl genomtänkt system för att ta hand om olika typer av radioaktivt avfall. Här finns redan ett mellanlager för använt kärnbränsle (Clab), ett slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) och ett specialbyggt fartyg med olika typer av behållare för att frakta det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken till avfallsanläggningarna.

Vår uppgift är emellertid inte slutförd med detta. För att systemet ska bli komplett krävs också en inkapslingsanläggning för att kapsla in det använda kärnbränslet i kopparkapslar och ett slutförvar där de fyllda kapslarna ska deponeras.

Ytterligare utrymmen behövs

Det behövs också ytterligare förvaringsutrymmen för radioaktivt drift- och rivningsavfall. Ett slutförvar för långlivat avfall (som inte är använt kärnbränsle) tillkommer också. För närvarande ligger tyngdpunkten i



Med SKB:s metod kan kopparkapslarna med det använda kärnbränslet deponeras vertikalt eller horisontellt.

Slutförvaret för använt kärnbränsle

Slutförvaret för använt kärnbränsle bygger på KBS-3-metoden. Förkortningen KBS-3 står för kärnbränslesäkerhet. Metoden innebär i korthet att det använda kärnbränslet deponeras i urberget på cirka 500 meters djup och skyddas av olika barriärer.

Den första barriären är kopparkapseln som omger det använda bränslet. Dess uppgift är att isolera bränslet från omgivningen. Inga radioaktiva ämnen kan komma ut ur en tät kapsel. Kapseln har en insats av gjutjärn för att kunna stå emot mekaniska påfrestningar nere i berget.

Runt kapseln finns bentonitlera. Leran kallas buffert, eftersom den skyddar kapseln från små rörelser i berget. Bufferten har ytterligare två uppgifter. Bentonitleran sväller och tätar när den suger åt sig vatten.



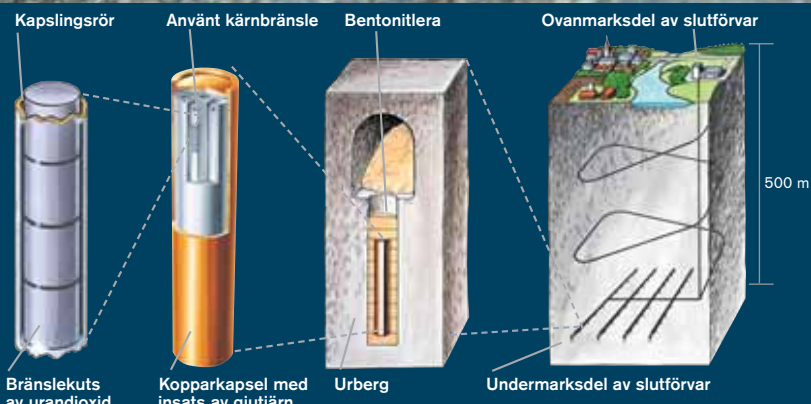
PLATSEN

Assen Simeonov är geolog på SKB och var ansvarig för de geologiska undersökningarna i Forsmark.

Samtidigt fungerar den som ett filter och stoppar upp grundvattnets transport av radioaktiva ämnen till markytan.

Även det omgivande berget fördröjer transporten av radioaktiva ämnen. Dess främsta uppgift är emellertid att skydda kapseln och bufferten från händelser som kan tänkas inträffa på markytan. Berget ska också erbjuda en stabil kemisk miljö för de övriga barriärerna.

KBS-3-metoden gör det möjligt att deponera kapslarna vertikalt eller horisontellt. I båda varianterna är kapseln och bufferten densamma.

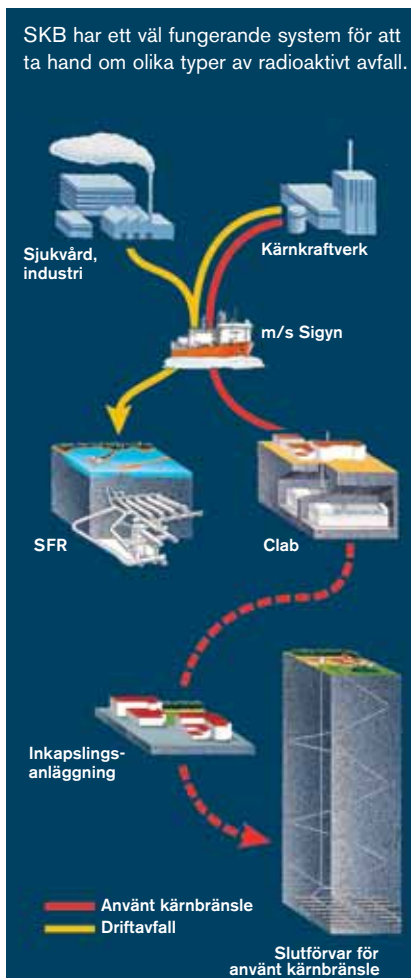


Tre barriärer (kopparkapseln, bufferten av bentonitlera och berget) ska hindra de radioaktiva ämnena i det använda kärnbränslet från att ta sig upp till markytan.

SKB:s arbete på slutförvaret för använt kärnbränsle. Alla våra planer utgår från att kärnkraftverken drivs i mellan 50 och 60 år. Detta skulle ge upphov till 12 000 ton uran, motsvarande ungefär 6 000 kapslar. Vi har redan kommit en bit på väg. År 2006 lämnade SKB in en ansökan enligt kärntekniklagen om att få bygga samman inkapslingsanläggningen med Clab och driva de båda som en gemensam anläggning.

Går fram i steg

Arbetet med att finna en lämplig plats för slutförvaret för använt kärnbränsle har pågått under flera decen-



ner och gått fram i steg. Förstudier har genomförts i åtta kommuner: Storuman, Malå, Nyköping, Östhammar, Oskarshamn, Tierp, Hultsfred och Älvkarleby. Samtidigt pågick länsvisa översiktsstudier. Vi har även jämfört kust- och inlandslägen.

År 2002 startade platsundersökningar i Östhammars och Oskarshamns kommuner. De platser där som är aktuella är Forsmark och Laxemar. Undersökningarna avslutades 2007 och har genererat en uppsjö av data om berget, vattnet och miljön på markytan.

Få överraskningar

Med facit från platsundersökningarna till hands, kan vi nu konstatera att metodik och teknik för såväl de geovetenskapliga undersökningarna som undersökningarna av ekosystemen på

ytan i stort sett fungerat som planerat. Överraskningarna har varit få och av begränsad betydelse.

Samtidigt som de praktiska undersökningarna i fält har pågått har vi också analyserat de data som undersökningarna gett upphov till och de observationer vi gjort i övrigt. I juni 2009 hade vi utvärderat underlaget tillräckligt för att välja plats.

Våra analyser visar att Forsmark är tillräckligt bra för att uppfylla alla krav på långsiktig säkerhet. Här är platsens geologiska, hydrologiska och kemiska egenskaper särskilt viktiga.

Det ska dessutom finnas tekniska förutsättningar att bygga ett förvar på platsen. Detta ställer i sin tur krav på berggrundens stabilitet och vattenföring. Etableringen och verksamheten ska kunna genomföras med hänsyn till miljön i övrigt. Motiven för platsvalet har redovisats separat.



Ett specialbyggt fartyg fraktar det radioaktiva avfallet mellan anläggningarna.



Historiskt sett har landskapet i Forsmark präglats av träkolsproduktionen för brukets järnframställning samt av odling av foder till lantbruksdjuren. I dag dominerar elkraftsproduktion. På bilden ses Forsmarks bruk i förgrunden och kärnkraftverket i bakgrunden.



Forsmark då och nu

Platt, skogsbevuxen och belägen i ett landskap som i hög grad påverkats av landhöjningen. Så kan man kort beskriva Forsmark.

Forsmark ligger i Osthammars kommun i norra Uppland, ungefär 12 mil norr om Stockholm. Platsundersökningen har genomförts inom ett så kallat kandidatområde, se karta på sidan 10. Kandidatområdet är det område som pekades ut som det mest lämpliga vid den förstudie som stod klar år 2000 och som omfattade hela kommunen.

Platsen är belägen vid Öregrundsgrepens strand och sträcker sig från Forsmarks kärnkraftverk och tillfartsvägen till SFR i nordväst till Kallrigafjärden i sydost. Kandidatområdet är omkring sex kilometer långt och två kilometer brett. Det avgränsas natur-

ligt mot omgivningen genom att berggrunden består av en tektonisk lins. Med en tektonisk lins menas en relativt opåverkad bergkropp, som är omgiven av zoner med deformerat berg.

Torrt i nordväst

Under platsundersökningens senare del koncentrerades undersökningarna till områdets nordvästra del, nära kärnkraftverket. Detta område har vi valt att kalla det prioriterade området. Här är berget mycket torrt på djupet, eftersom det finns få sprickor som leder vatten.

För omkring 11 000 år sedan försvann inlandsisen från norra Uppland. Under större delen av tiden därefter har Forsmark legat under havsytans nivå. Först för omkring 1 000 år sedan hade landet höjts så mycket att större delen av kandidatområdet hamnade ovanför havsnivån.

Landhöjningen pågår fortfarande och strandlinjeförskjutningen uppgår till cirka sex millimeter per år. Landskapet är mycket flackt. Den högsta punkten ligger bara 25 meter över havsytans nivå.

Historiskt sett har landskapet påverkats av den järnframställning som skett vid det närbelägna Forsmarks

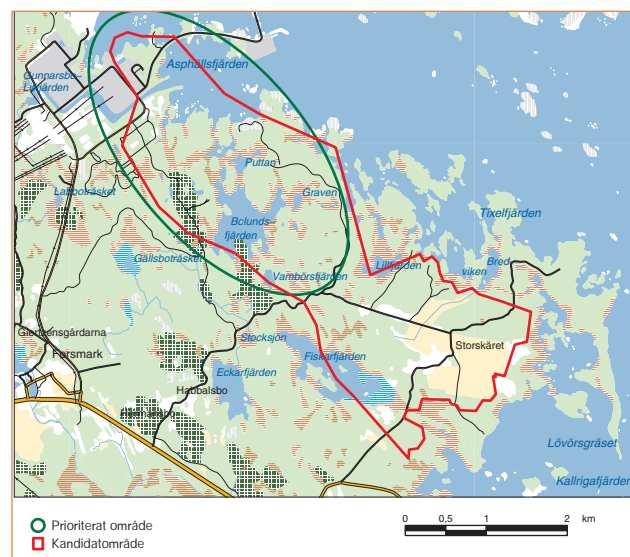


Börje Andersson hälsar på korna på Storskäret. Sonen Niclas Börjesson driver det enda jordbruket inom kandidatområdet.

bruk. Bränsle från skogarna användes för den träkolsproduktion som var nödvändig för att framställa järnet. Mycket av jordbruksmarken gick åt till att odla foder för att föda djuren i lantbruket. I dag domineras landskapsbilden av det närbelägna kärnkraftverket.

Växtligheten är påverkad av den kalkhaltiga morän som täcker berggrunden. Gran och tall är de vanligaste trädslagen, medan markvegetationen karakteriseras av örter, bredbladiga gräs samt orkidéer och andra växter som kräver kalkhaltiga jordar. Sjöarna är grunda och näringsfattiga. Livet i dem påverkas även det av den kalkhaltiga moränen.

Skogen dominerar, men det finns också inslag av jordbruksmark. Den del av kandidatområdet, som ligger längst i sydost tillhör jordbruksfastigheten Storskäret. Räknet från sydost till nordväst ägs sedan marken av Sveaskog, SKB, Vattenfall Fastigheter och Forsmarks kraftgrupp.



Kartan visar kandidatområdet (röd linje) och det prioriterade området (grön linje).

På plats i Forsmark

Få områden i världen är så väl undersökta som Forsmark. Platsundersökningen och den efterföljande analysen har genererat omfattande kunskap inom såväl naturvetenskap som samhällsvetenskap.

En platsundersökning går främst ut på att undersöka berget, men innehåller också omfattande studier av miljön på ytan. I Forsmark är det främst fem frågor vi har sökt svaret på under platsundersökningen:

- Hur djupt sträcker sig den tektoniska linsen?
- Vilka egenskaper har de deformationszoner som omger linsen?
- Finns det malm eller andra brytningsvärda mineraler i berggrunden?
- Var finns de flacka deformationszonerna i berggrunden?
- Hur stora är bergspänningarna?

Platsundersökningen har dessutom haft som syfte att undersöka förekomsten av sprickor inom linsen, hur vattenförande dessa är samt att kartlägga den kemiska sammansättningen hos grundvattnet.

Vi började med att undersöka berget från ytan. Geologiska karteringar, geofysiska mätningar från helikopter och seismiska undersökningar (där vi studerade hur ljudvågor fortplantar sig i berget) gav kunskap om berggrundens mönster av bergarter och

deformationszoner. De seismiska undersökningarna var speciellt värdefulla för att bestämma läget på flacka deformationszoner.

De ytbaserade undersökningarna måste emellertid kompletteras med borrhningar till olika djup för att vi skulle kunna hämta in mer information om berget från borrhämlar och bergsfragment från borrhningen.

Borrhningarna följdes upp genom en detaljerad kartering av borrhämlar, analyser av bergarter och sprickor samt genom omfattande mätningar i borrhålen för att fastställa berggrundens förmåga att leda vatten och för att bestämma med vilken hastighet grundvattnet kan transporteras upp till markytan. Mätningarna gav också kunskap om grundvattenkemin.

Bergets mekaniska egenskaper är också viktiga. Höga bergspänningar gör att slutförvarets tunnlar måste orienteras i en viss riktning och kan också påverka den långsiktiga säkerheten. Även bergets värmeledningsförmåga har betydelse för hur slutförvaret byggs. I ett berg som lätt kan leda bort värme kan kapslarna placeras tätare. Den totala volymen som måste



Platsundersökningen innebar också omfattande kartläggningar av miljön på ytan. Bland annat undersöktes växtligheten. Bilden visar blåkllocka.

utnyttjas för förvaret blir alltså mindre. Förutom att borra i berget har vi till exempel undersökt vattnets kemiska sammansättning i berget och på ytan, mätt nederbörd och inventerat växtlighet, fåglar och vilt. I samråd med kommunen har vi också studerat hur en etablering av ett slutförvar för använt kärnbränsle skulle påverka samhället och de människor som lever där i olika avseenden. Till detta kommer även ett av SKB finansierat program inom samhällsvetenskaplig forskning.

Alla dessa studier har dokumenterats och gett upphov till ett mycket stort antal rapporter och vetenskapliga artiklar. Bara platsundersökningen har resulterat i drygt 600 rapporter. Ytterligare ett sjuttioal rapporter har tagits fram som en del av platsbeskrivningen för Forsmark. Allt material är offentligt och finns tillgängligt på SKB:s webbplats www.skb.se.

Platsmodellen blickar bakåt

Datamängden från platsundersökningarna på respektive plats utgör underlag till den beskrivning av platsen som tas fram. Beskrivningen – eller model-



len – av platsen tar sin utgångspunkt i dagens förhållanden och blickar bakåt. Platsbeskrivningen blir sedan i sin tur startpunkt för två andra viktiga produkter: anläggningsbeskrivningen och säkerhetsanalysen. De förra versionerna av platsmodell och anläggningsbeskrivning togs fram efter de inledande platsundersökningarna. Då gjordes också säkerhetsanalysen SR-Can, som fokuserade på kapselns funktion i slutförvaret.

Anläggningsbeskrivningen är en beskrivning av hur slutförvaret kan utformas. Den fastställer bland annat på vilket djup förvaret ska ligga, vilken riktning och längd tunnlarna ska ha samt var anläggningarna på markytan ska ligga.

Säkerhetsanalysen ser framåt

Säkerhetsanalysen tar vid där platsbeskrivningen slutar. Den har sin utgångspunkt i anläggningsbeskrivningen och de förhållanden som råder när förvaret förslutits.

Analysen blickar sedan långt in i framtiden – upp till en miljon år. Säkerhetsanalysen behandlar de förändringar som slutförvaret antas genomgå med tiden. Nästa säkerhetsanalys kallas SR-Site och blir en del av underlaget för den juridiska prövningen. Den ska visa om slutförvaret på den utvalda platsen uppfyller myndigheternas krav på långsiktig säkerhet.

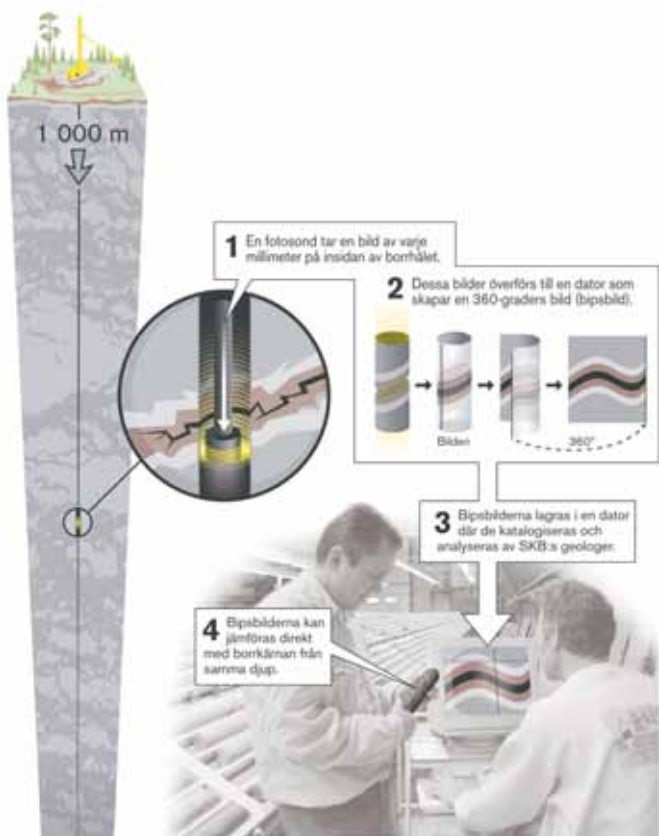
Platsbeskrivningen kommer även att leverera underlag till den miljökonsekvensbeskrivning som ska tas fram och ingå i miljöprövningen av slutförvaret.

Platsundersökningen i Forsmark pågick 2002 – 2007. Periodvis var bormaskinerna igång dygnet runt. Kurre Granström arbetade nattsiftet.

Så undersökte vi borrhämnarna

Under platsundersökningen i Forsmark borrade vi 25 stycken kärnborrhål. Borrhålens väggar filmades med hjälp av en speciell TV-utrustning. Borrhämnarna jämfördes sedan med TV-bilder från samma djup. Vi kunde då se vilka bergarter och sprickmineral som finns, var gränserna mellan olika bergarter går och åt vilket håll sprickorna i kärnan är orienterade.

Därefter togs en stor mängd prover på kärnan. Proverna analyserades sedan på olika laboratorier för att undersöka vilka egenskaper berget har, till exempel hållfasthet och värmeledningsförmåga. Med hjälp av så kallade tunnslip och mikroskop kan andelen av olika mineral i berget bestämmas. Detta ger i sin tur upplysningar om vilken bergart det rör sig om och hur omvandlat berget är.



Sprickor (tusen meter borrhämnarna tas upp ur många kärnborrhål)

- Öppen spricka
- Krosszon
- Lågt spricka
- Breccia
- Bergartsgång



Bergarter

- Basisk gång
- Pegmatitgång
- Apitgång





Några medlemmar av analysgruppen diskuterar den geologiska platsmodellen. Från vänster Kristina Skagius Elert, Anders Ström och Raymond Munier.

Bilden av Forsmark

Platsmodellering är som ett gigantiskt tredimensionellt pussel, där vi redan från början vet att vi inte kommer att ha tillgång till alla bitarna. Bitarna har olika storlek och vissa bitars form förändras dessutom med tiden.

Den platsbeskrivande modellen är grunden för att förstå hur ett slutförvar för använt kärnbränsle påverkar miljön runt Forsmark på kort och på lång sikt. Mycket förenklat handlar platsmodellering om att förstå hur en plats fungerar samt om att tolka och överföra den punktvisa information,

som vi fått fram vid platsundersökningarna i form av mätvärden, till att gälla för ytor och volymer. På så sätt får vi en sammansatt bild av området. Platsmodellering innebär också att vi måste kunna förklara det vi ser på djupet och på ytan. Vi måste få grepp om den historiska utvecklingen och

kunna koppla händelser i det förflutna till de observationer vi gör i dag. Dessutom måste vi redogöra för de osäkerheter som finns i beskrivningen, samt värdera vad de betyder för helheten.

Modellen ska ge en helhetsbeskrivning av förhållandena både på ytan

och nere i berget. Totalt ska vi hantera fyra dimensioner (längd, bredd, djup och tid). Utmaningen ligger i att veta vilka och hur många bitar som behövs för att förstå pusslets struktur tillräckligt bra. Vi måste ha kunskap om alla de processer och egenskaper som styr utvecklingen av berggrunden och grundvattnet (geosfären) och de ytliga ekosystemen (biosfären) samt hur dessa påverkar varandra. Med processer menas de förändringar som sker naturligt i både geosfär och biosfär.

Mycket handlar om att förstå och länka samman olika kretslopp, som vart och ett har olika omloppstid. Det geologiska kretsloppet – bergarts-cykeln – som bygger upp och bryter ned berggrunden är oerhört långsamt och har en omloppstid på flera miljar-der år. Det drivs av värme från jordens inre.

Varierande tidsperspektiv

Det hydrologiska kretsloppet – vattnets kretslopp – drivs ytterst av sol-energin. Vatten avdunstar, kondenserar och faller ned som regn eller snö och strömmar som grund- eller ytvatten tillbaka till havet.

Tidsperspektiven varierar och kan vara alltifrån timmar för avdunstning till hundratusentals – eller till och med miljontals år – för djupa grundvatten. Vatten som är bundet i glaciärer ingår i den så kallade glaciations-cykeln. Genom att vatten kan såväl erodera, transportera och sedimentera bergmaterial griper vattnets kretslopp in i bergarts-cykeln.

Kopplade till både det geologiska och det hydrologiska kretsloppet är också olika grundämnenas kretslopp mellan olika reservoarer (uppehålls-platser). Ett sådant exempel är kolets kretslopp mellan jordskorpan (stenkol, olja, kalksten), atmosfären (koldioxid), haven (karbonatjoner) och biosfären (växter och djur). I analys-

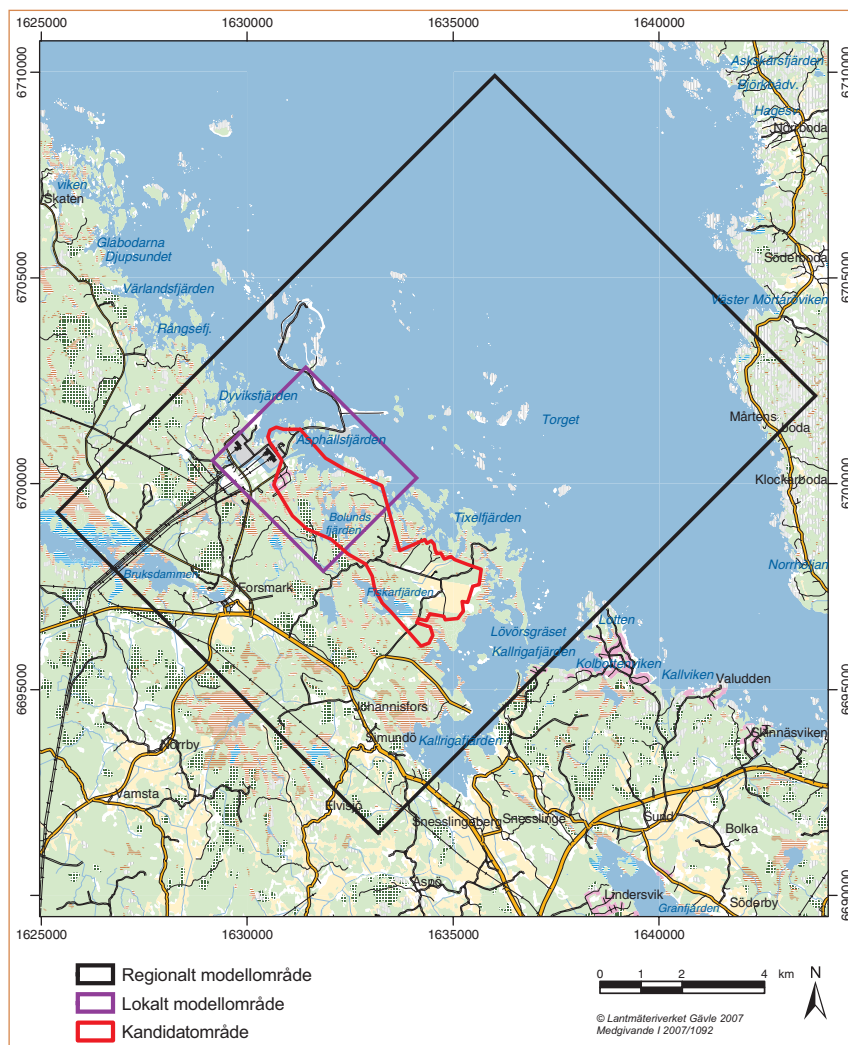
arbetet har vi undersökt omsättning-en av ett femtiotal olika grundämnen.

Täcker större område

När vi gör våra modeller utgår vi från ett större område än själva kandidat-området, det regionala modellområdet. Hela ytan på det geografiska område som den regionala modellen täcker är omkring 165 kvadratkilometer. Utsträckningen i djupled är 2 200 meter (från 100 meter över havet till 2 100

meter under havsnivån). Den regionala modellen inkluderar större delen av havet mellan Forsmark och Gräsö. Att en så stor yta i havet ingår beror bland annat på att vi vill kunna analysera regionala grundvattenströmmar.

Ett mindre område, drygt 30 kvadratkilometer stort, som omfattar det prioriterade området och dess närmaste omgivningar har analyserats i detalj. För detta lokala modellområde har vi fler data än för de mer avlägset belägna områdena inom modellom-



Det regionala modellområdet omfattar ett betydligt större område (svart linje) än själva kandidatområdet (röd linje). I modelleringens slutskede har insatserna koncentrerats till det lokala modellområdet (lila linje).

rådet. Allra högst är datatätheten i det prioriterade området.

Berget basen för modellen

Utgångspunkten vid platsmodelleringen är hur berggrunden är uppbyggd av bergarter och partier med uppsprucket berg. I den geologiska beskrivningen finns bergarternas fördelning och egenskaper med, liksom deformationszonernas läge, geometri och egenskaper.

Utifrån den geologiska modellen av området kan vi sedan bygga motsvarande modeller för övriga ämnesområden. Berggrundens mekaniska egenskaper är till exempel nära kopplade till bergarternas sammansättning och förekomsten av sprickor. Det är också bergets termiska egenskaper, det vill säga dess förmåga att leda värme. På motsvarande sätt är fördelningen av bergspänningar delvis beroende av de deformationszoner som finns i området.

Berggrundens sprickstruktur är också basen för den hydrogeologiska modellen. Det är bara sprickorna

som kan ha så hög vattengenomsläpplighet att grundvattnet i berget kan röra sig som har betydelse. Hur vattnet rinner i bergets sprickor och vilka uppehållstider och flöden det handlar om beror både på hur genomsläppliga de är och hur sprickorna hänger ihop. Genom att undersöka vilka mineral som sprickornas ytor är täckta med kan man också få en uppfattning om vilka kemiska förhållanden som har rått under olika tidsperioder samt uppskatta vilken förmåga berget har att bromsa upp transporten av radionuklider. Vi kan se under vilka perioder syrerikt vatten har trängt ner i berggrunden och hur djupt det har nått. Sprickmineralens ålder ger också en uppfattning om vilka sprickor som har varit vattenförande länge.

För att vi ska kunna tro på den platsbeskrivning vi tar fram måste vi alltså vara övertygade om att våra tolkningar och analyser av data inom de andra ämnesområdena passar in i den gemensamma bilden.

De stora mängder data som har genererats har lagrats i SKB:s databas Sicada eller i vår GIS-databas, så att

vi kan spåra bakåt var och när en viss uppgift kommer ifrån. I modelleringsarbetet har emellertid inte bara våra egna data använts. Vi har i vissa fall också jämfört med data från andra motsvarande undersökningar som publicerats i den vetenskapliga litteraturen. På så sätt kan vi avgöra om de mätvärden vi själva fått fram är rimliga och hur mycket förhållandena på djupet och på ytan i Forsmark skiljer sig från vad som är "normalt".

Liksom vid lokaliseringsprocessen för att finna en lämplig plats för slutförvaret sker utvärderingen och analysen av de data som kommer fram vid platsundersökningen i steg. Utgångspunkten för arbetet med platsbeskrivningen var läget när platsundersökningen startade år 2002. Den sammanställdes till en modell som fick beteckningen "version 0" och innehöll all den kunskap som framkommit vid förstudien i Forsmark.

Olika versioner

Version 0 följdes därefter av version 1.1 år 2004 och version 1.2 år 2005. Den sistnämnda baserade sig på den kunskap som framkommit under den inledande fasen, det vill säga de första två åren, av platsundersökningen. Under platsundersökningens senare del har ytterligare tre steg (steg 2.1, steg 2.2 och steg 2.3) tagits fram i modelleringsarbetet, där den geologiska modellen har uppdaterats och där de olika ämnesområdena inkluderats. Nu när undersökningarna är avslutade sammanfattas helheten i SDM-Site, den fullständiga och slutgiltiga modellversionen för platsundersökningsskedet.

Att arbeta stegvis och med flera modellversioner har varit viktigt. Det har gjort det möjligt att ta in synpunkter från vetenskapliga granskare. Vi har också kunnat ge återkoppling till verksamheten på plats.



Peter Dahlin och Eva Samuelsson från Geosigma granskar borrhörningar från Singözonen i närheten av Forsmark.



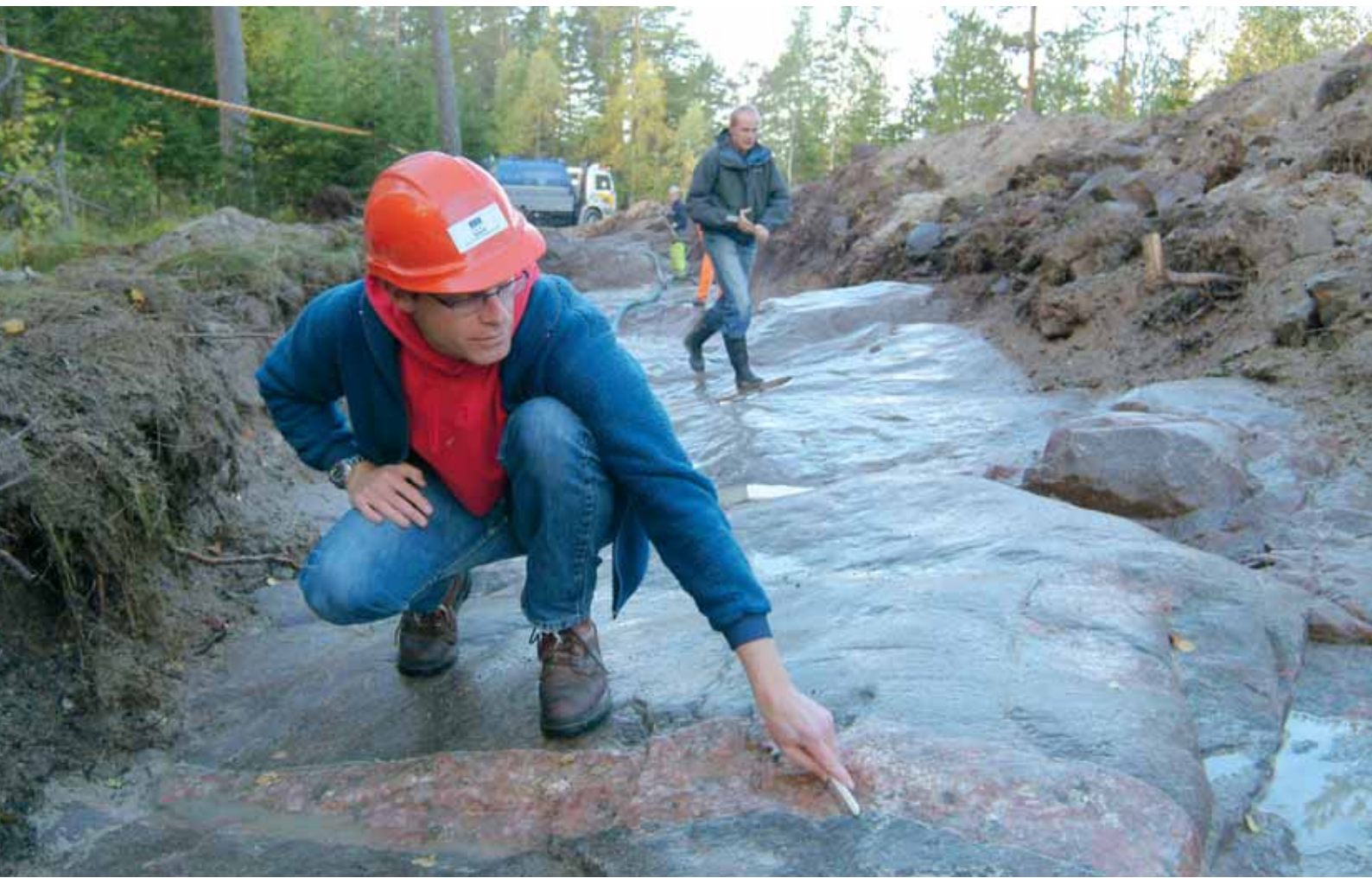
Sprickmineralen kan berätta om förhållandena i berget under gångna tider. Här ser vi bergkristall som är överväxt av en "matta" av röd hematit. Lösningarna som har cirkulerat genom denna spricka har varit rika på kisel och bergkristaller har bildats. Dessutom har det funnits en del järn.

PÅ DJUPET

- Urberget berättar sin historia
- Att beskriva berget
- Vattnets vägar i berget
- Inte bara vanligt vatten
- Berget som barriär

Urberget berättar sin historia

Den plats vi i dag kallar Forsmark har sitt ursprung långt nere i berget, vid kanten av en kontinent. I berget kan vi se spår av olika händelser under årmiljonernas lopp: vulkanutbrott, jordbävningar, veckningar och klimatväxlingar.



Berget är en mosaik av bergarter och sprickor. Jesper Petersson, geolog från Vattenfall Power Consultants, visar strukturer i det frilagda berget vid dikesgrävningarna på vägen upp mot borrhållsplats 6 i Forsmark.

Den plats vi kallar Forsmark har en lång historia, som täcker nästan hela den senare halvan av den tid som jordklotet existerat. Berggrunden i östra Sverige består av rötterna till den Svekokarelska bergskedjan, som reste sig för mellan 1 900 och 1 800 miljoner år sedan. Forsmark tillhör den sydvästra delen av denna berggrundsregion.

Forsmarks historia är berättelsen om hur en bergskedja reser sig, påverkas av olika krafter i jordskorpan och så småningom eroderar ner. Samma geologiska process som när den svekokarelska bergskedjan bildades äger rum i dag på andra platser på jorden. Längs västra Sydamerika pressas till exempel oceanbotten ner under den sydamerikanska kontinenten. Resultatet blir en flera tusen meter hög bergskedja – Anderna.

Måste förstå historien

För att kunna avgöra om berget i Forsmark är lämpligt för att härbärgera ett slutförvar för använt kärnbränsle måste vi förstå hur de globala processer som ständigt pågår i jordskorpan en gång bildade berget, samt hur detta därefter har påverkats av förändringar i såväl regional som i lokal skala.

Vi har redan konstaterat att det kretslopp som sträcker sig över de överlägset längsta tidsperspektiven är det geologiska kretsloppet, där bergarter bildas och så småningom eroderar ner för att slutligen bilda nya bergarter. Det rör sig om mycket långsamma förändringar som kan ta flera miljarder år i Sveriges kristallina berggrund.

Jordskorpan är inget sammanhängande skal utan består av ett antal delar, så kallade tektoniska plattor, som flyter på den underliggande manteln.

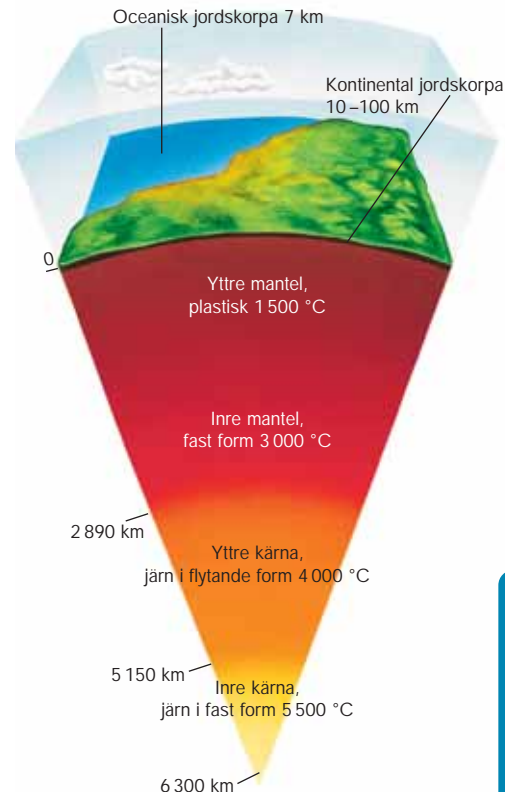
Jorden är uppbyggd av olika lager med sinsemellan olika egenskaper. Relativt sett är jordskorpan oerhört tunn. I Forsmark varierar den mellan 46 och 48 kilometer.

De tektoniska plattorna kan vara av två slag: kontinentala eller oceaniska. Kontinentala plattor består av lätta ljusa bergarter som främst innehåller kisel och aluminium, medan oceanbottenarna är sammansatta av mörkare tyngre bergarter som innehåller mycket järn och magnesium. De kontinentala plattorna är också betydligt tjockare än de oceaniska. En kontinental platta varierar mellan tio och 100 kilometer i tjocklek, medan en oceanisk platta bara är omkring sju kilometer tjock.

Världskartan ritas om

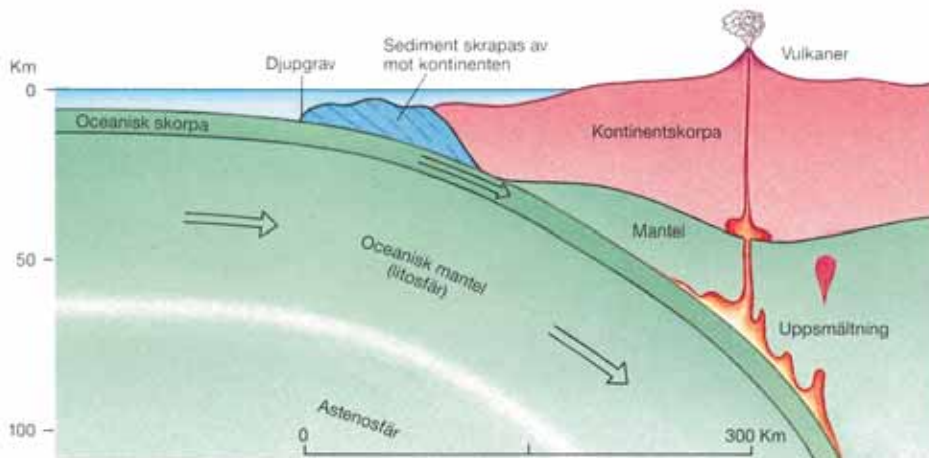
Att jordskorpan ständigt förändras och är i rörelse innebär naturligtvis att världskartan ändras i ett geologiskt tidsperspektiv. De platttektoniska rörelserna följer ett mönster. En kontinent spricker upp, varvid en ocean bildas mellan kontinentens delar genom oceanbottenspridning. Därefter byter rörelsen riktning och oceanbotten pressas ner längs kanterna av kontinenterna i subduktionszoner. Kontinenten sluts igen när all oceanbotten har förbrukats i subduktionszonerna. Förloppet kallas en platttektonisk cykel.

Hela cykeln tar ungefär 500 miljoner år. Senaste gången Atlanten började öppna sig var för ungefär 55 miljoner år sedan och vi befinner oss således fortfarande i spridningsfasen. Tidigare under historiens gång har till exempel berggrunden i norra Europa varit en del av superkontinenterna Rodinia och Pangea.



Vad har då de storskaliga geologiska processerna med Forsmark att göra? Jo, ganska mycket visar det sig. Historiskt sett har platttektoniken haft betydelse för den geologiska utvecklingen i Forsmark vid flera tillfällen.

Det som avgör om den svenska berggrunden är lämplig för ett slutförvar är hur stabil den är på lång sikt. Stabiliteten avgörs i sin tur av det platttektoniska läget. Berggrunden blir i princip mer stabil med färre vulkanutbrott och jordbävningar ju längre bort från en plattgräns man befinner sig. Den närmaste plattgränsen från Sverige räknat går rakt genom Island. Det är en så kallad spridningszon, där den euroasiatiska och den nordamerikanska plattan rör sig åt var sitt håll längs den mittatlantiska ryggen.



Vid en kollision mellan oceanisk och kontinental jordskorpa sjunker den tyngre oceaniska skorpan ned i manteln. Oceanisk skorpa blir sällan mer än 200 miljoner år, eftersom den hela tiden förbrukas respektive nybildas.

På flera ställen på jorden finns så kallade sköldområden. Det är kontinentala, centralt belägna urbergsområden inom en kontinentalplatta.

Det svenska urberget tillhör den fennoskandiska skölden, som sträcker sig från Kolahalvön i nordost till Skåne och Sydnorge i sydväst. Flera gånger har berggrunden veckats för att sedan erodera ner. Vid varje tillfälle reste sig höga bergskedjor.

Geologerna talar om olika tektoniska enheter i den fennoskandiska skölden. Dessa har bildats eller omvandlats kraftigt vid olika tidpunkter. Mycket förenklat kan man säga att kontinenten byggdes på från nordost mot sydväst, räknat från dagens väderstreck.

Ursprungligen fanns i nordost en gammal arkeisk (uråldig) kontinent, som bildades för över tre miljarder år sedan. När denna krockade med den utanförliggande oceanplattan för ungefär två miljarder år sedan uppstod en subduktionszon i havet utanför kontinenten. Längst upp i norr finns fortfarande rester av den arkeiska kontinenten. De allra äldsta bergarterna i Sverige är ungefär 2,8 miljarder år

gamla. Arkeisk berggrund finns också i Nordnorge, östra Finland och västra Ryssland.

Krock bildar bergskedja

Krocken mellan oceanplattan och den arkeiska kontinenten innebar att

den svekokarelska bergskedjan reste sig. Den svekokarelska bergskedjeveckningen var första steget i ”utbyggnaden” av den gamla arkeiska kontinenten. Samtidigt närmade sig en annan subduktionszon från väster. Mellan de två subduktionszonerna bildades en havsbassäng med ett öbågesystem. När öbågesystemet närmade sig kontinenten, kom de sediment som hade avsatts i havsbassängen att pressas ihop och omvandlas. Vulkanerna vid kontinentens rand gav upphov till såväl tjocka lager av aska som till intrusioner (inträngningar) av magma, som kom upp från manteln i jordskorpan svaghetszoner och sedan stelnade djupt nere i berggrunden eller i bergets sprickor.

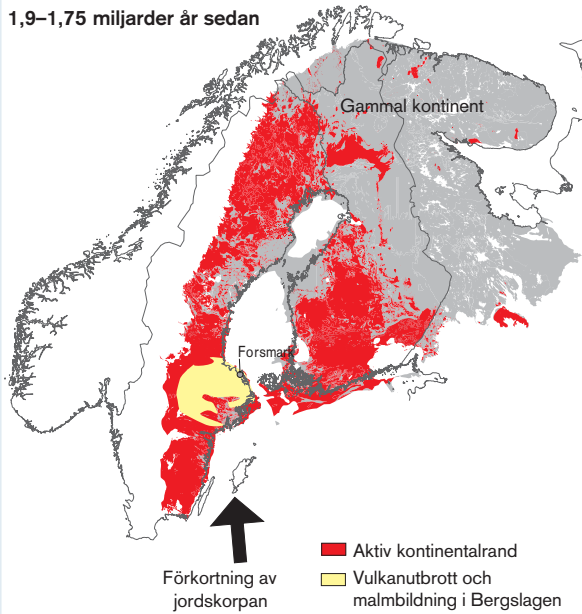
Deformation i band

Krocken mellan oceanplattan och den arkeiska kontinenten orsakade stora krafter i jordskorpan. Dessa påverkade, tillsammans med den höga temperaturen nere i jordskorpan, även berg-



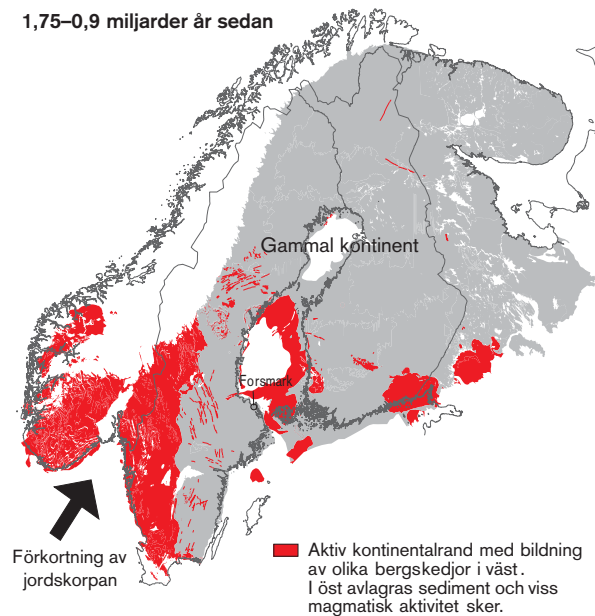
Exempel på olika strukturer vid plastisk deformation av berget. Bilden visar a) horisontell påverkan av berg som är utsatt för höggradig plastisk deformation, b) veckning, c) meta-morfos i Eckarfjärdszonen, d) mylonit i Eckarfjärdszonen.

1,9–1,75 miljarder år sedan



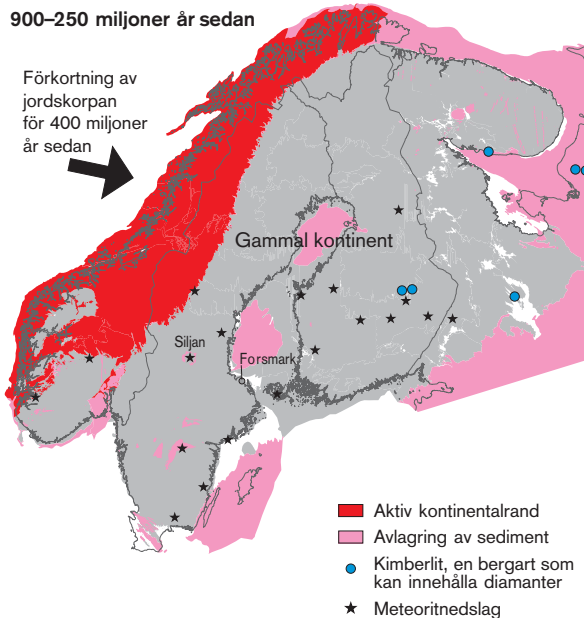
De äldsta bergarterna finns i nordost och kallas arkeiska. För mellan 1,9 och 1,8 miljarder år sedan bildades den svekoka-relska berggrunden i östra Sverige och Finland.

1,75–0,9 miljarder år sedan



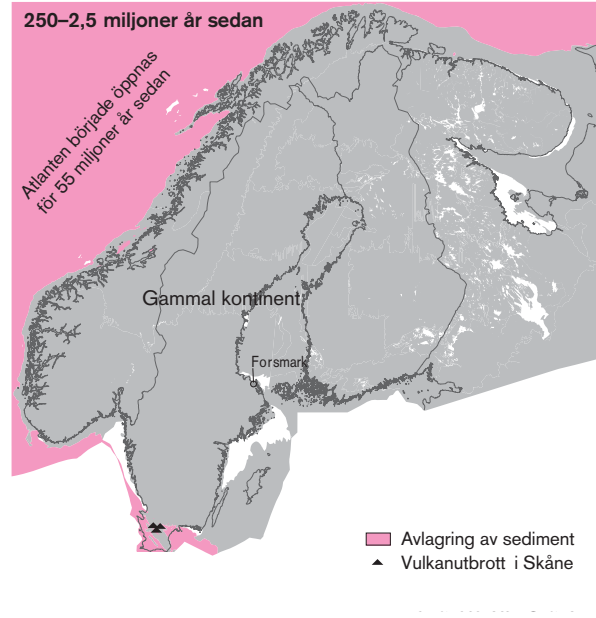
Kontinenten växte åt sydväst då ny berggrund bildades vid tre bergskedjeveckningar, den gotiska, den hallandiska och den svekonorvegiska.

900–250 miljoner år sedan



Fjällkedjan tillhör inte urberget, utan bildades i ett senare skede när flera kontinenter kolliderade och slogs samman till superkontinenten Pangea.

250–2,5 miljoner år sedan



Efter bildningen av fjällkedjan har det inte hänt så mycket med den svenska berggrunden. De geologiska processer som pågår nu är att Atlanten vidgar sig och att Alporna fortfarande reser sig.

arterna på djupet. Deformationerna koncentrerades i stora band längs vilka bergarternas struktur förändrades. Geologerna kallar fenomenet plastisk deformation. Så länge berget var varmt, det vill säga befann sig på stort djup i jordskorpan, var bergmassan i de plastiska deformationszonerna seg. Berget kunde röra sig utan att spricka.

Deformationszonen drogs först ut, för att sedan veckas. Platta mineral som glimmer omorienterades, medan andra mineral omfördelades inom bergarten. Mellan banden bildades linsformade områden, så kallade tektoniska linser, där berggrunden inte var lika deformerad. Tektoniska linser är således inget ovanligt fenomen i Uppland. Forsmarkslinsen är bara en av många.

Även berget i linsen påverkades av plastisk deformation, men alls inte i samma utsträckning. Detta kan man se genom att gränserna mellan den dominerande bergarten metagranit och andra bergarter är veckad och del av en storskalig veckformation. I den mindre skalan kan man också notera att bergarternas mineraler har orienterat sig åt samma håll.

Den plastiska deformationen har fått betydelse för hur vi modellerar bergets egenskaper i linsen. I och med att mineralen har en viss orientering kommer en del av bergets egenskaper att bli olika i olika riktningar. Man säger att förhållandena är anisotropa.

Lösningar bildar malm

En stor del av de malmtillgångar som finns i Norrland, Bergslagen och norra Uppland bildades under den svekokarelska bergskedjeveckningen. Det kunde antingen ske genom direkta utfällningar ur magman eller genom utfällningar på havsbotten från heta lösningar. I Forsmarks närhet finns



Metagranit med amfibolitgång.

Bergarter i Forsmark

Berg kan bildas på många olika sätt. Det går att bestämma bergets ålder med hjälp av så kallad radiometrisk datering. Metoden bygger på att en del grundämnen har instabila isotoper (olika antal neutroner i kärnan). Dessa sönderfaller med en viss hastighet till stabila isotoper av ett annat grundämne. Ett exempel på detta är när uran sönderfaller till bly.

Vissa mineral kan ta upp uranatomer i sin kristallstruktur när de bildas. Samtidigt stöter de bort bly. Genom att mäta koncentrationerna av den ursprungliga uran-isotopen och dotterisotopen av bly kan man också räkna ut åldern på mineralet.

I Forsmark har vi kunnat särskilja fyra olika bergartstyper på markytan. Bergarterna har bildats vid olika tillfällen under den svekokarelska bergskedjeveckningen. Indelningen har gjorts utifrån bergarternas ålder.

De äldsta bergarterna har vulkaniskt ursprung. De härstammar från den tidiga delen av den svekokarelska bergskedjeveckningen i samband med den kraftiga vulkaniska aktiviteten och är äldre än 1,89 miljarder år.

Nästa generation bestod av magmatiska djupbergarter. Det var magmor som under de följande 20 miljoner åren trängde upp och stelnade på mellan 20 och 25 kilometers djup och bildade bergarter med granitliknande sammansättning. Metagraniten, den dominerande bergarten i den tektoniska linsen, tillhör de yngsta bergarterna i denna grupp. Den har åldersbestämts till 1,87 miljarder år. Till gruppen hör också de något äldre bergarterna metatonalit, metagranodiorit och metagabbro.

Den tredje generationen bergarter består av så kallade gångbergarter. De bildades

när magma trängde upp och fyllde sprickor i jordskorpan. Gångbergarterna består av amfibolit, granodiorit och tonalit och är omkring 1,86 miljarder år gamla. Amfiboliten kan också förekomma fläckvis inom vissa områden av den tektoniska linsen.

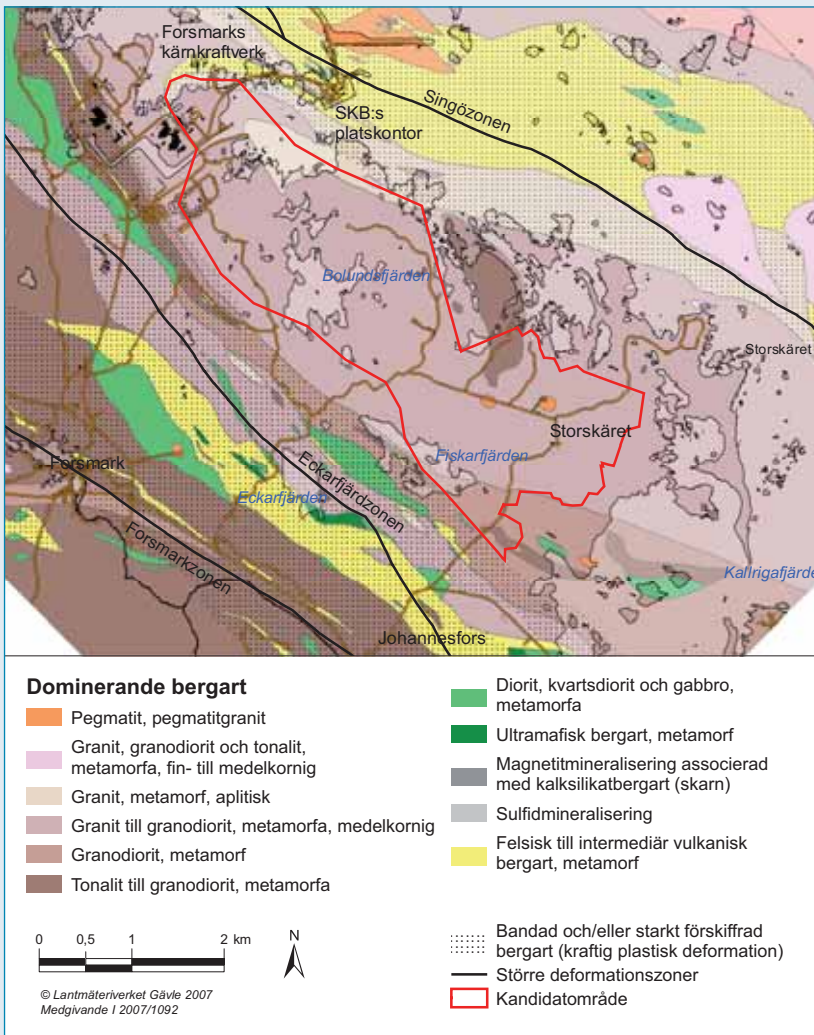
De yngsta bergarterna i Forsmark – den fjärde generationen – består av granit och bildades för mellan 1,86 och 1,85 miljarder år sedan. De förekommer både som gångbergarter och som intrusioner.

Kartan visar fördelningen av olika bergarter i Forsmarksområdet. Inom kandidatområdet dominerar en rödgrå metamorf (omvandlad) granit, så kallad metagranit. Mot sydost finns även metamorf tonalit och pegmatit. Små kroppar av amfibolit är vanliga. De är dock för små för att synas på kartan.

Utanför kandidatområdet är berggrunden inhomogen. Här finns förutom metamorf granit, granodiorit och tonalit även bergarter med vulkaniskt ursprung som ibland innehåller små järnmineraliseringar. Sydväst om kandidatområdet är mörka mafiska (kvartsfattiga) bergarter som metamorf diorit och gabbro samt ultramafit vanliga.

några mindre järnmalmfyndigheter, bland annat vid Norrskedika. Den mest kända – och för bygden mest betydelsefulla – mineralfyndigheten är den i Dannemora.

Ett av kriterierna för att en plats ska vara lämplig för ett slutförvar för använt kärnbränsle är att det inte finns några brytvärda mineraltillgångar där. Vid platsundersökningarna dokumenterade vi några järnoxidmineraliseringar sydväst om kandidatområdet. Fyndigheterna är emellertid för små för att de ska vara ekonomiskt lönsamma att bryta. Vi bedömer att så kommer att vara fallet även i framtiden. I övrigt innehåller inte området någon malm eller andra värdefulla mineraltillgångar.



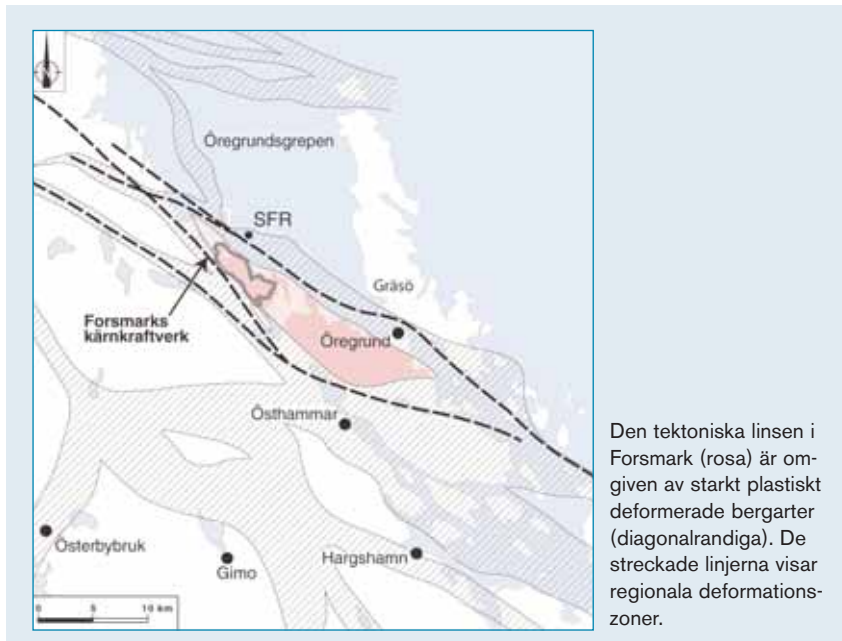
Berget svalnade långsamt

Efter den svekokarelska bergskedjeveckningen blev de geologiska förhållandena stabilare. Vulkanismen avtog och de höga bergen började långsamt erodera ner. Eftersom jordskorpan måste befinna sig i jämvikt med den underliggande magman lyftes hela berggrunden långsamt uppåt allt eftersom erosionen fortsatte och bergskedjans massa gradvis minskade. Fenomenet kallas isostasi.

Att jordskorpan lyftes uppåt medförde att temperaturen i berggrunden långsamt sjönk. För omkring 1,8 miljarder år sedan var den nere i 500 °C och för ungefär 1,7 miljarder år sedan hade den sjunkit ytterligare till under 300 °C.

Den lägre temperaturen innebar att bergets egenskaper ändrades. Från att ha varit segt och trögflytande blev det i stället sprött.

Berget i deformationszonerna runt den tektoniska linsen i Forsmark – och även berget i själva linsen – uppförde sig likadant. När temperaturen i bergmassan sjönk ändrades spänningsfördelningen och deformationen



Den tektoniska linsen i Forsmark (rosa) är omgiven av starkt plastiskt deformerade bergarter (diagonalrandiga). De streckade linjerna visar regionala deformationszoner.

där slutförvaret ska byggas, främst genomkorsas av tvärsgående branta zoner med riktningen nordost till sydväst.

Cirkulerande vätskor

I samband med att berget sprack upp kunde också varma vätskor cirkulera i sprickorna. Vätskorna löste ut olika ämnen från det omgivande berget och förde dem med sig. När trycket eller temperaturen förändrades kunde ämnena inte längre hållas i lösning. De fälldes ut och bildade sprickmineraller. Vanliga mineral i Forsmark är klorit, kalcit, adularia, laumontit, kvarts och epidot. I mindre omfattning träffade vi också på pyrit, hematit och olika typer av lermineral.

Mineralen har bildats under olika tidsperioder och under olika yttre omständigheter. Genom att tidsbestämma mineralen i sprickan kan vi ta reda på i samband med vilka geologiska händelser de bildats.

övergick från att ha varit plastisk till att bli spröd. Berget sprack upp i omgångar och på olika sätt, beroende på i vilken riktning de yttre krafterna verkade.

Branta strukturer först

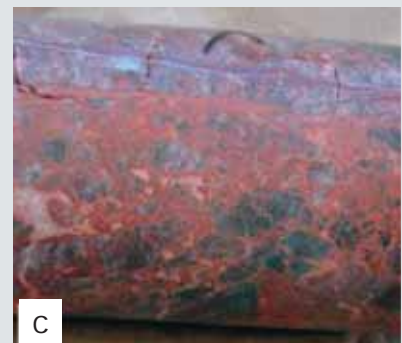
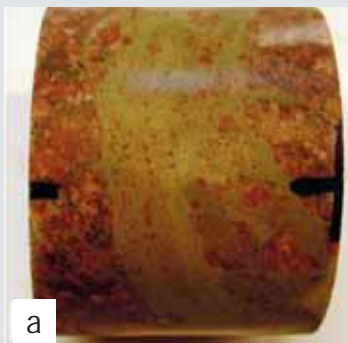
Den första generationens spröda strukturer uppstod i slutfasen av den

svekokarelska bergskedjeveckningen. Dessa är branta strukturer och följer i stort sett de plastiska zonernas riktning från nordväst till sydost.

När temperaturen sjönk ytterligare blev den spröda deformationen ännu mer märkbar. Även den tektoniska linsen sprack nu upp. I linsens sydöstra del bildades flacka deformationszoner, medan linsens nordvästra del,

Har sprickan öppnats?

Om sprickmineralen är betydligt yngre än sprickan är det ett tecken på att en läkt spricka först har öppnats



I Forsmark finns fyra generationer av sprickmineral. Bild a visar epidot från första generationen och bild b visar andra generationens mineral där en spricka fylld med adularia skärs av en spricka fylld med prehnit. Bild c visar andra generationens laumontit.

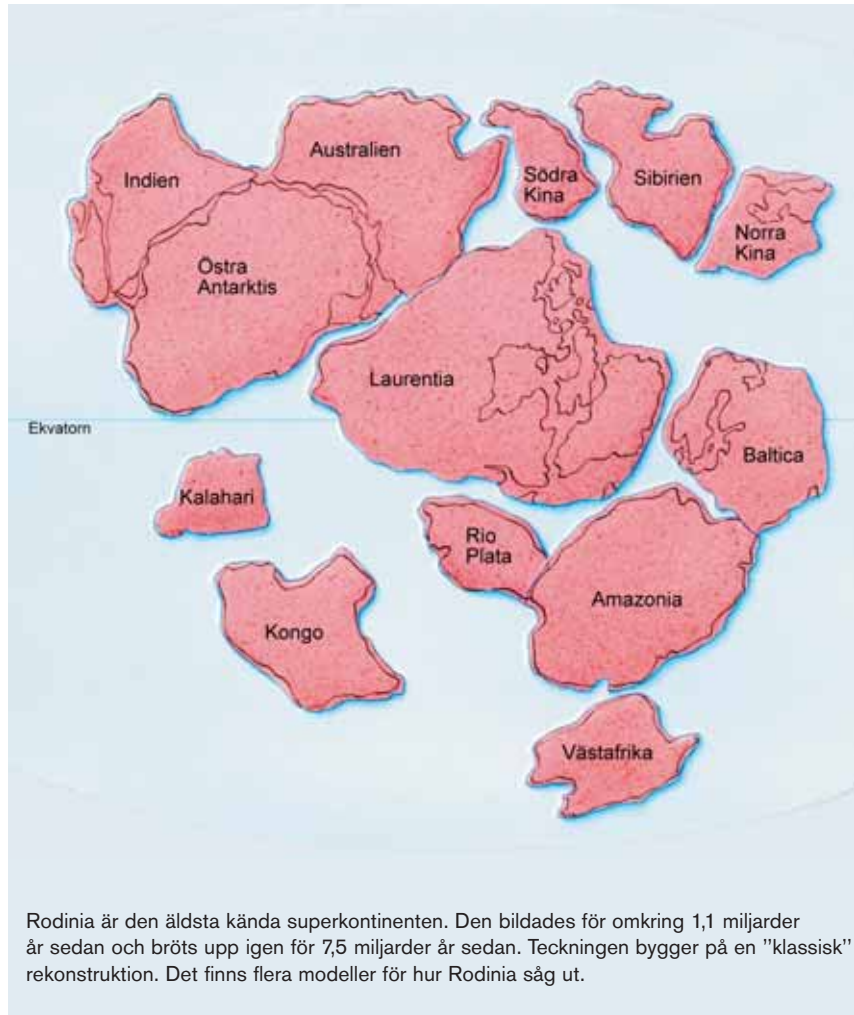
(reaktiverats), helt eller delvis spolats ren på gamla mineral och slutligen återigen läkt ihop genom att det nya mineralet fällts ut.

I Forsmark har vi funnit fyra olika generationer av sprickmineral. De bildades både vid bergskedjeveckningar (svokokarelska, gotiska, hallandiska svekonorvegiska och kaledonska) samt som ett resultat av sedimentavlagringar.

Veckningar i väst

I västra Sverige finns sydvästkandinaviska tektoniska enheten. Det är den mest komplicerade delen av urberget. Den bildades vid tre stora bergskedjeveckningar: den gotiska för 1,70 till 1,55 miljarder år sedan, den hallandiska för 1,50 till 1,40 miljarder år sedan och den svekonorvegiska för 1,10 till 0,90 miljarder år sedan.

Vid den svekonorvegiska bergskedjeveckningen var det kontinentala plattor som krockade och bildade superkontinenten Rodinia. Både Nordamerika och Grönland (den dåtida kontinenten Laurentia) var inblandade i krocken som gav upphov till den svekonorvegiska bergs-



Rodinia är den äldsta kända superkontinenten. Den bildades för omkring 1,1 miljarder år sedan och bröts upp igen för 7,5 miljarder år sedan. Teckningen bygger på en "klassisk" rekonstruktion. Det finns flera modeller för hur Rodinia såg ut.

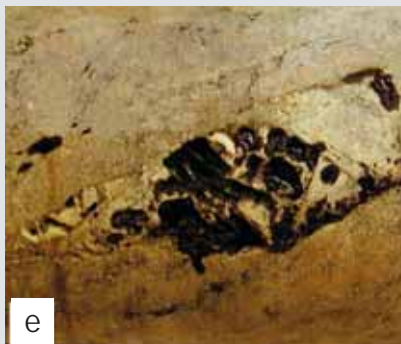


Bild d visar kvarts och pyrit från tredje generationen. Bild e visar tredje generationens asphaltit och kalcit. Bild f visar en öppen spricka med ett tunt lager av kalcit från den fjärde generationen.

kedjeveckningen. Resultatet blev en mäktig bergskedja, hög som Himalaya.

Trycket från väster under denna period gjorde att de nordostliga och ostnordostliga deformationszonerna i Forsmark, på samma sätt som vid den gotiska bergskedjeveckningen,

aktiverades på nytt och därefter fyll-
des igen med andra nybildade mineral. Detta vet vi genom att åldern på vissa sprickmineral har bestämts till cirka 1,07 miljarder år.

Av de höga bergskedjorna finns i dag ingenting kvar. De har nötts ned

av vittring och erosion. En flack land-
yta, ett peneplan, är varje bergskedjas slutstadium.

Att en bergskedja eroderar ned betyder att mängder av material transporteras och belastar jordskorpan någon annanstans. Så länge ett land-



I berget kan vi se resterna av forna tiders havslevande organismer. Det organiska materialet förvandlas långsamt till olja och pressas ned i berget.

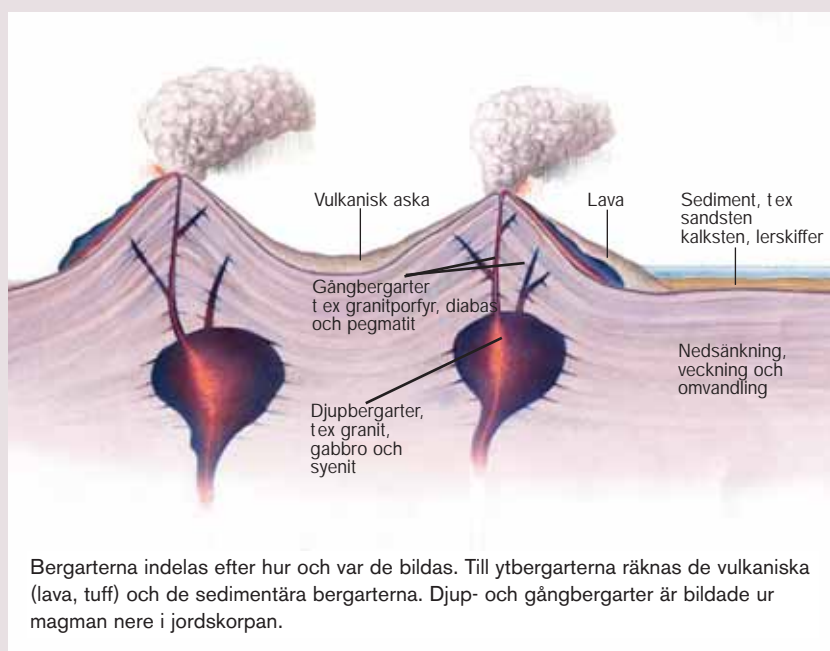
Den bergyta vi kan se vid markytan i dag är i stort sett densamma som för 600 – 500 miljoner år sedan.

Bergartscykeln

Materien i bergarterna rör sig i ett evigt kretslopp. Nere i jordskorpan verkar de endogena (inre) processerna, och uppe på jordytan verkar de exogena (yttre) processerna. Genom erosion, sedimentation, metamorfos, uppsmältning, magmatism och vulkanism kan en bergart övergå i en annan.

Sedimentära och magmatiska bergarter kan omvandlas till metamorfa vid hög temperatur och högt tryck. Blir temperaturen tillräckligt hög kan dessa smälta så att magma bildas. Magman kan sedan kristallisera till en ny magmatisk bergart.

När en bergart blottläggs vid markytan utsätts den för erosion. Det eroderade materialet avsätts och kan ge upphov till nya sedimentära bergarter.



Bergarterna indelas efter hur och var de bildas. Till ytbergarterna räknas de vulkaniska (lava, tuff) och de sedimentära bergarterna. Djup- och gångbergarter är bildade ur magman nere i jordskorpan.

område ligger ovanför havsytans nivå utsätts det för nedbrytande krafter genom mekanisk, kemisk och biologisk påverkan. Inlandsis, vatten och vind transporterar sedan det lösgjorda materialet tills det sedimenterar i havet eller i botten på någon sjö. Under den tid sedimenten ligger under havsytans nivå utsätts de inte för någon storskalig erosion och kan därför med tiden omvandlas till sedimentära bergarter.

Periodisk belastning

Tiden efter den svekonorvegiska bergskedjeveckningen fram till våra dagar innebar att jordskorpan i Forsmark utsätts för ett antal periodiska cykler av belastning och avlastning. Den första inträffade när den svekonorvegiska bergskedjan började erodera ner. Erosionsprodukterna transporterades då till mera låglänta områden där de bildade sedimentära avlagringar. Dessa kan ha varit upp till åtta kilometer tjocka på vissa platser.

Avlagringarna kom snart att täcka stora delar av sydöstra Sverige och därmed även Forsmark. Med tiden packades de ihop och det ökade trycket medförde att det bildades sedimentära bergarter ovanpå den gamla svekofenniska berggrunden.

Så småningom steg landet åter ur havet. För 600 miljoner år sedan hade även de sedimentära bergarterna eroderat bort och blottade den kraftigt eroderade svekofenniska berggrunden. Den berggrund vi ser vid markytan i dag är i stort sett samma berg som fanns vid markytan för 600–500 miljoner år sedan.

Samtidigt sprack Rodinias jordskorpa mellan Laurentia och Baltica (som Forsmark tillhörde) igen. Det hav som bildades mellan de två kontinentalplattorna kallas Iapetushavet och var en dåtida motsvarighet till dagens Atlanten.

En annan stor förändring vid denna tid var att livet tog fart på allvar. Koraller, snäckor, primitiva bläck-

fiskar och musslor intog haven med början för ungefär 540 miljoner år sedan. När dessa dog och föll ned på havsbotten bildades tjocka kalkstens- och skifferavlagringar. Urberget över Forsmark täcktes åter. Delar av det organiska materialet förvandlades långsamt till olja som pressades ner i bergets sprickor. Vid platsundersökningen såg vi spår av detta i kärnborrhål fem och sex. Trögflytande bitumen, så kallad bergtjära, påträffades i sprickorna inom olika borrhintervall i de översta 150 metrarna av berget.

Fjällkedjan första steget

Under de geologiska tidsperioderna kambrium och ordovicium, för mellan 510 och 400 miljoner år sedan, närmade sig Laurentia och Baltica (fennoskandiska skölden) återigen varandra och Iapetushavet stängdes. Långt ute i Iapetushavet började oceanskorpan att dras ned i subduk-

tionszoner. Så småningom kolliderade Baltica och Laurentia. Det var det första steget att bilda en ny superkontinent – Pangea.

Vid kollisionen pressades Balticas randzon ner under Laurentias. Avsättningar från Iapetushavets botten sköts upp och in över Baltica i stora berggrundssjök, så kallade skollor. Dessa transporterades hundratals kilometer in över kontinenten och hamnade i lager ovanpå varandra. Fjällkedjan, eller Kaledoniderna som den också kallas, reste sig. Sedan fjällkedjan bildades har inga fler

bergskedjeveckningar ägt rum i den svenska berggrunden. Den påverkan som har skett har i stället berott på de tidigare nämnda cyklerna av belastningar och avlastningar.

Kaledoniderna var till en början tre till fyra gånger högre än i dag. Men även den utsattes för vittring och erosion. Än en gång svämmade sedimentationsprodukter över urberget i Forsmark och bildade ungefär två kilometer tjocka sedimentlager, men så småningom eroderades även de bort. Detta skedde sannolikt under den geologiska tidsperioden

tertiär för 65–2,5 miljoner år sedan. Rester av kalksten från Kaledoniderna finns dock på Östersjöns botten, bland annat i Gävlebukten nordost om Forsmark.

Alperna och Atlanten i dag

På lite längre avstånd – i södra Europa – pågick (och pågår fortfarande) en annan geologisk process. Den afrikanska plattan pressas norrut mot den euroasiatiska plattan, med Alperna som resultat. Kollisionen började för ungefär 100 miljoner år sedan. Det finns inga tecken på att denna har aktiverat några sprickzoner i Forsmark.

Vi ser heller inga effekter på sprickorna i Forsmark av att Atlanten började öppna sig för 55 miljoner år sedan eller av det faktum att den fortfarande vidgar sig.

De periodiska cyklerna av belastning och avlastning beror inte bara på om berggrunden är täckt med sediment eller inte. Även klimatförändringar kan ge upphov till belastningar och avlastningar.

Data från djuphavssediment visar att under de senaste 800 000 åren har ett mönster av glaciationscykler upprepat sig. Från förhållanden som liknar dagens växer inlandsisar till, drar sig delvis tillbaka och växer till igen för att slutligen nå en maximal storlek. Då slår klimatet hastigt om och isen smälter mycket fort.

Mönster av nedisningar

Kallperioderna med successivt större och större istäcken kallas glacialer och de varmare perioderna mellan dem interglacialer. En glaciationscykel består av en glacial och en interglacial och varar mellan 100 000 och 150 000 år. Den senaste istiden började för 115 000 år sedan och isen försvann från Forsmark för omkring 11 000 år sedan.



Pangea bildades under den geologiska tidsperioden perm för 290–245 miljoner år sedan. Superkontinenten sträckte sig som ett enormt C från pol till pol med ekvatorn i mitten. För omkring 200 miljoner år sedan började Pangea spricka upp.



Under de senaste 800 000 åren har Skandinavien täckts av ett antal inlandsisar med flera kilometer tjock is. I dag finns inlandsisar bara på Grönland och Antarktis. Bilden visar den grönländska isen.

Under en glaciation kan istäcket bli flera kilometer tjockt. Nedtryckningen av berggrunden under förra istiden uppskattas till som mest 800 meter. Så länge berget är täckt med is hindrar detta rörelser i berget. När isen smälter lättar trycket och jordskorpan höjer sig snabbt igen för att återta jämvikt. I kombination med rörelsen av de tektoniska plattorna kan krafterna i berget omfördelas och ge upphov till stora postglaciala jordskalv. Jordskalven kan i sin tur leda till att sprickor i berget reaktiveras.

Istid påverkar sprickor

Vi har inte funnit några tecken på att det har inträffat postglaciala jordskalv

i Forsmark. Däremot kan vi se hur istiden har påverkat sprickorna. Sprickor som tidigare varit läkta, speciellt ytliga flacka sådana, reaktiverades och kan åter leda vatten. Detta är vanligt ner till 200 meters djup – ännu djupare längs vissa flacka zoner.

Sediment i sprickor

När isen försvann letade sig stora mängder vatten, som var uppblandat med slam och sediment, ner i sprickorna. Det höga vattentrycket skapade en miljö där sprickorna kunde fyllas med sediment. Sedimentfyllda sprickor förekommer nära ytan ner till ungefär 40 meters djup. Därefter avtar antalet med djupet.



Vid den senaste nedisningen var istäcket som störst för 22 000 år sedan. Den blå streckade linjen visar hur långt isen nått som mest under tidigare nedisningar.



Michael Stephens vid Sveriges geologiska undersökning (SGU) har haft ansvar för den geologiska modelleringen i Forsmark.

Att beskriva berget

Bilden av berget i Forsmark kan aldrig bli helt sann. Däremot måste den vara tillräckligt trovärdig för att vi ska kunna avgöra om Forsmark är en lämplig plats för slutförvaret för använt kärnbränsle.

Ordet modell betyder avbildning. Och det är just vad det är – en förenklad bild av ett verkligt system. Hur en modell är konstruerad bestäms både av vårt syfte med modellen och av vilken kunskap vi har om

det system som ska modelleras. En modell kan därför aldrig vara ”sann” eller ”korrekt”. Den ska bara vara ”tillräckligt bra” för att uppfylla sitt syfte. Målet för en modellör är att använda sig av en så enkel modell

som möjligt, utan att ge avkall på resultatets kvalitet.

Berggrundsmodellerna består av flera delar. En del beskriver deformationszonerna, en annan del beskriver bergarterna. Dessa modeller är deter-

ministiska, dvs de beskriver (så långt osäkerheterna tillåter) läget, formen och egenskaperna för de modellerade strukturerna och bergartskropparna.

Andra typer av modeller kan emellertid inte beskrivas på samma sätt, utan måste kunna hantera slumpmässighet eller förändring över tid.

Det är alltid viktigt att noga kontrollera att modellens kvalitet är tillräcklig för att den ska kunna uppfylla sitt syfte. Detta görs vid kalibreringen, där man på olika vis undersöker om modellen och resultaten håller tillräckligt hög kvalitet. En grundläggande del av kalibreringen innebär att man jämför modellens beteende med det verkliga systemets beteende. Dessa måste uppvisa tillräcklig likhet för att man ska kunna lita på modellens resultat. En annan viktig del av kalibreringsarbetet innebär att kontrollera att de olika datamängder som används som indata till modellen är trovärdiga. Förser man en modell med indata av låg kvalitet kommer resultatet att överensstämma dåligt med verkligheten.

Sammanför resultaten

Vid platsmodelleringen sammanfattas resultaten för varje ämnesområde (geologi, bergmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, hydrogeokemi, bergets transportegenskaper och ytnära egenskaper) i en för ämnesområdet speciellt anpassad modell. Varje ämnesmodell består av två delar; ett beskrivande dokument och en digital geometrisk representation av platsen med tillhörande databaser för mätvärden och annan information. Platsbeskrivningen är sedan syntesen av de olika ämnesmodellerna. Datormodellerna beskriver berggrundens geometrier och egenskaper. De utgör underlag för säkerhetsanalys och projektering.

Som vi redan konstaterat är det den geologiska modellen som är utgångs-

punkten när vi beskriver berget. Att modellera berget innebär i korthet att data och tolkningar från hur berget ser ut på ytan ska kombineras med data och tolkningar av hur det ser ut på djupet.

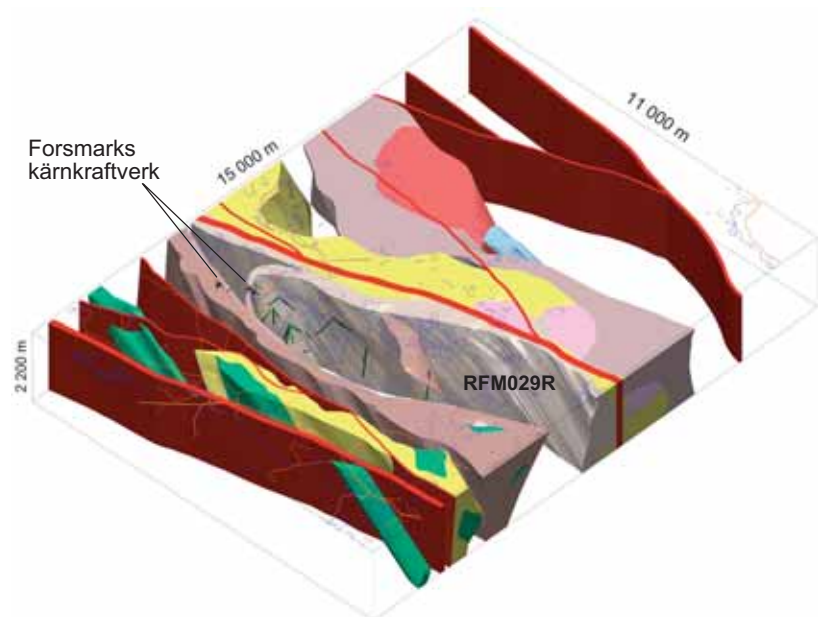
Förenklad bild av berget

Vi tillverkar helt enkelt en förenklad bild av berggrunden, där de ingående elementen beskrivs matematiskt med utgångspunkt från sin utsträckning i rummet. Elementen kan således vara dimensionslösa (punkter), endimensionella (kurvor), tvådimensionella (ytor) eller tredimensionella (volymer). I de två senare fallen talar man om 2D-modellering respektive 3D-modellering. En berggrundskarta som visar olika bergarter vid markytan är till exempel en 2D-modell av berget.

De datorbaserade beräknings- och presentationshjälpmedel modellören

använder för att ta fram sina modeller med kallas modellverktyg.

SKB har tagit fram ett eget verktyg för att visa de olika geometriska elementen i berget. Verktyget kallas RVS (Rock Visualizing System) och hanterar bland annat geometrier för deformationszoner, förkastningar, sprickor och bergenheter. RVS kan också användas för att få en bild av fördelningen av jordarter, markytor och vattenytor – mer om detta i nästa del. RVS hämtar data i SKB:s databas Sicada, där data från platsundersökningen lagrats. Grundtanken med RVS är att verktyget ska kunna hämta stora mängder geografiskt relaterade data från Sicada och snabbt visualisera dessa på det sätt som modellören bestämmer. Modellören kan också välja skala. Skalan var ursprungligen regional och omfattade det område som visas på kartan på sidan 15. Vid analysarbetet har vi under modelleringens gång gradvis minskat modell-



En tredimensionell beskrivning av det regionala modellområdet visar hur de olika bergenheter ser ut och var i berget de finns.

området. Vi arbetar nu med ett lokalt modellområde, som omfattar den bergvolym där slutförvaret ska byggas och dess närmaste omgivning.

Tre delar i geomodellen

Den geologiska modell som tagits fram vid analysarbetet består av tre olika delar: en delmodell för bergets olika enheter, en för deformationszonerna och slutligen en som beskriver nätverket av sprickor i berget mellan deformationszonerna. Angreppssättet är olika för de olika modellerna. Bergenheterna och deformationszonerna modelleras deterministiskt, medan spricknätverket mellan zonerna modelleras stokastiskt.

I den geologiska modellen måste vi också beskriva själva berget. Grunden för detta är att dela in berget i bergenheter. Med en bergenhet menar vi en bergvolym där de geologiska egenskaperna liknar varandra. Sammansättningen av bergarter och i någon mån även mineralornens storlek hos den dominerande bergarten är grunden för indelningen. Vi har också tagit hänsyn till hur likformig berggrunden är samt på vilket sätt och i vilken utsträckning som den har deformerats av olika krafter.

Inom det regionala modellområdet har vi funnit 38 olika bergenheter. De flesta av dessa är belägna utanför kandidatområdet.

Slutförvar i två bergenheter

Tittar vi närmare på den bergvolym i vilket slutförvaret eventuellt ska byggas, finns där bara två enheter: bergenhet RFM029 och bergenhet RFM045. Av dessa är RFM029 den största. Med hjälp av data från mark- och flygbaserade undersökningar (bland annat berggrundsgeologisk kartering och magnetiska mätningar), berggrundskartor, 21 stycken kärn-

borrhål och 33 stycken hammarborrhål har vi konstruerat en detaljerad tredimensionell karta av de två bergenheternas rumsliga utbredning och studerat hur bergarter och andra egenskaper varierar inom respektive enhet.

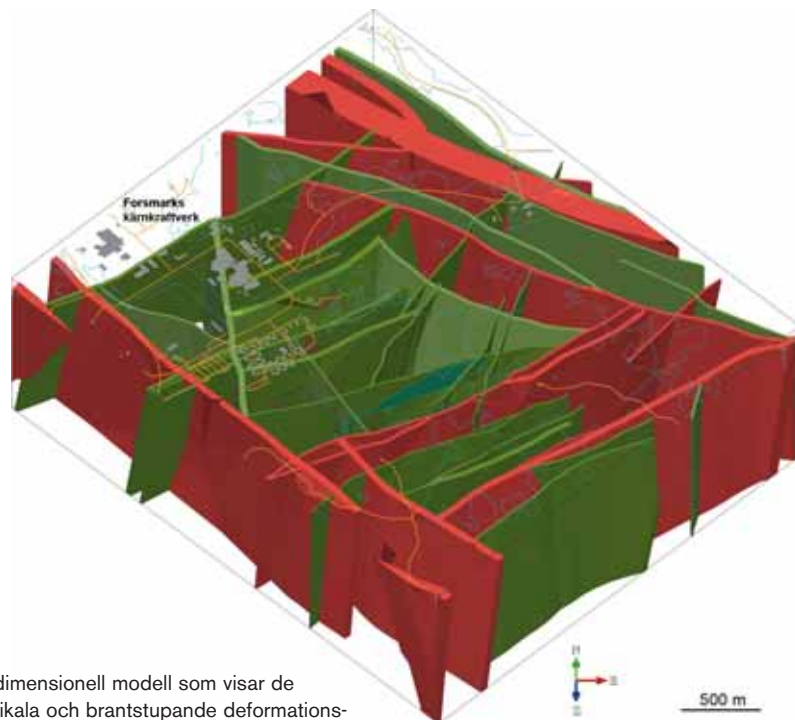
Deformerat berg förändrat

Deformationszoner är zoner i berget, där bergets struktur och egenskaper förändrats. Det kan röra sig om regelrätta sprickor (spröda deformationszoner) men det kan också innebära zoner där berget har skjuvats (plastiska deformationszoner) eller påverkats av en kombination av plastisk och spröd deformation. I den lokala geologiska modellen av det prioriterade området ingår 60 deformationszoner. Majoriteten av dessa har identifierats med stor säkerhet.

Det finns både branta och flacka deformationszoner. De branta plastiskt-spröda zonerna finns huvudsakligen längs den tektoniska linsens kanter och går för det mesta i riktning nordväst till sydost. Tvärs över linsen finns ytterligare en uppsättning branta deformationszoner som bildats senare genom spröd deformation. Merparten av de flacka zonerna finns utanför det lokala modellområdet i kandidatområdets sydöstra del. Liksom de tvärgående branta zonerna har de flacka zonerna bildats genom spröd deformation.

Hanteras statistiskt

Vi kan inte identifiera och karakterisera alla strukturer som är kortare än 1 000 meter. Det skulle kräva ett oerhört stort antal borrhål. I stället har



Tredimensionell modell som visar de vertikala och brantstupande deformationszonerna inom det prioriterade området för ett eventuellt slutförvar i Forsmark. De rödmarkerade zonerna är längre än tre kilometer och de grönmarkerade zonerna är mindre zoner som är kortare än tre kilometer.

vi hanterat dem statistiskt. Det gäller hur uppsprucken bergmassan är, sprickornas längd och orientering samt vilka egenskaper de i övrigt har.

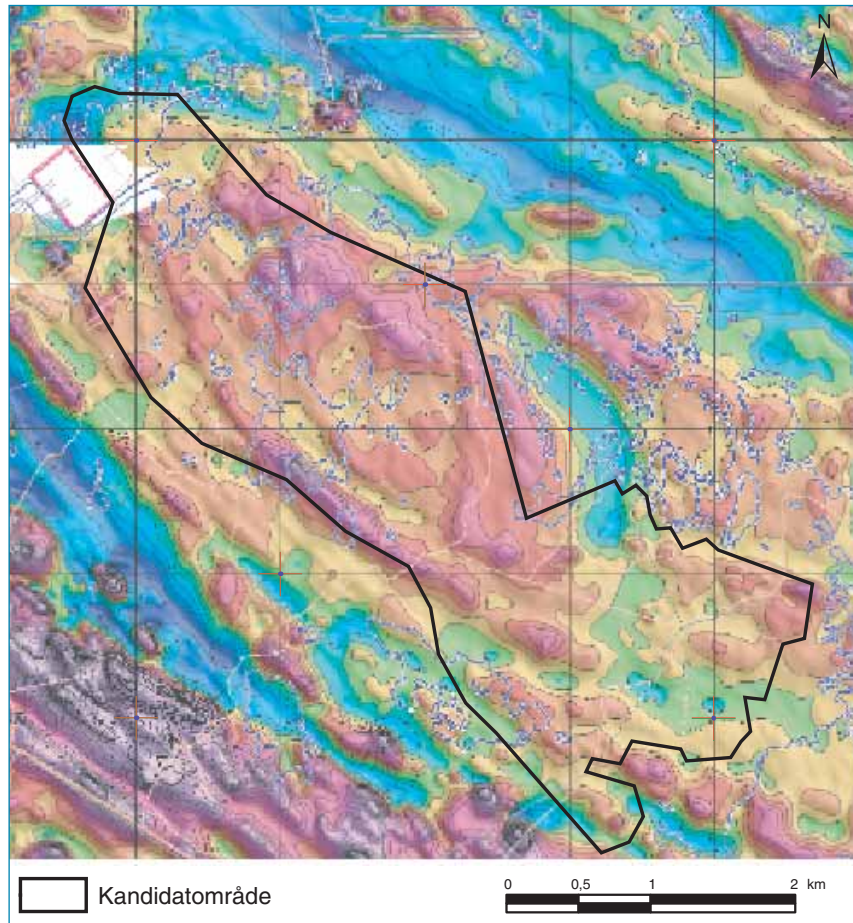
Modellverktyget vi har använt är en så kallad geologisk DFN-modell (spricknätsmodell). Förkortningen DFN står för Discrete Fracture Network. Slutprodukten från modelleringsarbetet är en statistisk beskrivning av sprickorna i berget. Beskrivningen kan sedan användas för andra ändamål.

Sprickfrekvensen varierar

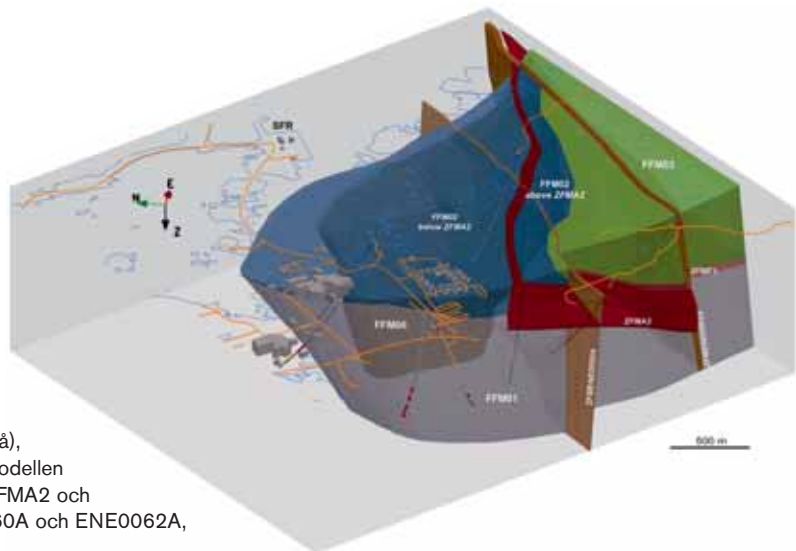
Redan i början av modelleringsarbetet såg vi att sprickfrekvensen varierade i olika delar av kandidatområdet. Skillnaderna visade på behovet att dela upp bergvolymen i olika delvolym för att bättre kunna bearbeta geologiska och även hydrogeologiska data.

Inom och direkt utanför kandidatområdet har vi identifierat sex olika sprickdomäner. Indelningen har gjorts utifrån hur uppsprucket berget är och vilka geologiska egenskaper det har. Tre av domänerna (FFM01, FFM02 och FFM06) ligger inom det tilltänkta försvarsområdet i den nordvästra delen av kandidatområdet och måste därför ägnas särskild uppmärksamhet vid den geologiska modelleringen.

Vi har modellerat varje domän för sig. Resultaten visar att egenskaperna hos den ytliga domänen FFM02 skiljer



Variationer i det jordmagnetiska fältet uppmätta från helikopter. Blå färger visar låga värden och röda färger höga värden. Variationerna beror på innehållet av magnetiska mineraler (främst magnetit) i berggrunden. Resultaten kan exempelvis användas för att studera olika bergarters utbredning och var sprickzoner finns.



Tredimensionell modell av de olika sprickdomänerna, sedd mot ostnordost. Sprickdomänerna är FFM01 (grå), FFM02 (blå), FFM03 (grön) och FFM06 (mörkgrå). Modellen visar också de flacka subhorisontella sprickzonerna ZFMA2 och ZFM1 samt de branta deformationszonerna ENE0060A och ENE0062A, som båda går tvärs över den tektoniska linsen.



Anders Ullberg, Göran Nilsson, Kaj Ahlbom och Assen Simeonov studerar borrhållarna från borrhål KFM08D. Detta är det sista kärnborrhålet som borrades i den tektoniska linsen. Borrhållarna har en mycket låg sprickfrekvens på djupet, vilket gjorde att vi kunde ta upp dem i tremeterslängder. Det är den maximala längden som rent tekniskt går att ta upp.

sig från de övriga, som alla är belägna djupare ner i berget. FFM02 är betydligt mera uppsrucken.

Totalbild av berget

De tre olika delarna har slutligen vävts ihop till en totalbild av berget, där bergets sammansättning, deformationszoner och spricknätverk ingår. Det är denna tolkning som sedan har legat till grund för modelleringen av de övriga ämnesområdena.

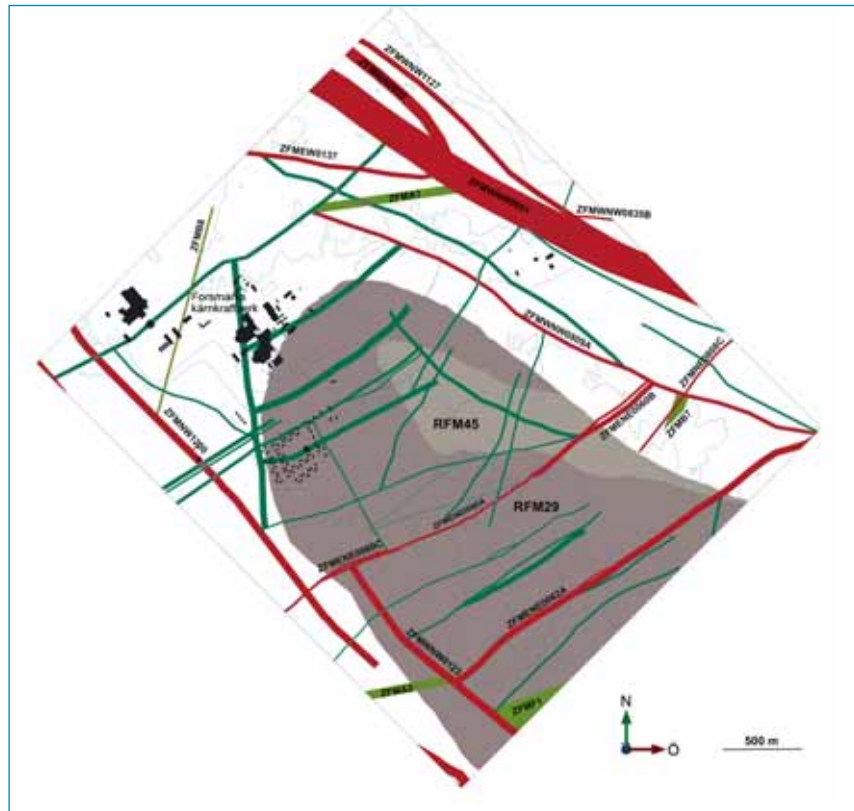
Hur trovärdig är då bilden av berget i Forsmark? I slutet av platsundersökningen borrades ett sista kärnborrhål – borrhål 8D – precis genom gränsen mellan bergenheterna RFM029 och RFM045 i det aktuella området. Modelleringen var då i sitt slutstadium och vi fick ett ypperligt tillfälle att kontrollera hur bra modellen stämmer med verkligheten.

Stämmer över förväntan

När vi undersökte borrhänskan och borrhålsväggen kunde vi konstatera att modellen stämmer över förväntan. Gränsen mellan de två bergenheterna RFM029 och RFM045 låg bara 30 meter ifrån det djup de teoretiska beräkningarna visade. Av de tolv möjliga deformationszoner, som tolkningen av data från borrhålet visade, hade nio modellerats deterministiskt. Hos sex zoner fick vi modifiera lutningen något, mellan en och tio grader. Det fanns ingen zon inne i den bergvolym där förvaret ska byggas som hade en längd över 3 000 meter. Vi kunde också konstatera att de sprickor och spricknätverk som förekom var ihopläkta och att inget vatten rann i dem, precis som vi förutsatt i modellen.

Storlek och riktning viktig

Bergspänningarnas storlek och riktning var en av de viktiga frågorna



Vy från ovan över en integrerad geologisk modell för bergenheter och deformationszoner för ett tvärsnitt på 500 meters djup.

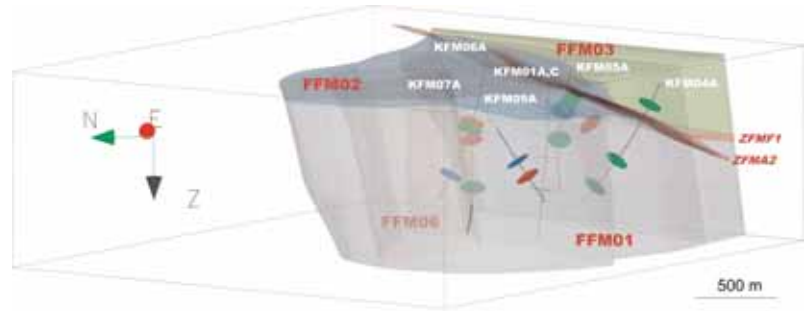
som skulle besvaras under platsundersökningarna, eftersom dessa i kombination med bergets hållfasthet kan påverka förutsättningarna för att bygga anläggningen. Alla kristallina bergarter i den fennoskandiska urbergsskölden har ungefär samma deformationsegenskaper för de storskaliga krafter som verkar i jordskorpan på grund av plattektoniska rörelser. I homogena områden, som till exempel den tektoniska linsen i Forsmark, kan man därför förvänta sig att bergspänningsnivåerna är ungefär lika stora på större djup (några kilometer) var man än är inom urbergsskölden. Sprickfrekvensen och sprickornas orientering i berget påverkar hur den uppsruckna delen av berget har kunnat deformeras och därmed hur de tektoniska spänningarna avlastas lokalt. Ett berg med få

sprickor bär mer spänningar än ett uppsrucket berg. Detta är även intressant mot markytan, där man ofta finner en ökande sprickfrekvens på grund av att även ytliga processer, exempelvis frostsprängning, kan ha påverkat sprickfrekvensen. Detta medför att spänningarna minskar mot bergytan. När vi undersöker spänningar i borrhål från markytan brukar vi prata om gradienten, dvs hur spänningarna ökar mot djupet.

Relativt höga spänningar

Tidigare erfarenheter från Forsmark har indikerat relativt höga spänningsnivåer, dock utan att det erfarits stabilitetsproblem på grund av spänningsinducerade brott i tunnlarna. Våra undersökningar har bekräftat att

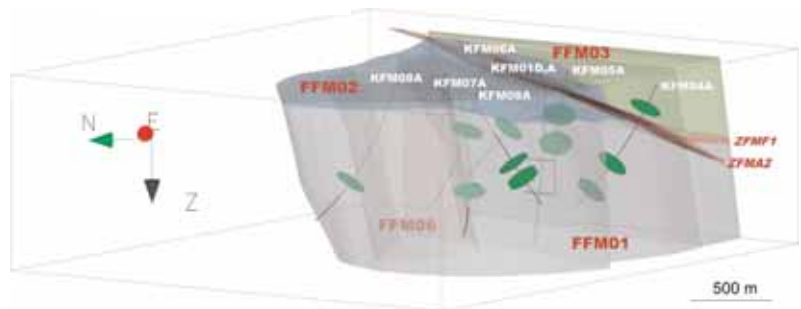
spänningsnivåerna i Forsmark är relativt höga redan vid djup under 100 meter. Den största horisontal-spänningen är cirka 20 MPa. Det motsvarar samma spänning som vikten av en bergpelare med ytan en kvadratmeter, och höjden cirka 750 meter. Detta bedöms bero på det relativt sprickfattiga berget, och att de dominerande sprickgrupperna är så orienterade att de troligen inte medgett nämnvärda deformationer i markytan som kan orsaka spänningsavlastning. På 500 meters djup beräknas största horisontella spänningen till cirka 41 MPa. Motsvarande värde för den minsta horisontella spänningen beräknades vara cirka 23 MPa. Spänningsgradienten under 100 meters djup är liten, jämfört med erfarenheter från andra platser i Sverige. Földaktligen är gradienten i berggrundens övre del större än normalt, eftersom bergspänningarna är noll nära markytan.



Enaxlig hållfasthet (MPa)



Mätpunkter för enaxliga hållfasthetstester.



De direkta mätningarna av bergspänningarna kompletterades med indirekta observationer. Bilden visar mätpunkterna för dessa.

Två olika metoder

Vi har använt två olika metoder för att mäta bergspänningarna, överborrning och hydraulisk spräckning. Ingen av dem har fungerat perfekt under 400 meters djup, men ger tillsammans en tämligen enhetlig bild. Dessutom har vi genomfört geofysiska mätningar som detaljerat registrerar borrhålens form (så kallad Acoustic televiewer). På ett fåtal ställen i borrhålen förekommer utfall av bergfragment, vilket indikerar spänningsinducerade brott. Utfallen förekommer inte systematiskt i borrhålen utan finns främst i avslutning till naturliga sprickor, som genomborrats där små flisor ramlat ut.

Därmed är det möjligt att lägga fast en övre gräns för bergspänningarna ner till 1 000 meters djup, eftersom vi vet att det inte är så höga som skulle ha krävts för systematiska bergutfall. Bergutfallen ger dessutom en mycket konsistent bild av spänningsorien-

teringen, som väl stämmer överens med den orientering som bestämts med hjälp av överborrningsmetoden.

Den bergmekaniska modelleringen i platsbeskrivningen bygger, som tidigare nämnts, på den geologiska modellen av bergmassans, deformationszonernas och sprickdomänernas egenskaper. En annan viktig komponent i modellen är hur bergspänningarna fördelar sig i bergvolymen.

Indata från laboratorium och fält

Indata till modellen kommer både från mätningar av bergspänningar och från hållfasthetsanalyser. Under de inledande platsundersökningarna mätte vi bergspänningarna och tog prover på borrhålen för att bestämma hållfastheten och andra parametrar på olika djup: 300 meter, 500 meter och 700 meter. Syftet var att få en allmän bild av hur spännings-

tillståndet och egenskaperna varierar. Undersökningarna koncentrerades under platsundersökningens avslutande fas till 400–500 meters djup i sprickdomänerna FFM01 och FFM06.

För att få en så fullständig bild som möjligt av spänningsstillståndet i berget har vi kombinerat de direkta mätningarna i borrhålen med indirekta observationer. Vi har således också studerat bergutfall från borrhålens väggar, om borrhålen spricker upp i skivor på grund av höga bergspänningar (så kallad core discing) samt utvärderat om det har uppstått mikrosprickor i samband med borringarna.

Laboratorieundersökningar av elasticitet, enaxlig och treaxlig tryckhållfasthet samt bergets brottgräns i det intakta berget i de aktuella sprickdomänerna FFM01 och FFM06 visar att detta är styvt, starkt och relativt homogent. Trots att bergets mineralstruktur är påverkad har vi inte kunnat

se att egenskaperna varierar med mineralens orientering. Det finns således fog för att anta att de mekaniska egenskaperna är homogena, dvs lika i alla riktningar.

Hög hållfasthet

I sprickdomän FFM01 dominerar metagranit med medelstora mineral-korn. Medelvärde för den enaxliga tryckhållfastheten uppgår till 226 MPa, vilket är att betrakta som mycket högt. Metagraniten i FFM06 är albitiserad. Med albitisering menas att fältspat-mineralet plagioklas i graniten om-

vandlas till sin natrium- och kiselrika form albit. Detta gör berget extremt starkt. Medelvärde för tryckhållfastheten uppgår här till 373 MPa. Den andel av bergmassan som har reducerad tryckhållfasthet består i första hand av sådant berg där det finns många sprickor. En jämförelse med den geologiska modellen visar att dessa avsnitt av berget hör till deformationszoner.

Den vanligaste och enklaste typen av brott inträffar längs deformationszoner i ett berg med hög hållfasthet. Vi har därför också noggrant under-

sökt sprickornas egenskaper. Här är bland annat sprickornas friktionsvinkel och kohesion (vidhäftningsförmåga) viktiga egenskaper.

Praktiskt och teoretiskt

De mekaniska egenskaperna hos bergmassan har uppskattats med två olika metoder – en empirisk modell och en teoretisk. Den empiriska modellen bygger på praktiska erfarenheter (det vill säga mätresultat) och fysikaliska samband om hur berget beter sig. Vid det teoretiska angreppssättet utgår vi



Det tyska företaget MeSy anlitas för att göra mätningar med hydraulisk spräckning. Bilden visar undersökningsledare Gerd Klee.



Stina Åstrand, Vattenfall Power Consultants, mäter bergspänningar med överborrningsteknik.

Att mäta spänningar i borrhål

Spänningar i berget är ett tillstånd och ingen direkt mätbar egenskap. Genom att orsaka störningar i ett borrhål och sedan mäta responsen försöker vi bedöma spänningstillståndet.

Vid platsundersökningarna använde vi oss av två metoder för att mäta spänningar direkt i borrhålen: överborrning och hydraulisk spräckning.

Med överborrning menas att man i botten av ett kärnborrhål borrar ett smalare hål. På bergväggen limmas små töjningsgivare fast. Dessa registrerar när berget töjer sig i olika riktningar när installationen överborras. Om man sedan antar att berget är tämligen likformigt och elastiskt kan man beräkna spänningarna.

Hydraulisk spräckning innebär att en sektion av borrhålet, där det finns en spricka (eller där man skapar en spricka) isoleras med hjälp av två manschetter. Mellan manschetterna pumpas man in vatten. Genom att ömsom öka och minska trycket i sektionen kan man få sprickan att sluta och öppna sig. Det tryck som öppnar sprickan motsvarar det tryck som berget utövar vinkelrätt mot sprickan för att hålla den stängd. För att få en bild av hela spänningstillståndet måste man mäta på sprickor i alla riktningar.

i stället från den geologiska DFN-modellen för att simulera spricknätverket, en mekanisk modell för att beräkna bergmassans mekaniska egenskaper och en statistisk modell som uppskattar hur egenskaperna varierar i rummet. Resultaten från den empiriska och den teoretiska modellen har sedan vävts samman.

Bränslet värmer förvaret

Bergets förmåga att leda och magasinera värme, samt hur mycket det utvidgar sig vid uppvärmning har – precis som bergspänningarna och bergets hållfasthet – stor betydelse för hur slutförvaret ska utformas. Värmeledningsegenskaperna avgör hur snabbt värmen från kapslarna i förvaret leds bort och därmed också vilka avstånd som behövs mellan deponeringstunnlarna och deponeringshålen. Temperaturen påverkar också den mekaniska stabiliteten och de kemiska förhållandena i berget.

Värmeutvecklingen från bränslet kommer att öka temperaturen hos slutförvarets alla delar under en mycket lång tidsperiod. Temperaturökningen och den efterföljande nedkyllningen medför spänningssamlagringar i berget i och omkring slutförvaret. Fram till nästa istid är temperaturförändringar den faktor som kommer att orsaka störst mekanisk påverkan på förvaret. För att förvissa oss om att slutförvarets tekniska barriärer (kapseln och bufferten) fortsätter att fungera som avsett har vi ansett att temperaturen i bufferten inte får överstiga 100 °C.

Ledning, strömning och strålning

Vid den termiska dimensioneringen av förvaret har vi byggt upp en modell av en central del av förvaret. Modellen innehåller ett antal deponeringshål och värmeledningsegenskaperna i

berget varierar i ett stort antal fall. Temperaturen beräknas med numeriska metoder.

Tre sätt att leda värme

Värme kan transporteras på tre olika sätt i ett medium – genom ledning, konvektion (strömning i vatten eller gas) eller strålning. Transporten genom berget sker främst genom värmeledning. Strålning och konvektion har liten inverkan och kan därför försummas vid modelleringen.

Beskrivningen av de termiska förhållandena i den platsbeskrivande modellen utgår från värmeledningsegenskaperna och initiala temperaturförhållanden i de bergenheter där slutförvaret ska byggas. Bergenheter är uppbyggda av en rad olika bergarter, med sinsemellan olika värmeledningsegenskaper. Variationen är stor.

Vid modelleringen har vi utgått från en statistisk beskrivning i liten skala. Svårigheten är sedan att skala

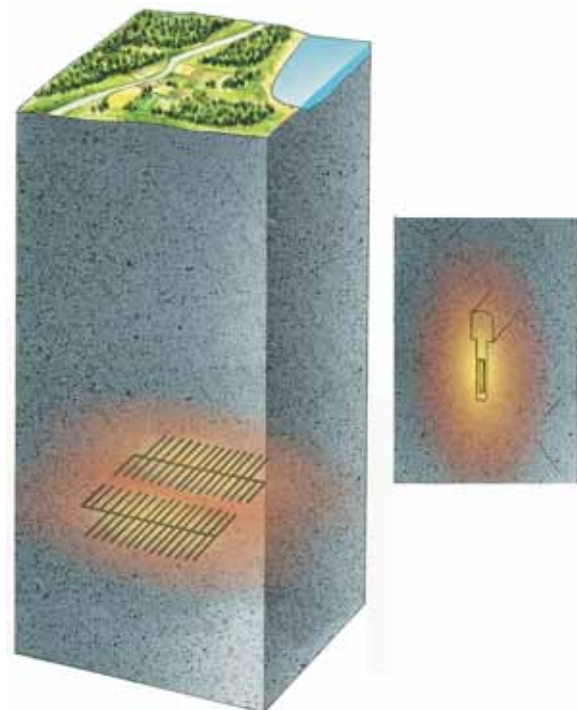
upp förhållandena så att de även gäller i större skala, till exempel för förhållandena i berget runt ett deponeringshål.

Ett centralt begrepp när det gäller bergets värmeledningsegenskaper är termisk konduktivitet. Den termiska konduktiviteten är ett mått på bergets förmåga att leda bort värme och varierar mellan olika bergarter. Framför allt är vi intresserade av att kunna förutsäga hur den termiska konduktiviteten varierar i bergmassan.

I samband med platsundersökning- en analyserade vi den termiska konduktiviteten hos en rad olika bergarter i laboratorium. I kristallint berg beror den på främst följande faktorer:

- Mineralsammansättning
- Temperatur
- Förekomst av vätska eller gas i mikrosprickor
- Riktning beroende egenskaper (anisotropi)

Det använda kärnbränslet kommer att värma upp slutförvarets alla delar under en mycket lång tidsperiod. Berggrundens förmåga att leda bort värme påverkar avståndet mellan tunnlar och deponeringshål.



Resultaten visade att ju mer kvarts berget innehåller, desto högre är den termiska konduktiviteten. Kvarts har tre till fyra gånger högre termisk konduktivitet än andra mineral. Det är bara i bergarter med låg kvartshalt som kvarts inte har någon betydelse för den totala termiska konduktiviteten. Berggrunden i bergenheter RFM029 och RFM045 innehåller mycket kvarts (i regel 24–50 procent).

Den termiska konduktiviteten är temperaturberoende. Den sjunker med ökande temperatur. Metagraniten i Forsmark uppvisade till exempel en minskning med i genomsnitt sex procent i temperaturintervallet 20–80 °C.

Riktningen påverkar

Alla bergarter i bergenheter där förvaret ska byggas, RFM029 och RFM045, har utsatts för någon form av plastisk deformation. Det har orsakat både foliation och lineation som innebär att bergartens mikrostruktur förändras så att strukturen blir skiktad. Lineation innebär att mineralkornen orienterar sig i samma riktning, så att bergarten får en linjär struktur. Den förändrade strukturen

leder i sin tur till att värmeledningsegenskaperna blir olika i olika riktningar. Man säger att förhållandena är anisotropa. I regel är den termiska konduktiviteten högre längs med mineralkornens orientering jämfört med vinkelrätt mot den.

Anisotropi i stor skala

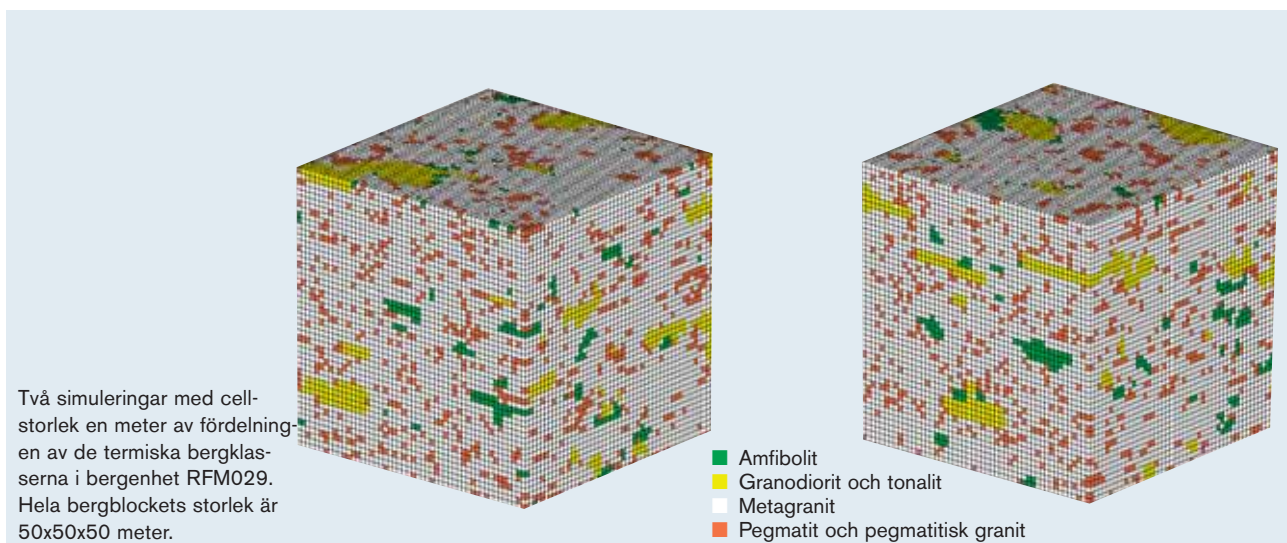
Det finns också en anisotropi i större skala i berget. Olika bergskroppar, speciellt sådana som består av andra bergarter än den dominerande metagraniten, kan vara orienterade i olika riktningar. I Forsmark finns till exempel kroppar av amfibolit som ligger parallellt med foliationens riktning. Dessa har sämre termisk konduktivitet än metagraniten och orsakar anisotropi, vilket har undersökts genom storskaliga fältförsök på en håll nära borrhåll 6. Resultaten visade att skillnaderna i värmeledning var mindre än tio procent.

Termiska bergklasser

Vid den termiska modelleringen delade vi in bergarterna i bergenheter RFM029 och RFM045 i vardera fyra

grupper, så kallade termiska bergklasser. Termisk bergklass förkortas TRC, som står för Thermal Rock Class. Utgångspunkten för indelningen är mineralsammansättning och termiska egenskaper. Tre av grupperna är gemensamma för båda bergenheter.

Efter ett stort antal simuleringar med cellstorleken 1×1 meter får vi en statistisk fördelning av hur de olika klasserna är fördelade i simuleringsvolymen. Hela simuleringsvolymen uppgår till 50×50×50 meter (125 000 m³). Simuleringarna av termisk konduktivitet utförs separat för varje bergklass och slås sedan samman med simuleringar av hur de olika bergklasserna är fördelade i simuleringsvolymen. Resultatet blir en statistisk representation av den rumsliga fördelningen av termisk konduktivitet i simuleringsvolymen. Resultaten kan sedan skalas upp för att gälla även femmetersskala. Modellen av bergets värmeledningsegenskaper och den initiala temperaturfördelningen kan användas som utgångspunkt för att beräkna hur värmeutvecklingen från det använda kärnbränslet påverkar förvarsutformningen.





Tomas Svensson från Geosigma förbereder för pumptest och flödesloggning i hammarborrhål HFM22.

Vattnets vägar i berget

Skillnader i sprickfrekvens tillsammans med skillnader i hur öppna sprickorna är påverkar både bergets grundvatteninnehåll och dess vattenledande förmåga på olika djup. I bergets övre delar har stora flöden uppmätts. På det djup där slutförvaret ska byggas finns knappt något mätbart grundvattenflöde.

Vattnets kretslopp drivs av solens energi och jordens dragningskraft. Vid platsundersökningen i Forsmark har vi strävat efter att få en så fullständig bild av vattenomsättningen ovanpå och under markytan som möjligt. På markytan har vi mätt upp såväl nederbörd och ytavrinning som jordlagrens förmåga att släppa igenom vatten. I borrhålen har vi mätt grundvattenflöden och undersökt grund-

vattnets sammansättning. Detta avsnitt tar upp grundvattnet. Nästa del av denna skrift behandlar ytvattnet.

Flödets storlek och ålder

I Forsmark har den specifika avrinningen, eller nettonederbörden (en vardaglig benämning på skillnaden mellan nederbörd och avdunstning), uppskattats till cirka 150 milli-

meter per år. En del av denna avrinning bildar grundvatten på sin väg mot lågpunkterna i terrängen. Merparten av grundvattenavrinningen i Forsmark sker ytligt och bråkdelar av procent av nettonederbörden når det djup där slutförvaret ska byggas.

Grundvattnet i Forsmark kan betraktas som blandvatten från olika tidpunkter, eftersom strömningsvägarna hela tiden ändras. En orsak till

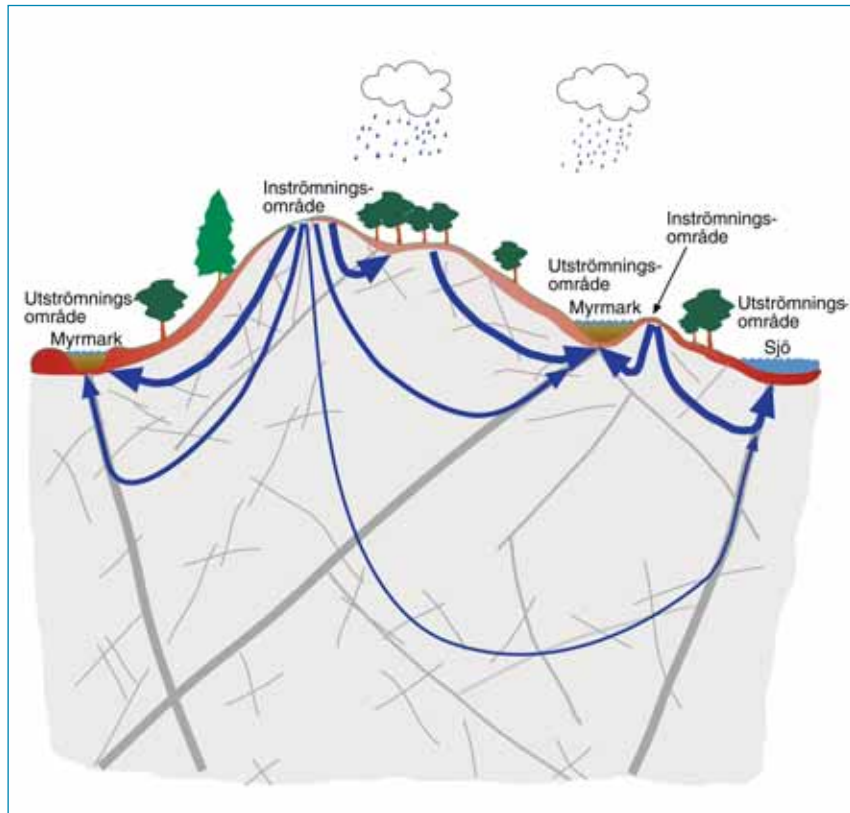
detta är landhöjningen efter den senaste istiden. I dag är strandlinjeförskjutningen i Forsmark cirka sex millimeter per år och om 10 000 år beräknas området ha stigit med sammanlagt cirka 40 meter jämfört med i dag. Trots de förändringar i flödesmönstret som strandlinjeförskjutningen orsakar ökar grundvattnets genomsnittliga ålder med djupet under markytan, eftersom bergets förmåga att släppa igenom vatten minskar med djupet.

Hur gammalt vattnet är i ett grundvattenprov kan man analysera genom att studera vattnets kemiska sammansättning och innehåll av olika isotoper (atomer av samma grundämne som har olika antal neutroner i kärnan). De äldsta grundvatten som åldersbestämts i Forsmark är cirka 1,5 miljoner år.

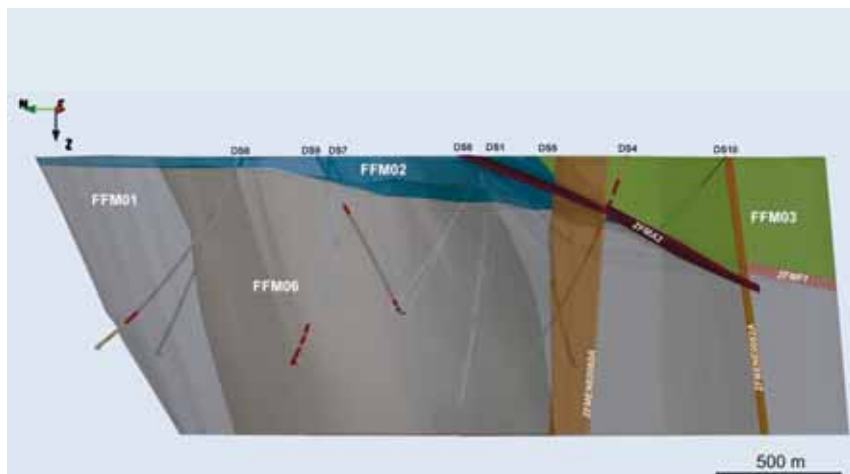
Sprickzoner och sprickdomäner

För att undersöka geologins betydelse för grundvattnet måste man borra, pumpa, mäta grundvattennivåer och ta vattenprover på många olika ställen. I Forsmark finns i dag ett sjuttiofem borrhål som går genom både jordlagren och berget. Drygt 20 av borrhålen som finns i berget når ner till det djup där slutförvaret ska byggas, det vill säga 400–500 meter. Omkring hälften av dessa når ner till det dubbla djupet. Samtliga borrhål har undersökts mycket noga. De hydrogeologiska undersökningarna i berget har planerats och tolkats med ledning av geologernas indelning av bergets spricksystem i sprickzoner (deformationszoner) och sprickdomäner (spricksystemet mellan zonerna), som vi redan berättat om i avsnittet ”Att beskriva berget”.

Det som i första hand skiljer sprickzoner från sprickdomäner är inte de enskilda sprickornas storlek (längd) utan koncentrationen av sprickor mätt som antalet sprickor som skär en rak



Den hydrauliska gradienten driver grundvattenflödet. Ett område med nedåtriktat grundvattenflöde kallas inströmningsområde och ett område med uppåtriktat grundvattenflöde kallas utströmningsområde.



Olika sprickdomäner i Forsmark. Sprickdomänerna är spricksystemet mellan zonerna.

linje med längden en meter (sprickfrekvens). Sprickfrekvensen är således betydligt högre i sprickzonerna än i sprickdomänerna mellan zonerna. Eftersom de regionala och lokala större sprickzonerna uppträder som kilometerlånga stråk med hög sprickfrekvens är de av förklarliga skäl lätta att identifiera och dokumentera.

Spricksystemet i sprickdomänerna mellan de regionala och lokala större sprickzonerna har således en mätbart lägre frekvens av enskilda sprickor och så kallade lokala mindre sprickzoner (kortare stråk med en något högre sprickfrekvens). Sprickdomänerna i Forsmark har kartlagts genom att sprickartera blottade berghällar på markytan som inte sammanfaller med regionala och lokala större sprickzoner. Geologerna har också delat upp berget i sprickzoner och sprickdomäner

genom att titta på sprickfrekvensen i så kallade kärnborrhål, dvs man har mätt antalet sprickor per meter borrkärna. Borrkärnorna är 76 millimeter i diameter och tas upp i längder om maximalt tre meter. Sprickorna studeras även genom att fotografera borrhållsväggen. Genom att samtidigt mäta grundvattenflödet i dessa borrhål har hydrogeologerna kartlagt vilka av sprickorna som leder vatten, vilken riktning de har, hur många de är och deras förmåga att släppa igenom vatten. Den sistnämnda egenskapen kallas för transmissivitet.

Öppna och läkta sprickor

En spricka i berget, vare sig den finns i en sprickzon eller i en sprickdomän, kan vara öppen, slutet (läkt) eller både öppen och läkt (på olika ställen). Att

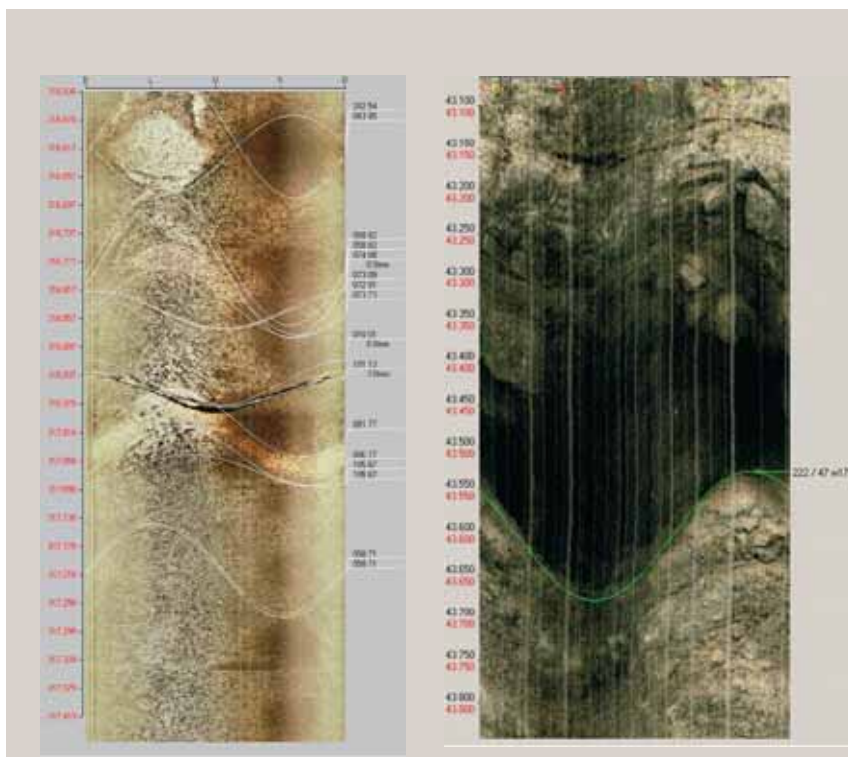
en spricka är öppen innebär att det finns ett utrymme mellan sprickans väggar (spalt, apertur) som inte är berg. En läkt spricka är en spricka som en gång varit öppen, men som numera är igencementerad med sprickmineral, till exempel kalcit. Cirka 75 procent av alla sprickor (sprickskärningar) som påträffats i kärnborrhålen mellan 100 och 1000 meters djup i Forsmark är karterade som läkta och cirka 25 procent som öppna. Det är endast de öppna partierna av en spricka som kan tänkas magasinera och leda grundvatten.

För att grundvattnet ska kunna strömma genom de öppna sprickorna måste dessa vara sammanbundna (konnekterade) så att en tryckskillnad (hydraulisk gradient) kan skapas. I öppna sprickor som saknar både in- och utlopp finns det inget grundvattenflöde därför att den hydrauliska gradienten då är noll.

I Forsmark har man med hjälp av pumptester funnit att cirka sju procent av de öppna sprickorna har mätbara grundvattenflöden, dvs knappt två procent av alla sprickskärningar som påträffats mellan 100 och 1000 meters djup i de ovannämnda kärnborrhålen. Den nedre mätgräns hos de mätutrustningar som använts vid platsundersökningen i Forsmark är sex tusendels liter per timme.

Sprickfrekvens och spricklängd

Det är sprickfrekvensen, tillsammans med spricklängden på de öppna sprickorna, som avgör hur väl de är konnekterade. Eftersom man inte kan studera längden på de sprickor som man ser i kärnborrhålen har såväl geologerna som hydrogeologerna i sina beskrivningar av sprickdomänerna i Forsmark använt sig av ett vedertaget synsätt på sambandet mellan sprickfrekvens och spricklängd som enkelt lyder: Korta sprickor finns det



Sprickorna har studerats bland annat genom att filma borrhållsväggarna med hjälp av TV-kamera. Genom att samtidigt mäta grundvattenflödet har hydrogeologerna kartlagt vilka sprickor som leder vatten, hur många de är och deras förmåga att släppa igenom vatten.



Borrkärnorna är 76 millimeter i diameter. På försvarsdjup är berget så sprickfattigt att de kan tas upp i längder om tre meter, vilket är den tekniskt möjliga längden. I vanliga fall delas kärnorna i kortare delar, eftersom de skärs av sprickor.



Vattnets kretslopp. Vattenånga dunstar från havet och omvandlas till nederbörd. Denna letar sig i sin tur ner i marken och med tiden tillbaka till havet. Det vatten som befinner sig i den underjordiska delen av kretsloppet kallas grundvatten.

många fler av än det finns långa sprickor.

Sambandet innebär att om avståndet mellan de vattenförande sprickorna som karterats är stort (låg frekvens) krävs det att sprickorna i fråga är långa för att de ska kunna leda vatten, dvs de måste vara tillräckligt långa för att träffa på andra vatten-

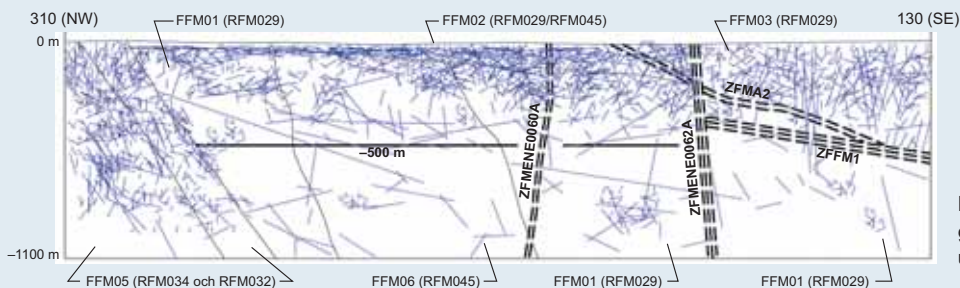
förande sprickor eller sprickzoner (alternativt markytan).

Avtar med djupet

Vattenflödena i bergets uppspruckna övre del (ned till cirka 150 meters djup) inom den nordvästra delen av kandidatområdet i Formsmark kan

anses som ovanliga för Sverige. Det genomsnittliga värdet för vattenflödet i de 22 först borrarade bergbrunnarna (hammarborrhålen) inom denna del av kandidatområdet var till exempel 12 000 liter per timme. Detta ska jämföras med snittvärdet för de bergbollarade brunnarna närmast utanför kandidatområdet (vilket är

Hydrogeologisk DFN-modell (sammanbundna öppna sprickor)



Den flacka sprickzonen ZFMA2 utgör gränsen mellan det täta och det uppspruckna berget.

detsamma som snittvärdet för alla bergborrade brunnar i urberg i Sverige) som är ungefär 600 liter per timme. De ovanliga förhållandena i den övre delen av berget inom den nordvästra delen av kandidatområdet beror på att den ytära sprickdomänen i detta område har en hög sprickfrekvens samt ovanligt många flacka, lokala mindre sprickzoner, så kallade bankningsplan. Förutom en hög frekvens av öppna sprickor med en betydande konnektivitet är de uppmätta transmissiviteterna hos både bankningsplan och enskilda sprickor ovanligt höga. Transmissivitetsvärden över 10^{-3} kvadratmeter per sekund har registrerats i enskilda borrhål. Den goda hydrauliska kommunikationen i ytberget har bekräftats med så kallade mellanhålpumptester.

På det djup där slutförvaret ska byggas är transmissiviteterna mycket lägre, i snitt cirka 10^{-8} kvadratmeter per sekund, eller cirka 100 000 gånger lägre än de högsta värdena som observerats i bergets övre del. Dessutom är det långa avstånd mellan de vattenförande sprickorna, på sina ställen mer än hundra meter. Dessa viktiga observationer bekräftas av det faktum att cirka 200 obrutna tre meter långa borrhål har kunnat hämtas upp ur berget i samband med kärnbörningarna inom kandidatområdet.

Stora resurser nedlagda

Vid undersökningen i Forsmark har vi lagt ner stora resurser för att ta reda på hur grundvattnet uppträder i berget. Vi har undersökt hur det strömmar i kandidatområdets sprickzoner och sprickdomäner, hur det omsätts på olika djup under markytan och vilka samband det finns mellan vatten av olika typer (ålder). Data från 21 kärnborrhål och 32 hammarborrhål har använts i den slutliga platsbeskrivningen.



Sven Follin från SF GeoLogic har ansvarat för den hydrogeologiska modelleringen av Forsmark.

Den hydrogeologiska egenskap som studerats i störst omfattning i platsundersökningen i Forsmark är bergets vattengenomsläpplighet. Den beror på sprickfrekvensen, sprickornas längd, sprickornas vattenledande förmåga

(transmissivitet) och grad av öppenhet (apertur). Bergets vattengenomsläpplighet uppvisar ett påtagligt djupavtagande i Forsmark i såväl sprickzoner som sprickdomäner. Den hydrauliska gradienten i Forsmark är generellt

sett liten, eftersom området är flackt. En låg vattengenomsläpplighet tillsammans med en liten hydraulisk gradient borgar för ett lågt grundvattenflöde. I Forsmark är det i första hand sprickdomänerna i den nord-



Den övre delen av berget i Forsmark är mycket vattenförande.

västra delen av kandidatområdet som är av störst intresse för ett slutförvar. Den våtare delen av berget inom detta område förekommer i bergets övre del ned till omkring 150 meters djup. Därunder avtar den vattenförande

(konduktiva) sprickfrekvensen mycket snabbt och under ungefär 400 meters djup finns knappt något mätbart grundvattenflöde. Det är volymen på det torra bergets sprickdomäner tillsammans med de hydrogeologiska

egenskaper hos dessa som avgör hur lång tid det tar för grundvattnet att transporteras från ett eventuellt slutförvar till närmaste sprickzon och därifrån vidare till olika utströmningsområden nedströms förvaret.

Så mätte vi i borrhålen

Vid hydrotesterna använde vi oss av fyra olika mätmetoder:

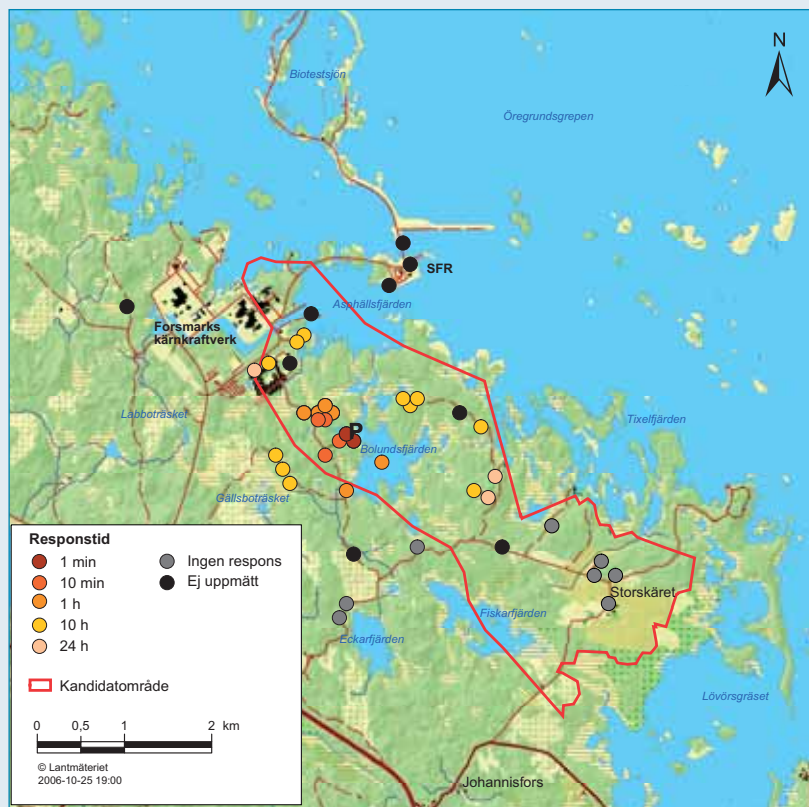
- Differensflödesloggning
- Injektionstester
- Spinnerloggning
- Interferenstester.

Differensflödesloggning (PFL – Posiva Flow Log) är en metod för att mäta enskilda sprickors vattengenomsläpplighet (transmissivitet) i kärnborrhål. Testen sker i tio centimeter långa sektioner av borrhålet. Differensflödesloggning kräver upprepade mätningar och totalt tar ett 1 000 meters borrhål två veckor att mäta. Tekniken har utvecklats av SKB:s finska motsvarighet Posiva.

I kärnborrhålen har vi också mätt med så kallade injektionstester (PSS – Pipe String System). Testen sker i längre sektioner av borrhålet. Dessa kan vara 5 meter, 20 meter eller 100 meter långa. Ett injektionstest tar ungefär 20 minuter att genomföra. Totalt tar ett 1 000 meters hål ett par veckor att mäta.

I hammarborrhålen har vi i första hand använt oss av spinnerloggning. Metoden ger såväl hålets totala transmissivitet som transmissiviteten för olika sektioner.

Vid så kallade interferenstester kunde vi generera en störning genom att pumpa ut vatten från ett borrhål så att grundvattenstrycket sänktes och därefter studera hur störningen spred sig till intilliggande hål.



Responstider under det tre veckor långa interferenstest som genomfördes under den torra sommaren 2006 i hammarborrhål HFM14 (betecknat P på kartan). Vi kunde spåra trycksänkningar på 71 av totalt 110 mätplatser. Som mest såg vi påverkan 1,8 kilometer bort.

Sommaren 2006 gjorde vi till exempel ett storskaligt interferenstest i HFM14, ett cirka 130 meter djupt hammarborrhål. Inom en timme såg vi trycksänkningar i alla borrhål inom en radie av 500 meter. Efter ett dygn hade trycksänkningen nått

ut till de yttersta borrhålen. Att trycksänkningen spred sig visade att spricksystemet i den övre delen av berggrunden hänger ihop. Den korta svarstiden visade att vattengenomsläppligheten i bergets yttliga delar är hög.



Biolog Anna Spets, platskemist Ann-Chatrin Nilsson och kemist Jonny Skarp tar vattenprover i Forsmark.

Inte bara vanligt vatten

Det duger inte med vilket vatten som helst i berget runt slutförvaret. För att bufferten och kopparkapseln ska fungera som det är tänkt får inte grundvattnet innehålla löst syre.

I skolan får eleverna lära sig att vatten har den kemiska beteckningen H_2O . Det är visserligen alldeles sant. Men det vi i dagligt tal kallar grundvatten är så mycket mer. Vattnet kan vara surt eller basiskt, salt eller sött. Det kan också innehålla metaller eller andra lösta ämnen. Vatten som har höga halter av kalcium och magnesium kallas hårt vatten. Sådant grundvatten förekommer i områden där berg- och jordarter innehåller mycket kalk. Så är det i Forsmark. Vattenkemin i det ytliga grundvattnet är starkt påverkad av det kalkhaltiga moränlager som täcker urberget. Grundvattnet kan också innehålla organiskt material eller till och med livsformer som bakterier och virus. Alla dessa lösta ämnen och livsformer påverkar vattnets egenskaper på ett eller annat sätt.

Sulfid och syre viktiga

Det är inte bara vattenflödena i berget som är viktiga för hur slutförvaret för använt kärnbränsle kommer att fungera på lång sikt. Även grundvattnets sammansättning har stor betydelse. Främst handlar det om halterna av syre och sulfid. Syre som är löst i grundvattnet kan leda till att kopparkapslarna korroderar, vilket i sin tur är ett hot mot den långsiktiga säkerheten. Vattnet på försvarsdjup får därför inte innehålla något löst syre. Det gör det normalt inte heller på 500 meters djup i svensk berggrund.

Även sulfidjoner i vattnet kan orsaka korrosion av kopparkapslarna. Sulfiden kan produceras av bakterier, som konsumerar lösta salter, nere i berget.

Under markytan i Forsmark finns ett grundvatten som består av flera olika vattentyper från skilda tidsperioder och som i varierande grad har blandats med varandra. Det grundvatten som finns i dag kommer med största

sannolikhet att se annorlunda ut i framtiden. Variationerna är inget problem, så länge grundvattnets sammansättning är godtagbar för den långsiktiga säkerheten i förvaret.

Filtrerar bort partiklar

När regnvattnet sipprar genom marken filtrerar växter och jordpartiklar bort en stor del av de fasta partiklarna och även andra lösta komponenter. Eftersom regnvattnet är surt (pH lägre än 7) kan det samtidigt lösa ut mineraler och andra ämnen ur de övre jordlagren. På så sätt får grundvattnet ett tillskott av till exempel magnesium, kalcium och natrium.

Är marken syrefattig löses även järn och mangan ut. Om en plats under en period varit täckt av ett hav kommer detta också att påverka sammansättningen, likaså om platsen är eller har varit täckt av en inlandsis.

Hur mycket av ett specifikt ämne som kan vara löst i vattnet beror på temperaturen och trycket. Mättat grundvatten har så många lösta joner av ämnet som är möjligt. Om trycket eller temperaturen ändras kan vattnet bli övermättat. Det finns då för många joner av ett visst slag i lösning och dessa faller då normalt ut i en fast fas i form av mineral. Om de yttre förutsättningarna ändras kan också vattnet bli omättat och lösa fler joner av ett visst slag från sprickmineral, omgivande berg eller jord.

Unika signaturer

Begreppet grundvatten är således ingen entydig företeelse. I vanliga fall talar vi om grundvatten som det sötvatten som vi utnyttjar som dricksvatten. Men djupare ner i berget är grundvattnet salt. Den ursprungliga sammansättningen förändras med tiden och med djupet. Faktorer som

vattnets uppehållstid och de långsiktiga klimatförändringarna påverkar. Till detta kommer andra faktorer som kemiska reaktioner med jordmån och mineral i bergets övre del samt de hydrauliska förhållandena nere i berget. Det är alltså inte bara dagens förhållanden som sätter spår i grundvattnet. I Forsmark, liksom på andra ställen, kan vi se påverkan från gångna tiders grundvatten djupare ner i berggrunden.

För att skilja mellan olika typer av grundvatten talar man om att vattnet har olika signaturer. Signaturen avslöjar hur gammalt vattnet är och vilket ursprung det har, det vill säga om det från början varit nederbörd, havsvatten eller smältvatten från en inlandsis. Den ger också upplysning om klimatet var varmt eller kallt när vattnet bildades. Man kan också se hur de olika vattentyperna har förändrats med tiden och om de har blandats med varandra.

Fyra vattentyper

I Forsmark har vi fyra huvudtyper av grundvatten med sinsemellan olika signaturer:

- Meteoriskt vatten (som kan vara ungt)
- Littorinavatten (rester från Littorinahavet, ett förstadium till Östersjön)
- Glacialt smältvatten (rester från senaste nedisningen)
- Mycket salt vatten (som dominerar på djupet)

I berget är grundregeln att nytt grundvatten tränger undan och med tiden ersätter gammalt. Grundvattnets saltinnehåll är också viktigt, eftersom saltvatten är tyngre än sött. Det söta vattnet kan inte tränga ned hur djupt som helst, utan flyter ovanpå det salta vattnet. Nedträngningen kan ta olika lång tid beroende på de hydrauliska

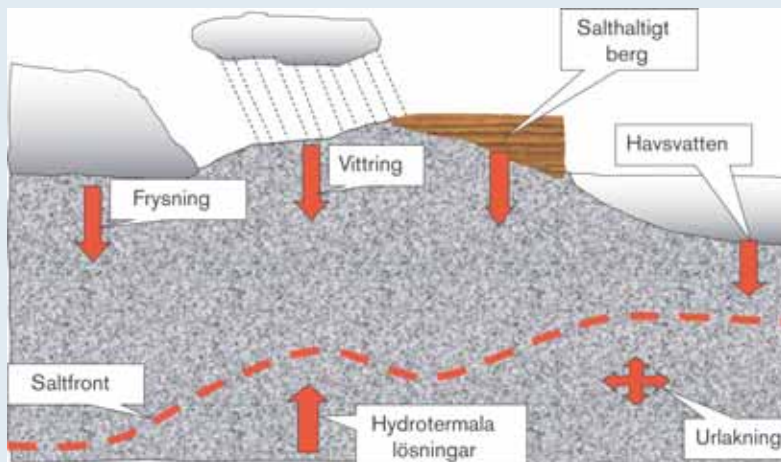


Kemiingenjör Daniel Nilsson analyserar vattenprover.

förhållandena i berget. Finns det många vattenförande sprickor går nedträngningen snabbare och omblandningen blir större. I områden med få vattenförande sprickor kan vattnet stå stilla under mycket långa tidsperioder.

Simulerar vattnets utveckling

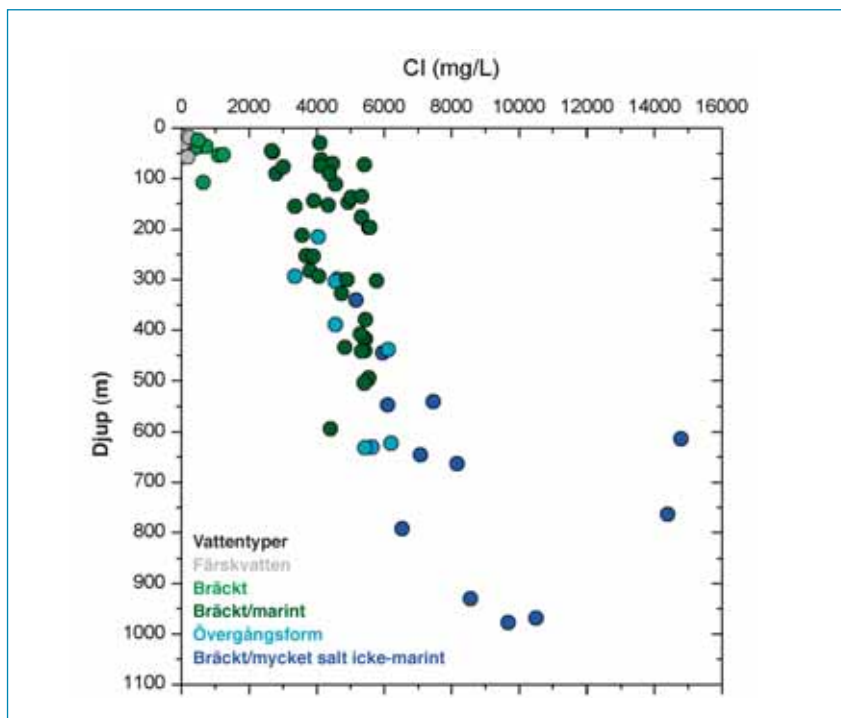
Vid den hydrogeologiska modelleringen har vi försökt simulera grundvattnets utveckling från den senaste istidens början och framåt för att se hur vår förklaringsmodell stämmer. Hur stämmer de vattensammansätt-



Grundvattnets salthalt ökar med djupet. Saltet kan tillföras på en rad olika sätt.

ningar som vi räknar fram med dem vi faktiskt mätte upp i borrhålen? Vi har utgått från situationen som rådde under den varma period som föregick istiden. Grundvattnet antas då över-

lag vara saltare på förvarsdjup än det är i dag och hade inget inslag av havsvatten. När isen smälte pressades glacialt smältvatten ner i berget för att i sin tur trängas undan av littorinavatten.



Kloridhalternas fördelning i borrhålen i Forsmark som funktion av djupet.

Överst i berggrunden i dag finns naturligtvis det unga meteoriska grundvattnet, som huvudsakligen härstammar från nederbörd. Bland de vattenmolekyler som trängt ner i berggrunden under de senaste 50 åren finns en högre andel av den radioaktiva väteisotopen tritium. Det är en effekt av de atmosfäriska atombombsprov som skedde på 1950- och 1960-talen. Tritiumanalyserna visar att detta unga grundvattnet ännu inte har trängt djupare ner än 200 meter.

Vid våra mätningar har vi kunnat konstatera att salthalten ökar gradvis mot djupet. Redan vid 100–150 meters djup är halten av kloridjoner högre än i havet utanför Forsmark. Kloridhalten fortsätter att öka och ligger mellan 200–600 meter ganska konstant i intervallet 5 000–6 000 milligram per liter.

Hydrologin viktig för kemlin

I Forsmark ser vi hydrologins betydelse för grundvattenomsättningen mycket tydligt. När Littorinahavet täckte Forsmark för mellan 9 000 och 5 000 år sedan bestod grundvattnet i berget av en stor andel glacialt smältvatten från den senaste istiden. Det salta littorinavattnet har trängt ner mycket djupare i den sydöstra delen än i den prioriterade nordvästra delen. I detta berg som har få sprickor är andelen littorinavatten betydligt lägre och vattentypen har bara påträffats ner till 300 meters djup i det prioriterade området.

I de flacka sprickzonerna i sydost har vi funnit spår av littorinavatten ner till 600 meters djup.

Grundvattnet i det mycket täta berget mellan sprickzonerna består av väldigt gammalt vatten med icke-marint ursprung – antingen av glacialt ursprung eller också ännu äldre icke-marint vatten. Så är till exempel fallet på förvarsdjup i det prioriterade

området. Där har grundvattnet varit stillastående under oerhört långa tider. Vattenkemin är komplicerad, eftersom sammansättningen är påverkad av såväl blandning som av reaktioner med mineral i bergmatrisen. Salthalten ligger mellan 4 000 och 10 000 milligram per liter.

Gammalt vatten på djupet

Vi har inte funnit några riktigt salta vatten (med en kloridhalt på mer än 20 000 milligram per liter), så kallad saltlake. Sådana borde emellertid finnas på stora djup. I mineralet kalcit har vi hittat vätskeinneslutningar som tyder på att saltlake kan ha bildats långt före den senaste istiden, vid en tid med varmt klimat. Forsmark var då täckt med kilometertjocka sedimentlager.

Ytterligare en pusselbit när det gäller grundvattnets egenskaper får vi genom att undersöka matrisvattnets sammansättning. Matrisvattnet är det vatten som finns i bergmassans (bergmatrisens) porer och mikrosprickor. Sammansättningen hos matrisvattnet är inte nödvändigtvis densamma som i de närbelägna sprickorna. Matrisvattnet är mera stagnant och kan ha tillförts porerna och mikrosprickorna under tidigare skeden av den geologiska historien, då grundvattnet hade en annan sammansättning än det har i dag.

Samverkan med berget

Det kan också finnas en samverkan mellan matrisvattnet och det vatten som finns i sprickorna. In- och utdiffusion av olika ämnen kan påverka sammansättningen. Med diffusion menas en transport av lösta ämnen i vattnet som inte sker genom strömning utan genom slumpvisa rörelser. Transporten sker från områden med hög koncentration till områden med



Porvattnet dunstar lätt bort. Proverna måste därför förpackas mycket noga. Förpackningen skyddar också från kontakt med syre.

låg. Diffusion kan leda till att matrisvattnet långsamt förändras med tiden. Salthalten kan till exempel gradvis öka eller minska. En annan omständighet som påverkar matrisvattnets sammansättning är vilka mineral berget består av. Matrisvattnets kemiska sammansättning styr vilka reaktioner som sker med mineralen. Mineralens sammansättning avgör i sin tur vilka ämnen som löses ut i vattnet.

Antag till exempel att vi har en bergmatris som består av en viss mängd kvarts och att kvartsen innehåller vätskeinneslutningar. Vätskeinneslutningarna, som ligger centralt i kvartskornen, förblir ofta intakta. Inneslutningar, som ligger nära kornens kanter, kan däremot påverka matrisvattnets sammansättning genom att tillföra salt. I förlängningen kan också det omgivande grundvattnet påverkas. Även rörelser i jordskorpan kan leda till saltutsläpp. Kvartsmineralen kan spricka upp av de krafter som bergmatrisen utsätts för och

matrisvattnet kan då komma ut i det omgivande grundvattnet.

Flack sprickzon undersökt

Nästan alla porvattenanalyser i Forsmark har gjorts på borrhärlor tagna från det torra och sprickfattiga berget mellan sprickzonerna. Undantaget är prov från ett borrhål som passerade den flacka sprickzonen ZFMA2. Här tog vi täta prover både före och efter passagen av zonen.

I Forsmark har vi kunnat konstatera att matrisdiffusion är en process att räkna med på förvarsdjup i den bergvolym där slutförvaret ska byggas. På förvarsdjup är salthalten i porvattnet generellt sett lägre än i sprickorna.

Porvattnet innehåller inget littorinavatten, utan är icke-marint vatten av betydligt äldre datum. Det innebär att vattnet i bergmatrisen har varit isolerat från sin omgivning under mycket långa tider.

Bergvolymen med det flacka sprickzonerna, ovanför zon ZFMA2, visar en



Mätutrustningen för laserinducerad nedbrytning av kolloider är mobil. På så sätt kan man mäta direkt i borrhålen.

annan utveckling. Porvattnet i området nära sprickzonen bär spår av både glacialt smältvatten och littorinavatten ner till omkring 550 meters djup.

Gaser från jordens inre

Grundvattnet innehåller inte bara en rad olika mineral, utan även lösta gaser. Huvudkomponenterna i den gas som finns i berget i den fennoskandiska skölden är kvävgas, koldioxid,

helium, vätgas, metan och argon. Andelen av de olika gaserna varierar regionalt samt med bergarten och djupet, liksom den totala andelen gas.

Gasen har flera olika ursprung, en del kommer från manteln i jordens innandöme, en annan med vatten från markytan. Andra källor är mikrobiell aktivitet. På 500 meters djup är normalt all gas löst i vattnet.

I Forsmark kunde vi konstatera att mängden lösta gaser ökar med djupet. Kväve är den vanligast förekommande gasen och helium den näst vanligaste. Vattnet är långt ifrån mättat på gas. Vid 10 °C och på 700 meters djup är det teoretiskt möjligt att lösa 1 200 milliliter kvävgas i en liter vatten. Detta ska jämföras med de uppmätta kvävgashalterna, som samtliga ligger under 150 milliliter per liter vatten.

Små svävande partiklar

Kolloider är partiklar som är så små att de kan hålla sig svävande i en lösning utan att sedimentera. De kan binda olika ämnen, till exempel

radionuklider och transportera dem i grundvattnet. Storleken brukar variera mellan en tusendels och en miljondels millimeter. Kolloider kan bildas som ett resultat av kemiska reaktioner, till exempel vid övermättnad när två olika vattentyper blandas. De kan också bildas genom erosion av bentonitlera.

Kolloidala partiklar i djupa grundvatten består främst av ler-, kisel- och järnhydroxidpartiklar. Partiklarna kan också bestå av enskilda organiska stora molekyler eller ansamlingar av flera sådana molekyler.

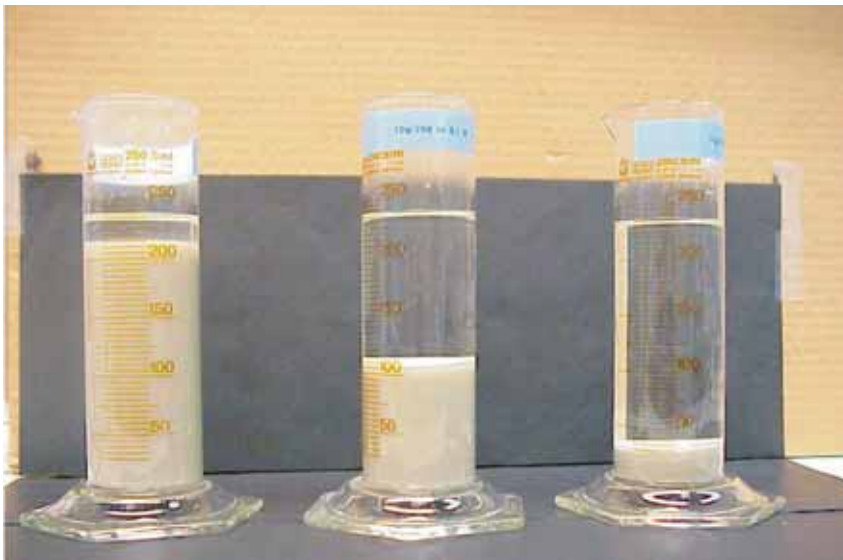
Beror av salthalten

SKB har undersökt kolloider i många år och genomfört ett stort antal mätningar av halterna på olika djup och i olika typer av grundvatten. Resultaten visar att kolloidhalten beror av hur salt vattnet är. Hög salthalt innebär få kolloider och tvärtom. Kolloidhalterna nära ytan, där grundvattnet har låg salthalt, kan därför vara höga. På förvarsdjup är de däremot mycket låga, eftersom salthalten är högre.

Hittills har det varit svårt att analysera kolloidhalter, eftersom det inte funnits någon enkel metod att mäta koncentrationerna. Kolloiderna är också besvärliga att studera, eftersom de till exempel inte följer kemiska jämviktslagar.

Tre olika metoder

I Forsmark har vi använt tre olika metoder för att bestämma kolloidhalterna: filtrering, fraktionering och laserinducerad nedbrytning. Där har vi kunnat konstatera att själva provtagningsförfarandet kan leda till att kolloidhalten ökar. De halter som uppmättes direkt på plats vid borrhålen vid andra undersökningar var lägre än i de prov som tagits enkom för att bestämma kolloider och som senare



Kolloidhalten sjunker när salthalten ökar och tvärtom. På bilden är salthalten i det högra mätglaset tio gånger högre än i mätglaset i mitten och 100 gånger högre än i mätglaset längst till vänster.



Grundvattnets sammansättning påverkas av om ett område ligger eller har legat under havsnivån.

skickats till laboratorium för analys. Vi tror att den högre halten beror på syreinträngning och järnutfällning eller på att kalcit fällt ut till följd av tryckminskningen.

Mätningarna visade att antalet kolloider varierade mellan 200 000 och 600 000 per milliliter, förutom på två mätpunkter i kärnborrhål 10A respektive kärnborrhål 8D. Där var antalet 10 till 1 000 gånger högre. De uppmätta värdena är dock alla i det intervall som är normalt för svensk berggrund.

Liv i berget

En intressant iakttagelse är att antalet kolloider är proportionellt mot antalet

mikrober i grundvattnet. Förutom lösta ämnen, gaser och partiklar innehåller nämligen grundvattnet också organismer i form av bakterier och virus. Det rör sig om livsformer som är helt oberoende av både syre och fotosyntesen för att överleva. Sambandet mellan mikrober och kolloider är något som måste undersökas vidare.

Många av de underjordiska bakterierna utnyttjar vätgas som energikälla. De kan också, precis som växterna, omvandla koldioxid till organiska kol-föreningar för att bygga upp den egna cellstrukturen.

Basen för det vätgasdrivna ekosystemet är så kallade acetogena bakterier, som framställer ättiksyra ur koldioxid och väte, samt metanogena

bakterier som framställer metan ur samma utgångsämnen. Högre upp i den underjordiska näringskedjan lever andra arter som får sin föda via acetogenerna och metanogenerna. Där finns till exempel de sulfatreducerande bakterierna som omvandlar sulfat till sulfid och de kvävereducerande som gör kvävgas av nitratföreningar.

Både bra och dåliga

Bakterier kan vara både bra och dåliga för den långsiktiga säkerheten i ett slutförvar. Av de ämnen som finns i grundvattnet är det främst syre och sulfidjoner som kan orsaka korrosions-skador på kapseln. Syre kan reagera med koppar och bilda kopparoxider.

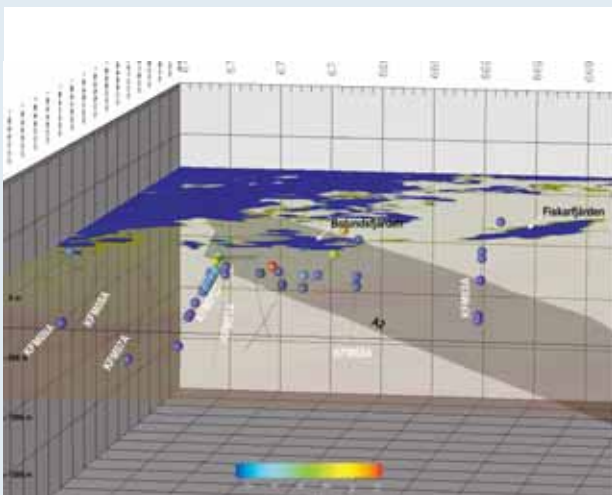
Isotoper bestämmer vattnets ålder

Vattnets ålder bestäms genom mätning av naturliga radioaktiva isotoper. En isotop är en atom med en speciell fördelning. Vi har framför allt använt oss av tre olika isotoper: tritium, kol-14 och klor-36. Alla bildas i atmosfären under inverkan av den kosmiska strålningen och sönderfaller med en bestämd halveringstid. Men om de på något sätt avskiljs från atmosfären, till exempel genom

att med regnvattnets hjälp transporteras ner i berget, sker inte längre någon tillförsel på naturlig väg.

Tritium används för att bestämma åldern på ungt vatten med en ålder upp till 50 år. Det är en radioaktiv isotop av grundämnet väte med halveringstiden 12,33 år. Normalt innehåller en kärna i en väteatom bara en proton. I en tritiumisotop är kärnan betydligt tyngre och mer instabil, eftersom den även innehåller två neutroner. De atmosfäriska atombombsproven i början av 1960-talet gav ett mycket stort tillskott av tritium. Grundvattnet som är yngre än 50 år har därför högre tritiumhalter än äldre vattentyper. Detta unga grundvattnet har låg salthalt och består huvudsakligen av nederbörd som trängt ner i marken.

Vatten som är upp till 40 000 år gammalt kan åldersbestämmas med hjälp av kol-14. På samma sätt som den kosmiska strålningen leder till att det bildas tritium i atmosfären, leder den även till att kolisotopen kol-14 bildas. Den nybildade kol-14-atomen reagerar sedan med syre och bildar atmosfärisk koldioxid. Den atmosfäriska koldioxiden sprider sig sedan ner till jorden genom att den löser sig i regnvattnet och genom att den tas upp av växternas fotosyntes. Så fort kol-14 avskiljs från atmosfären sönderfaller isotopen och halten minskar. Genom att utgå från isotopens halveringstid, som är 5 730 år, kan man beräkna grundvattnets ålder. För riktigt gamla vatten behövs en isotop med längre halveringstid. Klor-36 har en halveringstid på 301 000 år och kan på motsvarande sätt användas för att bestämma åldern på riktigt gammalt grundvatten djupt ner i berggrunden.



Diagrammet visar uppmätta tritiumhalter i olika borrhål. Förhöjda halter tyder på att det grundvattnet som finns i berggrunden har bildats under de senaste 50 åren.

Sulfidjonerna bildar kopparsulfid när de reagerar med kopparn.

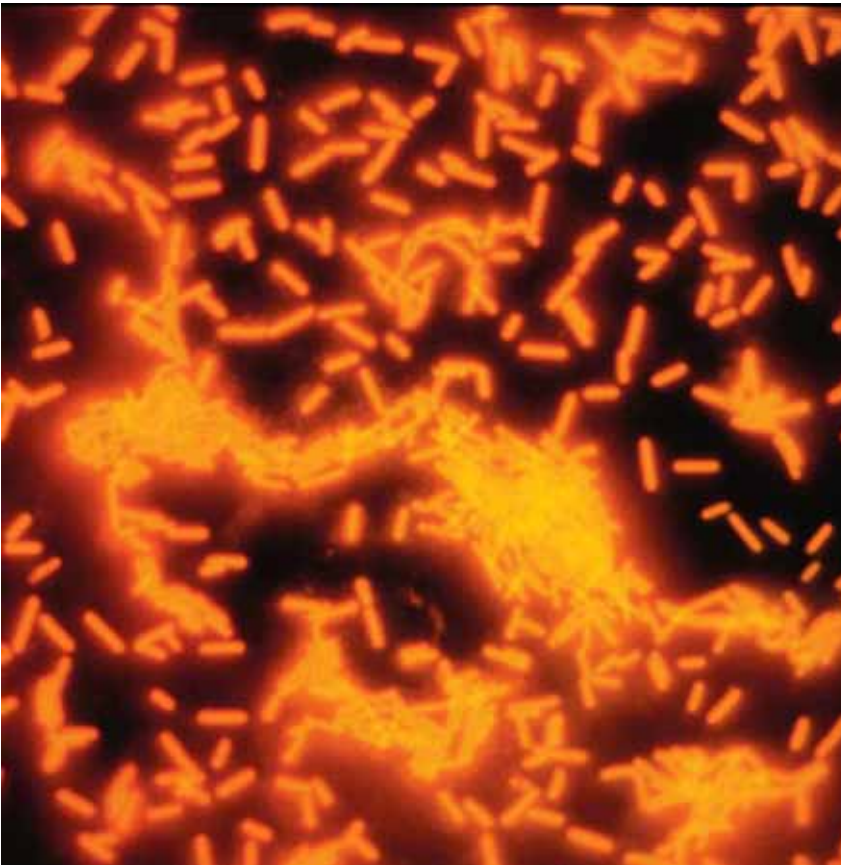
Syret i grundvattnet är egentligen inget problem. Syre är bakteriernas favoriträtt framför andra och det ämne som förbrukas allra först. Däremot kan sulfatreducerande bakterier bli ett problem om de finns i stora mängder nära kapseln. Försök visar att bakteriernas förmåga att överleva i bentonitbufferten runt kapseln är begränsad.

Undersökningarna i Forsmark visade att den vanligast förekommande typen av mikrober är acetogena bakterier. Sulfatreducerande bakterier förekommer på alla djup, men varierar stort i antal. I grundvattnet finns också metanogener, kväveredu-

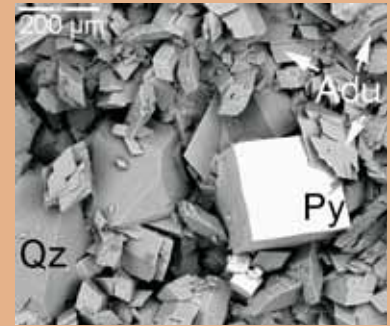
cerande bakterier och arter som reducerar järn och mangan. Vi har inte sett att olika typer av bakterier skulle föredra olika vattentyper. Det var inte heller väntat, eftersom en bakteriepopulationens storlek främst beror på näringstillgången. Denna varierar inte nämnvärt mellan olika vattentyper.

Syrefritt eller inte?

Ett viktigt resultat av mikrobanalyserna i Forsmark var att antalet sulfatreducerande bakterier tycks ha en betydande inverkan på redoxpotentialen i berget. Med redoxpotential menas ett ämnes benägenhet att ta upp eller avge elektroner. Redox-



Bakterier i vattenfyllda sprickor i berggrunden. Organismerna är infärgade med ett fluorescerande färgämne för att synas.



Pyritkristall (Py). På bilden syns även kalifältspat och kvartskristaller (Qz).

potentialen är ett mått på om förhållandena i berget är syrefria (reducerande) eller syrerika (oxiderande). Vid positiv redoxpotential är det ont om elektroner, vilket gör att de oxiderade formerna av olika ämnen dominerar. I fallet svavel dominerar således sulfat. På motsvarande sätt är tillgången på elektroner god vid reducerande förhållanden. Då är redoxpotentialen negativ och den reducerade formen sulfid dominerar. Gränsen mellan oxiderande och reducerande förhållanden i berget kallas redoxfront.

I avsnittet om berggrundens utveckling konstaterade vi att det finns fyra generationer av sprickmineral i Forsmark. Sprickmineralen kan inte bara berätta när en spricka bildades eller reaktiverades. De kan också tala om vilken kemisk miljö som har varit den förhärskande i berget. I samband med en istid skulle till exempel syrerikt vatten kunna tränga ner i berget. Detta skulle påverka redoxförhållandena och redoxfronten skulle då kunna flytta sig ner mot djupare nivåer i berget.

Vissa känsligare än andra

Vissa ämnen i mineralen är nämligen extra känsliga för redoxförhållandena. Det gäller i synnerhet järn, cerium och uran. Under platsundersökning-

arna karterade och analyserade vi sprickmineralen mycket noggrant för att få en uppfattning om hur redoxförhållandena varierat under gångna tider. Analyserna av de två äldsta grupperna visar att redoxförhållandena i berget måste ha varierat både i tid och rum. Vi har identifierat oxiderade former av både järn och cerium i vissa sprickor, samtidigt som det funnits reducerade former av de båda ämnena i mineral bildade under samma period i andra sprickor.

Sprickor som uppkommit under paleozoisk tid (545–250 miljoner år

sedan) visar däremot upp tecken på reducerande förhållanden. Flera vattenförande zoner har fällningar av järnsulfid (pyrit). Pyrit innehåller den reducerade formen av järn.

I de översta delarna av den flacka zonen ZFMA2 kan vi se spår av att syrerikt vatten cirkulerat i sprickorna. Förmodligen skedde detta i samband med den senaste nedisningen. Där finns utfällningar av mineralet götit, som innehåller järn i sin mest oxiderade form. Här tror vi dock att det kan ha rått ett "mikroklimat" med små områden där oxiderande förhållanden

råder i en annars reducerande miljö. En oväntad upptäckt vid platsundersökningen var den omständighet att uran frigjorts ur berget för att sedan åter fälls ut som sprickmineral i berggrunden. En del av dessa uranmineral är relativt lösliga. De har gett ett mätbart tillskott till uranhalt i grundvattnet från ytan ner till ungefär 600 meters djup.

Vi har också funnit uranmineral på ännu större djup. Uranet kan hållas i lösning även i syrefritt vatten, om halterna av vätekarbonat samtidigt är tillräckligt höga.



Kemin avslöjar ursprunget

Grundvattnet har olika ursprung. I Forsmark talar vi om meteoriskt vatten (från nederbörd), littorinavatten, glacialt smältvatten och mycket salt vatten (saltlake). För att klassificera olika grundvattentyper, deras ursprung och hur de blandats eller på annat sätt påverkat utgår vi från vattnets kemi.

Det första man tittar på är vilket ursprung vattnet har. Halterna av magnesium, kalium och sulfat samt kvoten mellan bromid- och kloridjoner avslöjar om grundvattnet har marint eller icke-marint ursprung. De uppvisar också om det rör sig om en ren vattenfraktion eller om en blandning.

Kemiska analyser ger också en uppfattning om vilket klimat som rådde vid den tid då vattnet trängde ner i berget. Förhållandet mellan mängden av den vanliga syreisotopen syre-16 och den tyngre syre-18 speglar variationerna i temperatur och nederbörd.

I vattenången som avdunstar från haven och faller ned som nederbörd över land finns mer av den tunga isotopen syre-18 om klimatet är varmt. På motsvarande sätt sjunker halten under kalla perioder. Vi kan således identifiera ett glacialt smältvatten genom att det dels har ett icke-marint ursprung, dels av att vattnet innehåller lite syre-18.

De mycket salta vatten som finns på stora djup har bildats under varma perioder före den senaste istiden. Åldersbestämningar visar att det kan vara så gammalt som flera hundra tusen år. Denna mycket gamla vattentyp finns bevarad i bergets porer även på ovanförliggande nivåer.

Berget som barriär

Berget är en av de tre barriärerna i slutförvaret. Förutom att skydda kapslarna med använt kärnbränsle från vad som händer på markytan ska det också fördröja och "filtrera" de radioaktiva ämnen som eventuellt kan komma ut ur en otät kapsel.

En fråga som är mycket viktig vid analysen av den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar är bergets förmåga att förhindra transport av radioaktiva ämnen från förvarsdjup till markytan. När vi modellerar transport av olika ämnen i berget, måste vi dels beskriva hur flödet sker, dels vilka mekanismer som bromsar transporten.

Bergets barriärfunktion bygger på att majoriteten av de radioaktiva ämnena aldrig ska nå markytan. Fördröjningen ska vara så stor att de i tillräcklig utsträckning hinner sönderfalla till stabila ämnen på vägen.

Fysik och kemi

Berggrundens förmåga att transportera radioaktiva ämnen har en fysikalisk och en kemisk del. Den fysikaliska delen har med vattnets rörelser att göra. Transporten av lösta radionuklider med grundvattenströmmarna



I berget finns sprickor av många olika slag. Olika processer i sprickorna bromsar upp transporten av radionuklider i berget.

kallas advektion. På förvarsdjup begränsas advektionen genom att vattnet i vissa sprickor i princip är stillastående. Den advektiva transporten sker bara i öppna och sammanhängande sprickor.

Från hög till låg halt

De radioaktiva ämnena kan också transporteras i bergets mikrosprickor genom en process som kallas diffusion. Ämnena vandrar då genom slumpmässiga rörelser från områden med hög koncentration till områden med låg koncentration. Radioaktiva ämnen kan även diffundera in i återvändsgränder i sprickor och till sprickpartier med stillstående vatten. Diffusionshastigheten bestäms framför allt av vattnets och de lösta ämnenas egen-

skaper. Jämfört med advektion är diffusion en mycket långsam process. Diffusionen in i bergets mikrosprickor och till partier med stillstående vatten innebär en uppbromsning av den transport av radioaktiva ämnen som sker med det strömmande grundvattnet.

Fastnar på berget

Den kemiska delen handlar om hur berget, grundvattnet och de radioaktiva ämnena reagerar med varandra. Här är det alltså inte fråga om någon transport, utan om hur transporten bromsas upp. De flesta radioaktiva ämnen fastnar (sorberar) lätt på bergets sprickytor, sprickmineral och på ytorna inne i bergets mikroporer. Av de ämnen vi studerar är det i första



För att ta sig från förvarsdjup till markytan måste en radionuklid passera ett nätverk av sprickor.

hand jod-129, klor-36 och kol-14 som är någorlunda lätttröliga.

Sorptionen kan ske antingen genom att ämnet adsorberas (fäster på ytan) vid den fasta fasen eller genom att det absorberas (upptas) i den. Att de flesta radioaktiva ämnen sorberar så lätt beror på skillnader i laddning. De radioaktiva ämnena förekommer i grundvattnet oftast som positivt laddade joner i grundvattnet.

Vid de kemiska förhållanden (pH och Eh) som råder i grundvattnet på 500 meters djup i en berggrund som domineras av granitliknande bergarter har sprickmineralens ytor ofta en

negativ nettoladdning. De positiva radionuklidjonerna attraheras till de negativt laddade delarna av sprickmineralens ytor och kan bilda så kallade ytkomplex. Detta kan också ske inne i bergets porer. Ibland sker också ett jonbyte, varvid radionukliden inlemmas i mineralstrukturen genom att den ersätter en annan positivt laddad jon i denna.

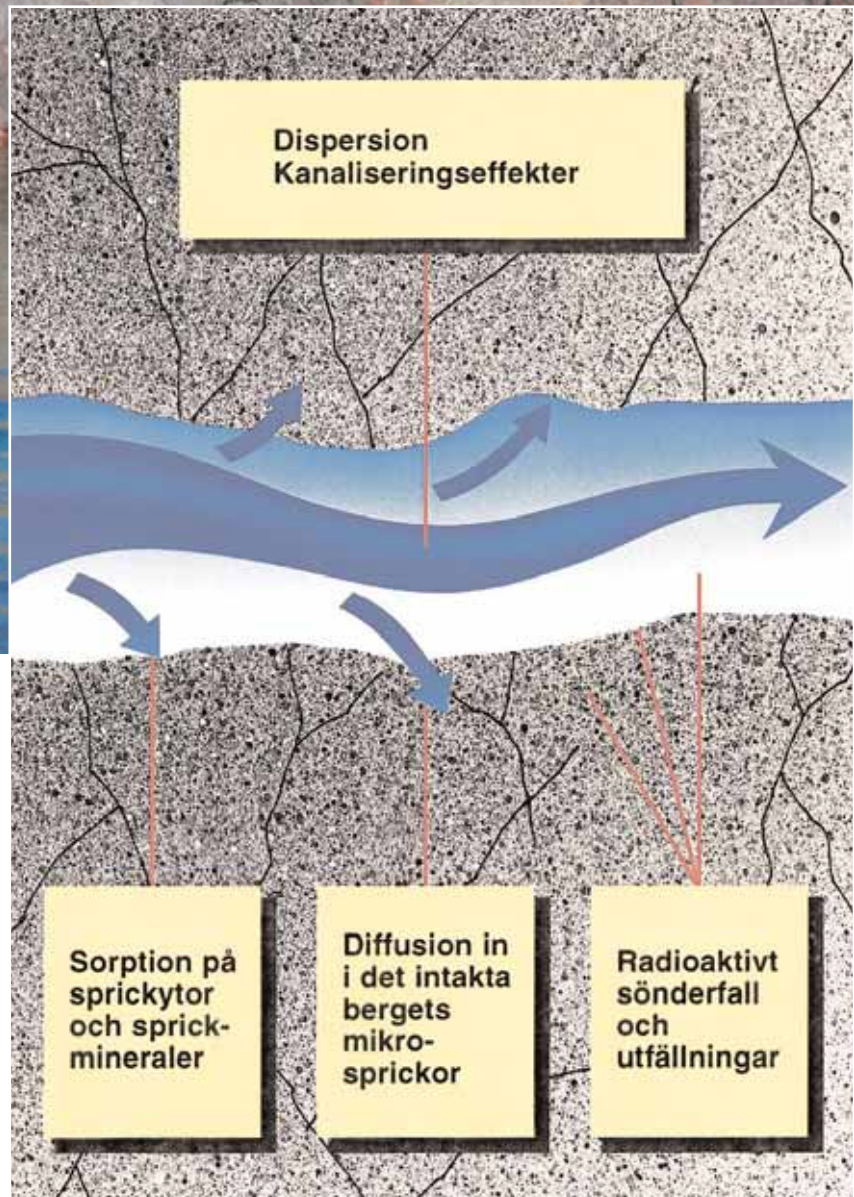
Tre viktiga parametrar

Både diffusionen och sorptionen bromsar alltså upp transporten. De är så kallade retentionsprocesser.

Tre parametrar är speciellt viktiga när det gäller att beräkna retentionen:

- Effektiv diffusivitet, D_e
- Fördelningskoefficient, K_d
- Bergmatrisens porositet

Den effektiva diffusiviteten, D_e är ett mått på hur rörlig en radionuklid är i berget när vattnet inte rör sig. D_e -värdet tar hänsyn till att diffusionen bara kan ske genom poröppningar, eftersom mineralkorn blockerar andra möjliga transportvägar. Det finns inget sätt att direkt mäta den effektiva diffusiviteten nere i berget. I stället får man beräkna den utifrån



empiriska formler, som kan grunda sig på exempelvis laboratorieförsök med bitar av borrhärdar.

Ämnen som har lätt för att sorbera sägs ha höga K_d -värden. K_d kallas fördelningskoefficient. I det här fallet är den ett mått på hur lätt en radionuklid fastnar på berget vid en bestämd grundvattensammansättning och en given bergart.

Lång och krokig väg

Att ta sig ut ur kapseln, genom bentonitbufferten och vidare genom berget upp till markytan är en besvärlig resa

Sorption och diffusion är de processer som i första hand bromsar upp transporten av de radioaktiva ämnena.

för en radionuklid. Vid modelleringen av bergets transportegenskaper utgår vi från hur en radionuklid rör sig genom ett system av sprickor i berget från mikrosprickor till sprickzoner.

Hela transporten genom bufferten går mycket långsamt och sker genom diffusion. När sedan radionukliden kommit ut i berget som omger deponeringshålet kommer den först till ett område med mikrosprickor. Här är vattengenomsläppligheten mycket låg, men transporten övergår nu från att vara styrd av diffusion till att regleras av advektionen.

Efter några meter kommer radionukliden ut i det område i berget

som ligger mellan sprickzonerna och som modelleras stokastiskt. Sprickornas transmissivitet är högre här än närmare kapseln, men det rör sig bara om enskilda sprickor – inte om några stora vattenförande zoner. Här förflyttar sig radionuklider i flödeskanaler genom de sammanhängande sprickorna tills den når den närmaste av de deterministiskt modellerade sprickzonerna.

Sprickor och matris fördröjer

Vid modelleringen tilldelade vi alla geometriska element (bergenheter och deformationszoner) i den geo-

logiska modellen specifika retentionsegenskaper. För bergarterna i bergenheterna RFM029 och RFM045 var skillnaderna inte så stora. Däremot ska vår radionuklid passera en rad olika typer av sprickor på sin väg mot ytan. Dessa har sinsemellan olika retentionsegenskaper.

För att förenkla beräkningarna har vi delat in sprickorna i åtta kategorier. Indelningen är gjord utifrån vilken generation sprickan tillhör, vilket sprickmineral som täcker ytorna samt hur djupt vittringen runt sprickan gått.



Bestämning av diffusivitet i laboratorium.

Så mätte vi bergets transportegenskaper

Sorptionsegenskaperna bestämdes i laboratorium. Bergproverna togs från olika djup i borrhålen och krossades sedan i olika storlekar. Vi analyserade till exempel sorptionsförmågan för ett tiotal radioaktiva ämnen i olika bergmaterial och med olika vattensammansättningar.

Det är svårt att mäta berggrundens transportegenskaper i fält, eftersom borrhålen ligger så långt från varandra. Ändå måste vi göra det för att visa att de egenskaper som vi bestämmer i laboratorium också gäller nere i berget under verkliga förhållanden.

För att täcka platsundersökningens behov fick vi använda en metod för att mäta retentionen. Metoden har fått namnet Swiw-test (single-well injection-withdrawal). Testet görs med en mobil utrustning som sänks ned till en lämplig spricka på förvarsdjup i ett borrhål.

En spårämneslösning pumpas in i sprickan. Lösningen innehåller både ämnen som inte fördröjs och sådana som fördröjs och dessutom har samma kemiska egenskaper som radionuklider (till exempel saltet cesiumjodid). Efter en tid pumpas vattnet tillbaka ur sprickan och vi kunde då mäta skillnaden i koncentration mellan de olika ämnena.

An aerial photograph of a lush, green landscape covered in moss and small plants. A central stream flows through the terrain, surrounded by dense vegetation. The overall scene is vibrant and natural.

PÅ YTAN

- Att beskriva ytan
- I isens spår
- Vattnets vägar vid ytan
- Sjöar och vattendrag
- I skog och mark
- Till havs
- Flöden i landskapet



Storskäret med Kallrigafjärden i förgrunden och kärnkraftverket i bakgrunden.

Att beskriva ytan

Platsundersökningen i Forsmark har inte bara inneburit provborringar i berget, utan även ett omfattande program för att undersöka ekosystemen på land, i sjöarna och i havet.

För att kunna beskriva de eventuella effekter som ett förvar för använt kärnbränsle kan åstadkomma – både under byggfasen och när förvaret väl finns på plats – måste man skaffa sig en bra bild över hur ekosystemen i Forsmark ser ut och fungerar.

Effekterna kan vara kortsiktiga och behandlas då i miljökonsekvensbeskrivningens rapporter. De kan också vara långsiktiga och redovisas i

så fall i en separat säkerhetsanalys. Dessutom behövs information om mark- och vattenförhållanden för att på ett bra sätt kunna bygga och placera de anläggningar ovan jord som ingår i förvaret. I platsbeskrivningarna samlas den information som behövs för att svara på frågeställningarna.

Här redovisas delar av dessa beskrivningar, med tonvikt på allmän plats-

förståelse och långsiktig säkerhet. Några exempel på frågor som varit viktiga under analysarbetet är:

- Vilka ekosystem finns i Forsmark och hur fungerar de?
- Hur har Forsmark utvecklats från senaste istiden till i dag?
- Vilka egenskaper och processer styr flöden av ämnen i landskapet samt mellan ytan och djupet?

Med ett ekosystem menas en bit natur med dess innehåll av växter, djur, vatten, vind, mineraler med mera. Att klassificera och dela in landskapet i lagom stora enheter är en av de viktigaste uppgifterna vid modelleringen av de ytnära ekosystemen. Ett ekosystem kan vara hur stort eller hur litet som helst och har heller inga begränsningar i tiden. Det kan omfatta en stubbe eller en skog, en liten damm eller ett stort hav. Den som ska genomföra undersökningen bestämmer därför också omfattningen i tid och rum utifrån syftet.

Tre ekosystem

Vi har valt att dela in ekosystemen i Forsmark i tre grupper:

- Landekosystem
- Sjöekosystem
- Havsekosystem

Landekosystemet är i sin tur uppdelat i olika delekosystem; skog, våtmark och jordbruksmark.

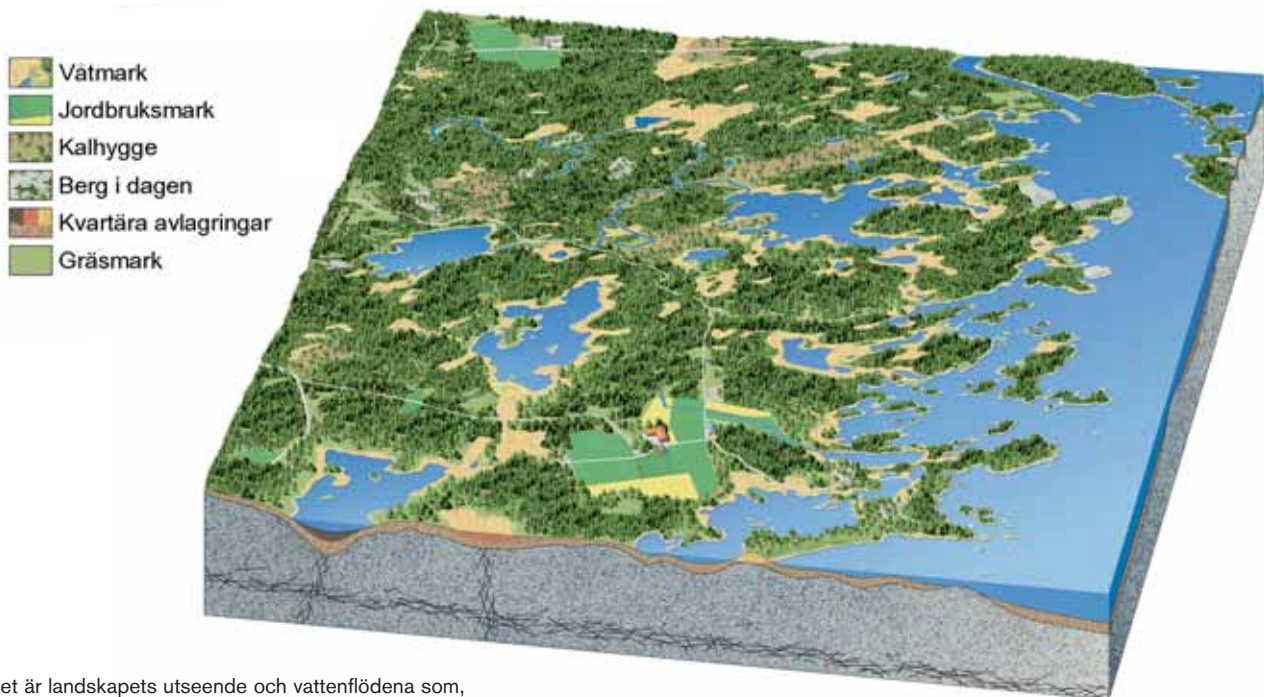
Platsundersökningen i Forsmark har resulterat i en av de mest ingående beskrivningarna som någonsin gjorts i Sverige av ekosystemen på en plats. Precis som när vi beskrev berget har vi haft ett integrerat synsätt, där så skilda discipliner som hydrologi, kvartärgeologi, kemi och ekologi är representerade.

Samverkan mellan yta och djup

Under arbetet med platsbeskrivningen behövdes även information från ytsystemet för att förstå de processer och företeelser som förekommer nere i berget. På samma sätt har vi utnyttjat de modeller och data som tagits fram för berget för att skapa en principiell förståelse för hur förhållanden i de djupare delarna kan påverka ytsyste-



Therese Carlsson från limnologiska institutionen vid Uppsala universitet karterar växter vid ett vattendrag.



Det är landskapets utseende och vattenflödena som, tillsammans med övriga transportprocesser, avgör vilka ekosystem och organismer som kan komma att utsättas för effekter av ett slutförvar.



Vid modelleringsarbetet har vi delat in ekosystemen i Forsmark i tre kategorier: sjöekosystem, landekosystem och havsekosystem. Bilden visar de centrala delarna av kandidatområdet med sjön Bolundsfjärden i förgrunden och SFR i bakgrunden.

met. Denna typ av integration mellan yta och djup – samt mellan ämnesområdena – har varit mycket värdefull och hjälpt oss att bättre förstå hur platsen Forsmark ser ut och fungerar i dag.

Arbete i flera steg

Arbetet med att beskriva ytan kan delas in i flera steg. Det första steget är att konstruera en konceptuell modell för ett landskap som omfattar både mark, sjöar och hav. Med en konceptuell modell menas en modell som på ett principiellt sätt beskriver en företeelse – i det här fallet hur olika ämnen transporteras mellan och ackumuleras i olika ekosystem i ett landskap. Modellen innehåller både biotiska och abiotiska faktorer (levande och ickelevande företeelser).

Den konceptuella modellen behöver inte från början vara knuten till en speciell plats. Genom att använda de data som framkommit vid platsunder-

sökningen och vid andra undersökningar, kan man sedan i nästa steg utveckla och anpassa den allmänna konceptuella modellen till en platsspecifik variant. Detta har vi också gjort för fallet Forsmark. Den konceptuella modellen ger oss till exempel en grov uppfattning om var i det regionala undersökningsområdet biomassa lagras och var den förbrukas.

Nästa steg är att vi kvantifierar egenskaperna hos respektive ekosystem. Rent praktiskt innebär detta att vi sätter siffror på flödena in i och ut ur systemet genom att göra djupdykningar i vart och ett av ekosystemen, där vi studerar hur näringsvävorna ser ut och vilka funktionella grupper (grupp av djur eller växter som har samma funktion) som finns.

Utifrån provtagningar, statistiska bearbetningar av data och även genom att använda oss av modeller som tagits fram i andra sammanhang kan vi sedan bestämma hur stora mängder av olika ämnen som tillförs, befinner sig i och

lämnar ekosystemet i fråga. Det finns ett antal tekniker för att ta reda på ovanstående. Mycket förenklat handlar det om att hitta andra ämnen – eller grupper av ämnen – som till sina egenskaper liknar de radioaktiva och därefter undersöka hur de fördelar sig inom och rör sig mellan olika medier.

Man skulle kunna säga att modelleringsarbetet går ut på att rita en tredimensionell karta över hur material av olika slag rör sig inom ett område. Denna kunskap kan sedan användas för att bedöma hur olika ämnen transporteras och ackumuleras. Analysarbetet har omfattat både naturliga processer och de förändringar som människan gett upphov till.

Vattnets roll viktig

När vi beskriver ytan måste vi lägga särskild vikt vid vattnets roll. Det är flödet av vatten vid ytan och i övergången mellan berg och markyta som

tillsammans med övriga transportprocesser avgör vilka ekosystem och organismer som kan komma att utsättas för strålningsdoser.

Framför allt gäller det att veta var utströmningsområdena och avrinningsområdena finns. Ett utströmningsområde är ett område där grundvatten når markytan, medan ett avrinningsområde definieras som ett landområde (inklusive sjöar) där all nederbörd som faller rinner ut i samma vattendrag.

Avrinningsområdet begränsas av omkringliggande vattendelare. Med vattendelare menas i sin tur en höjdformation, som är så hög att inga vattendrag passerar den. Vattendelaren delar i stället upp vattenflödet i två eller flera riktningar.

Flera faktorer styr flödet

Eftersom flödet av ytvatten som synes beror av en rad olika faktorer, till exempel höjdskillnader i terrängen samt jordtäcket tjocklek och genomsläpplighet, måste vi konstruera modeller för dessa komponenter.

Vi behöver också ta hänsyn till att förhållandena ändras med tiden genom att beskriva hur strandlinjen och landskapstyperna förändras. Den tidsperiod vi har studerat sträcker sig från det att inlandsisen lämnade Forsmark för ungefär 11 000 år sedan fram till i dag.

Kemin är också en mycket viktig komponent vid modelleringen. Vid platsundersökningarna genomförde vi ett mycket omfattande kemiprovtagningsprogram där de kemiska egenskaperna hos vatten, växtlighet, jordlager etc kartlades. De data som framkom har sedan använts för att tilldela de olika komponenterna en del av sina egenskaper.

Sett i ett större sammanhang kan de kemiska förhållandena i hela landskapet ge många viktiga ledtrådar till att förklara hur platsen fungerar.

Markkemin har ju stor betydelse för grundvattnets kemi. Den kemiska sammansättningen påverkar transportprocesserna i väldigt hög grad. Sammansättningen är också viktig för att kontrollera om vi räknat rätt. Våra beräkningar av hur grundvattnets sammansättning förändras när det tränger ner i berget måste till exempel stämma med den verkliga sammansättningen.

Människan då och nu

Vid modelleringsarbetet har vi också studerat hur människan påverkat landskapet under historiens gång. Säkerhetsanalysens dosberäkningar inriktar sig på den grupp av människor som skulle drabbas hårdast av ett utsläpp av radioaktiva ämnen. Det värsta tänkbara fallet är en grupp människor som bor på platsen och som livnär sig utslutande genom självhushållning.

Dagens situation är långt från ett sådant scenario. De få invånare som finns inom det regionala modellområdet i dag använder sig inte av marken och havet som resurs tillnärmelsevis så intensivt som befolkningen i området gjorde för exempelvis 100 år sedan. Genom att undersöka de historiska förhållandena är det emellertid möjligt att få en uppfattning om var gränserna för produktion och förbrukning går i ett samhälle som baseras på självhushållning.

Lättare undersöka på ytan

Fördelen när man modellerar förhållandena på ytan jämfört med när man modellerar förhållandena nere i berget är att det är lättare att kontrollera de antaganden man gör. En vegetationskarta kan ganska lätt kontrolleras mot verkligheten genom att man helt enkelt går ut i naturen och jämför.

Vid utvärderingen är ett tvärvetenskapligt synsätt nödvändigt eftersom



Anna Hedenström, kvartärgeolog vid SGU, är en av de många personer som har deltagit i arbetet med att modellera förhållandena på ytan. Hon har ansvarat för beskrivningen av de avlagringar som avsatts under och efter den senaste istiden.

modellerna måste vara konsistenta mellan olika ämnesområden – både för de yt nära disciplinerna och de ämnesområden som berör förhållandena på djupet. Exempelvis måste hydrologernas modell över ytvattenförhållanden, infiltration och grundvattenflöde, stämma överens med geokemisternas modell över olika vattentypers utbredning mot djupet, men också med ekologernas modeller över flödet i markytan av olika ämnen.

I isens spår

Inget fenomen förändrar förhållandena på markytan så radikalt som en istid. Stora mängder sten och jord fryser fast i isen för att sedan på olika sätt deponeras på andra platser.

Den senaste istiden startade för 115 000 år sedan och hade sitt maximum för ungefär 20 000 år sedan. Perioden kallas Weichsel. Namnet kommer från det tyska namnet på floden Wisla i norra Polen. Så långt söderut nådde nämligen den skandinaviska inlandsisen. Förutom i Skandinavien fanns det också vid denna tid inlandsisar i Alperna, Sibirien, Nordamerika, Antarktis och på Grönland.

Minst tre gånger under den senaste istiden har Forsmark varit täckt av en inlandsis. Den varma period vi just nu upplever är ett undantag. Det normala på våra breddgrader är permafrost

(ständigt frusen mark) eller ett upp till tre kilometer tjockt istäcke.

De glaciärer vi kan se i dag i den svenska fjällkedjan, i Alperna och på Island är inga kvarvarande rester av inlandsisen. Riktiga inlandsisar finns bara på Grönland och Antarktis. Skillnaden mellan en inlandsis och en glaciär är att inlandsisen är så stor att den styr sitt eget klimat.

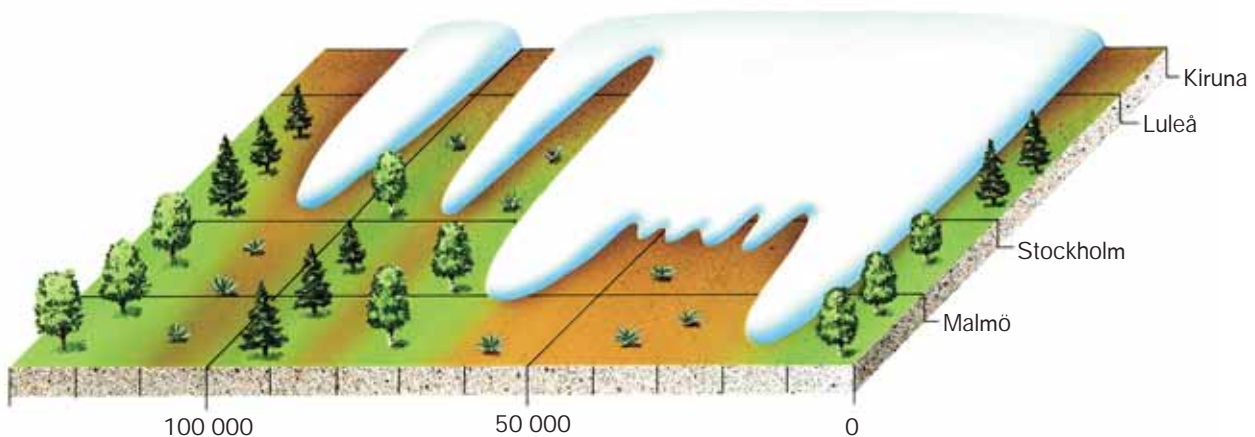
När isen smälter går det ganska fort. Under Weichsel började isen dra sig tillbaka för ungefär 18 000 år sedan. Iskanten nådde Forsmark för ungefär 10 800 år sedan. Fronten drog sig vid den tiden tillbaka med mellan

300 och 350 meter per år från området. Mindre än 1 000 år senare var hela Sverige i stort sett isfritt.

Tre olika processer

Geologerna talar om tre olika processer som formar landskapet i samband med en istid: erosion, transport och avlagring. När isen rör sig över underlaget hyvlar den av mycket av det lösare materialet ovanpå berggrunden. Jord och stenar av olika storlekar fryser fast i isen, rör sig med denna och river som ett rivjärn. På detta sätt har isen eroderat storskaliga formationer som fjällkedjornas u-formade dalar.

Erosionen verkar också i liten skala. Alla har vi sett klipphällar som slipats släta av inlandsisen. Vad vi däremot kanske inte har lagt märke till är att hällarna ofta är formade på ett speciellt sätt. På fackspråk kallas de rundhällar.



Isens utbredning i Sverige under den senaste istiden (Weichsel) jämfört med det nord-sydliga läget för några av dagens städer.



Rundhällen har en mycket karakteristisk form. Isen har glidit fram över den jämna ytan och plockat med sig material från den branta sidan.

Den blankslipade hällen slutar ofta tvärt med en brant ojämn lutning.

Formen visar att isen har glidit fram över den blankpolerade delen för att sedan plocka med sig material från den branta delen. Ofta finns det också räfflor som visar isens rörelseriktning. Räfflorna är repor från stenar som suttit infrusna i isen.

I nordöstra Uppland finns det tre generationer av isräfflor, som avspeglar isens rörelseriktning vid olika tillfällen. Den äldsta generationen motsvarar en rörelseriktning från nordväst, mellangenerationen motsvarar en rörelseriktning från nord-nordväst och den yngsta generationen motsvarar en rakt nordlig rörelseriktning.

Mönstret med olika generationers räfflor finns även i kandidatområdet. Här skiljer sig emellertid riktningarna. Både den äldsta och den yngsta generationen representerar rörelser rakt norrifrån, medan mellangenerationen visar på en rörelse från nordväst.

En smältande is kan antingen släppa sitt grepp om stenmaterialet direkt eller också transportera detta på olika sätt till en annan plats. Båda sätten ger karakteristiska formationer i naturen. Genom att studera hur transporten och avlagringen har skett kan man få en uppfattning om i vilken riktning isen har rört sig och hur långt materialet har transporterats.

Släpper greppet direkt

Låt oss börja med det fall då isen släpper greppet om stenmaterialet direkt. Stenar och grus hamnar då huller om buller på marken. Partiklarna är kantiga och bildar morän. Kornstorleken hos en moränavlagring varierar mycket – från block till små lerpartiklar.

Morän är den vanligaste jordarten i Sverige i dag och täcker hela 75 procent av landets yta. Moräntäcket följer i regel berggrundens höjdskillnader,



Räfflorna på ytan visar hur isen har rört sig. I Forsmark har isen ändrat rörelseriktning tre gånger och kommit från norr, nordväst och återigen rakt norrifrån. Bilden visar den yngsta generationen sprickor orsakade av en isrörelse rakt norrifrån.

men kan även bilda egna formationer. Detta kan leda till förvirring, eftersom begreppet morän alltså både omfattar jordarten och den formation som jordarten bildar. En moränformation kan ligga både längs med och vinkelrätt mot isens rörelseriktning beroende på hur den har avsatts.

Även i Forsmark är morän den vanligaste jordarten. Den täcker 65 procent av det regionala modellområdet och 30 procent av havsbotten. Vi har inte hittat några moränavlagringar från tidigare nedisningar, utan tror att all morän har avsatts i samband med den senaste

istiden. Det går emellertid inte att utesluta att det någonstans i området även skulle kunna finnas ännu äldre moränavlagringar.

Moränen i Forsmark avsattes vid olika tillfällen under den senaste istiden. Detta vet vi genom att avlagringarna har olika sammansättning.

Strandlinjen i Forsmark

När inlandsisen smälte täcktes stora delar av den nedpressade jordskorpan av havet. Den högst belägna strandnivån efter istiden kallas högsta kustlinjen.

När man modellerar hur förhållandet mellan land och hav ändras talar man inte om landhöjning utan om strandlinjeförskjutning.

Den globala havsnivån ändras nämligen också och kan både stiga och sjunka, beroende på klimatet och på hur mycket vatten som är bundet i inlandsisar.

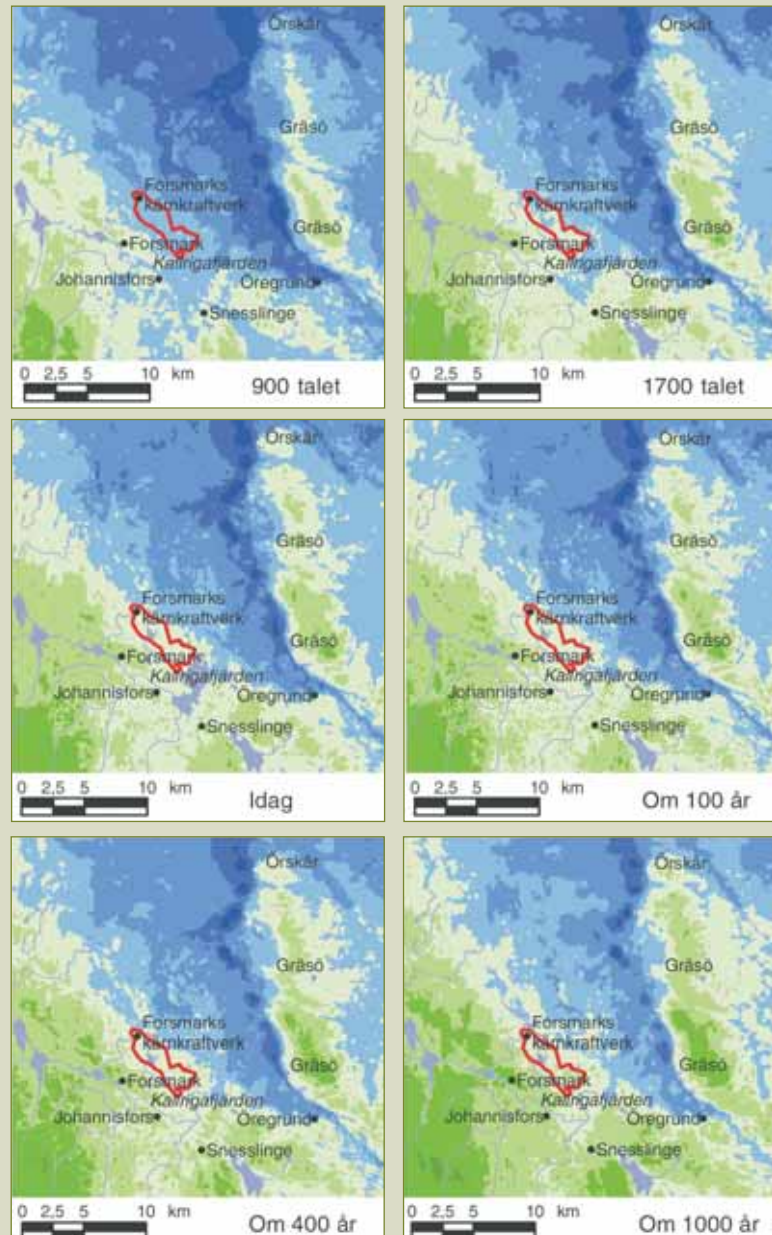
Strandlinjeförskjutning är nettoeffekten av landhöjningen och förändringen i havsnivå.

Vid den tid då isen lämnade Forsmark var jordskorpan nedpressad så mycket att vattendjupet var 150 meter i kandidatområdet. Till en början gick strandlinjeförskjutningen mycket snabbt – cirka 3,5 meter på 100 år. I dag uppgår strandlinjeförskjutningen till omkring sex millimeter per år.

Tittar vi in i framtiden kommer stora områden, som i dag ligger under vatten att bli land. Strandlinjeförskjutningen ändrar även det unga flacka landskapet genom att gradvis förvandla det till en torrare miljö.

En viktig pågående process i Forsmarksområdet är när havsvikar snörs av och bildar insjöar. Med tiden växer sjöarna igen och bildar våtmarker. Via kärr och mossar omvandlas våtmarkerna så småningom till skogs- eller jordbruksmark.

Landhöjningen har förändrat landskapet genom årtusendena. Processen fortsätter. Om 1 000 år har till exempel Örskär förenats med Gräsö.



Huvuddelen av moränen har transporterats från nordväst.

En av de äldsta moränlagren som påträffats är lerig, kompakt och blå. Den kallas Gamle Blå. Avlagringen är belägen i den västra delen av kandidatområdet, nordöst om Gällsboträsket. Det är en mycket hård lerig moräntyp som bildades för ungefär 75 000 till 60 000 år sedan. Tidsbestämningen har vi kunnat göra genom att analysera pollen från den tidens växtlighet.

Tre moränområden

Vi har delat in moräntäcket i tre olika delar utifrån dess sammansättning på ytan. Huvuddelen av landdelen av modellområdet tillhör moränområde I. Här är moränen sandig och det finns en del stora block på markytan. Medeldjupet uppgår till 3,5 meter.

I modellområdets sydöstra delar är moränlagren djupare och lerigare, vilket gör marken lämpligare för odling. Vi kallar detta moränområde II. Åkermarkerna runt Storskäret består till exempel av morän med en lerig sammansättning. Det genomsnittliga morändjupet i område II är 5,8 meter.

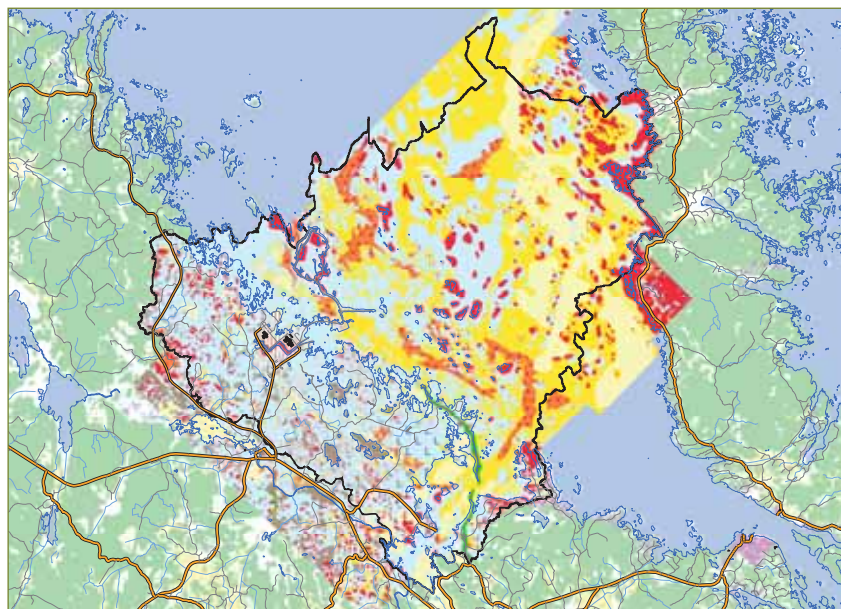
De östra delarna av modellområdet tillhör moränområde III. Här dominerar grövre moränavlagringar på ytan. Stora block är vanliga här. Den grova kornstorleken gör att marken lätt släpper igenom vatten.

Djupt och lerigt i väst

Vi har också undersökt vilka bergarter som moränen består av och jämfört dessa med sammansättningen hos de bergarter som den underliggande berggrunden består av. Sammansättningen hos de stora moränblocken liknar mycket sammansättningen hos de bergarter som är vanliga i Forsmark. Därmed har blocken förmodligen inte heller transporterats så långt.

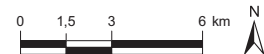


Refraktionsseismik bygger på att ljudvågor fortplantar sig med olika hastigheter i olika material. På så sätt kan man särskilja olika lager i marken och berget. Bilden visar hur hastigheten varierar. I moränlagret "Gamle Blå" är hastigheten ungefär dubbelt så hög som i ovanpåliggande yngre moränskikt.



Jordarter

Torv och gyttna	Glaciofluviala sediment
Lera-silt	Morän
Ler gyttna	Lerig morän eller moränlera
Glacial lera	Urberg
Postglacial sand-klapper	Fyllnadsmassa



© Lantmäterverket Gävle 2007
Medgivande I 2007/1092

Fördelningen av de olika jordarterna och berg i dagen inom Forsmarks regionala modellområde. Kartan visar en sammanställning av resultaten från många olika undersökningar och bygger både på direkta observationer och på tolkningar av indirekta mätmetoder. Den svarta linjen i kartan visar det område där vi också har gjort en modell av jorddjupet.

I Forsmarksområdet, liksom i hela nordöstra Uppland består de mindre partiklarna i moränen av kalksten. Kalkstenen härrör från den sedimentära berggrund som finns i Gävlebukten. Den har sedan med isens hjälp transporterats till Forsmark rakt norrifrån. Tillskottet av kalk gör att ytvattnet och det ytliga grundvattnet har högt pH och höga koncentrationer av kalcium och bikarbonat.

Kantigt eller runt?

När isen smälte bildades stora tunnlar genom den. Där strömmade isälvar som förde med sig en blandning av block, stenar, grus och lera. Stenarna nöttes mot varandra och ojämnheter slipades bort. Man kan alltså skilja en moränavlagring från en isälvsavlagring genom stenarnas form och rundhetsgrad. I moränen är stenarna kantiga, i isälvsavlagringen rundslipade.

Huvuddelen av materialet transporterades längs isälvarnas botten. Vattnet sorterade materialet efter stor-

lek. När stenarna kom till tunnelns mynning och mötte havet minskade vattnets hastighet. Block och stenar kunde avsättas redan inne under isen, sand och lerpartiklar höll sig svävande i vattnet längre och sedimenterade inte förrän de kom ut i havet. Stenarna utgör kärnan i den ås, som byggdes upp. När isfronten drog sig tillbaka ännu mer byggdes formationen på med allt finkornigare partiklar. Åsarna löper vinkelrätt mot iskanten och har ofta en ringlande form, som visar var isälven haft sitt lopp.

Ringlande ås i söder

I södra delen av det regionala modellområdet kan vi se en sådan isälvsformation. Börstilåsen ringlar sig fram från Kallrigafjärden till Tixelfjärden. I de södra delarna är åsen mäktigare och bredare. Detta kan vara svårt att se med blotta ögat, eftersom den har planats av under landhöjningens gång.

Även havsbotten är täckt av morän, sand och lera. Där dominerar dock de



Åsar är avlagringar som bildas när material transporteras i tunnlar genom isen. Den har ofta en ringlande form som visar var isälven haft sitt lopp.

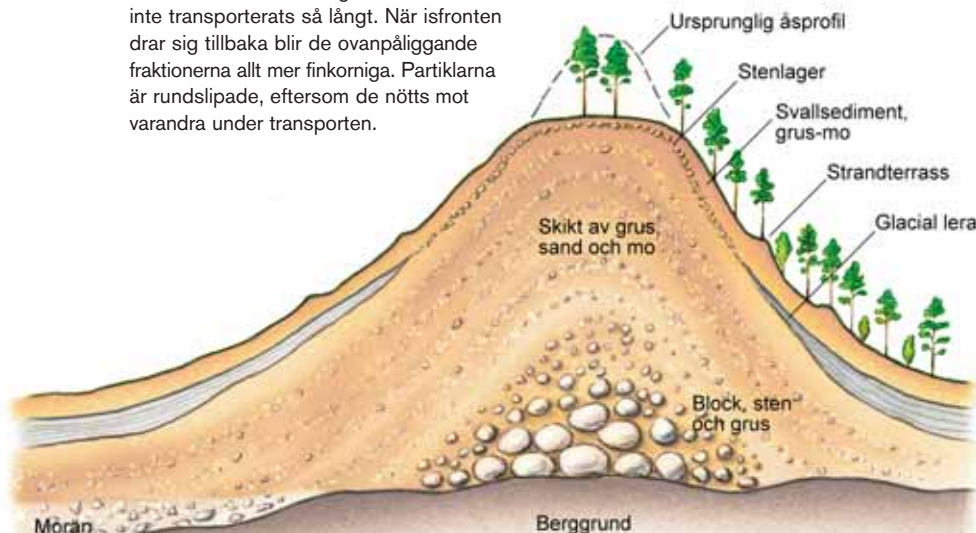
finkornigare jordarterna sand och lera. Jordarter som morän, sand och lera kallas med ett gemensamt namn glaciala jordarter om de har bildats i kontakt med inlandsisen. De består alla av oorganiskt material – kort sagt krossad sten i olika storlekar. Detta skiljer dem från de postglaciala jordarterna, det vill säga sådana som bildas efter istidens slut. Postglaciala jordarter kan innehålla organiska ämnen från förmultnade växter. Till de postglaciala jordarterna hör sediment av olika slag samt torvjordar.

Moränbottnar längre ut

På havsbotten är utbredningen av de postglaciala sedimenten främst koncentrerad till de grunda vikarna och till djupområdena. I andra delar av havet är botten exponerad för vågor och strömmar på ett helt annat sätt och där sker pålagring av sediment i mindre utsträckning. Bottnarna är ofta så kallade erosionsbottnar och består i stället till stor del av morän.

Inom det regionala modellområdet är mer än 90 procent av ytan täckt av glaciala eller postglaciala avlagringar. Resten består av berg i dagen. Hur jordarterna fördelar sig på ytan beror till stor del på den underliggande

Åsens kärna består av grovt material som inte transporterats så långt. När isfronten drar sig tillbaka blir de ovanpåliggande fraktionerna allt mer finkorniga. Partiklarna är rundslipade, eftersom de nöts mot varandra under transporten.



berggrundens topografi. Glacial lera tenderar till exempel att ansamlas i sänkor i terrängen, framför allt gäller detta sänkor på havsbotten. Det är därför viktigt att ta reda på hur den underliggande berggrunden varierar i

höjd inom det regionala modellområdet.

Vid analysarbetet har vi tagit fram en sådan modell av bergytan. Den visar att bergets yta varierar mer i höjdd än vad markytan ovanför gör.

Höjdmodellen för berggrunden sätter sedan, tillsammans med en motsvarande modell för hur höjdskillnaderna i terrängen varierar, gränserna för jordlagrens mäktighet i jorddjupsmodellen. Generellt är avlagringarna

Inga stora jordskalv i Forsmark

När isen smälter lättar trycket på markytan och denna höjer sig igen för att komma i jämvikt med den underliggande manteln. Höjningen går fort i början. Krafterna i berget omfördelas och ger upphov till fler och större jordskalv än vad som förekommer i dag.

Jordskalv är snabba rörelser som sker i bergets sprickzoner. Spänningarna i berget byggs gradvis upp för att till slut frigöras genom att berget rör sig.



På Börstilsåsens östra sluttning grävdes ett 80 meter långt dike för att studera om det fanns förskjutningar i jordlagren som kunde tyda på att det förekommit stora jordskalv efter den senaste istiden.

Rörelserna sker främst i befintliga deformationszoner. Om rörelsen är tillräckligt stor kan det ske en förkastning.

Bergblocken på de olika sidorna om en deformationszon rör sig då i förhållande till varandra. De kan höjas, sänkas eller glida längs med varandra och förflytta sig i sidled.

Ett jordskalv ger också avtryck i ovanpåliggande jordlager genom att dessa förskjuts i förhållande till varandra eller störs på annat sätt.

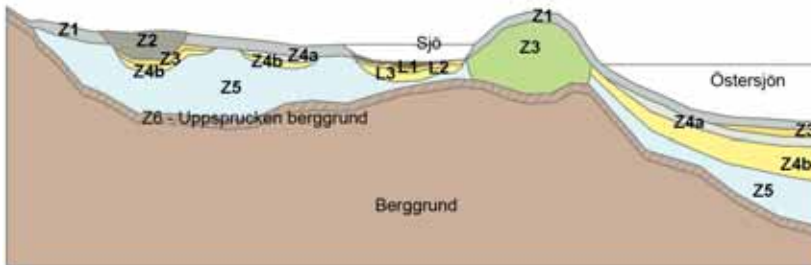
I norra Sverige kan man se flera exempel på förkastningsrörelser som orsakats av jordskalv med upp till magnitud 8 på Richterskalan. Däremot finns det inte några entydiga tecken på att stora jordbävningar efter den senaste istiden skulle påverkat berggrunden i södra Sverige.

Under platsundersökningarna gjorde vi en särskild studie för att undersöka om det finns några spår efter stora jordskalv i norra Uppland. På 18 olika platser grävde vi 48 diken (med en total längd av omkring 900 meter) för att studera hur de olika jordlagren ligger i förhållande till varandra och om lagerföljden har förskjutits. På två av de 48 platserna påträffade vi störningar i jordlagren som kan ha orsakats av jordskalv: Torkelsbo norr om Uppsala och Runhällen norr om Heby.

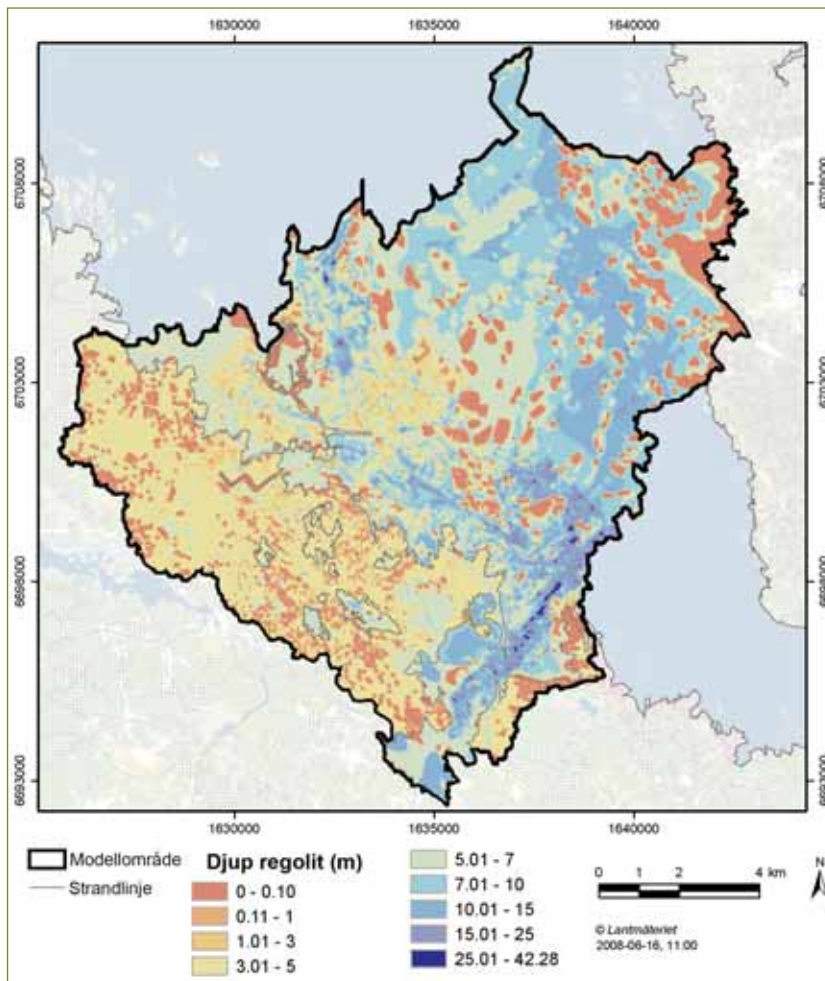
Inte på något ställe i kandidatområdet har vi hittat bevis i form av rörelser i jordlagren för att det har förekommit stora jordbävningar efter den senaste istiden. Med stora jordbävningar menar vi sådana med en magnitud som överstiger 7 på Richterskalan.

Däremot har vi bland annat vid Börstilsåsen påträffat spår efter skred. Samtidigt finns det också tecken på att det skett en omfattande erosion av strömmande vatten. Troligen är det denna erosion – och inte ett jordskalv – som orsakat skreden.

När vi frilade bergytan vid borrhälsplats 5 hittade vi också ytliga sprickor där det skett förkastningar. Sprickorna var fyllda med glaciala sediment, vilket visar att de reaktiverats i samband med istiden. Berggrunden undersöktes därför extra noga ner till ett djup av 130 meter. Det visade sig att berget bara var påverkat i det översta tiometersskiktet. Detta tyder på att orsaken borde vara någon ytlig händelse snarare än ett jordskalv.



Jorddjupsmodellen delar in jordlagren i olika skikt (Z1–Z6). Sjösedimenten (L1–L3) har modellerats för åtta utvalda sjöar.



Jorddjupsmodellen visar jordlagrens mäktighet inom det regionala modellområdet.

som täcker havsbotten dubbelt så tjocka som på land (i genomsnitt åtta meter jämfört med fyra meter på land).

Jorddjupsmodellen ger en förenklad bild av jord- och sedimentlagren genom att dela in dem i olika skikt, som vart och ett beskrivs geometriskt. Det översta lagret (Z1) representerar den del av jordtäcket som har påverkats av ytliga processer och biologisk aktivitet. Nästa skikt (Z2) omfattar ett lager med torv. Därefter följer Z3 som karakteriseras av sand och grus, isälsavlagringar eller fyllnadsmaterial. Det fjärde lagret (Z4) delas in i två kategorier: Z4a och Z4b. Dessa består av postglacial respektive glacial lera. Näst underst ligger moränen (Z5). Det understa lagret (Z6) representerar bergets överyta och motsvarar i verkligheten ett lager av uppsprucket berg. Vi har även modellerat sjösedimenten i åtta utvalda sjöar genom att betrakta dem som separata sedimentlinser. Vid modelleringen använde vi oss av tre förenklade lager: olika typer av gytta (L1), sand och grus (L2), samt glacial och postglacial lera (L3).

Data från många håll

Indata till modellen har kommit från 115 borrhål och 23 provgropar eller observationspunkter samt från fem borrhål i SGU:s brunnarsarkiv. Vi har också använt oss av flera tusen mätvärden, där jorddjupet har tolkats utifrån resultatet från de geofysiska undersökningarna (reflektionsseismik, elektriska sonderingar och markradarmätningar) vid platsundersökningen. Till detta kommer nästan 150 000 mätpunkter från maringeologiska undersökningar och information från befintliga geologiska kartor.



Cecilia Berg från Geosigma mäter vattnets elektriska ledningsförmåga vid en av områdets mätstationer för vattenflöden.

Vattnets vägar vid ytan

Omsättningen av vatten är mycket snabbare på ytan än på djupet. Där verkar även andra processer än på djupet, till exempel avdunstning. Därför måste vi ha ett annat angreppssätt för att kunna hantera de variationer som förekommer. Lösningen är att modellera ytan och berget med olika modelleringsverktyg och sedan kontrollera om modellerna passar ihop.

Den övre delen av vattnets kretslopp – den som berör förhållandena på markytan – innehåller ännu fler komponenter än vattenomsättningen i

berget. Några av dessa kan vi se med blotta ögat, till exempel regn, snö, bäckar och åar. Andra typer av vatten på eller nära markytan syns inte. Det

gäller bland annat vattenångan, markvattnet och det vatten som finns bundet i levande organismer. Det allra mesta av det vatten som avdun-



En del av nederbörden når aldrig marken, utan fastnar på växtligheten och avdunstar.



Nederbördsprovtagare på Brända hygget.

star från haven återvänder också till haven i form av nederbörd. En del av den vattenånga som omvandlas till regn, snö och hagel i atmosfären faller dock ner över land. I vilken form nederbörden kommer bestäms bland annat av var i atmosfären omvandlingen sker och av hur kallt det är i olika luftlager.

Ju varmare luften är, desto mer vattenånga kan den innehålla. När luften blir kallare kondenserar vattenångan och bildar vattendroppar eller iskristaller, som i sin tur bildar moln. Luften blir kallare om den stiger uppåt eller om den förs in över ett kallare område. För att det ska bildas vattendroppar krävs även att det finns partiklar som vattenångan kan fästa på.

Normal nederbörd

När vi beskriver vattnets vägar vid markytan i Forsmark utgår vi från de mätningar vi gjort av nederbörd, flöden i vattendrag, ytvattennivåer och grundvattennivåer i jordlager samt i den övre delen av berggrunden, som står i nära kontakt med jordlagret. I det undersökta området har neder-

börden i form av regn och snö mätts upp vid två stationer (Högmasten och Storskäret) mellan januari 2004 och december 2006. Årsmedelvärdet uppgick till 537 millimeter per år. Det ligger inte långt ifrån det värde på 559 millimeter per år som SMHI har angett som beräknat långtidsmedelvärde för tidsperioden 1961–1990.

En del av nederbörden tränger ner i marken. Markvattnet fungerar som en stor buffert för det ythydrologiska systemet. Efter en längre torrperiod behövs huvuddelen av den nederbörd som faller för att vattenmätta marken genom att fylla ut hålrummen mellan jordpartiklarna. Grundvattenmagasinen fylls därför inte på så mycket när det regnar efter en torr period. Inte heller flödena i vattendragen påverkas så mycket. Om det däremot kommer nederbörd efter en blöt period, när marken redan är vattenmättad, kan avrinningen bli häftig och orsaka kraftiga vattenflöden.

Magasin modifierar avrinning

Ytvattnet samlas i våtmarker, vattendrag och sjöar. Dessa fungerar som

lagringsmagasin och jämnar ut avrinningens årstidsvariationer. Topografin har stor betydelse för avrinningen. Det är höjdskillnaderna i terrängen som styr delavrinningsområdenas storlek och därmed även den totala avrinningen. Avrinningen från ett område bestäms genom att mäta flödet i vattendragen. I Forsmark uppgår avrinningen till mellan 150 och 160 millimeter per år.

Det är också viktigt att ha kunskap om växtlighetens roll i vattnets kretslopp. En del av nederbörden fastnar i växtligheten och avdunstar. Därmed når den aldrig marken. Denna del av nederbörden utgör en del av den så kallade evapotranspirationen. Evapotranspirationen består av evaporation från barmark, från öppet vatten (sjöar, pölar, snötäcke m m) samt från fritt vatten på växtligheten. Till evapotranspirationen räknas också sådant vatten som har passerat genom växterna från marken. Den högsta möjliga evapotranspirationen i Forsmark har beräknats till 509 millimeter per år. Vid våra beräkningar har vi därför fått ett något lägre värde för den verkliga avdunstningen, 400–410 millimeter per år. Detta värde baserar

sig på vattenbalansberäkningar för dagens förhållanden.

Påverkar grundvattennivån

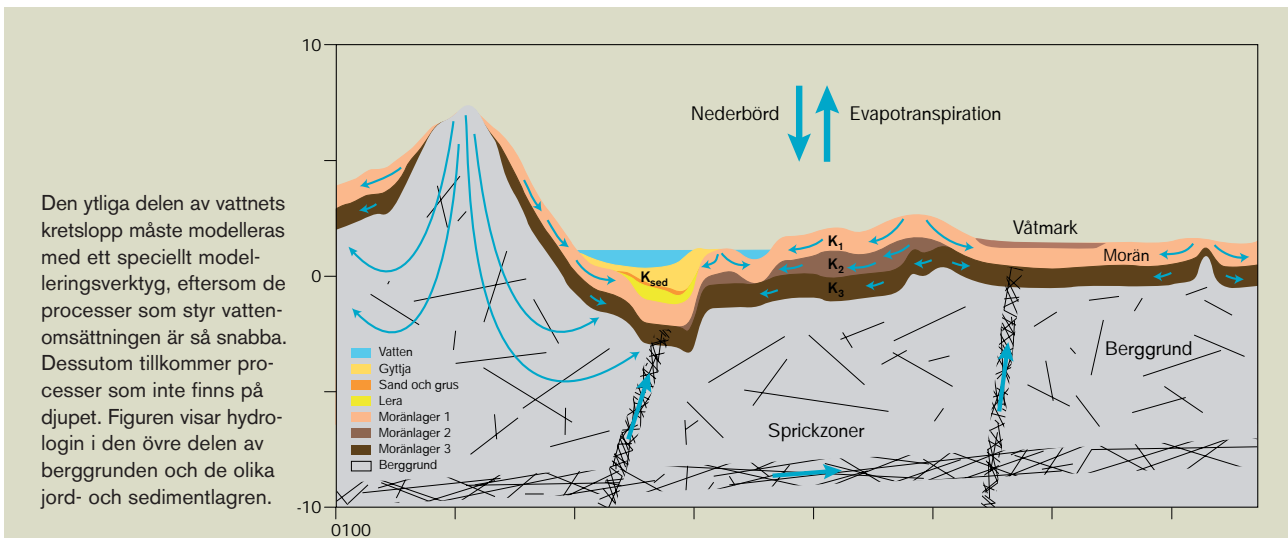
Växternas upptag av vatten kan direkt påverka grundvattennivåerna. Runt de grunda sjöarna tar till exempel växtligheten upp så mycket vatten att grundvattennivåerna periodvis är lägre än vattennivåerna i sjöarna. I regel sjunker grundvattennivåerna i jordlagren dagtid, då växternas andning och avdunstning är som störst. Mängden vatten som tas upp på detta sätt varierar beroende på typ av växtlighet, djup till grundvattnet och jordart.

Under platsundersökningen har vi kunnat övervaka hur och när grundvattenmagasinen fylls på genom att jämföra nederbörd med grundvattennivåer. Vi har samlat in data från två meteorologistationer, ett sjutiototal grundvattenrör och fyra vattenföringsstationer. Mätningarna har genererat en mycket stor mängd data, som har använts vid de hydrologiska beräkningarna. Även indata från andra mätningar har använts, bland annat vegetationskarteringar, jordartskarteringar och kemiprovtagningar. Hur



Hydrogeolog Per-Olof Johansson, Artesia Grundvattenkonsult, mäter vattennivån i jordlagren.

PÅ YTAN



mycket grundvattenytan stiger vid nederbörd beror naturligtvis på hur mycket nederbörd som faller. Men även den omättade zons mäktighet och markens förmåga att transportera och magasinera vatten har betydelse.

På de platser där vi mäter grundvattennivåerna i jord och berg på samma ställe inom den nordvästra delen av kandidatområdet är dessa högre i jord. Eftersom moränens vattengenomsläpplighet minskar med djupet, tolkar vi detta som att huvuddelen av vattnet rinner i de ytliga markskikten. Detta medför att inströmningsområdena och avrinningsområdena blir små och starkt kopplade till landskapets flacka topografi. Den lilla mängd vatten som når ner till berget kan där transporteras bort i de ytliga subhorisontella sprickzonerna.

Täta sediment under sjöar

Speciellt tydligt är den låga hydrauliska konduktiviteten i vertikalled när

man betraktar sedimenten under sjöarna i Forsmark. Dessa är mycket täta och släpper nästan inte igenom något vatten alls. Detta kan man se genom att undersöka berggrunden under sjöarna. Här är grundvattnet mycket gammalt och bär spår av marina signaturer. Denna bild bekräftas av genomförda provpumpningar i berg och jordlager.

I och med att de subhorisontella zonerna leder ut grundvattnet direkt till Östersjön finns det i dag i det prioriterade området inte några utströmningspunkter för grundvatten till markytan från den bergvolym där slutförvaret ska byggas.

Längre bort från den tektoniska linsens nordvästra delar, till exempel i området runt Eckarfjärden, finns platser där situationen är den omvända. Där ligger grundvattennivåerna i berget över nivåerna i de sedimentära avlagringarna.

När vi modellerar de ytliga vattenflödena använder vi oss av ett annat

angreppssätt än när vi modellerar vattenflödena i berget. Anledningen är att de processer som styr förhållandena på djupet respektive förhållandena på ytan sker inom helt olika tidshorisonter.

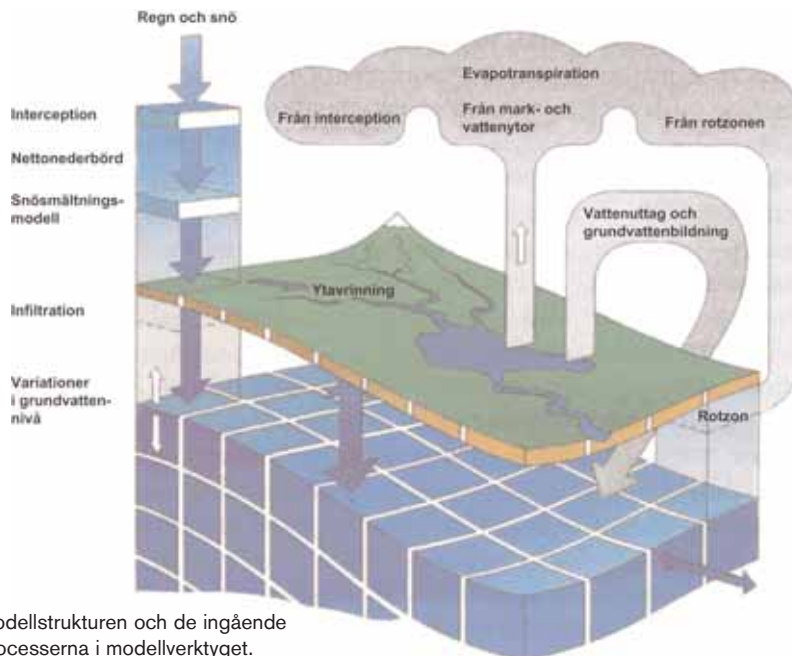
På djupet är processerna så långsamma att det kan ta tusentals år för en förändring att ske. Inom ythydrologin är däremot förändringarna snabba. De modeller som används måste kunna ta hänsyn till dygnsvariationer.

När det gäller vattnet på ytan finns inte heller något behov att ta hänsyn till vattnets salthalt, eftersom allt vatten i de ytliga skikten har mycket låg salthalt. På djupet ger däremot salthalten upphov till densitetsvariationer – och därmed också till densitetsdriven strömning – som man måste ta hänsyn till vid modelleringen.

Simulerar hela cykeln

Vid modelleringsarbetet har vi använt oss av ett modelleringsverktyg som simulerar hela den landbaserade hydrologiska cykeln. Verktyget kan hantera såväl grundvattenströmning som omättad strömning ovanför grundvattenytan, samt även ytvattenflöden på markytan och i vattendrag. Detta gör att resultatet kan användas för att studera hur det ytliga grundvattnet samspelar med djupare liggande grundvatten.

Utifrån simuleringar kan resultaten från varje komponent i beräkningen studeras, såsom evapotranspiration från växter, ytavrinning, vattenhalt i den omättade zonen och storleken på perkolationen till grundvattnet. Andra intressanta beräkningsresultat är grundvattentryck i olika lager och grundvattenmagasin samt vattenutbytet mellan grundvattenmagasin och ytvattnet.



Modellstrukturen och de ingående processerna i modellverktyget.



Jonny Skarp och Micke Borgiel från Vattnekologerna AB förbereder provtagningar på Bolundsfjärden. Det är den största sjön i det undersökta området i Forsmark.

Sjöar och vattendrag

Sjöarna i Forsmark är små, unga och grunda. Deras näringsfattiga miljö är starkt präglad av den kalkhaltiga moränen. De få vattendrag som finns består för det mesta av grävda diken.

Sjöarna och vattendragen utgör det limniska ekosystemet (sötvattenssystemet) i Forsmark. Limnologin, eller läran om inlandsvatten, är den del av ekologin som studerar växel-spelet mellan olika organismer och deras livsmiljö i sjöar och vattendrag.

Det limniska systemet avgränsas från landekosystemet (det terrestra ekosystemet) vid strandlinjen. Ibland är gränsen mellan sjö och land inte så

lätt att fastställa, eftersom vattennivån kan variera över tiden.

Små och grunda

Vid platsmodelleringen har vi definierat en sjö som en volym sötvatten med minst 0,5 hektars yta och som dessutom helt är omgiven av land. Utifrån denna definition finns det 25 sjöar inom det regionala modell-

området i Forsmark. De flesta är emellertid mycket små. Bara tre av dem (Bolundsfjärden, Fiskarfjärden och Eckarfjärden) har en yta som överstiger 20 hektar. Alla sjöarna är också mycket grunda. Det maximala djupet varierar mellan 0,4 och 2,2 meter.

Vassbältena som omger sjöarna torkar delvis ut under somrarna. De räknas därför som våtmarker och tillhör därmed enligt vår definition det



Nya sjöar bildas i det låglänta kustområdet genom att grunda havsvikar snörs av från havet.

terrestra ekosystemet. Den senaste istiden har haft stor inverkan på hur sjöarna ser ut i dag. Isens rörelser skapade många bassänger, som senare med landhöjningens inverkan utvecklades till sjöar – en utveckling som för övrigt fortfarande pågår. Sjöarna kan betraktas som sedimentfällor, där partiklar, näringsämnen och spårelement samlas.

Sedimentlager i sjöar

Under sjöbottenarna finns lager av sediment som byggts upp redan från

Sjöarnas livscykel

En sjö är egentligen bara ett tillfälligt stadium mellan havsvik och landområde. I alla fall i ett geologiskt perspektiv.

De äldsta sjöarna inom det regionala modellområdet i Forsmark ligger också längst från kusten. Till dessa hör Gunnarsboträsket som blev sjö redan på 1100-talet. De yngsta sjöarna är alldeles nybildade och har fortfarande ett visst utbyte med havet. Ju grundare en sjö är, desto kortare livstid har den.

Bolundsfjärden och Fiskarfjärden hör däremot till de djupare. De bildades båda på 1900-talet och kommer att existera i ytterligare ungefär 5 600 år.

Andra väntar fortfarande på att få kallas sjö. Simpvikens och Bredvikens kommer till exempel att avskiljas någon gång senare under detta århundrade.



Sjöarna i Forsmarksområdet. Några av dem bildades alldeles nyligen. Eftersom många av dem är grunda existerar de bara under korta tider. Andra har längre livstider. Bolundsfjärden och Fiskarfjärden är de sjöar vi får ha kvar längst – i 5 600 år till.

Sjöars födelse och död i Forsmark

	Blev sjö	Blir våtmark
Labboträsket	1400-talet	2200-talet
Gunnarsbo-Lillfjärden	1700-talet	2900-talet
Gunnarsboträsket	1100-talet	2900-talet
Eckarfjärden	1200-talet	7 100-talet
Stocksjön	1500-talet	2400-talet
Kungsträsket	1600-talet	2200-talet
Gällsboträsket	1700-talet	2500-talet
Fräkengropen	1800-talet	2200-talet
Vambörsfjärden	1800-talet	3000-talet
Graven	1900-talet	2500-talet
Puttan	1900-talet	3200-talet
Norra Bassängen	1900-talet	3400-talet
Bolundsfjärden	1900-talet	7600-talet
Tallundet	2000-talet	2600-talet
Lillfjärden	2000-talet	3700-talet
Bredviken	2000-talet	5900-talet
Simpvikens	2000-talet	2200-talet
Märribadet	2000-talet	2300-talet
Fiskarfjärden	1900-talet	7600-talet

Tabellen visar när de olika sjöarna i Forsmark blev till (eller kommer att bli) och när de blir våtmarker.



Kransalgerna i sjöarna tillhör släktet *Chara*.



Eva Andersson har ansvarat för en stor del av modelleringen av sjöar och vattendrag i Forsmark. Här mäter hon primärproduktionen från kransalger.

det marina stadiet och fram till i dag. De djupare sedimenten under en sjö är därför äldre än sjön själv. I de flesta Forsmarkssjöarna är sedimenten täckta av ett levande skikt av mikroorganismer (bakterier och alger), en så kallad mikrobiell matta bestående av svavelbakterier, cyanobakterier, kiselalger och grönalger. Mattan kan bli upp till 30 centimeter tjock i vissa delar av sjöarna.

Under detta skikt ligger ett lager av gyttja. Gyttjan deponerades under sjöstadiet. Den är en organisk jordart, som består av sönderdelade rester från växter och djur. Nedanför gyttjan finns leryttja, en jordart som avsattes under det marina stadiet och som innehåller betydligt lägre halter organiskt material. De understa lagren består av sand, grus, lera och i botten oftast morän.

En sjös vattenbalans är summan av tillrinning och nederbörd, minskad med avdunstningen och avrinningen. Detta visar sig i olika höga vattenstånd. I Forsmarks sjöar är vattennivåerna i regel högst i mars och april och lägst från juli till september. Några sjöar ligger nära kusten och har nyligen av-

snörts från havet. I dessa kan bräckt vatten tränga in vid stormar och förändra både vattenbalansen och vattenkemin. Eftersom vattenvolymerna i sjöarna inte är så stora blir heller inte omsättningstiden så lång. Uppehållstiderna varierar mellan några dagar upp till ett år för de största sjöarna. Sjön tillförs material av olika slag via nederbörd, mark- och grundvatten. Likaså sker en uttransport av material genom utflöden via vattendrag, men även genom ackumulering i sediment.

Mycket kalk och lite näring

Vattnet i sjöarna är rikt på kalk, men fattigt på näring. Man säger att sjöarna är kalkoligotrofa. Näringsfattiga sjöar förekommer ofta i regioner med magra skogsmarker. Att de dessutom innehåller kalk är däremot inte så vanligt. Längs Upplandskusten finns visserligen många kalkoligotrofa sjöar, men inte i resten av Sverige.

De näringsämnen som i första hand reglerar växtligheten i en sjö är fosfor och kväve. Av dessa är det oftast fosfor



Cecilia Berg från Geosigma tar prov på gasbubblor från bottenlager i Bolundsfjärden. Detta gör man för att analysera gaserna kväve, syre, väte, helium, koloxid, koldioxid, metan samt kolväten.

som begränsar tillväxttakten. Förrådet av fosfor i naturen finns främst i berggrunden, samt i mark och sediment. Ämnet förekommer även i djur och växter samt i rester av dessa.

Koncentrationen av fosfor i en kalkoligotrof sjö är extra låg, eftersom ämnet tenderar att fällas ut tillsammans med kalk. På så sätt binds det i sedimenten. Detta sker för övrigt även med andra näringsämnen som järn och magnesium. En viss variation i fosforhalt med årstiden kan dock förekomma. Kvävekoncentrationerna i kalkoligotrofa sjöar kan däremot vara betydligt högre. Så är också fallet för Forsmark.

De höga halterna av kalciumjoner har medfört att kalciumkarbonat fälls ut. Detta sker särskilt under somrarna när pH-värdet är högre än på vintern. Vattnet i sjöarna är ovanligt

klart. Samtidigt är halterna löst organiskt kol höga, vilket är en ovanlig kombination.

Solbelysta bottnar

Ett limniskt ekosystem har olika habitat, dvs livsmiljöer för växter och djur:

- Pelagialen (den fria vattenmassan)
- Littoralen (det område där ljusförhållandena är sådana att fotosyntes sker)
- Profundalen (det område dit solljuset inte når och där således ingen fotosyntes sker)

Eftersom sjöarna i Forsmark är så grunda och klara blir hela botten solbelyst. Det finns därför ingen profundal och vegetationen kan breda ut sig över hela sjöbotten. De dominerande arterna tillhör gruppen kransalger. I

Forsmarks sjöar finns flera kransalger av släktet *Chara*. I de täta bestånden av kransalger finns ett rikt djurliv.

Fiskbeståndet varierar mellan de olika sjöarna. I allmänhet är det dock arter som klarar låga syrehalter som trivs bäst. Under 2003 genomförde vi provfiske i fyra av sjöarna och fångade då totalt åtta olika arter. De undersökta sjöarna var Eckarfjärden, Bolundsfjärden, Fiskarfjärden och Gunnarsbo-Lillfjärden. Mört och abborre dominerade i samtliga sjöar sett till antalet individer.

Om man räknar om fiskbeståndet till biomassa blir bilden annorlunda. Då dominerar sutare i Eckarfjärden och Bolundsfjärden, medan ruda dominerar i Fiskarfjärden och Gunnarsbo-Lillfjärden. Flest arter – åtta stycken – fanns i Bolundsfjärden. Under 2007 undersökte vi fisk-

Så har människan förändrat miljön i sjöarna

Många sjöar i Forsmark är ganska opåverkade av människans närvaro. Den sjö som påverkats mest är Gunnarsbo-Lillfjärden. Sjön isolerades från havet 1970 – 1972 när kärnkraftverket byggdes. Bassängen delades i två och delar av den fylldes också igen. Även vattennivån i Eckarfjärden har sänkts på konstgjord väg.

Förutom detta är människans inverkan på sjöekosystemet liten. Ingen av sjöarna är badsjöar. Omfattningen av fritidsfiske är också ytterst begränsat. Vattendragen har däremot påverkats av människan i mycket högre grad, eftersom dessa till stor del består av grävda diken.

I våra säkerhetsanalyser måste vi ta hänsyn till hur sjöarna skulle kunna utnyttjas i framtiden. Den senaste säkerhetsanalysen, SR-Can, utgick från att endast försumbara mängder insjöfisk konsumerades. Den största andelen fisk antogs i stället komma från Östersjön.

Den totala fiskproduktionen antogs motsvara 0,5 gram kol per kvadratmeter. Av denna är den ätliga andelen ännu lägre. Till detta kommer andra vattenlevande organismer som teoretiskt skulle kunna utgöra föda för människan, till exempel musslor.

Gunnarsbo-Lillfjärden är den sjö som påverkats mest av människans ingrepp. Havsbassängen avskiljdes från Östersjön när kärnkraftverket byggdes.





Rudan är en art som klarar låga syrehalter. Den klarar sig därför i de mindre sjöarna, där syrehalten kan gå ner avsevärt under vintrarna.

beståndet i ytterligare en sjö, Labboträsket. Där fanns bara ruda, en art som är extremt tålig mot låga syrgashalter i vattnet.

I både små och stora sjöar är biomassan koncentrerad till littoralen. Här finns mer än 95 procent av biomassan och här sker också den huvudsakliga primärproduktionen. Med primärproduktion menas den omvandling av luftens koldioxid till organiskt bundet kol som organismer som innehåller klorofyll står för. Växtplankton, det vill säga de små primärproducenter som svävar i den fria vattenmassan, har inte så stor betydelse för primärproduktionen i Forsmark.

De sjöar som har en mikrobiell matta på botten har större primärproduktion än respiration (cellandning). Detta leder till att ekosystemets totala produktion blir positiv. Motsatt situation råder i sjöar utan mikrobiell matta. I Labboträsket är exempelvis respirationen av samma storleksordning som primärproduktionen.

Få och små vattendrag

Vattendragen inom det regionala modellområdet är få och små. Den totala längden uppgår till omkring 15 kilometer. Vattenflödena är låga

och långa sträckor torkar ut under sommaren. Mestadels består de av grävda diken, där människan rätat ut sträckningen hos de ursprungliga vattendragen.

Under platsundersökningen undersökte vi vattendragen bland annat med avseende på bottensubstrat och vegetation. Vattendragen fungerar som transportleder för lekande fisk. Lekvandringar har till exempel observerats i det lilla vattendraget som förbinder Norra bassängen med Östersjön.



Vattendragen i Forsmark är få och har inte några speciella naturvärden. Det är vanligt att de torrläggs under sommaren.



Anna Spets från Vattenekologerna AB noterar längd och vikt för en infångad abborre.

I skog och mark

Guckuskon trivs i den kalkrika jorden i Forsmarks fuktiga kalkrika skogar.

Hur fungerar en skog egentligen? Var ansamlas olika ämnen och hur förflyttar de sig inom ekosystemet i tid och rum? Det är några frågor som vi måste besvara när vi beskriver ekosystemen på land i Forsmark.

Landekosystemet – eller det terrestra ekosystemet som det också kallas – är det mest heterogena av de tre ekosystemen i Forsmark. Därmed är det också svårast att beskriva. För att underlätta beskrivningarna och beräkningarna har vi därför delat in det i olika vegetationstyper:

- Skog
- Våtmark
- Jordbruksmark

Gemensamt för alla vegetationstyperna är att växtligheten är starkt påverkad av den kalkhaltiga moränen. Kalkkrävande örter, bredbladiga gräs

och orkidéer är vanliga. Under platsundersökningen kartlades de olika vegetationstyperna med hjälp av fjärranalys. Metoden innebär att data från flygbilder samlas in för att sedan bearbetas och tolkas. Resultatet blev en vegetationskarta över området. Vi har sedan kontrollerat resultatet av mätningarna genom besök i fält.

Mest skog

Resultaten från undersökningarna visar att huvuddelen av markytan (73 procent) är täckt av skog. Tall och gran dominerar växtligheten. Gran är vanligare där jordtäcket är



Anordning för att samla in fallföna från träden.

djupare. Andra träslag är björk, al och rönn, men även lönn och ask förekommer.

Den näst vanligaste vegetations-typen är våtmark. I de tre största avrinningsområdena täcker våtmarker mellan 10 och 20 procent av ytan. Några avrinningsområden består av ända upp till 30 procent våtmark. Våtmark är inget enhetligt begrepp utan består av flera olika naturtyper, som egentligen bara har det gemensamt att grundvattenytan ligger nära – eller till och med över – markytan under hela eller större delen av året.

Odlingsmark i sydöst

Den lilla andel jordbruksmark som finns upptar fem procent av ytan och ligger i modellområdets sydöstra delar, där den leriga moränen har avsatts. Här finns jordbruksfastigheten Stor-skäret med sina 84 hektar mark, av vilka 34 hektar används till odling och resterande 50 hektar består av ängs- och hagmarker.

En mera detaljerad bild av vegetationen har vi sedan fått genom att inventera valda delar av området. Olika slags biotoper (livsmiljöer för vissa växter eller djur) har valts ut och i dessa har slumpmässigt utsedda rutor specialstuderats. Varje ruta har undersökts med avseende på växtligheten i markskiktet (mossor i granskog samt lavar i tallskog), fältskiktet (örter och gräs), buskskiktet samt för trädsiktet.

Växter bryts ned

Vi har även studerat hur mark och växtlighet samspelar. En viktig process i en skog är när svampar och bakterier bryter ner döda växtdelar till så kallad förna. Många olika ämnen ackumuleras på så sätt i jordlagren. Vid platsundersökningen i Forsmark studerade vi nedbrytningen i tre olika gran-skogar. Dessutom tog vi prover på

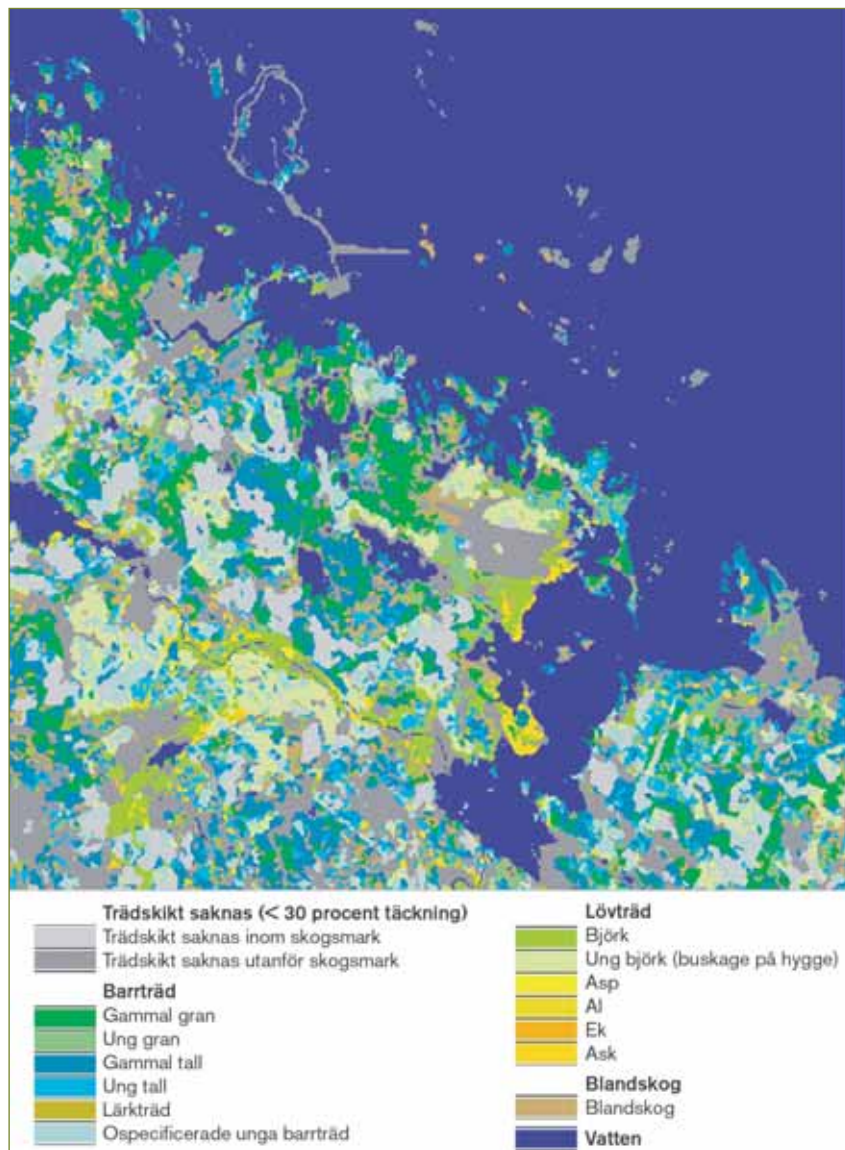
den levande växtligheten och även på jorden för att bestämma vilka ämnen de innehåller. Vid dessa studier intresserade vi oss inte bara för kolflödena, utan även för andra ämnen.

En annan viktig process är bioturbation. Med bioturbation menas den uppluckring och omblandning av markens översta skikt som bland annat maskar, myror och mikroorganismer orsakar. Daggmaskar äter jord och organiskt material som de trans-

porterar mellan olika markskikt.

Myror äter visserligen inte jord, men de samlar jord och förna när de bygger sina bon. Bioturbation kan därigenom vara en viktig mekanism för att omfördela olika ämnen, till exempel radionuklider, mellan markskikten. I Forsmark har vi studerat bioturbationen på tio olika platser.

Skogsområdena i Forsmark består delvis av riktigt gammal skog. Eftersom området har en lång historia av



Vegetationskarta över trädsiktet i Forsmark.



Sara Nordén, platsekolog på SKB, mäter markrespirationen i en skogsbacke.

skogsbruk kan vi tydligt se hur människan påverkat den genom avverkning. Skogarna har under senare tid brukats av Sveaskog AB. Avverkningen av träden sker efter ungefär 100 år. 70 procent av kalhyggerna förnyras genom återplantering, 20 procent genom självsådd och 10 procent genom sådd.

Blandning av sjö och land

Våtmarker är speciella eftersom de utgör en övergångsform mellan sjöekosystem och landekosystem. Vattenutbytet mellan våtmarken och det omgivande grundvattnet bestäms av hur genomsläppliga de olika sedimentlagren i våtmarken är. Ofta är våtmarkerna belägna i sänkor på platser där tillrinningen från omgivningen är stor eller där infiltrerad nederbörd når ytan.

Jordmån

När man talar om terrestra ekosystem är jordmånen ett viktigt begrepp. Med jordmån menas den del av jordtäcknet som har förändrats genom yttre påverkan från nederbörd, klimatväxlingar, växtlighet samt de svampar och djur som lever under marken.

Genom jordmånsprocesser bildas olika horisonter i marken med sinsemellan olika egenskaper. Varje jordmån kan karakteriseras genom sin speciella sekvens av horisonter. De olika horisonterna är:

- Organiskt lager (O)
- Urlakningshorisont (A)
- Anriktningshorisont (B)
- Ursprungsmaterial (C)

I det organiska lagret finns mer eller mindre förmultnade växtdelar.

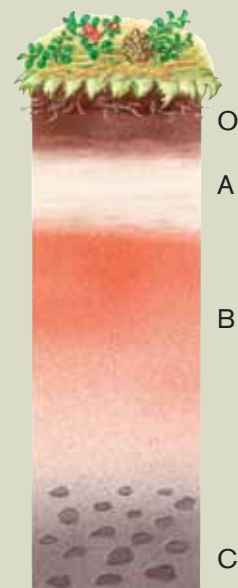
I Forsmark steg land sent ur havet. De postglaciala jordarterna i området har därför

haft kortare tid på sig att bildas än jordarterna längre inåt land. Därmed innehåller jordmånen låga halter av organiskt material och kväve, samt en hög andel vittringskänsliga mineral.

Den vanligaste jordmånen i Sverige är podsol. Denna jordmånstyp har inte hunnit utvecklas ännu i Forsmark. Där dominerar i stället regosol, som kan sägas vara en omogen podsoljord.

Histosol och gleysol är också vanliga. Dessa har uppstått ur organiskt material som torv.

Undersökningar av jordmånens beskaffenhet ger bland annat information om hur jordarna har bildats och hur rörligt ytvattnet är. Under platsundersökningen analyserade vi jordens pH, karbonathalt, kväveinnehåll och kornstorlek för en rad olika marktyper.



Det tar ungefär 2000 år för podsol att utvecklas. Jordmånen i Forsmark kan sägas vara en omogen podsoljord.

I och med att våtmarken är en blandning mellan sjö och land kan både insjöarter och landlevande växt- och djurarter leva där. Den växtlighet som klarar av att etablera sig i en våtmark måste klara av att vara dränkt av vatten under hela eller delar av året. Våtmarken är det mest produktiva av de tre terrestra ekosystemen. Även ackumuleringen av olika ämnen är störst här.

Sumpskogar vanligast

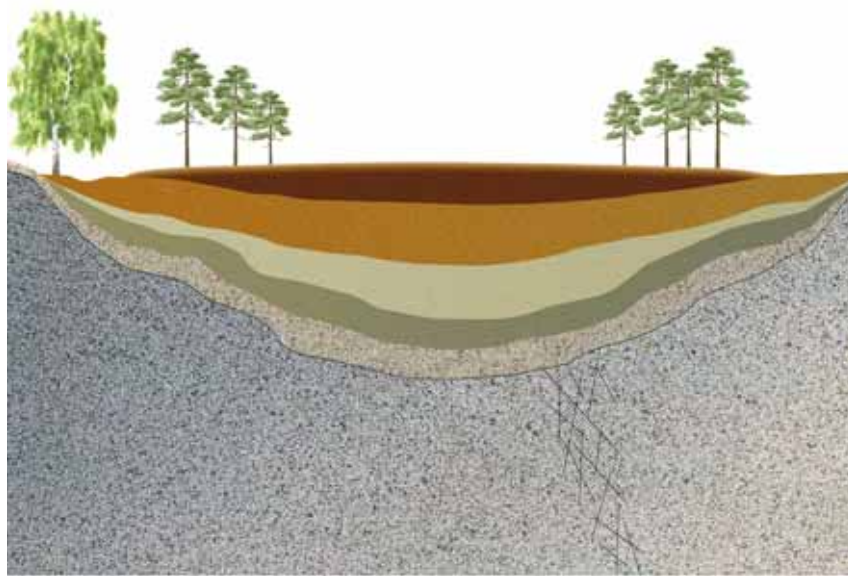
Det finns flera olika typer av våtmarker i Forsmark. Dessa skiljer sig sinsemellan genom en rad olika faktorer. Förekomsten av träd är en faktor, och förekomsten av ett välutvecklat fältskikt en annan. Sätten att klassificera våtmarker är många och kan göras utifrån flera utgångspunkter. Vi har valt att kategorisera våtmarkerna i följande grupper:

- Myrar (kärr och mossar)
- Strandängar
- Havsstränder
- Sumpskogar

Majoriteten av våtmarkerna i Forsmark tillhör gruppen sumpskogar. Rikkärr och vassbälten är också vanliga. Stora mossar med tjocka torvlager är däremot ovanliga. Sådana naturtyper har haft alltför kort tid på sig att utvecklas.

Mossor dominerar växtligheten och i de undre lagren bildas torv när mossorna bryts ned. En liten bit ner i de permanenta våtmarkerna råder syrebrist. Nedbrytningen och cirkulationen av organiskt material och andra ämnen går långsamt. Vattnet har lågt pH-värde och ekosystemet innehåller förhållandevis få arter.

I kärrna i Forsmark är växtligheten starkt påverkad av den kalkhaltiga moränen. Det kalkhaltiga vattnet gör att myrarna utvecklas till rikkärr. Även



I de undre lagren av en mosse bildas torv när mossorna bryts ned. Ännu längre ner finns sjösediment.

i dessa bildas torv. Brunmossor är vanliga, men vegetationsmönstret beror till stor del på våtmarkens ålder.

Många torvmarker i Forsmark är grunda och har utvecklats från sjösediment. Genom att undersöka hur jordartsprofilerna ser ut kan vi också få kunskap om utvecklingshistorien från sjö till våtmark.

De tillfälliga våtmarkerna är periodvis uttorkade. Här är artrikedomen större och nedbrytningen och cirkulationen av olika ämnen går fortare än i en permanent våtmark, eftersom en del av biomassan bryts ned som vanlig förra när våtmarken är uttorkad.

När ett vattendrag når en våtmark minskar vattnets flödes hastighet. De partiklar som finns uppslammade sedimenterar då och ackumuleras i våtmarken. Man säger att våtmarken fungerar som en sedimentfälla.

Vissa radionuklider binder sig lätt till partiklar och kolloider. Detta gäller till exempel cesium-137. En våtmark skulle därför kunna binda större

mängder radioaktiva ämnen än andra landekosystem.

Förändrat jordbruk påverkar

Jordbruksmarken är den landskapstyp som är mest påverkad av människan. För att marken ska behålla sin avkastningsförmåga och vara en förnyelsebar resurs måste den skötas. Resultatet av att mark odlas upp eller betas blir att det bildas en mosaik av olika livsmiljöer, som inte fanns i det ursprungliga landskapet. Det öppna landskapet domineras av åkermark samt ängs- och hagmark.

Forsmark har, liksom många andra platser, påverkats av den strukturrationalisering som jordbruket genomgått. Mindre bördiga marker har övergetts eller planterats igen med skog. Samtidigt har den tekniska utvecklingen ökat avkastningen från den uppodlade areal som finns kvar.

Åkermarken har huvuddelen av sin biomassa ovan jord. Grödorna skör-



Astrid Taylor vid Sveriges Lantbruksuniversitet är expert på maskar. Hon och hennes kollegor har undersökt hur maskar och myror blandar om jordlagren.

Under 2006 studerade forskare från Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) hur maskar och myror blandar om de olika jordlagren på tio olika platser i Forsmark och på så sätt åstadkommer det fenomen som kallas bioturbation.

Myror flyttar jordpartiklar från djupare lager till ytskiktet när de bygger sina bon. De arter som bygger stora stackar på ytan samlar även material från omgivningen.

SLU undersökte vilka arter som finns, hur tätt myrornas bon ligger och hur stora dessa är. Myrornas torrsvikt bestämdes också genom vägning i laboratorium.

Inventeringen visade att det finns nio olika myrarter i Forsmark.

Volymen och vikten på några bon mättes och dessa data användes, tillsammans med data på livslängden på myrbon, för att uppskatta omsättningen av jord per hektar och år på de olika lokalerna.

När vi undersökte bovolymer hittades ett bo som beboddes av två olika myrarter. Detta är ingen ovanlig förekomst i sig, men i det här fallet rörde det sig om två arter (*Lasius flavus* och *Formica exsecta*) som man inte tidigare hade hittat tillsammans.

Antalet myrbon var störst vid en av sumpskoglokalerna (SS1). Trots det var bioturbationen högst i den övergivna betesmarken där vi hittade arter som bygger stora bon: *Lasius niger* och *Formica exsecta*.

Precis som myrorna spelar maskar en stor roll i materialomflyttningen i olika naturtyper. För att kunna uppskatta maskarnas bioturbation i Forsmark har antalet maskar per volymenhet, deras vikt samt artsammansättningen undersökts på samma tio platser som för myrorna. Maskar samlades in från provtytor, 20 gånger 20 centimeter stora, genom markprover ner till 40 centimeters djup. Därefter artbestämde, räknades, torkades och vägdes de i laboratorium.

För att uppskatta deras vertikala jordomblandning bestämdes den mängd avföring, som producerades under en viss tid.

Den högsta bioturbationen på cirka 17 kilo torrsvikt per kvadratmeter och år fann vi i en frisk lövskog medan den var mycket lägre i betesmarker. De höga grundvattennivåerna i Forsmark kan leda till att bioturbationen blir mindre här än i motsvarande naturtyper. Maskar och myror kan ändå blanda om det övre skiktet av marken helt på mellan tolv och 20 år.

das regelbundet. Kvar blir växternas rötter. Inget av biomassan i dessa överlever vintern till nästa år utan bildar humus.

Översta skiktet omblandat

Eftersom marken plogas en till två gånger per år blir omblandningen i markens övre skikt betydligt större än för andra marktyper. Man kan inte se någon tydlig humushorisont i jordmånsprofilen.

En del av ängs- och hagmarkerna är övergivna åkermarker. Växtligheten där domineras av fleråriga växter. Mängden biomassa per ytenhet är lägre än på den odlade marken.

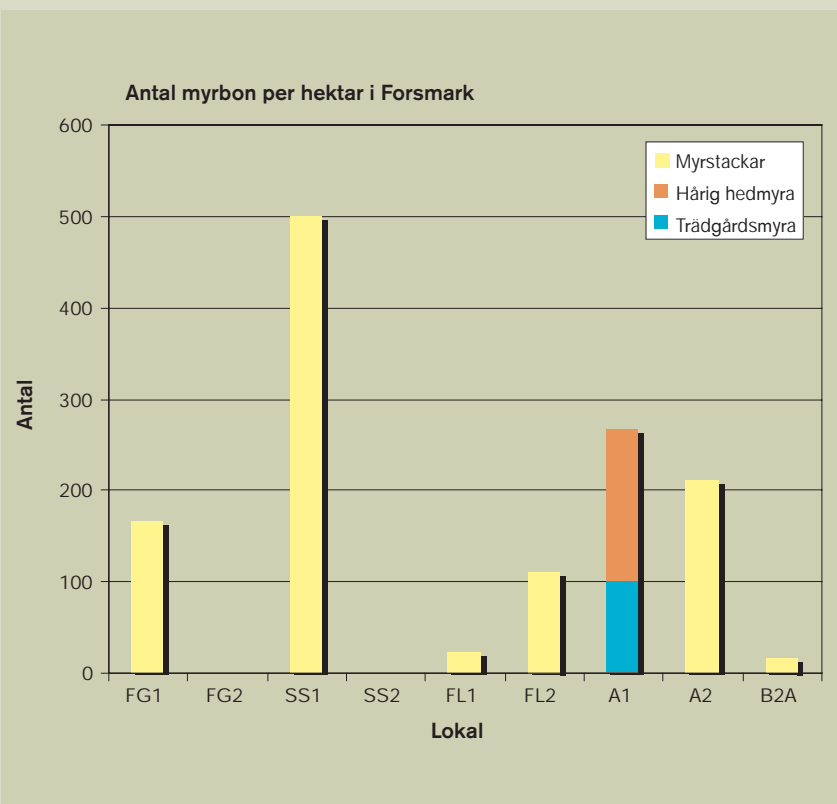
Vid modelleringen av jordbrukslandskapet har vi uppskattat hur mycket resurser som människan tar ut ur landskapet i form av jordbruksprodukter. I Forsmark har detta varit förenat med vissa svårigheter, eftersom det inom området bara finns ett enda jordbruk. Av integritetsskäl kan vi därför inte använda exakta uppgifter från denna jordbruksfastighet. Det vi kan säga är att det bedrivs köttproduktion på gården och att en stor del av de grödor som odlas förmodligen går till foder.

I stället har vi fått använda oss av statistik från Forsmarks församling. Generellt kan man säga att produktiviteten i Forsmark är betydligt lägre

än för Uppsala län som helhet. I genomsnitt uppgår produktionen i Forsmark till 70 procent av den i länet. Höproduktionen motsvarar däremot det svenska genomsnittet.

Djuren inte stationära

Vid platsmodelleringen har vi behandlat de landlevande djuren på ett lite annorlunda sätt än djurlivet i sjöar och hav. Anledningen är att på land kan inte alla djur knytas till en speciell plats eller en speciell landskapstyp på samma sätt som de kan göras för havet eller för en sjö. Detta gäller speciellt de stora däggdjuren, som kan förflytta sig över stora områden.



Antal myrbon per hektar i Forsmark. FG=frisk granskog, SS=sumpskog, FL=frisk lövskog, A=betesmark, B=torrare granskog. Hårig hedmyra (*Formica exsecta*) och trädgårdsmyra (*Lasius niger*) bygger stora bon med hög bioturbation.



I Forsmark fann vi nio olika arter av myror.

Förutom att ta reda på vilka arter som finns var målet vid platsundersökningen att bestämma populationstätheten för ett antal större djur genom att regelbundet inventera bestånden inom ett 110 kvadratkilometer stort område. Här jämförde vi med motsvarande inventeringar i ett referensområde i Hållnäs, som ligger norr om Forsmark. På liknande sätt inventerades förekomsten av olika fågelarter.

Inventeringarna skedde på olika sätt, beroende på vilken art det var fråga om. Genom att inventeringarna upprepades under flera år kunde resultaten också användas för att bedöma i vilken utsträckning arbetet med platsundersökningarna har påverkat djurlivet.

Vid modelleringsarbetet har vi sedan uppskattat biomassa, produktion, konsumtion, avföringsmängder och respiration för att kunna uppskatta kolflödena mellan olika nivåer i näringsväven.

Hur många djur finns det?

Liksom vid övrig modellering av ekosystemen har vi delat in de olika djurarterna i det terrestra ekosystemet i funktionella grupper:

- Stora däggdjur
- Små däggdjur
- Fåglar
- Grod- och kräldjur
- Reptiler

Populationsstorlekarna av många arter uppskattades genom att räkna spillning. Dessa undersökningar kompletterades genom att små däggdjur (främst gnagare) fångades i fallor. Bestånden av större rovdjur som mård, lo och räv uppskattades genom spårning i snö. Det var svårt att uppskatta hur många rävar som finns i området. Djurens rörelsemönster var oregelbundna och de rörde sig över stora sträckor, vilket gjorde det svårt att räkna spåren i snön. Älgstammen räknades vid flyginventeringar. Genom samarbete med jaktlagen i området kunde vi också ta del av uppgifter om stammens åldersstruktur och hur stor genomsnittsvikten är.

Rådjur var det dominerande landlevande däggdjuret. Populationstätheten uppgick till 6,2 individer per kvadratkilometer. Detta var en betydligt högre siffra än i referensområdet i Hållnäs (3,7 individer per kvadratkilometer). Tätheten kunde dock variera mycket från område till område. Rådjurstammen hålls till viss del nere av jakt. Även naturliga faktorer som svåra vintrar och mängden rovdjur (främst räv) i området avgör stammens storlek. Resultaten från inventeringarna visar att stammen minskade mellan 2002 och 2007. Detta är i enlighet med trenden i övriga Sverige.

Unga älgar i Forsmark

Älgar var också vanligt. I genomsnitt fanns det 0,7 älgar per kvadratkilometer, vilket var ungefär i nivå med siffrorna för Hållnäs. Medelåldern hos älgarna var låg: 2,7 år för älg-tjurar och 4,9 år för älgkor. Detta avspeglar jakttrycket och den strategi man har att i första hand skjuta tjurar.

Hare var lite ovanligare i Forsmark än i jämförbara områden på andra platser. Vildsvinen var däremot på frammarsch och hade ökat förvånansvärt snabbt. Under de år som platsundersökningen pågick var ökningen till och med snabbare än i övriga landet.

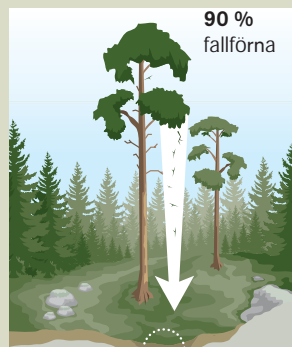
Ny lodjursfamilj

Lodjur fanns i regionen. En nyetablerad lodjursfamilj höll till i Forsmark och en annan i Hållnäs. Även sporadiska besök av varg förekom.

Forsmark hyser även ett stort antal häckande fågelarter. Bestånden har undersökts med olika metoder och genom årliga inventeringar mellan

Vi undersöker förna

Det översta skiktet i marken kallas förna. Undersökningar av förna är nyckeln till förståelse för hur ämnen omsätts i markskiktet. För att få en uppfattning om vilka vägar radioaktiva partiklar skulle kunna ta i ekosystemet studerar vi hur specifika ämnen omsätts, exempelvis kol.



Förna bildas

Förna består av delvis nedbrutna växtdelar. I skogsmark är fallförna vanligast, dvs barr, löv och grenar som faller ner från träden.

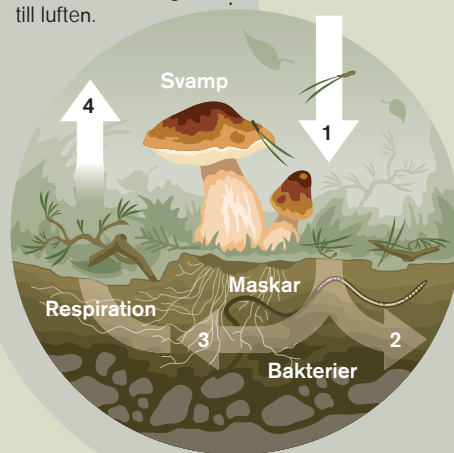
Nedbrytningsförloppet

Förna bryts ner av olika organismer i marken. Kolet i förnan omvandlas till olika kolföreningar som lagras i marken eller förs vidare i ekosystemen.

- 1 Förna faller ner och kol tillförs marken.
- 2 En del av kolet lagras i jorden.
- 3 Maskar och bakterier tar hand om en del av kolet.
- 4 En viss del kol frigörs till luften.

Mängden fallförna

Vi använder förnafällor för att uppskatta mängden förna som faller ner från träden.



Ca 20 förnafällor placeras ut i två granskogar och en alsumpskog.

Förnafälla

Resultat

Resultaten från förnastudien används i våra matematiska modeller för hur ekosystemen fungerar. Modellerna hjälper oss sedan att göra långsiktiga beräkningar av hur naturen skulle kunna påverkas om radioaktiva partiklar kom upp till markytan.



Nedbrytningshastighet

För att mäta förnas nedbrytningshastighet samlar man in förna på stora presenningar. Forna läggs i påsar som placeras ut i skogen.

Nedbrytningen fortsätter

Efter två år analyserar vi alla data och beräknar förnas fortsatta nedbrytning.

2 år



Påsarnas innehåll analyseras och vägs vid sex tillfällen under två år.



2001 och 2007. Dels inventerades ett 170 kvadratkilometer stort område och dels gjordes detaljerade studier i själva kandidatområdet. Alla resultat jämfördes sedan med statistik för regionen. Undersökningarna genomfördes genom att inventeraren gick längs uppgjorda linjer för att lyssna och titta efter fåglar, så kallade linjetaxeringar. Observationerna har sedan skett längs samma sträckor under ett antal år.

Totalt har vi observerat 118 arter, varav 110 arter inom kandidatområdet. Av dessa är 29 stycken upptagna i EU:s fågeldirektiv eller den svenska Rödlistan. Bland de rödlistade arterna märks silltrut, törnskata och göktyta.

Fåglarnas tio i topp

De tio vanligaste häckfåglarna i Forsmark var:

1. Lövsångare
2. Bofink
3. Rödhake
4. Fiskmå
5. Grågås
6. Taltrast
7. Koltrast
8. Grönsiska
9. Ringduva
10. Talgoxe

Artrikedomen var relativt hög i Forsmark och detta hade flera orsaker. Området ligger vid gränsen mellan Norrland och Svealand, vilket gör att båda landsdelarnas fåglar trivs där. Dessutom består området av en mosaik av flera olika biotoper som skärgård, lövskog, kärrmarker, barrskog och jordbruksmark. Detta gynnar naturligtvis den biologiska mångfalden.



Fladdermöss i Forsmark

Sommaren 2004 genomfördes en fladdermus-inventering i Forsmark. Syftet var att kartlägga vilka arter som finns, uppskatta antalet kolonier och individtäthet samt att definiera viktiga jaktområden.

Totalt fanns sju arter. Vid tidigare undersökningar har nio arter registrerats: dvärgfladdermus, stor fladdermus, Brandts fladdermus, nordisk fladdermus, vattenfladdermus, långörad fladdermus, trollfladdermus, fransfladdermus och mustaschfladdermus. Av dessa är de tre sistnämnda rödlistade. Dvärgfladdermusen är minst med sina tre till åtta gram. Störst är givetvis stor fladdermus med en vingbredd på närmare 40 centimeter och en vikt på omkring 36 gram.

Fladdermöss lever tillsammans i kolonier. De största kolonierna i Forsmark rymmer förmodligen mellan 50 och 100 individer.

Intressantast är kolonin med trollfladdermus vid Kallerö. Den består av omkring 100 djur, som bosatt sig i ett båthus.

Vanligtvis förekommer inte trollfladdermus norr om Kalmar, vilket gör denna nordliga koloni unik. Arten har även observerats vid tidigare inventeringar och man tror därför att den funnits länge i området.

Sofia Gylje från Länsstyrelsen i Uppsala län inventerar fladdermusbeståndet i Forsmark.

Den allmänna slutsatsen både från de upprepade inventeringarna av den totala fågelfaunan – och även den mer detaljerade uppföljningen som gjorts av vissa rödlistade arter – är att platsundersökningarna glädjande nog har haft en väldigt liten påverkan på fågellivet.

Det totala antalet fåglar i området har till och med ökat sedan platsundersökningens första år. Ungefär två

tredjedelar av alla arter som registrerats under linjetaxeringarna har ökat eller hållit sina populationsstorlekar på en stabil nivå mellan 2002 och 2007. Detta följer i stort sett mönstret i landet som helhet under senare år.

Gölgrodan speciell

Bland kräldjuren är det främst gölgrodan som bör nämnas. Det är en

utrotningshotad art, som i Sverige bara finns i Nordupplands kustband. År 1993 inplanterades den i Forsmark och finns i dag i ett flertal mindre vattensamlingar. Populationerna uppgår till mellan 50 och 100 individer på varje plats.

Vid undersökningarna har vi, förutom gölgrodan, iakttagit fem andra arter av kräldjur.



Utanför Forsmark breder Öregrundsgrepen ut sig. Bilden är tagen från Gräsö i riktning mot kärnkraftverket.

Till havs

En unik, sårbar och tuff plats att leva på. Så kan man sammanfatta de villkor som råder för livet i Östersjön. Den bräckta miljön ger inte mycket manöverutrymme för de få arter som gjort den till sin.

Havet utanför Forsmark kallas Öregrundsgrepen. Havsområdet begränsas i öster av Gräsö samt i sydväst av fastlandet. Området närmast kusten har lägre salthalt, eftersom avrinningen från land via vattendragen påverkar. Likaså är mängden biomassa större närmare kusten. För att kunna göra tillförlitliga massbalanser måste vi dela in vattenmassan i mindre volymer, så

kallade bassänger. Varje bassäng behandlas sedan som en separat enhet när vi gör våra beräkningar.

Bassänger blivande sjöar

Indelningen har gjorts efter höjdförhållandena på havsbotten. Med tiden kommer de olika bassängerna att avskiljas till sjöar och ännu längre

fram omvandlas till landområden. Genom att ta hänsyn till de framtida avrinningsförhållandena redan vid indelningen underlättar vi säkerhetsanalysens beräkningar. Några av bassängerna är speciellt intressanta, eftersom de någon gång i framtiden kan bli utströmningsområden för djupt grundvatten från den bergvolym där slutförvaret ska byggas.



I de grunda vikarna är växternas produktion störst. Här får fisken skydd under lek och yngeltid. Micke Borgiel från Sveriges Vattnekologer tar prover på havsbotten.

Liksom när vi modellerar de limniska och terrestra ekosystemen baserar vi modellen av det marina ekosystemet på en näringsväv med primärproducenter, konsumenter, nedbrytare, samt abiotiska reservoarer och flöden av material i ekosystemet. Reservoarerna – både de biotiska och de abiotiska – visar hur olika ämnen är fördelade i havsekosystemet. Dessa omfördelas sedan genom transportprocesser som primärproduktion, respiration, sedimentation, strömning och avrinning. I havet utgör vattenströmningen den helt dominerande transportprocessen.

Skilda ursprung

Östersjön är på många sätt en unik miljö. Vattenvolymen är liten jämfört med andra hav. Det gäller även vatten-

utbytet med Kattegatt. Detta gör känsligheten för föroreningar extra stor. Växlingarna i salthalt under perioden efter den senaste istiden har gjort förhållandena svåra för de flesta av de arter som försökt etablera sig där. Bland de få arter som lyckats finns både sådana med limniskt och med marint ursprung. På grund av den korta tid som förflutit sedan Östersjön uppstod finns det inga arter som utvecklats speciellt för de salthalter som förekommer i dag. Antalet arter i havet är generellt sett mycket lägre än antalet på land. En orsak till detta är att livsbetingelserna är mycket mer likartade i havet än de är på land. Ju mer homogen en livsmiljö är, desto färre arter kan etablera sig där. Havsmiljön i Forsmark kan delas in i tre typer: halvslutna vikar som påverkas av sötvatteninflöde, skärgårdsmiljöer



Kallrigafjärden om vintern. Vid strandkanten växer bälten av vass.

med skyddade lägen och det öppna havet. Av dessa tre är naturligtvis det öppna havet den mest homogena delen. Pelagialen (den fria vattenmassan) är därför också den artfattigaste miljön, trots att den dominerar volymmässigt.

Tio grupper

Inför modelleringsarbetet definierade vi tio olika funktionella grupper för att underlätta beräkningarna:

- Makrofyter (stora vattenväxter)
- Mikrofyttobentos (bottenlevande mikroskopiska alger)
- Växtplankton
- Bottenlevande bakterier
- Bottenlevande djur
- Djurplankton
- Bakterieplankton
- Fisk
- Fåglar
- Däggdjur

Makrofyterna är vattenväxter som är synliga för blotta ögat. Till gruppen hör såväl kärlväxter (exempelvis bladvass), som vattenmossor och stora alger. Fåglarna är sjöfåglar som på olika sätt finner sin föda i havet. Gruppen havslevande däggdjur består endast av en art, gråsäl, men även mink och utter finns i området.

Akkumulation eller erosion?

När man modellerar ett marint ekosystem är det viktigt att beskriva hur exponerat området är för vind och vågor. Detta påverkar nämligen hur havsbotten ser ut, fördelningen mellan olika botten typer, och i förlängningen även mellan olika ämnen. Stränderna i Forsmark är grunda och det blir inte

djupt så fort. Medeldjupet i hela området är 9,5 meter. I skyddade lägen närmast kusten är ackumulationsbottnar vanliga. Sådana finns till exempel

i Kallrigafjärden och Asphällsfjärden. På de grunda bottenarna ansamlas fin-kornigt material och halten organiskt material är hög. Sedimentpartiklarna

Den fotiska zonen

Ett viktigt begrepp när man talar om marina ekosystem är den fotiska zonen. Med detta menas den vattenvolym där fotosyntes kan ske.

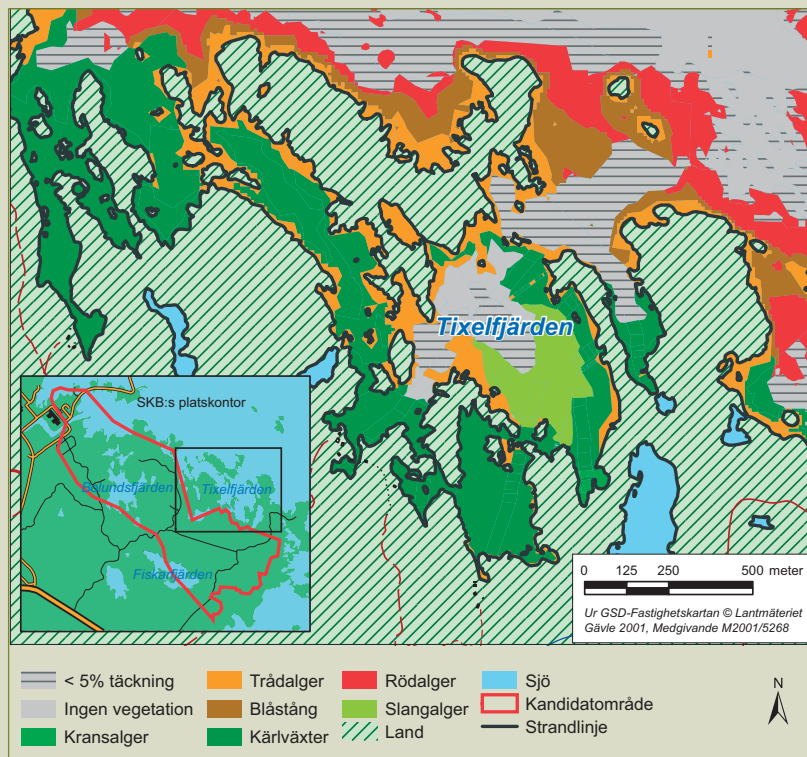
Det är bara på botten inom den fotiska zonen som växter kan etablera sig. Vid större vattendjup finns inga växter.

Den fotiska zonen sträcker sig ungefär ner till dubbla siktdjupet. Siktdjupet utanför Forsmark uppgår till mellan 3,4 och 3,6 meter. Det innebär att den fotiska zonen sträcker sig ner till ungefär sju meters djup.

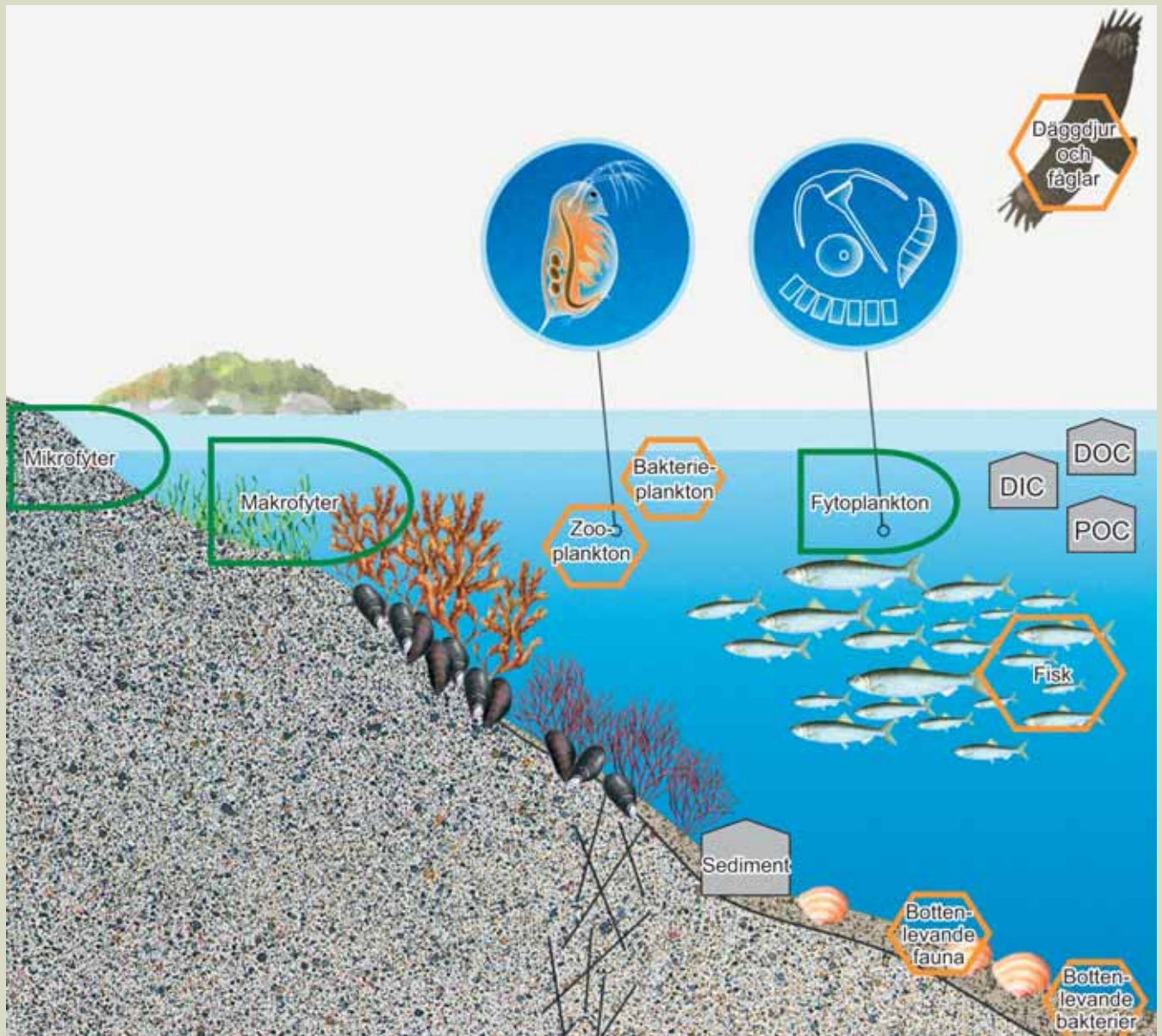
Beroende på vilka pigment som växten innehåller kan den leva ner till ett visst djup. Gröna växter (som tar upp rött ljus) växer bara på riktigt grunda bottenar och gärna på ett sådant sätt att de exponeras vid lågvatten.

Sedan kommer brunalgerna. Dessa växer i bälten under grönalger. Blåstång är ett exempel på en vanlig brunalg.

På de djupaste bottenarna inom den fotiska zonen växer det rödalger. De kan ta upp blågrönt ljus, som har den våglängd som når längst ner i vattnet.



Karta över växtligheten på botten av Tixelfjärden. Närmast stranden växer kärlväxter och grönalger, längre ut brunalgerna och rödalger.



Funktionella grupper i det marina ekosystemet.

(DIC = löst oorganiskt kol, DOC = löst organiskt kol, POC = partikulärt bundet organiskt kol).

Livet i havet

Basen för allt liv i havet är produktionen av växtplankton. Växtplankton är små alger som lever i den fria vattenmassan. Deras tillväxt styrs av tillgången på näringsämnen kväve och fosfor. I den funktionella grup-

pen växtplankton ingår även cyanobakterier, vilka kan binda kväve från luften. Cyanobakterier, eller blågröna alger som de tidigare kallades, kan fixera kväve. Detta är en egenskap som skiljer dem från andra typer

av växtplankton. Cyanobakterierna är alltså inte beroende av det lösta kvävet i vattnet, utan kan använda det kväve som finns i luften. De får därför en stor fördel gentemot andra växtplankton under de perioder då kvävehalterna i havet är låga. Cyanobakteriernas förmåga att ta upp kväve från luften gör att det tillförs stora mängder av ämnet till Östersjön.

Till producenterna hör också makrofyterna. Det är stora flercelliga vattenväxter. Gruppen består av kärlväxter, vattenmossor och stora alger.

Huvuddelen av primärproduktionen sker inom den fotiska zonen och styrs till stor del av ljuset. Även tillgången på närsalter har betydelse. Normalt uppvisar produktionen av växtplankton typiska mönster där olika arter produceras under olika årstider.

Produktionen av bottenlevande alger och makrofyter styrs inte på samma sätt av tillgången på närsalter. Där är det främst vattnets klarhet, djupförhållandena och sedimenttypen som avgör. Ju klarare vattnet är, desto större blir produktionen.

Producenterna utgör föda för konsumenterna. Dessa kan vara växtätare (primärkonsumenter), rovdjur (sekundärkonsumenter) eller nedbrytningsorganismer (destruenter) som tar hand om döda växt- och djurdelar.

Zooplankton är mycket små djurarter som driver med havsströmmarna. De livnär sig av mikroskopiska alger och djur, som de filtrerar ut ur havsvattnet. En del djurarter, till exempel strömming, lever som zooplankton under sina yngel- eller larvstadier. Andra zooplankton lever hela sitt liv i planktonfasen.

Djur som lever på eller nedgrävda i bottensedimenten kallas bottendjur eller bentos. Gruppen består av musslor, maskar, kräftdjur m fl. De bottenlevande djuren har stor betydelse för utbytet av olika ämnen mellan den fria vattenmassan och sedimenten. Musslor kan filtrera vattnet och bidrar på så sätt till att organiskt material transporteras från vattnet till botten. Bottenlevande maskar och kräftdjur pumpar vatten genom sina gångar, som de gräver i sedimenten.

I den fria vattenmassan lever också fisk. De olika fiskarterna kan vara såväl primärkonsumenter som sekundärkonsumenter.

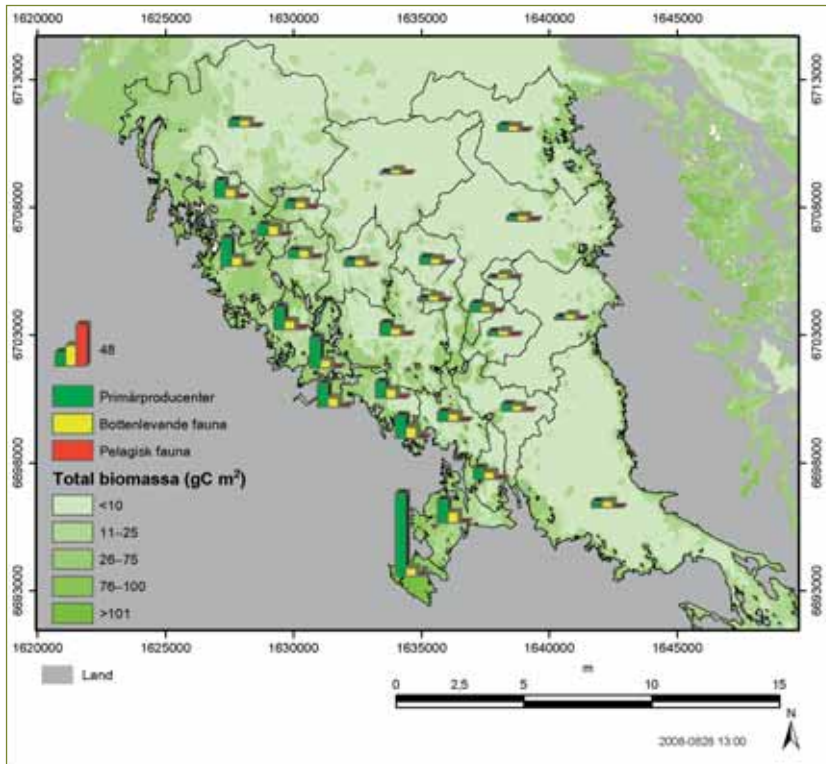
På den högsta nivån i näringsväven befinner sig toppkonsumenter som fiskätande sjöfåglar och däggdjur. I Forsmark finns bara ett sådant däggdjur – gråsälen.



Björn Söderbäck, limnolog på SKB, provfiskar.



Huvuddelen av primärproduktionen sker i den fotiska zonen, dvs den del av vattenmassan som utsätts för solljus.



Fördelningen av biomassa mellan funktionella grupper i de olika bassängerna (stapeldiagram). För varje bassäng är också den totala mängden biomassa angiven (grönskala).

på en ackumulationsbotten kan komma både från grunda och från djupa områden. Vattenomsättningen är ofta liten och därmed blir syrehalten låg.

Växtligheten skyddar

De mjuka ackumulationsbottenarna i grunda områden är rika på vegetation och de är en av de viktigaste livsmiljöerna i havet. Det är här artrikedomen är störst. Vegetationen ger skydd åt bland annat lekande fisk och fiskyngel. I själva strandlinjen växer vassbälten. Längre ut avlöser undervattenväxter vassen. I Forsmark hittar vi, liksom i sjöarna, kransalger av släktet *Chara* på ackumulationsbottenarna. Många av de bottenlevande djur som finns där lever nedgrävda i de översta centimetrarna av bottensedimenten. Längre ut till havs påverkas botten-

na av vågor och där kan inte finkornigt material sedimentera. Bottnarna är så kallade erosionsbottenar och består i stället av morän. Hit når inte solljuset och vi hittar därför inga växter alls, bara djur av olika sorter. Den bottenlevande faunan domineras av Östersjömusslan (*Macoma baltica*).

Liten variation

Förutom salthalten är temperaturen och syrehalten de parametrar som i första hand sätter gränserna för den biologiska mångfalden i havet. Under platsundersökningen analyserade vi en rad parametrar utöver dessa tre, till exempel turbiditet (partikelinnehåll), pH och elektrisk konduktivitet. Dessutom analyserade vi vattnets innehåll av närsalter, kolföreningar, spårmetaller och isotoper. Resultaten

visar att variationen mellan de olika provtagningspunkterna är liten. Detta gäller dock inte salthalten. Där finns en gradvis övergång från låga salthalter nära land till högre längre ut i Öregrundsgrepen.

Närsalterna består främst av kväve och fosfor och då lösta i vatten i form av nitrat och fosfat. Även kisel räknas som närsalt, eftersom ämnet är viktigt för sådana organismer som har skal eller skelett.

Fosfor begränsar tillväxt

Normalt är fosfor det begränsande ämnet för tillväxten i ett sjöecosystem och kväve det begränsande ämnet i ett havsekosystem. Så är det emellertid inte i Forsmark. I Öregrundsgrepen är påverkan från avrinningen från land så stor att det är fosfor som begränsar tillväxten. Kväve kan dock vara begränsande under sommarmånaderna. Då blommar de kvävefixerande cyanobakterierna.

I ett nationellt perspektiv är kvävehalterna låga till måttligt höga. Koncentrationerna av de oorganiska fraktionerna av kväve (ammoniak, nitrit och nitrat) är också låga jämfört med övriga Sverige.

Människan och havet

I Forsmark kan vi också se spår av hur människan påverkat havsmiljön. Halten av tungmetaller som kadmium, bly och koppar är högre än genomsnittet i Sverige. Det är spår från de järnbruk som har funnits i området. Även Skutskärsverken utanför Gävle har troligen bidragit till de förhöjda halterna.



Under platsundersökningarna inventerades bottenarnas flora och fauna. Karl Svanberg från Stockholms universitet och Sara Norén, platsekolog på SKB, undersöker botten utanför Tixlan i Kallriga naturreservat.

Fiskarna i havet

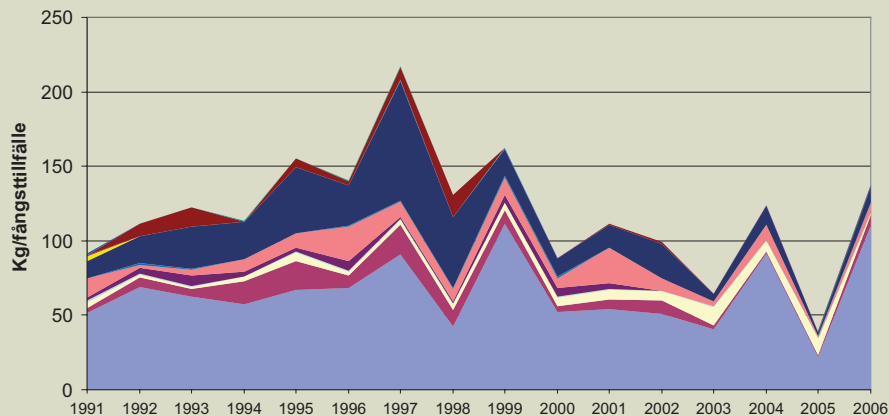
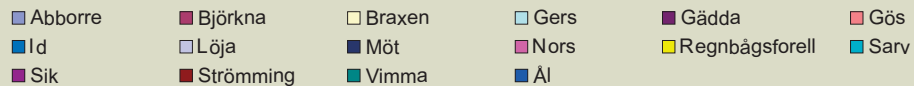
Sedan kärnkraftverket togs i drift har Fiskeriverket undersökt fiskbeståndet i havet utanför för att se om utsläppen av kylvatten haft någon effekt på förekomsten och artsammansättningen av fisk.

Det finns därför ett stort dataunderlag och statistik som sträcker sig tillbaka till 1980, då den första reaktorn startades. Abborre dominerar fångsterna och utgör ungefär 75 procent av alla fångade individer.

Andra delar av det marina ekosystemet, till exempel i Kallrigafjärden fem kilometer söderut, var inte lika väl undersökta när platsundersökningen inleddes.

Vi anlidade därför Fiskeriverket för att undersöka beståndet av strömning med hjälp av ekolod och trålning. Resultaten från ekolodningen databehandlades, så att fisktätheten kunde uppskattas. Detta jämfördes sedan med resultaten från trålningar i samma områden.

Fiskbeståndet i havet utanför Forsmark påverkas mer av det storskaliga fisket i Östersjön än av de lokala fångster som görs. Detta mönster är inte unikt för Forsmark utan kan även ses på andra platser längs Upplandskusten.



Fiskeriverket har undersökt fiskbeståndet utanför Forsmark sedan 1980-talet.

Flöden i landskapet

En platsbeskrivning av ytan innebär även att ta reda på hur olika ämnen rör sig i landskapet. Kunskapen kan sen översättas till hur ett slutförvar i Forsmark skulle kunna påverka omgivningen.



PÅ YTAN

Markanvändningen är en viktig del vid beskrivningen av platsen. Om vi känner till hur marken används kan vi koppla flödena i landskapet till människan.

När vi efter de inledande platsundersökningarna hade samlat på oss tillräcklig information för att kunna identifiera Forsmarks olika ekosystem började vi bygga upp modeller för hur ekosystemen fungerar. Hydrologiska modeller gav oss vattenbalanser, som användes för att förstå vattnets vägar och uppehållstid i landskapet. Kemiska provtagningar tillsammans med tids-serier av vattenföringen i bäckar gav oss en möjlighet att beräkna hur ämnen rör sig i landskapet. Jord- och sedimentprovtagningar gav oss infor-

mation om förekomsten av ämnen som inte var lösta i vatten. Provtagningar av växter och djur visade i sin tur hur ämnen fördelades i näringsväven.

Tillsammans utgjorde dessa data grunden för våra modeller över materialflöden inom och mellan de olika ekosystemen och i landskapet.

Gröna växter producerar

Förutom vattenbalansen i respektive ekosystem påverkar också biologiska processer som produktion, konsum-

tion och respiration hur och var material ansamlas och transporteras. Därför är det viktigt att vi förstår och kan beskriva ekosystemens funktion. Alla ekosystem består av en näringsväv med producenter (gröna växter), konsumenter och nedbrytare.

Låt oss börja med den process som kallas produktion. Allt levande behöver energi för sin existens. Men det är bara de organismer – växter, alger och cyanobakterier – som innehåller klorofyll som kan utnyttja solenergin. De kan omvandla solljus till kemiskt bun-



Det är bara de organismer som innehåller klorofyll som kan tillgodogöra sig luftens koldioxid.

den energi genom fotosyntes. Samtidigt omvandlar de oorganiskt kol från atmosfären till organiskt kol, som de sedan använder för att bygga upp sina egna cellstrukturer.

Tar upp från luft och vatten

På land tar växterna upp koldioxid direkt från luften och de näringsämnen som behövs från jorden. I sjöar och hav tar alger och övriga växter upp

både löst koldioxid och lösta näringsämnen, som kväve och fosfor. Energin från solljuset sätter igång olika kemiska reaktioner i växtens celler, så att det där bildas komplexa kemiska föreningar som socker, proteiner och fetter. Producenterna är de organismer som befinner sig längst ner i näringskedjan. I sjöar är det ofta tillgången till fosfor som begränsar den totala produktionen, medan det på land och i havet ofta är kväve som begränsar.

Den kemiskt bundna energin kan överföras till nästa nivå i näringskedjan. Producenten kan antingen bli föda åt en konsument eller dö och bli omhändertagen av nedbrytare. Konsumenterna är således djur och dessa utvinnet energi genom att konsumera antingen producenter eller andra konsumenter. Den konsument som befinner sig överst i en näringskedja kallas toppkonsument.

Energin flödar i ekosystemet

Den process som sker när en konsument tillgodogör sig den energi som finns bunden i det organiska materialet hos en annan organism kallas respiration eller cellandning. Genom respirationen omvandlas den kemiska energin som finns lagrad i de uppättna organismernas celler till vatten och koldioxid, samt till energi som konsumenten kan tillgodogöra sig för sin egen ämnesomsättning. Den frigjorda energin kan också användas för andra ändamål, till exempel omvandlas till rörelseenergi i muskelcellerna. Respirationen är alltså fotosyntesens mot-

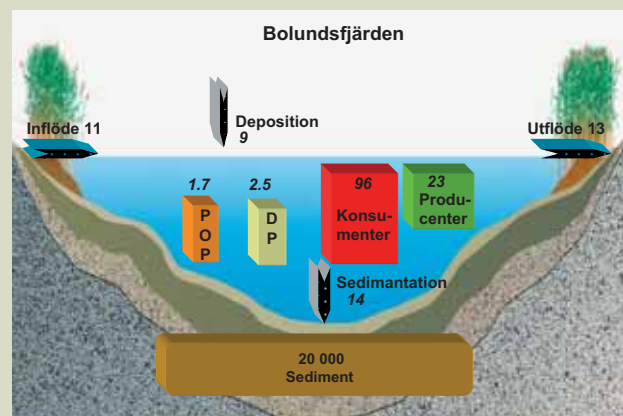
Fosforbalans för Bolundsfjärden

Bolundsfjärden är den största sjön inom det regionala modellområdet i Forsmark. Sjön är belägen på en dryg halvmeters höjd över havet och har ett maximalt djup av 1,8 meter. Liksom de andra sjöarna i området är det en kalkoligotrof klarvattensjö omgiven av vassbälten. Botten är täckt av en mikrobiell matta och det är gott om kransalger i sjön.

Vid stormar kan bräckt vatten tränga in från Östersjön. Detta leder till att salthalten ibland är högre än vad som är normalt för en insjö.

En massbalans för fosfor visar att sjön är en sänka för fosfor. Med det menas att fosfor förbrukas eller binds i ekosystemet. För Bolundsfjärdens del innebär det att fosfor fälls ut tillsammans med kalcium för att lagras i sedimenten på sjöns botten.

Den största osäkerhetsfaktorn vid beräkningarna är just tillförseln till sedimenten.



Massbalans för fosfor i Bolundsfjärden. Boxarnas och pilarnas storlek är – förutom för sediment – skalens mot reservoarer och flöden (uttryckt i kilogram fosfor per år) i ekosystemet. POP=partikulärt bunden organisk fosfor, DP=löst fosfor.

sats. Fotosyntes och respiration utgör förutsättningarna för att energi ska kunna flöda genom ekosystemen.

Särskilt viktigt är det att förstå flödena av organiskt bundet kol. Organiskt kol finns i alla ekosystem. Allt organiskt kol har bildats av primärproducenter och detta kol kan användas som ett enkelt mått på hur energi i form av mat transporteras mellan olika delar av ekosystemet. Vid beräkningarna kan därför kolet användas som en gemensam valuta – ett slags ekosystemens euro.

Organiskt kol kan även användas som en indikator för hur vissa radionuklider förflyttar sig i näringsvävarna.

Produktionen sätter gränsen

Produktionen av organiskt material (nettoprimärproduktionen) ger en övre gräns för hur mycket av olika ämnen som kan bindas upp av växterna. När växtligheten bryts ner kan de olika ämnena antingen ackumuleras i marken eller transporteras vidare i ekosystemet, oftast med hjälp av vattendrets rörelser.

Kolflödena till andra nivåer i näringsväven kan sedan användas för att uppskatta hur mycket av olika ämnen som i slutändan maximalt kan tas upp av människan genom födan. Vi har till exempel uppskattat hur mycket resurser som människan på ett hållbart sätt kan ta ut från området i form av grödor, köttproduktion, svamp, bär, vilt och fisk. Hur stor del av ekosystemets produktion som man kan använda reglerar sedan i sin tur storleken på den befolkning som kan utnyttja marken vid självhushållning.

Att bygga en ekosystemmodell

Metodiken för att beskriva kolflöden i näringsväven är densamma oavsett om det handlar om ett ekosystem på land eller i vatten. Man bestämmer

först vilka funktionella grupper systemet innehåller, och kartlägger sedan vem som äter vad (eller vem) för att klargöra vilka vägar energitransporten i form av mat tar.

Genom att ta reda på mängden organismer inom olika funktionella grupper kan man beskriva hur fördelningen av biomassa inom systemet ser ut, och därmed kan man också uppskatta storleken på kolflödena mellan olika funktionella grupper.

Vid analysarbetet har vi använt en rad olika beräkningsmodeller och kombinerat resultaten från dessa med de uppskattningar som vi gjort i fält. Resultaten avslöjar några generella mönster för var kolet finns och hur transportvägarna för kol går genom ekosystemen.

Ett landekosystem är en sänka för kol, det vill säga vegetationen binder luftens koldioxid. Den största kolreservoaren på land finns i markens humuslager och mineraljordar, därefter följer det kol som är uppbundet i vegetationen. På samma sätt som på land finns den största reservoaren av organiskt kol i sjö- och havsekosystemen i sedimenten. I sjöar och hav är däremot en betydligt mindre del av kolet uppbundet i växter, eftersom dessa inte bygger upp någon vedartad biomassa och dessutom delvis består av små och kortlivade planktonarter.

In i och ut ur skogen

De två processer som uteslutande styr skogsekosystemets nettobalans för kol är fotosyntesen som tar upp kol och respirationen som avger kol. Skogens ålder och utvecklingsfas, samt typen av skogsekosystem, har också avgörande betydelse för kolbalansen.

På våren och sommaren så tar skogen upp betydligt mer koldioxid än vad den avger. Under senare delen av hösten och vinterhalvåret förlorar däremot skogen koldioxid till atmos-



Fisk – en av de sju funktionella grupper i ett sjöekosystem.

fären eftersom respirationen, trots att den är liten, till skillnad från fotosyntesen inte avstannar under vintern. Exporten av kol från det terrestra ekosystemet sker främst i form av löst organiskt kol som lakas ur från marken och förs bort med vattendragen.

En viktig del av modelleringen av det terrestra ekosystemet är att förstå hur olika kemiska ämnen fördelar sig mellan mineraljord, humuslager, producenter och konsumenter. Totalt har vi studerat ett femtiotal olika ämnen. Resultaten visar att de flesta ämnen, förutom klor, framför allt finns i marken. Mellan 75 och 80 procent av all klor finns däremot i vegetationen.

Specialstudier av tre ämnen

Vi har även specialstuderat de tre naturligt förekommande ämnena jod, uran och torium. Dessa kan ge oss en uppfattning om hur olika ämnen i det



Under platsundersökningen specialstuderade vi två granskogar för att uppskatta kolflöden och kolreservoarer.

använda kärnbränslet kommer att betesiga. Där kan vi se att jod uppträder annorlunda än uran och torium. Medan den lätttrörliga joden främst finns i vegetationen och sedan transporteras till sjöecosystemet, ansamlas de mer svårslösliga ämnena uran och torium i första hand i markskiktet (mineraljordar) och i andra hand i humusskiktet. Endast en mycket liten del finns i vegetationen.

Även näringsämnet fosfor binds till största delen i vegetationen. Det transporteras emellertid inte vidare till sjöarna i samma utsträckning som jod. Den kalkhaltiga jorden håller kvar ämnet. Enligt våra beräkningar

är 31 procent av all fosfor i landekosystemet bundet i vegetationen.

Kolets väg i skogen

Under platsundersökningarna genomförde vi ett antal studier för att uppskatta kolflöden och kolreservoarer i olika ekosystem. För att se vilka ramar variationerna ligger inom valde vi tre olika naturtyper:

- Ung granskog
- Gammal granskog
- Alsumpskog

Där tog vi prover på mark och växtlighet, mätte markrespiration och en

rad andra parametrar. Den unga granskogen hade en lägre nettoprimärproduktion än den gamla. Däremot var ackumuleringen av kol i växtligheten större i den unga skogen. I den gamla granskogen bildades mer förna.

Alsumpskogen skilde sig från granskogen såtillvida att humuslagret hade ett högre kolinnehåll. Å andra sidan var kolinnehållet i mineraljorden lägre där.

Sjön som ett system

För sjöarna i Forsmark har vi, förutom kol- och fosforbalanser, också räknat på omsättningen av ett stort antal andra ämnen. Beräkningarna visar att utflödet via vatten är viktigt för ett rörligt ämne som jod. För torium är däremot den mängd som ackumuleras i sediment tre gånger så stor som den mängd som förs bort med vattnet. När det gäller uran är den mängd som transporteras bort med vatten något större än den mängd som ackumuleras i sedimenten.

Resultaten visar att det finns en generell skillnad mellan stora och

Data för olika marktyper i Forsmark

Egenskap	Åkermark	Ängs- och hagmark	Skogsmark
Biomassa (kgC/m ²)*	0,2	0,4	9,8
Nettoprimärproduktion (kgC/m ² och år)*	0,2	0,4	0,6
Organiskt kol i jord (gC/m ² till 1 m djup)	13,9	13,9	8,0
Jordart	Lerig morän	Lerig morän	Morän
Jorddjup (m)	5,8	3,6	3,6

*Inklusive rötter



Många ämnen tenderar att ansamlas i de stora sjöarna i Forsmark, eftersom in- och utflödena är små jämfört med vattenvolymer. I små sjöar förflyttar sig olika ämnen lättare nedströms.

små sjöar när det gäller omsättningen av olika ämnen. I stora sjöar, som till exempel Bolundsfjärden, är omsättningen inom sjön stor jämfört med de mängder som strömmar ut och in i sjön. Detta leder till att många ämnen tenderar att ansamlas där.

I de mindre sjöarna är däremot den interna omsättningen i sjön mindre än inflödet till respektive utflödet från sjön. Det innebär att olika ämnen lättare förflyttar sig nedströms i sjön.

Kolbalanser för de olika havsbassängerna visar att den totala biomassan varierar mellan 5 och 160 gram kol per kvadratmeter. Genomsnittsvärdet uppgår till 18

gram kol per kvadratmeter, men fördelningen är ojämn. De högsta värdena finns längs kusten och i grunda områden. I hela modellområdet finns uppskattningsvis 4 400 ton kol fixerat i växter och djur. Makrofyterna står för den största delen av biomassan.

Mest produktion vid stranden

Precis som biomassan är nettoprimärproduktionen koncentrerad till strandlinjen. Längs Kallrigafjärdens tätbevuxna strandlinje kan årsproduktionen nå över 250 gram kol per kvadratmeter. Nettoproduktionen är också ganska hög ute till havs där

djupet är stort och vattnet så klart att fytoplankton kan produceras i stora mängder. Den klart största kolreservoaren i det marina ekosystemet är dock inte växter och djur utan sedimenten. I sedimenten finns 20 gånger mer kol än i de andra reservoarerna. Sedimenten är inte bara den största reservoaren för kol. Där finns också den största delen av alla de enskilda ämnen som vi analyserade under platsundersökningen. Det gäller även de specialstuderade ämnena torium, uran och jod. Förutom kol är det bara kväve, fosfor, kisel, mangan och jod där mer än en procent av den totala mängden finns i löst form eller i organiskt material.

Kolbalans för Eckarfjärden

Eckarfjärden är den högst belägna sjön inom det regionala modellområdet. Den är belägen på fem meters höjd över havet. Trots att det är en av de djupare sjöarna i Forsmarksområdet så är Eckarfjärden en relativt grund sjö. Det maximala djupet uppgår till 2,1 meter.

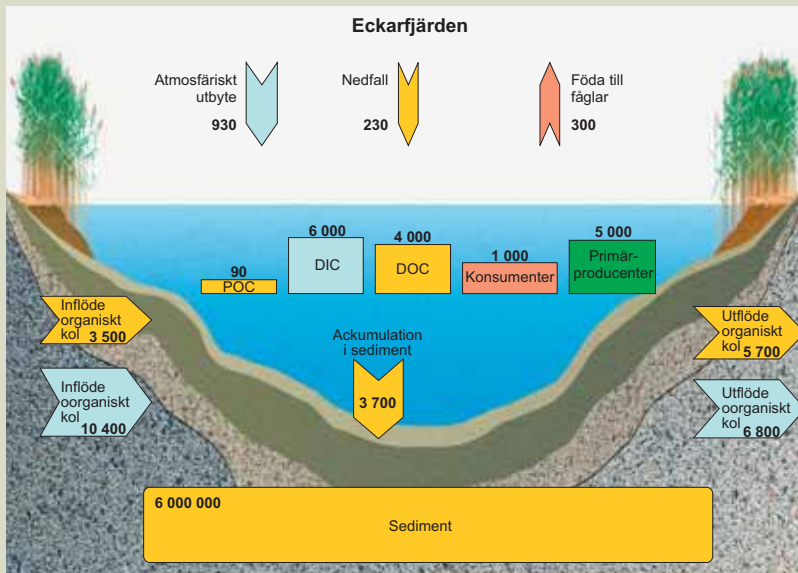
Bottenlevande primärproducenter och bakterier är de vanligaste organismerna i Eckarfjärden. Beräkningarna visar att den totala biomassan i Eckarfjärden uppgår till ungefär 5 900 kilogram räknat som kol. Så mycket som 96 procent av denna finns i littoralen, dvs bundet till de solbelysta bottenarna i sjön.

De bottenlevande primärproducenterna dominerar primärproduktionen och står för 88 procent av den totala primärproduktionen i sjön. Den största delen av respirationen däremot, 58 procent, äger rum i pelagialen. Bakterier (pelagiska och bottenlevande) står för 82 procent av den totala respirationen. Andra viktiga grupper för respiration är fytoplankton (9 procent) och fisk (6 procent). Den årliga primärproduktionen uppgår till 30 600 kilogram kol, medan respirationen uppgår till 21 100 kilogram kol. Detta ger en positiv nettoproduktion av 9 500 kilogram kol.

Det största kolflödet uppåt i näringsväven går från bottenlevande primärproducenter via bottenlevande djur och slutligen till fisk.

Flödena av kol in i och ut ur sjön är små jämfört med omsättningen inom den.

Vi har gjort motsvarande kolbalanser för Bolundsfjärden, Gunnarsbo-Lillfjärden och Labbotträsket.



Eckarfjärden. Massbalans för kol uttryckt i kilogram kol per år. TOC = totalt organiskt kol, DIC = löst oorganiskt kol.



SLUTSATSER

- Vet vi tillräckligt om Forsmark?
- Hänger yta och berggrund ihop?
- Säkert och osäkert
- Hur går vi vidare?



Platsundersökningen i Forsmark har gett upphov till en mycket stor mängd data. På bilden mäter Ellen Walger från Geosigma flödet i ett hammarborrhål. Vi vet nu vad vi behöver för att utvärdera om det går att bygga ett säkert slutförvar i Forsmark.

Vet vi tillräckligt om Forsmark?

Gav platsundersökningen i Forsmark svar på de frågor vi ställde i början. Ja, nu förstår vi den geologiska utvecklingen, vattnets kretslopp och kemiska sammansättning tillräckligt bra för att kunna göra trovärdiga prognoser om förhållandena i framtiden.

Den stora mängd data som platsundersökningen genererade gör att vi i dag har en tydlig bild av var de stora deformationszonerna i berggrunden finns. Vi kan förklara hur de en gång bildades samt om det rör

sig om plastiska zoner (där berget har deformerats under varma förhållanden) eller om det rör sig om spröda zoner (där berget har spruckit upp). Genom att detaljstudera borrhämnarna och mäta vattenflödena i borrh-

ålen vet vi vilka bergarter som finns samt hur frekvensen av vattenförande sprickor varierar med djupet. Den övre delen av berggrunden är kraftigt uppsprucken och vattenförande, medan det finns få sprickor och nästan inget vatten på djupet.

Analys ger information

Analys av grundvattnets kemiska sammansättning i olika punkter gav ytterligare information om var olika vattentyper förekommer i förhållande till de geologiska strukturerna i berg-

grunden och dessas hydrauliska egenskaper. De gav också information om under vilka tidsperioder och klimat som grundvattnet bildats.

Med utgångspunkt från detta kan vi dra slutsatser om hur stor vattenomsättningen är på olika ställen i berget. På 500 meters djup finns exempel på vattentyper som är 1,5 miljoner år gamla. Detta vatten bildades långt före den senaste istidens början.

När det gäller beskrivningen av ytssystemet har vi utvärderat resultaten med alternativa beräkningssätt och jämfört dessa med förhållandena på andra platser för att förvissa oss om att de är rimliga.

Fem frågor – fem svar

I det inledande avsnittet ställdes fem frågor om berget. Förutom dessa platsspecifika frågor var vi framför allt intresserade av förekomsten av stora deformationszoner, sprickornas frekvens och vattengenomsläpplighet samt grundvattnets kemiska sammansättning. Några av dem har också redan besvarats i avsnittet om berggrunden, men låt oss ändå för fullständighetens skull sammanfatta svaren.

■ Hur djupt sträcker sig den tektoniska linsen?

Denna fråga ställde vi för att avgöra om förvaret kunde byggas i bergkroppen. De borrhål vi borrade i linsen sträckte sig ner till 1 000 meters djup. Så djupt ner går alltså minst den tektoniska linsen. Eftersom slutförvaret enligt planerna ska byggas på 475 meters djup innebär detta att vi har goda marginaler för anläggningen, både uppåt och nedåt.

■ Vilka egenskaper har de deformationszoner som omger den tektoniska linsen?

Många av de borrhål som borrades under platsundersökning har placerats så att de går igenom de stora zonerna i förvarets närhet. På så sätt har vi fått

information om vilka egenskaper zonerna har, dvs hur de har bildats, vilka bergarter som det deformerade berget består av och hur mycket vatten som rinner där.

■ Finns det malm eller andra brytningsvärda mineraler i berggrunden?

Malm- eller mineralförekomster är en egenskap som direkt diskvalificerar en plats från att vara aktuell för att bygga ett slutförvar på. Under den svekokarelska bergskedjeveckningen bildades flera malmförekomster i Forsmarks närhet. Vid platsundersökningen dokumenterade vi några järnoxid-mineraliseringar sydväst om kandidatområdet. Det finns emellertid ingen ekonomisk potential att bryta någon malm. Området i övrigt innehåller inte några malm- eller andra värdefulla mineraltillgångar.

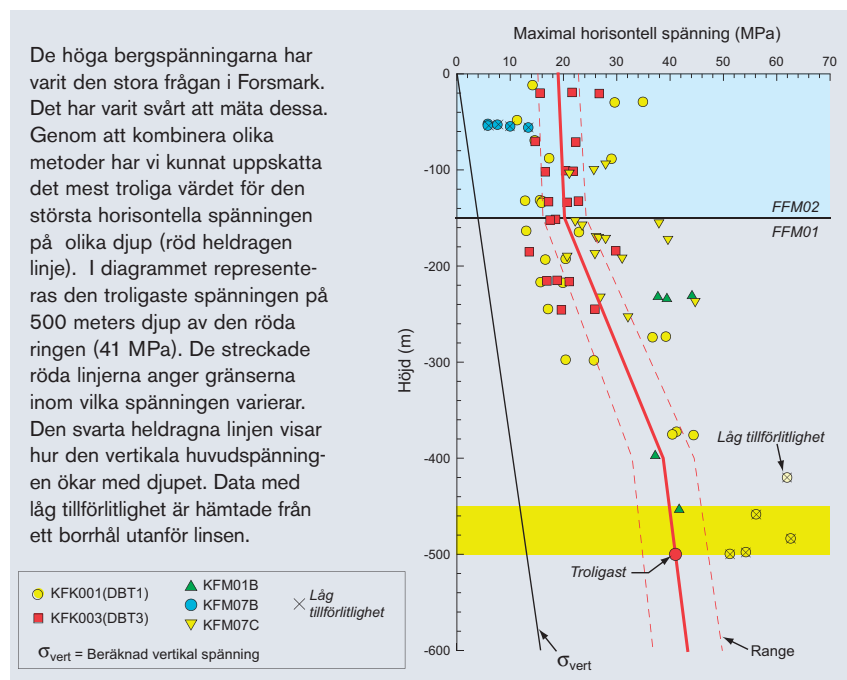
■ Var finns de flacka sprickzonerna i berggrunden?

De mest vattenförande zonerna består av en rad flacka sprickzoner i områdets sydöstra del. Zonen ZFMA2

är den viktigaste av dessa för vattenföringen i närheten av den bergvolym där slutförvaret eventuellt ska byggas. Den skiljer den täta delen av berget från bergvolymen med de flacka, vattenförande zonerna. I nordväst finns dessutom nästan horisontella spricksystem, som på ett effektivt sätt hindrar vatten från ytan att tränga ner på djupet och i stället leder ut detta till Östersjön. Här är den övre delen av berggrunden extremt vattenförande ner till mellan 150 och 200 meters djup.

■ Hur stora är bergspänningarna?

Bergspänningarna i Forsmark är höga, jämfört med som vad som är normalt för berggrunden i Sverige. Det har varit svårt att mäta bergspänningarna i Forsmark. Eftersom det inte förekommer utfall av bergfragment på ett systematiskt sätt i borrhålen (vilket skulle indikera spänningsinducerade brott i borrhålen) är det möjligt att lägga fast en övre gräns för bergspänningen ner till 1 000 meters djup.



Hänger berggrundyta och yta ihop?

Hur påverkar ytsystemens snabba processer berget? Och hur kommer ett slutförvar att påverka ytan? Det får inte finnas några vita fläckar i den platsbeskrivande modellen om vi ska förstå helheten.

En svårighet när man tar fram en platsbeskrivande modell är att gifta ihop förhållandena på markytan med förhållandena nere i berget. Vi måste kunna förstå platsens egenskaper uppifrån och ner, likaså nerifrån och upp.

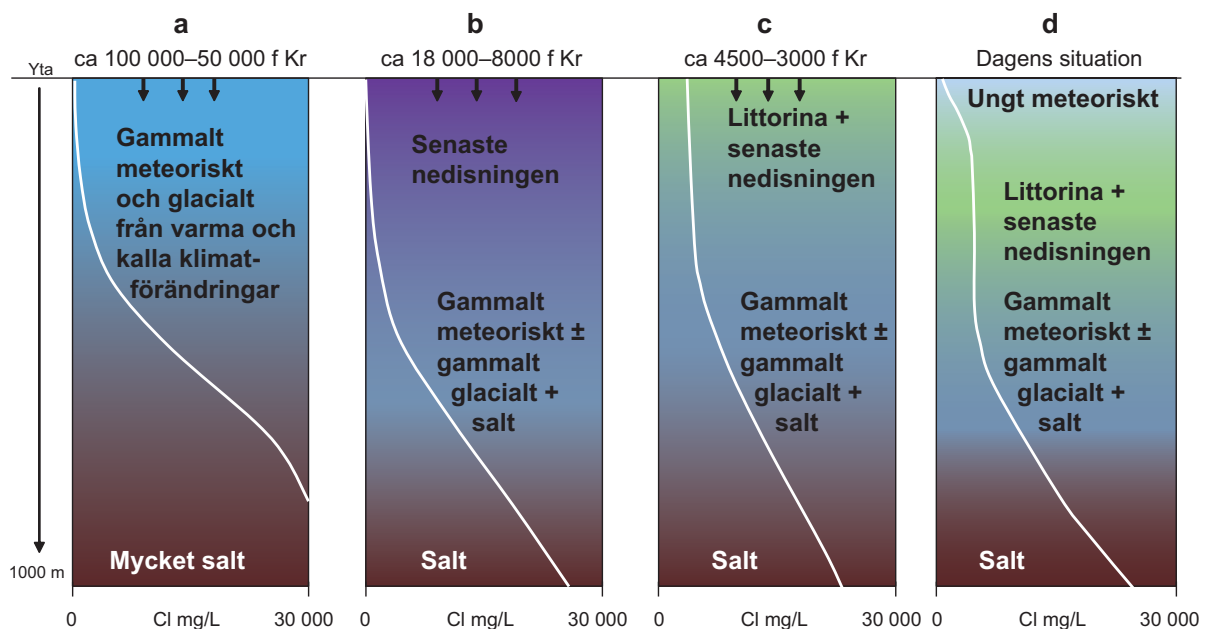
Vid platsmodelleringen har vi främst tittat på hur de abiotiska (icke-levande)

delarna av ekosystemen påverkar förhållandena i berget. Främst handlar det om hur berggrundens sammansättning och sprickmineral påverkar grundvattnet med tiden. De biotiska delarna av ekosystemen har inte lika stor påverkan. Mikrobernas roll i berget är en faktor som skulle kunna

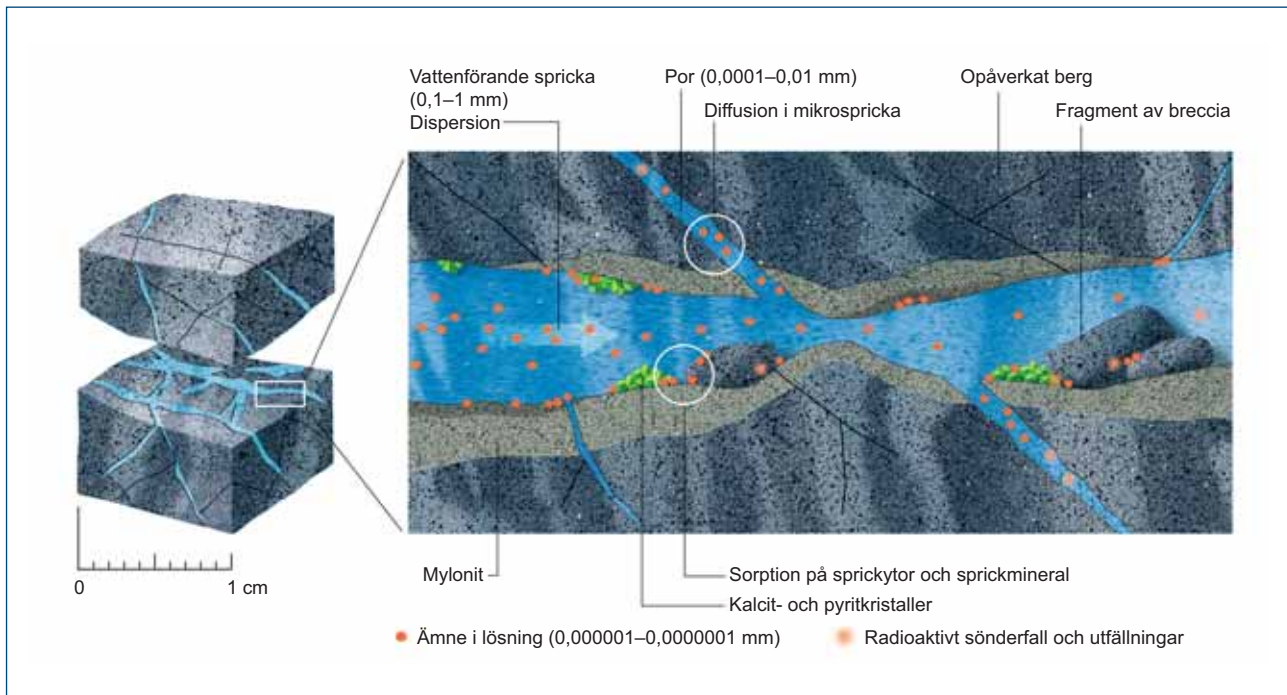
spela roll. Om detta har vi emellertid ännu inte så mycket information.

Berget står stilla

Själva berget slutade i princip att utvecklas för över en miljard år sedan. Vattnet i berget förändras däremot



Grundvattnets sammansättning har varierat under olika tidsperioder. Figur a visar situationen före den senaste istiden. Efter den senaste istiden trängde glacialt smältvatten ner i berggrunden, figur b. Under ett av Östersjöns förstadier, Littorinahavet, trängde salt vatten ner ganska långt, eftersom detta hade högre densitet än det ursprungliga glaciala smältvattnet, se figur c. Figur d visar dagens situation. Den vita linjen visar hur saltheten förändras mot djupet.



En rad olika processer påverkar transporten av lösta ämnen i bergets sprickor.

ständigt, om än i olika takt, beroende på vilket djup det befinner sig på.

När vi modellerar yt- och grundvatten använder vi oss av olika modelleringsstrategier. För att få ett grepp om helheten gäller det att resultaten stämmer överens hela vägen från yta till djup. Det gör de också i stor utsträckning i Forsmark. Med utgångspunkt från dagens förhållanden kan vi beräkna vilka egenskaper grundvattnet hade bakåt i tiden. Vi kan också simulera den framtida utvecklingen.

Hur stor är variationen?

Att undersöka hur de kemiska förhållandena ändras framåt och bakåt i tiden är inte bara viktigt för att kunna avgöra inom vilka gränser olika parametrar varierar. Det är också en viktig ledtråd när vi ska avgöra om våra

hydrogeologiska modeller fungerar. När det gäller vår modell för Forsmark kan vi vara nöjda. Vi kan återskapa hur grundvattnets sammansättning varierat i det förflutna och göra prognoser för framtiden.

Man kan också vända på frågeställningen och utgå från hur ett slutförvar skulle kunna påverka förhållandena på ytan. Detta är emellertid inte en uppgift för den platsbeskrivande modellen, utan görs inom ramen för säkerhetsanalysen.

Här är bergets förmåga att fördröja transporten av radioaktiva ämnen nyckeln. Genom att simulera utsläpp av radioaktiva partiklar på djupet kan vi beräkna hur lång tid det tar för dem att nå ytan och var de kommer upp.

Ekosystemets egenskaper på utsläppsplatsen ger sedan ytterligare underlag för att beräkna hur stor dosen till människa och miljö blir.



Bergets förmåga att fördröja radioaktiva ämnen och ekosystemet på utsläppsplatsen bestämmer dosen till människa och miljö.

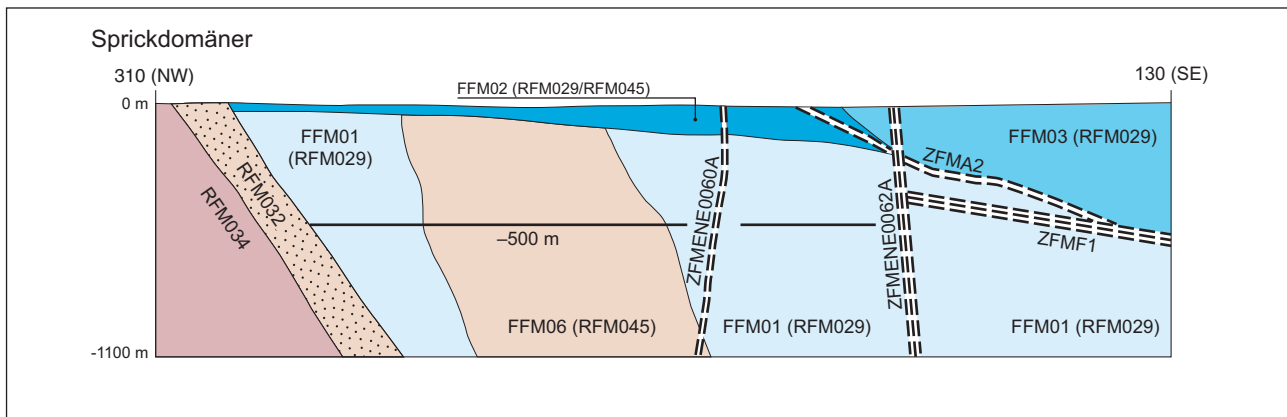
Säkert och osäkert

Hur vet vi att de platsbeskrivningar vi har utvecklat verkligen ger en rättvis bild av platsen? Och hur vet vi att beskrivningarna av platsens egenskaper är användbara för sitt syfte?

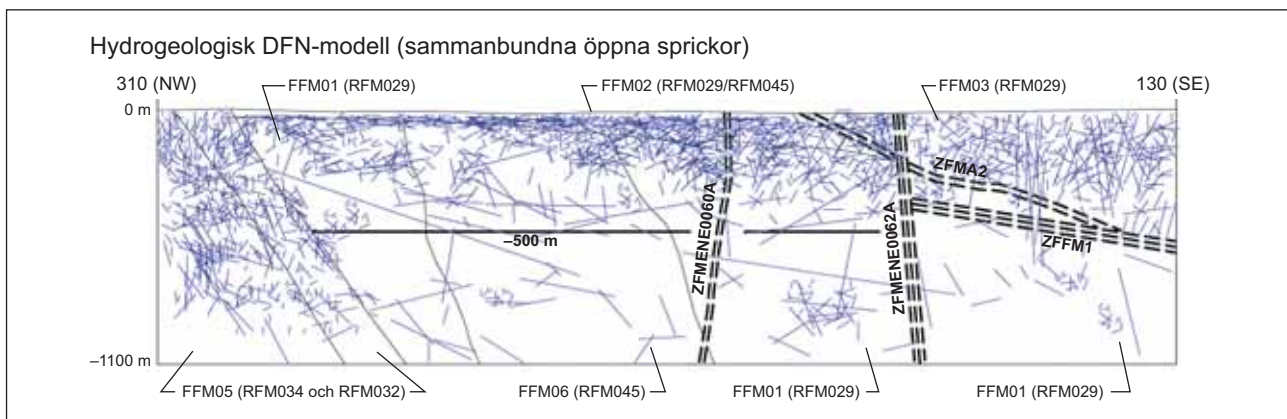
När man bedömer resultatet av en platsbeskrivning skiljer man mellan begreppen tillförlitlighet och osäkerhet. Att platsbeskrivningen är tillförlitlig innebär att den beskriver alla kända processer som sker på markytan och i berggrunden.

Graden av tillförlitlighet är med andra ord ett sätt att kvantifiera att platsbeskrivningen är baserad på relevant information, rätt sorts undersökningar och riktiga data. I tillförlitligheten ligger också att den beskriver de förlopp som den är avsedd att

beskriva samt att detta sker på ett objektivt sätt och enligt vedertagna vetenskapliga metoder. Osäkerheten är ett mått på platsbeskrivningens precision, det vill säga hur nära verkligheten vi kommer. Att beskriva – och även tolka – den insamlade infor-



De olika delmodellerna för olika ämnesområden ska stämma överens. Då ökar tilltron till platsmodellen. Detta har vi lyckats med ganska bra i Forsmark. Den konceptuella modellen av olika sprickdomäner i berget ...



... återspeglar hur de vattenförande sprickorna är fördelade i berget enligt den hydrogeologiska modellen ...

mationen inom ett stort undersökningsområde från markytan är en utmaning. Grafisk modellering är ett viktigt verktyg för att åskådliggöra information i tre dimensioner och för att kommunicera resultatet av en platsbeskrivning. Rätt använda ger tredimensionella bilder en bättre förståelse både för det utförda arbetet och för de data som samlats in. Även tilltron till platsbeskrivningen i sin helhet blir större.

Olika typer av modeller

Inom de olika ämnesområdena har olika typer av matematiska modeller utvecklats som stöd för arbetet med

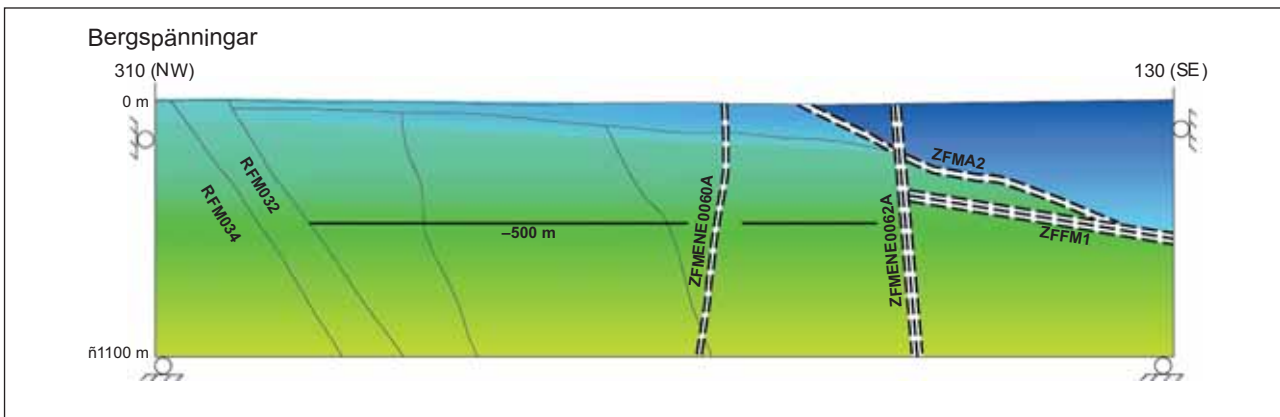
platsbeskrivningen. Vissa av de matematiska modellerna används för att analysera insamlade data, för att sortera information och för att bearbeta data. Andra matematiska modeller används för att stödja eller avfärda ett antagande om hur platsen fungerar. Ytterligare några modeller används för att parameterisera (sätta siffror på) platsens egenskaper så att vi i ett senare skede ska kunna använda detta inom säkerhetsanalysen eller när vi utformar anläggningen.

Att beskriva en stor bergvolym i tre dimensioner utifrån information från borrhålen och markytan är naturligtvis alltid förknippat med stora osäkerheter. Det är först när man går ner i

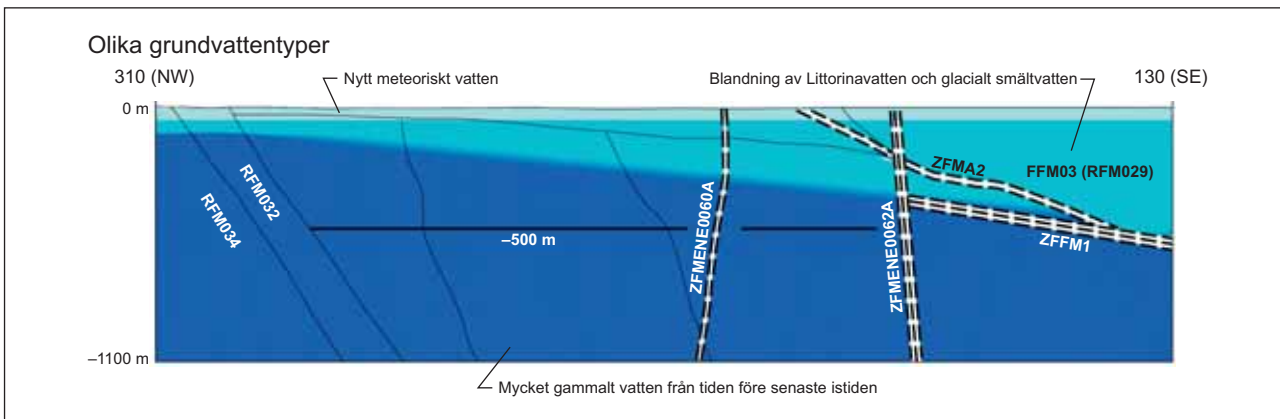
berget som man får bekräftelse på hur det ser ut i verkligheten. I nuläget är det viktigt att ha en uppfattning om vilka osäkerheter som finns samt vad var och en av dessa osäkerheter betyder för tilltron till platsbeskrivningen, för den långsiktiga säkerheten och för hur anläggningen utformas. Vi måste också ha en uppfattning om vi kan leva med dessa osäkerheter tills nästa skede då anläggningen uppförs.

Vi tror på platsbeskrivningen

Det finns flera faktorer som gör att vi har en god tilltro till platsbeskrivningen för Forsmark. För det första är mängden data som platsundersök-



... samt även hur bergspänningarna varierar utifrån hur mycket de olika sprickzonerna förmår att avlasta berget. Blå färg representerar låga bergspänningar och gul färg höga.



Tittar vi närmare på modellen över grundvattensammansättningen i berget ser vi att vattnet på förvaringsdjup är mycket gammalt. De ytliga sprickzonerna leder bort vattnet och hindrar på så sätt vattenomsättningen i bergets djupare delar.

ningen genererat mycket stor, både för berget och för de ytliga ekosystemen. Med dessa i ryggen har vi kunnat bygga upp en stabil och tillförlitlig geologisk modell. Bland annat ger den geologiska modellen en tydlig bild av de stora deformationszonerna i berggrunden. Vi vet var de finns och hur de en gång bildades. Den geologiska beskrivningen är sedan utgångspunkten för de övriga ämnesspecifika beskrivningarna, vilka i sin tur stöds av en mängd andra typer av data från området.

För det andra kan vi också konstatera att de mätdata vi har fått fram vid undersökningarna inom de olika ämnesområdena är tillförlitliga. Bara några få data har behövt uteslutas, eftersom de bedömts vara störda eller påverkade av andra mätfel. Andra data är rimliga, men behäftade med olika grad av osäkerhet. Det gäller till exempel orienteringen hos vissa borrhål, liksom orienteringen hos de sprickor vi filmat med hjälp av borrhålskamera. Ett annat exempel är uppskattningen av bergspänningarnas storlek. Dessa felkällor har begränsad betydelse för tillförlitligheten. Däremot ger de osäkerheter som måste hanteras.

Säkrare och säkrare

Under platsundersökningens gång har antalet oväntade resultat minskat. Utfallen har i stället mer och mer bekräftat de antaganden vi gjort eller de förväntningar vi haft. Ju längre undersökningarna har fortlöpt, desto större har överensstämmelsen varit.

Det omfattande och systematiska arbetet med osäkerheter i data, samt med osäkerheter i och tilltro till olika matematiska modeller, gör att tilltron till beskrivningen i sin helhet blivit ännu större. Alternativa förklaringar har hanterats inom ramen för vad som

får anses vara rimligt. Våra experter på säkerhetsanalys och anläggningsutformning har involverats i arbetet och kunnat konstatera att tilltron till platsmodellen är tillräckligt stor för att tillåta en tillförlitlig värdering av den långsiktiga säkerheten. Platsens nuvarande egenskaper – geologiska, hydrogeologiska, kemiska och mekaniska – kan till stora delar förklaras av områdets historiska utveckling under en lång geologisk tidsperiod.

Berget på djupet viktigast

Alla egenskaper är naturligtvis inte lika viktiga när det gäller att bedöma om platsen är lämplig. Framför allt är det förhållandena nere i den bergvolym där förvaret ska byggas som är viktiga. I Forsmark är följande fenomen på förvarsdjup inte helt klarlagda:

- Det finns kvarvarande osäkerheter i beskrivningen av de kemiska förhållandena i förvarsvolymen. Osäkerheten gäller hur mycket som finns av de sprickmineraler som kan ta upp syre, till exempel järnmineralet pyrit. Även förekomsten av sådana mineral som ser till att grundvattnets pH överstiger 7, exempelvis kalcit, är behäftad med osäkerheter. Dagens grundvatten blir syrefritt nära ytan och kalcit är ett vanligt förekommande sprickmineral. Efter en framtida glaciation skulle glacialt smältvatten kunna tränga ner i berget och förändra syrehalt och pH. För att kunna göra prognoser om mängden pyrit och kalcit räcker för att hålla grundvattnet syrefritt och neutralt måste vi sätta siffror på hur stora mängder det finns. En sådan undersökning pågår och resultaten kommer att finnas framme till säkerhetsanalysen SR-Site.

- I några borrhål har vi konstaterat att sulfidhalterna ökar med tiden. Det kan bero på att provtagningarna av grundvattnet i sig har gynnat sulfidbildningen, men vi är inte säkra på att det är detta som är orsaken. Ytterligare mätningar kommer därför att pågå under en längre tid.

- I vissa borrhål har vi mycket sporadiskt träffat på porös granit. Där finns det avsnitt där vissa mineral har lösts upp. Eftersom den porösa graniten förekommer så pass sällan och oftast i samband med sprickzoner (som undviks vid deponeringshål) bedömer vi att de inte har någon betydelse för den långsiktiga säkerheten.

Enhetlig bild av berget

De kvarstående osäkerheterna om de ytliga ekosystemen handlar främst om hur mycket sedimentlagren varierar i tjocklek och hur stor vattengenomsläpplighet den övre delen av berggrunden har. Vår allmänna kunskap om grundvattenströmningen i berget är god. Däremot är det svårt att fastställa det exakta läget för de punkter där djupt grundvatten strömmar upp. Det beror på att landhöjningen hela tiden ändrar strandlinjens nivå.

Ett sätt att avgöra om vi tror på de olika delmodellerna eller inte är att jämföra resultaten från dem med varandra. En positiv erfarenhet vid platsmodelleringen är att vi ser att överensstämmelsen mellan de olika delmodellerna är god. Bilden av berget upprepar sig oavsett om man betraktar det utifrån ett geologiskt, bergmekaniskt, hydrogeologiskt eller hydrogeokemiskt perspektiv.

Hur går vi vidare?

Platsbeskrivningen för Forsmark och motsvarigheten för Laxemar, tillhörde de viktigaste underlagen när SKB valde plats för slutförvaret. Beskrivningen av Forsmark har också varit utgångspunkten för layouten av förvaret och kommer även att ge underlag till säkerhetsanalysen.

Som vi redan konstaterat vet vi tillräckligt mycket om platsen för att kunna utvärdera om det går att bygga ett säkert slutförvar i Forsmark. Några frågetecken återstår emellertid när det gäller den platsbeskrivande modellen för Forsmark.

Främst rör det sig om förhållanden inne i det område där förvaret eventuellt ska byggas. Bergartssammansättningen och sprickornas läge är till exempel än så länge bara beräknade med hjälp av statistiska metoder. Först om och när själva bygget

börjar och vi går ner på djupet kan vi se hur det ser ut i verkligheten. Här har vi dock en uppfattning om inom vilka gränser egenskaperna varierar. Syftet med ytterligare undersökningar är att minska osäkerheterna ännu mer.



Modell över hur ett framtida slutförvar i Söderviken i Forsmark skulle kunna se ut.



Först när vi går ner under mark och gör kompletterande undersökningar kan vi fastställa deponeringstunnlarna och deponeringshålens exakta läge.

I Forsmark kommer vi att behöva komplettera platsundersökningen med undersökningar från de bergrum som byggs när vi går ner i berget. Syftet är att få en ännu mer detaljerad beskrivning av de faktorer som berör förhållandena nere i berget. De viktigaste av dessa är:

- Sprickornas storleksfördelning och sprickintensitet under 200 meters djup.
- Bergsspänningarnas storlek.
- Analyser av grundvatten och sprickmineraler kan ge oss ytterligare förståelse för de kemiska förhållandena i berget.
- Kartering av öppna sprickor kan ge oss ännu mera kunskap om hydrogeologin.
- Sedimentlagrens tjocklek och vattengenomsläppligheten i den övre delen av berggrunden kan undersökas närmare genom att borra ytterligare undersökningshål.
- När vi går ner i berget kan vi framför allt göra mer detaljerade geofysiska och hydrauliska tester i och omkring deponeringstunnlarna. Detta ger möjlighet att ytterligare specificera läget hos deponeringstunnlar och deponeringshål.

Ett specifikt program för dessa detaljerade undersökningar kommer att presenteras i samband med ansökningarna för att få bygga och driva slutförvaret.



Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, bildades på 1970-talet och ägs av de företag som äger de svenska kärnkraftverken. Dessa är enligt lag skyldiga att ta hand om det svenska kärnavfallet inom Sveriges gränser, samt finansiera detta.

SKB:s uppdrag är att ta hand om allt radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken. Omhändertagandet ska uppfylla kraven på hög säkerhet för människor och miljö. Uppdraget är så omfattande att vi ser det som ett av Sveriges största miljöskyddsprojekt.



Svensk Kärnbränslehantering AB

Box 250, 101 24 Stockholm
Telefon 08-459 84 00 www.skb.se