

Vattenverksamhet i Forsmark (del I)

Bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle

Kent Werner, EmpTec

Ulrika Hamrén, Per Collinder, Ekologigruppen AB

December 2010

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

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



ISSN 1402-3091

SKB R-10-14

Vattenverksamhet i Forsmark (del I)

Bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle

Kent Werner, EmpTec

Ulrika Hamrén, Per Collinder, Ekologigruppen AB

December 2010

Nyckelord: SKBdoc 1261311, Forsmark, Slutförvarsanläggningen, Vattenverksamhet, Grundvattenbortledning, MIKE SHE, MOUSE, Effekter, Konsekvenser.

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

Sammanfattning

I samband med uppförande, drift och avveckling av slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle i Forsmark planeras ett antal åtgärder som utgör vattenverksamhet enligt 11 kapitlet i miljöbalken. Denna rapport är en bilaga till miljökonsekvensbeskrivningen (MKB) och beskriver vattenverksamhet i form av bortledning av grundvatten från slutförvarsanläggningen. Rapporten biläggs även ansökan enligt kärntekniklagen. Rapportens huvudsyfte är att beskriva hydrogeologiska och hydrologiska effekter och de konsekvenser som kan uppstå i förvarets omgivningar till följd av grundvattenbortledningen. Vidare presenteras förebyggande åtgärder för att minska grundvattenbortledningens effekter och begränsande åtgärder som är inriktade på dess konsekvenser.

Slutförvarsanläggningens undermarksdel består av en nedfartsramp och ett antal schakt, samt ett centralområde (med flera berggrum) och ett förvarsområde på ungefär 470 meters djup. Anläggningen omfattar en total tunnellängd på ungefär 70 kilometer. Skedena uppförande, drift och avveckling omfattar en sammanlagd tidsperiod på 60–70 år. Under driftskedet kommer rampen, centralområdet och samtliga schakt att vara öppna. Deponeringsområdena i förvarsområdet kommer att byggas ut successivt. Detta innebär att alla deponeringstunnlarna inom ett visst deponeringsområde inte kommer att vara öppna samtidigt.

Modelleringsverktyget MIKE SHE har använts för att göra prognoser av grundvattenbortledningens effekter i omgivningarna, till exempel förändringar av grundvattennivåer och vattenföring i bäckar. Prognoser har gjorts för ett stort antal beräkningsfall, bland annat för att kunna beskriva inverkan av olika typer av osäkerheter. Vidare har jämförelser gjorts med resultat från ett annat modelleringsverktyg (DarcyTools), med analytiska beräkningar och med erfarenheter från andra undermarksanläggningar. Dessa jämförelser visar att resultaten från MIKE SHE-beräkningarna är rimliga.

Tätning med injektering är den viktigaste förebyggande åtgärden vad gäller grundvattenbortledningens effekter. Enligt modellberäkningarna kommer det totala inläckaget av grundvatten till slutförvarsanläggningen att bli i storleksordningen 10–50 liter per sekund, beroende på hur stor del av förvarsområdet som är öppet och vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen kring ramp, schakt och tunnlar. Inläckaget under uppförandeskedet kommer att bli i storleksordningen 10–20 liter per sekund. Inläckaget till rampen och schakten, som kommer att vara öppna under hela slutförvarsanläggningens driftskede, utgör 20–60 % av det totala inläckaget.

Enligt den kunskap som finns om de hydrogeologiska förhållandena i Forsmark innebär bortledning av grundvatten från berget att grundvattennivåerna sänks av inom så kallade ”bankningsplan” (strukturer som kan ha hög horisontell vattengenomsläpplighet) i de övre delarna av berget. MIKE SHE-beräkningarna visar att grundvattennivåsänkning kommer att ske i berget inom relativt stora områden kring förvaret. Själva grundvattenytan kommer främst att sänkas av i områden med brantstående sprickzoner med hög vattengenomsläpplighet som har kontakt med de ovanliggande jordlagren. Eftersom sådana zoner endast finns i vissa områden bedöms påverkansområdet för avsänkningen av grundvattenytan bli förhållandevis litet. Påverkansområdet kommer enligt beräkningarna att begränsas till smala stråk ovan förvaret och till områden kring kylvattenkanalen vid Forsmarks kärnkraftverk. Avsänkningen blir liten kring ramp och schakt i driftområdet.

Enligt beräkningarna kommer grundvattenbortledningen att leda till en obetydlig sänkning av vattennivån i sjöarna i området, med undantag för sjön Puttan där sänkningen kan bli större. Inflödet av bäckvatten till sjön Bolundsfjärden bedöms komma att minska med maximalt en tiondel av nuvarande inflöde. Effekterna på vattenföringen i övriga bäckar i området bedöms bli marginella.

Omfattande fältinventeringar, undersökningar och utredningar har genomförts för att kunna beskriva konsekvenserna av grundvattenbortledningen. Det som undersökts är bland annat ekologiska förhållanden (naturvärden och djur- och växtarter), lägen för enskilda brunnar och förhållanden som inverkar på risken för sättningar. Konsekvenserna beskrivs genom att resultaten från dessa inventeringar, undersökningar och utredningar kombineras med grundvattennivåer, ytvattennivåer och -flöden som beräknats med MIKE SHE.

Grundvattenbortledningens främsta negativa konsekvenser berör naturvärden i våtmarker (kalkgölar och rikkärr) och tillhörande arter. Våtmarksarter är generellt känsliga för förändringar av grundvattenytans nivå. Baserat på de omfattande ekologiska fältinventeringarna har ett antal våtmarker naturvärdesklassats som klass 1 (nationellt värde), det vill säga mycket höga naturvärden. Denna klassning baseras bland annat på förekomst av rödlistade och/eller skyddade arter. Bland dessa finns gölgrodan och orkidén gulyxne, som är skyddade genom artskyddsförordningen (SFS 2007:845).

Rapporten beskriver ett koncept för vattentillförsel till våtmarker för att bevara naturvärden och arter. Detta är ett sätt att undvika negativa konsekvenser av grundvattenbortledningen för gölgroda och gulyxne. Konceptet ingår även i en separat ansökan om dispens enligt artskyddsförordningen.

Vad gäller konsekvenser för skogsproduktion bedöms skogens bonitet (dess virkesproducerande förmåga) minska med maximalt 25 procent inom påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. I denna bedömning tas ingen hänsyn till att en avsänkning av grundvattenytan kan medföra positiva konsekvenser för skogens tillväxt i vissa områden, som kompenserar för bonitetsminskningen inom andra områden. Påverkansområdet är litet i förhållande till de totala skogsarealerna i Forsmark, och påverkansområdet omfattar huvudsakligen skogsområden som ägs av SKB. Aktivt jordbruk förekommer inte inom påverkansområdet.

Grundvattenbortledningen bedöms medföra obetydliga till små konsekvenser för enskild vattenförsörjning i Forsmarksområdet. En utredning av risken för sättningar av byggnader vid Forsmarks kärnkraftverk visar att grundvattenbortledningen endast kan ge upphov till obetydliga sättningar av reaktorbyggnaderna.

Summary

The construction, operation and decommissioning of the repository for spent nuclear fuel in Forsmark are associated with a number of measures that constitute water operations according to Chapter 11 in the Environmental Code. This report is an appendix to the Environmental Impact Assessment (EIA) and describes water operations in the form of groundwater diversion from the repository (the report is also included in the permit application according to the Nuclear Activities Act). The main objective of the report is to describe hydrogeological and hydrological effects and the consequences that may arise in the surroundings of the repository due to the groundwater diversion. Moreover, the report presents prevention measures to reduce the effects of the groundwater diversion and mitigation measures that aim at its consequences.

The underground part of the repository consists of an access ramp and a number of shafts, and a central area (with several rock caverns) and a repository area at a depth of approximately 470 metres. The facility comprises a total tunnel length of 70 kilometres. The construction, operation and decommissioning phases in total comprise a time period of 60–70 years. During the construction phase, the ramp, the central area and all shafts will be open. The deposition areas in the repository area will be constructed gradually. This implies that all deposition tunnels in a certain deposition area will not be open simultaneously.

The modelling tool MIKE SHE has been used to predict the effects of the groundwater diversion in the surroundings of the repository, such as changes of groundwater levels and stream discharges. Predictions have been made for a number of calculation cases, among other things to enable descriptions of the importance of various types of uncertainties. Moreover, comparisons have been made with results from another modelling tool (DarcyTools), with analytical calculations and with experiences from other underground facilities. These comparisons show that the results of the MIKE SHE calculations are reasonable.

Sealing by grouting is the most important prevention measure regarding the effects of the groundwater diversion. According to the model calculations, the total groundwater inflow to the repository will be on the order of 10–50 litres per second, depending on how large part of the repository area that is open and the permeability of the grouted zone around ramp, shafts and tunnels. The inflow during the construction phase will be on the order of 10–20 litres per second. The inflow to the ramp and the shafts, which will be open during the whole operation phase of the repository, represent 20–60% of the total inflow.

According to the knowledge on the hydrogeological conditions in Forsmark, groundwater diversion from the rock yields drawdown of groundwater levels in so called "sheet joints" (structures that may have high horizontal permeability) in the upper parts of the rock. The MIKE SHE calculations show that there will be groundwater-level drawdown in the rock in relatively large areas around the repository. Drawdown of the groundwater table will primarily occur in areas with steep fracture zones with high permeability in contact with the overlying Quaternary deposits. Such zones only exist in certain areas, and it is therefore assessed that the size of the influence area for the groundwater-table drawdown will be relatively small. According to calculations, the influence area will be limited to narrow bands above the repository and to areas around the cooling-water canal at the Forsmark nuclear power plant. There will be little drawdown around ramp and shafts in the industrial area for the repository.

According to calculations, the groundwater diversion will lead to insignificant drawdown of the water level in the lakes in the area, except for Lake Puttan in which the calculated drawdown may be larger. It is assessed that the stream inflow to Lake Bolundsfjärden will be reduced by maximum one tenth of the present inflow. The effects on the discharge in other streams in the area are judged to be marginal.

Comprehensive field inventories, investigations and analyses have been performed in order to enable descriptions of the consequences of the groundwater diversion. Investigated issues include ecological conditions (nature values and vegetation- and animal species), locations of private wells and conditions that influence the risks for subsidence. The consequences are described by combining the results from the inventories, investigations and analyses with groundwater levels, surface-water levels and -discharges calculated by MIKE SHE.

The primary negative consequences of the groundwater diversion are related to nature values in wetlands (lime ponds and rich fens) and associated species. Wetland species are generally sensitive to changes of the level of the groundwater table. Based on the comprehensive field inventories, a number of wetlands are classified as class 1 (national value), i.e. they possess very high nature values. Among other factors, this classification is based on the occurrence of red-listed and/or protected species. Such species include pool frog and fen orchid, which are protected by Swedish regulation (Species Protection Ordinance, SFS 2007:845).

The report describes a concept with preparedness for water supply to wetlands in order to preserve nature values and species. This is a method to avoid negative consequences of the groundwater diversion for pool frog and fen orchid. The concept is also included in a separate application for an exemption permit.

Regarding consequences for forestry, the forest yield (timber-production capacity) is judged to be reduced by a maximum of 25 percent within the influence area for the groundwater-table drawdown. This assessment does not take into account that a drawdown of the groundwater table may yield positive consequences for the forest growth in some areas, which compensate for the forest-yield reduction in other areas. The influence area is small relative to the total forest area of Forsmark, and the influence area mainly comprises forest areas owned by SKB. There is no ongoing agricultural activity within the influence area.

The groundwater diversion is judged to lead to insignificant to small consequences for private water supply in the Forsmark area. An investigation of the risk for subsidence of buildings at the Forsmarks nuclear power plant shows that the groundwater diversion only may lead to insignificant subsidence of the reactor buildings.

Innehåll

1	Bakgrund	9
1.1	Syfte och avgränsningar	9
1.2	Övergripande metodik	9
2	Slutförvarsanläggningen i Forsmark	11
2.1	Beskrivning av slutförvarsanläggningen	11
2.2	Slutförvarsanläggningens skeden	14
2.3	Uppförande och tätning av slutförvarsanläggningens undermarksdel	16
2.4	Vattenhantering	17
3	Bortledande av grundvatten vid undermarksbyggande	19
3.1	Definitioner av viktiga begrepp	19
3.2	Hydrogeologiska och hydrologiska effekter	20
3.2.1	Inläckage av grundvatten	20
3.2.2	Inläckagets effekter på grundvattennivåer i berg och jord	20
3.2.3	Uppträngning eller inträngning av saltvatten	22
3.2.4	Hydrologiska effekter	22
3.3	Markfysikaliska effekter och effekter på mark- och vattenkemiska förhållanden	22
3.3.1	Markfysikaliska effekter	22
3.3.2	Effekter på mark- och vattenkemiska förhållanden	23
3.4	Konsekvenser vid bortledande av grundvatten	23
4	Nuvarande förhållanden i Forsmarksområdet	25
4.1	Topografiska, meteorologiska och hydrologiska förhållanden	25
4.2	Hydrogeologiska förhållanden	27
4.2.1	Hydrogeologiska förhållanden i berget	27
4.2.2	Ytnära hydrogeologiska förhållanden	29
4.3	Fastigheter, byggnader och infrastruktur	33
4.4	Ekologiska förhållanden och områdesskydd	34
4.4.1	Allmänt	34
4.4.2	Sjöar och bäckar	35
4.4.3	Våtmarker	36
4.4.4	Skogar	37
4.4.5	Rödlistade och skyddade arter	37
4.4.6	Utpekade värdefulla och skyddade områden	39
4.5	Jord- och skogsbruk	40
4.6	Befintlig vattenhantering och vattenverksamhet	40
4.6.1	Befintlig vattenhantering	40
4.6.2	Befintliga vattenverksamheter	41
4.6.3	Markavvattningsföretag och källor	41
4.7	Förändringar av förhållandena i Forsmarksområdet fram till år 2100	42
4.7.1	Förändringar avseende övriga verksamheter	42
4.7.2	Forsmarksområdets naturliga utveckling	42
5	Grundvattenbortledningens hydrogeologiska och hydrologiska effekter	45
5.1	Underlag och genomförda bedömningar	45
5.2	Inläckage av grundvatten till slutförvarsanläggningen	46
5.2.1	Prognostiserat inläckage till slutförvarsanläggningen	46
5.2.2	Inläckage under olika utbyggnadssteg	47
5.2.3	Erfarenheter från andra undermarksanläggningar i berg	48
5.3	Grundvattenbortledningens effekter på grundvattennivåer i berg och jord	49
5.3.1	Sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg	49
5.3.2	Avsänkning av grundvattenytan	52
5.3.3	Erfarenheter från andra undermarksanläggningar i berg	63
5.4	Effekter på grundvattnets salthalt	64

5.5	Vattenmättnad och återhämtning efter förslutning av slutförvaret	65
5.6	Grundvattenbortledningens hydrologiska effekter	66
5.6.1	Effekter på sjöarnas vattennivå	66
5.6.2	Effekter på bäckarnas vattenföring	66
5.6.3	Effekter på områdets vattenbalans	67
5.7	Känslighetsanalyser	69
5.7.1	Inverkan av de hydrogeologiska egenskaperna i berg, i övergången mellan jord och berg samt under sjöar och hav	69
5.7.2	Inverkan av hårdgjorda ytor inom driftområdet	70
5.7.3	Inverkan av ett utbyggt SFR	71
5.7.4	Inverkan av meteorologiska förhållanden	77
5.7.5	Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden i Forsmarksområdet år 2100	78
5.8	Effekter på mark- och vattenkemiska förhållanden	80
6	Grundvattenbortledningens konsekvenser	83
6.1	Konsekvenser för naturvärden	83
6.1.1	Metodik för konsekvensbeskrivning avseende naturvärden	83
6.1.2	Ekologiska konsekvenser på landskapsnivå	84
6.1.3	Konsekvenser för sjöar och bäckar	85
6.1.4	Konsekvenser för våtmarksobjekt	85
6.1.5	Konsekvenser för skogsobjekt	91
6.1.6	Konsekvenser för rödlistade och skyddade arter	94
6.1.7	Konsekvenser för utpekade värdefulla och skyddade områden	95
6.2	Konsekvenser för produktionsmark	97
6.2.1	Konsekvenser för skogsbruket i Forsmark	97
6.2.2	Konsekvenser för jordbruket i Forsmark	99
6.3	Konsekvenser för befintlig vattenhantering och vattenverksamhet	99
6.3.1	Konsekvenser för befintlig vattenhantering	99
6.3.2	Konsekvenser för befintlig vattenverksamhet, markavvattningsföretag och källor	101
6.4	Konsekvenser för byggnader och infrastruktur	101
6.4.1	FKA:s byggnader	101
6.4.2	Övriga byggnader och infrastruktur	104
7	Förebyggande, begränsande och kompensatoriska åtgärder	105
7.1	Förebyggande åtgärder	105
7.2	Begränsande åtgärder – vattentillförsel till kalkgölar och rikkärr	105
7.2.1	Vattenbehov och vattenkvalitet	105
7.2.2	Vattentillgång och vattenkvalitet	107
7.2.3	Överföring och tillförsel till kalkgölar och rikkärr	108
7.2.4	Genomförbarhet, konsekvenser efter åtgärder och uppföljning	110
7.3	Naturvårdsinriktad skötsel	110
7.4	Kompensatoriska åtgärder	110
7.4.1	Naturvärden	110
7.4.2	Enskilda brunnar	110
8	Sammanfattande konsekvensbeskrivning	111
	Referenser	113
Bilaga 1	Förteckning över våtmarksobjekt	117
Bilaga 2	Förteckning över skogsobjekt	119
Bilaga 3	Förteckning över enskilda brunnar	121
Bilaga 4	Beskrivning av MIKE SHE	123
Bilaga 5	Beskrivning av DarcyTools	127
Bilaga 6	Konceptuell och numerisk modellering av grundvattenbortledningens effekter i Forsmark – diskussion kring osäkerheter och tilltro	131
Bilaga 7	MIKE SHE-beräknade tvärprofiler över grundvattenytans nivå	139
Bilaga 8	Ordlista	141

1 Bakgrund

1.1 Syfte och avgränsningar

Denna rapport behandlar vattenverksamhet enligt 11 kapitlet i miljöbalken, i form av bortledning av grundvatten i samband med uppförande, drift och avveckling av slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle i Forsmark i Östhammars kommun. Rapporten är således avgränsad till frågan om planerad vattenverksamhet och tar därför inte upp frågor som till exempel joniserande strålning eller långsiktig säkerhet. Rapporten utgör en bilaga till den miljökonsekvensbeskrivning (MKB) som åtföljer tillståndsansökan enligt miljöbalken och kärntekniklagen.

Rapportens övergripande syfte är att beskriva hur grundvattenbortledningen ska genomföras, dess hydrogeologiska och hydrologiska effekter, samt de konsekvenser som kan uppstå. Med effekt avses i denna rapport grundvattenbortledningens följder för hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden. Begreppet inbegriper sekundära effekter på fysikaliska (mekaniska), kemiska och biologiska förhållanden i mark och vatten. Med konsekvens menas något som förändras till följd av grundvattenbortledningens effekter, till exempel ekologiska förhållanden i våtmarker och skogar. Rapporten beskriver vidare åtgärder för att förebygga grundvattenbortledningens effekter, samt ger förslag på begränsande åtgärder som är inriktade på dess konsekvenser. En plan för kontroller och åtgärder kommer att tas fram i samråd med tillsynsmyndigheten innan vattenverksamheten kommer till stånd.

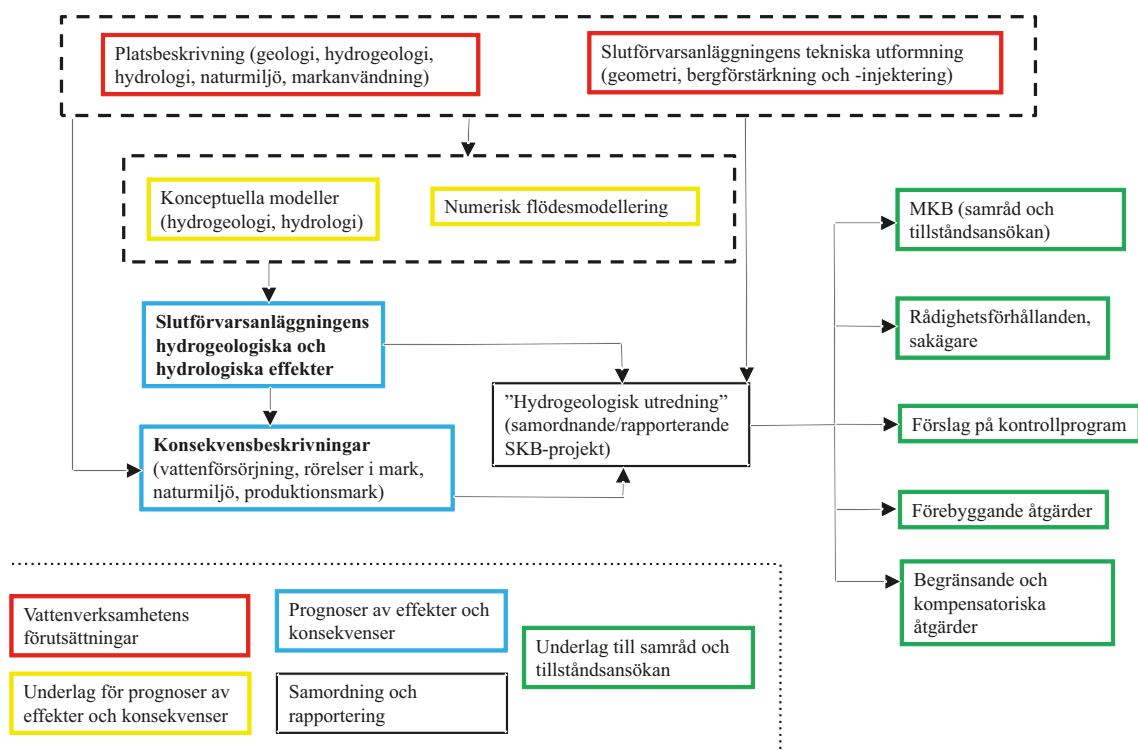
Förutom bortledning av grundvatten planerar SKB ett antal vattenverksamheter ovan mark i Forsmark. Dessa vattenverksamheter och deras effekter och konsekvenser behandlas i en annan rapport /Werner et al. 2010/.

I rapporten används koordinatsystemet RT 90 2,5 gon V/0:15 i plan och RHB 70 i höjd.

1.2 Övergripande metodik

Figur 1-1 illustrerar SKB:s metodik och aktiviteter som berör bortledning av grundvatten från slutförvarsanläggningen.

- De röda rutorna är underlag som beskriver förutsättningarna för vattenverksamheten i form av platsens egenskaper och slutförvarsanläggningens tekniska utformning. Specifikt innehåller platsbeskrivningen information om bland annat geologi, hydrogeologi, hydrologi, naturmiljö och markanvändning. Sådan information i kombination med information om slutförvarsanläggningens geometri samt planerad bergförstärkning och injektering behövs för att kunna beskriva effekter och konsekvenser.
- De gula rutorna är aktiviteter som beskriver grundvattenbortledningens effekter och konsekvenser. Specifikt behövs en platsspecifik konceptuell modell som beskriver troliga förändringar av bland annat grundvattennivåer och vattennivåer i sjöar då grundvatten leds bort från berget. En annan aktivitet är numerisk flödesmodellering, som utförs som stöd och för att illustrera effekterna.
- De blåa rutorna representerar prognoser av effekter och konsekvenser, som samordnas och rapportas inom ramen för SKB-projektet Hydrogeologisk utredning (den svarta rutan). Rapporteringen levereras i en form som är anpassad för samråd och tillståndsansökan (de gröna rutorna).



Figur 1-1. Övergripande illustration av SKB:s metodik och aktiviteter avseende vattenverksamhet i form av bortledning av grundvatten från slutförvarsanläggningen. Betydelsen av färgerna på rutorna anges längst ned till vänster i bilden.

2 Slutförvarsanläggningen i Forsmark

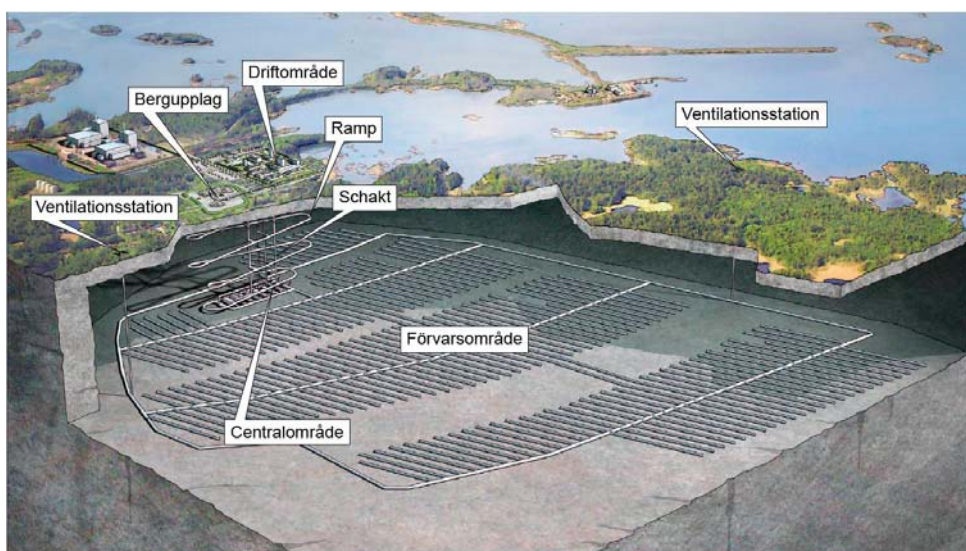
2.1 Beskrivning av slutförvarsanläggningen

Detta avsnitt ger en kortfattad beskrivning av slutförvarsanläggningen i Forsmark, med fokus på de anläggningsdelar och åtgärder som berör bortledning av grundvatten. Figur 2-1 visar en översiktbild av den planerade slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle i Forsmark. Med begreppet ”slutförvarsanläggning” menas en anläggning för deponering av kapslar med använt kärnbränsle i berget, medan ”slutförvar” avser den avvecklade och förslutna slutförvarsanläggningen /SKB 2010/. I denna rapport förekommer även förkortningen ”förvaret”, eftersom det är uppenbart vad som avses. Vidare används begreppet ”förvarsnivå” som avser den nivå i berget (470 meter under havet) där förvarsområdet är beläget. Totalt kommer förvaret således att täcka ett djupintervall för dränage på ungefär 500 meter, från markytan ned till förvarsnivå.

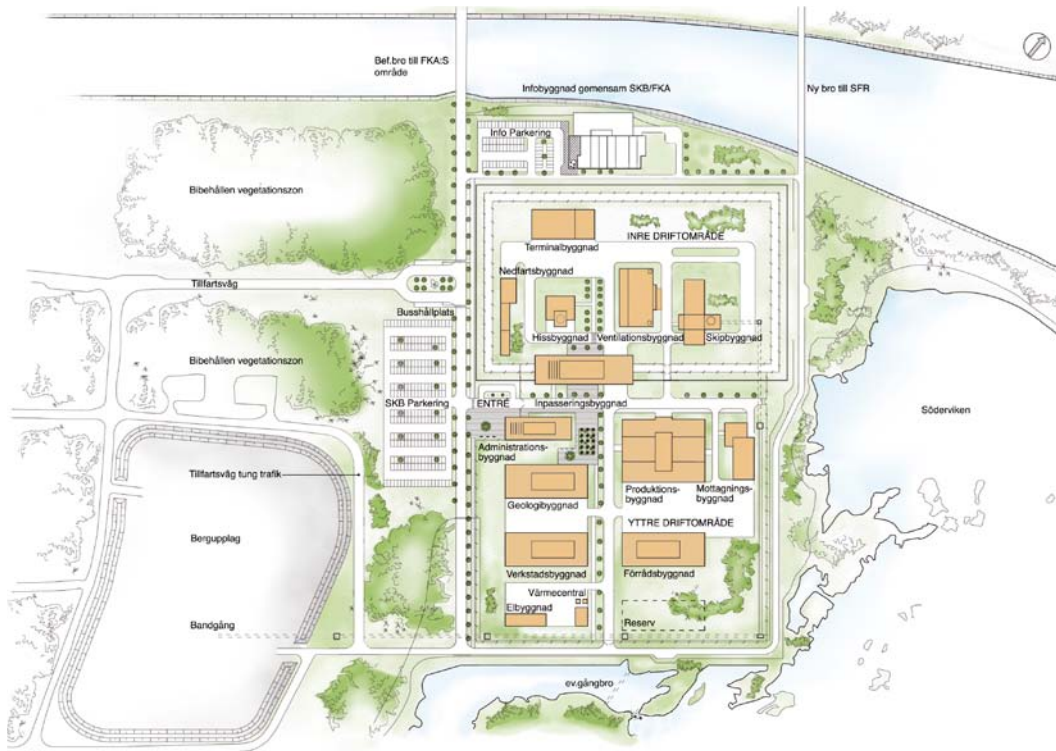
Slutförvarsanläggningen består av en ovanmarksdel och en undermarksdel. Ovanmarksdelen (figur 2-2) består av ett inre driftområde för den kärntekniska delen av verksamheten och ett yttre driftområde för övrig verksamhet. Ovanmarksdelen omfattar även ett bergupplag och två ventilationsstationer (figur 2-1). Från driftområdet kommer tillträde till slutförvarsanläggningens undermarksdel att ske via schakt och en ramp.

Slutförvarsanläggningens undermarksdel (figurerna 2-3 till 2-5) består av en fem km lång spiralformad ramp, ett centralområde, ett förvarsområde samt schakt och olika typer av tunnlar. Förvarsutformningen i figur 2-3 inkluderar en reserv på 13 % för potentiellt bortfall av kapselpositioner /SKB 2010/.

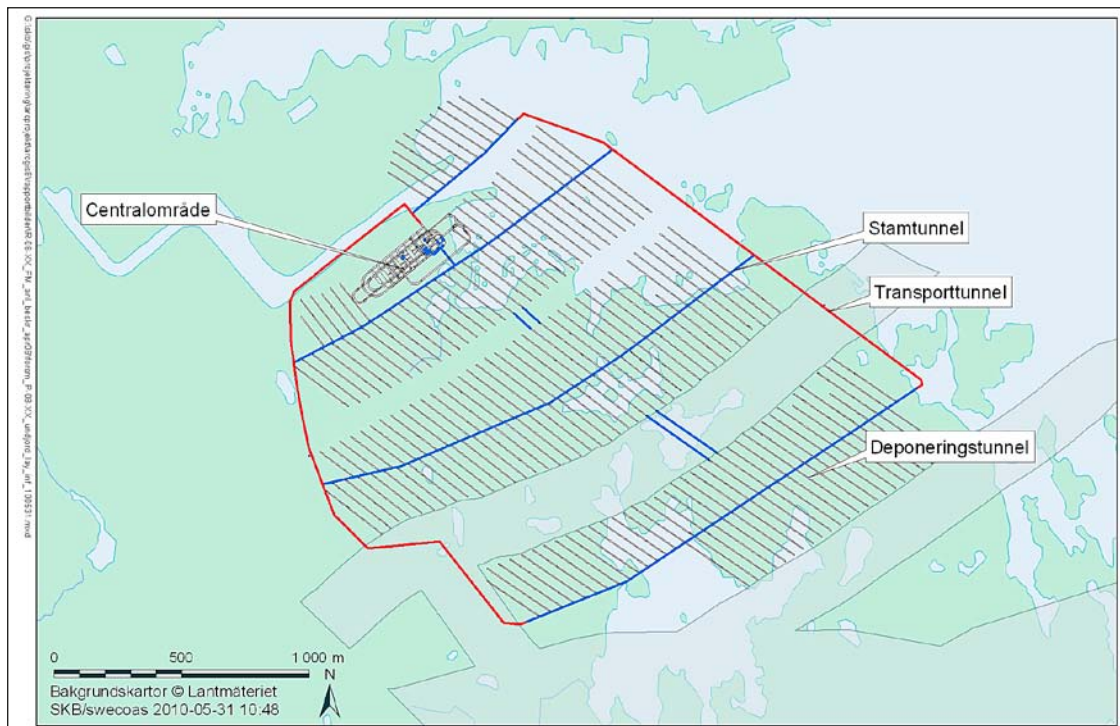
De totalt sex schakten har vardera en längd på cirka 500 m och en sammanlagd teoretisk volym på cirka 35 000 m³ (preliminära måttuppgifter). Schakten omfattar ett skipschakt (nr 10 i figur 2-5) för transport av bland annat utsprängda bergmassor, ett till- och ett frånluftschakt (nr 11), ett hisschakt (nr 12) samt två yttre ventilationsschakt (se figur 2-1). Inom centralområdet finns det åtta berggrum (nr 1–8 i figur 2-5) med en total teoretisk volym på cirka 60 000 m³. Berggrummen omfattar berglaststation (nr 1 i figur 2-5), berghall (nr 2), skiphall (nr 3), elhall (nr 4), fordonshall (nr 5), hisshall (nr 6), förråds- och verkstadshall (nr 7) och omlastningshall (nr 8). I centralområdet finns det även olika typer av tunnlar, såsom transport-, gång- och servicetunnlar.



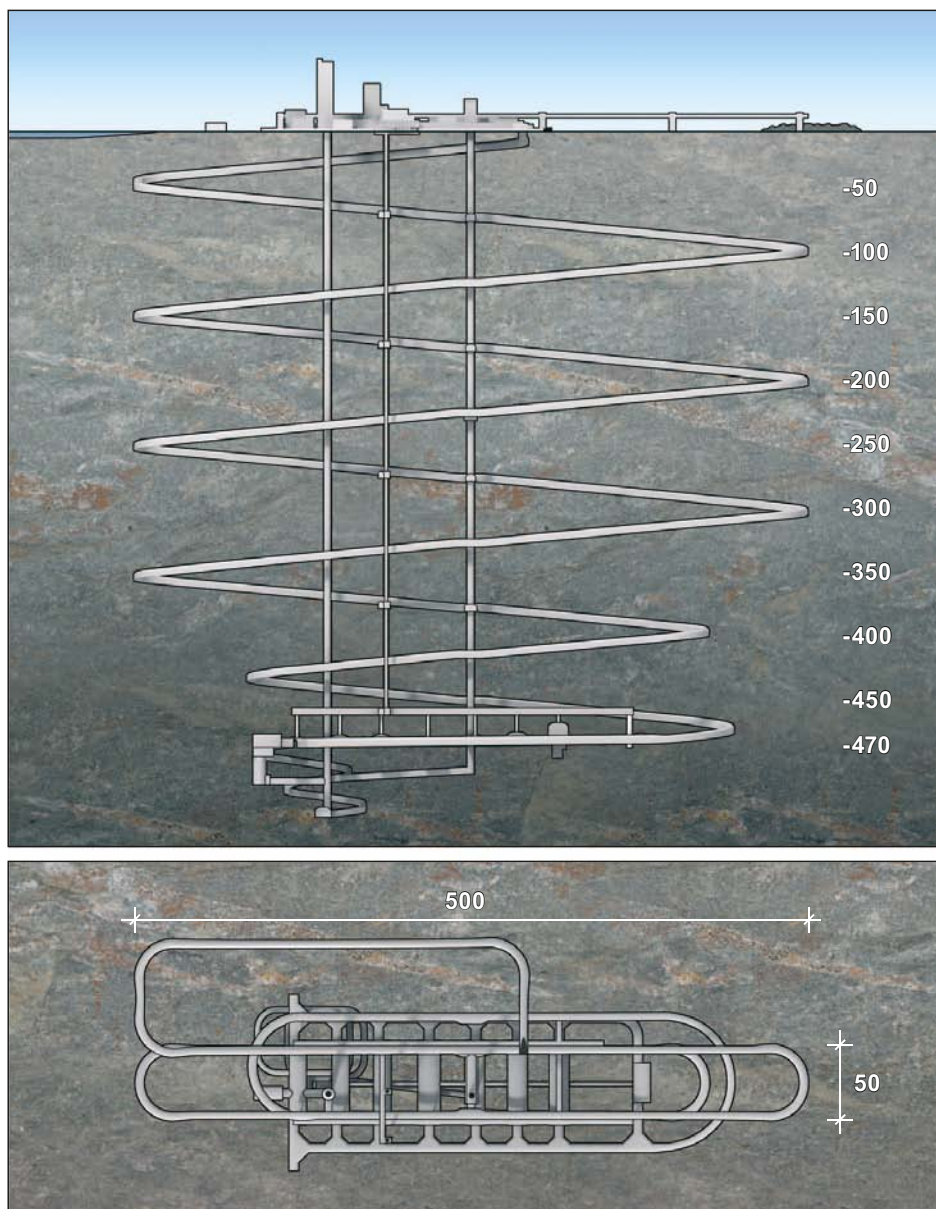
Figur 2-1. Översikt av slutförvarsanläggningen i Forsmark /SKB 2010/.



Figur 2-2. Översiktsskarta av slutförvarsanläggningens ovanmarksdel, med inre och yttre driftområde, bergupplag samt informationsbyggnad /SKB 2010/.



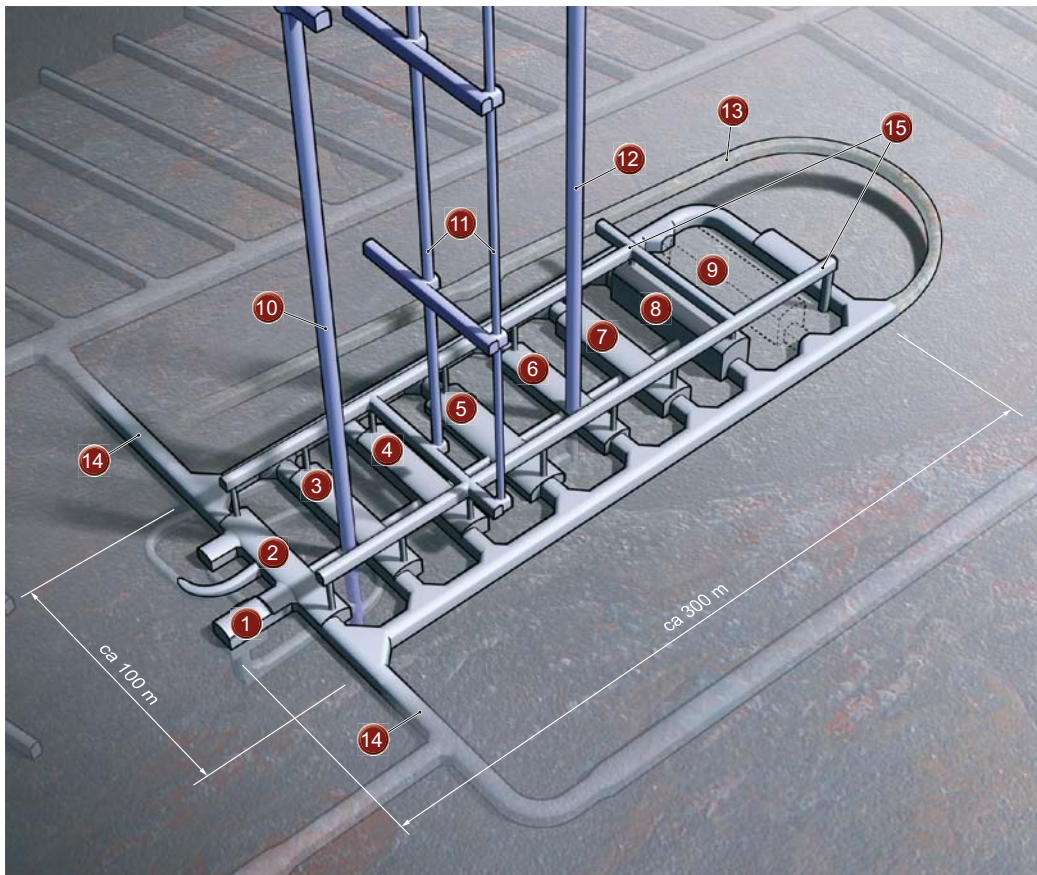
Figur 2-3. Översiktsskarta över slutförvarsanläggningens undermarksdel /SKB 2010/. De skuggade områdena representerar så kallade skyddsnivå till deformationszoner (deformerade strukturer i berget).



Figur 2-4. Översiktsbild över tillfarterna (ramp och schakt) samt centralområdet /SKB 2010/.

Förvarsområdet omfattar totalt en yta på 3–4 km². Inom förvarsområdet (figur 2-3) finns det fem stamtunnlar (en stamtunnel per deponeringsområde) med en total längd på 5,7 km. Transporttunnlar med en total längd på cirka fem km förbinder centralområdet med deponeringsområdena och de förbinder även deponeringsområdena med varandra. Från deponeringstunnlarna, med en total längd på cirka 50 km, borrar totalt ungefär 6 000 deponeringshål för deponering av kapslar.

Sammanfattningsvis omfattar slutförvarsanläggningen en total tunnellängd på ungefär 70 km, innefattande rampen och tunnlar inom central- och förvarsområdena. Den totala uttagna volymen fast berg (inklusive överberg) omfattar 2 300 000 m³.



Figur 2-5. Översiktsbild över slutförvarsanläggningens centralområde, rampen samt de fyra schakten som förbinder centralområdet med driftområdet på markytan /SKB 2010/.

2.2 Slutförvarsanläggningens skeden

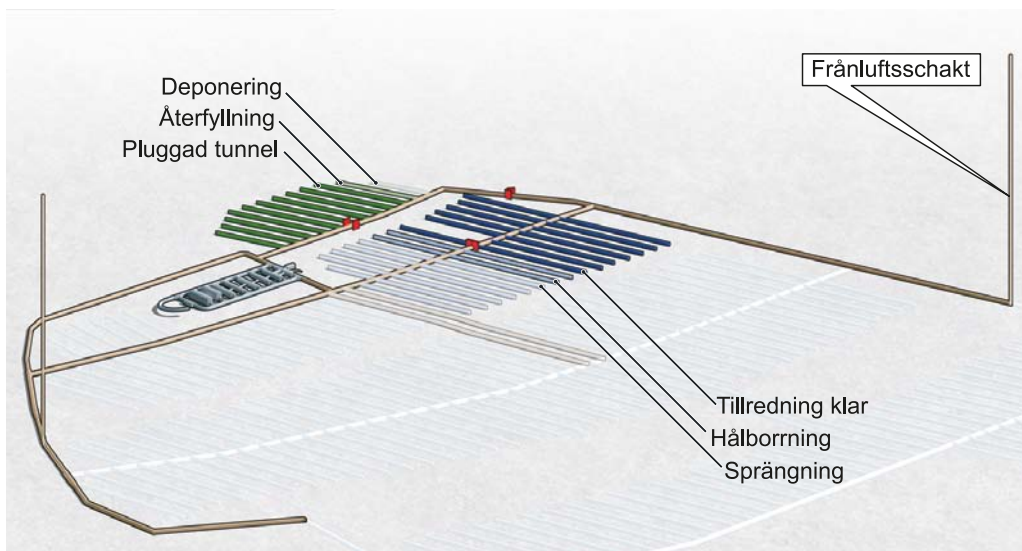
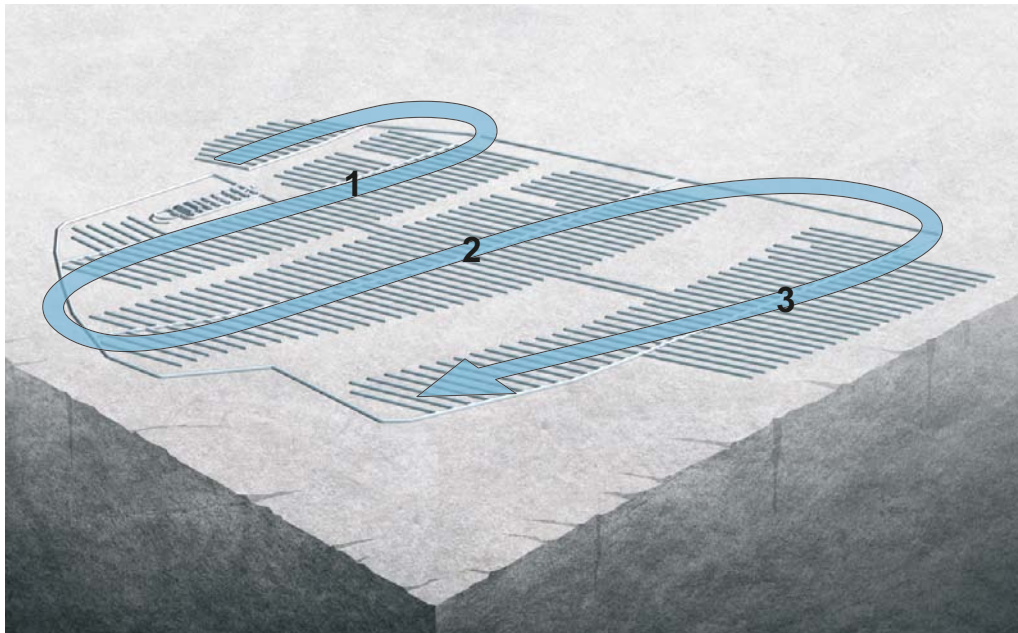
Slutförvarsanläggningens övergripande skeden uppförande, drift och avveckling omfattar en sammanlagd tidsperiod på 60–70 år. De tre skedena kan beskrivas enligt följande:

- **Uppförandeskede:** Detta skede omfattar en period på ungefär sju år. Under de första tre och ett halvt åren uppförs en del av förvarets anläggningsdelar ovan mark, till exempel vägar, område för bergupplag, skipbyggnad och geologbyggnad. Vidare uppförs nedfartsrampen samt schakt för skip, hiss och ventilation. Under de nästföljande tre och ett halvt åren uppförs resterande byggnader inom driftområdet ovan mark samt bergtrum och övriga utrymmen inom centralområdet under mark. Vidare uppförs deponeringstunnlar med deponeringshål för provdrift av anläggningen (se nedan).
- **Driftskede:** Detta skede omfattar en period på 45–50 år. Skedet indelas i
 - några års provdrift, samt
 - rutinemässig drift under resterande tid.

Under driftskedet sker uppförande av deponeringstunnlar, deponering av kapslar och återfyllnad av deponeringstunnlar successivt och parallellt inom olika delar av förvarsområdet.

- **Avvecklingskede:** Efter avslutad deponering påbörjas avveckling av slutförvarsanläggningen. Avvecklingskedet innebär bland annat att slutförvaret försluts. Detta sker genom en återfyllnad med svällande lera av typ bentonit, bergkross eller en kombination av dessa. Avvecklingskedet omfattar en tidsperiod på 10–15 år.

Under hela driftskedet kommer rampen, centralområdet, schakten samt stam- och transporttunnlar (i den takt de byggs ut) att vara öppna. Själva förvarsområdet består av ett antal deponeringsområden som kommer att byggas ut successivt (övre bilden i figur 2-6). Inom varje deponeringsområde kommer förundersökningar, borrhning/sprängning och injektering samt deponering i och återfyllnad



Figur 2-6. Övre bilden: Illustration av principen för successiv utbyggnad av deponeringsområden inom slutförvarsanläggningens försvarsområde (modifierad från /SKB 2010/). Undre bilden: Illustration av principen för parallell utsprängning, deponering och återfyllning av deponeringstunnlar längs en stamtunnel /SKB 2010/.

av deponeringstunnlar att ske successivt och parallellt inom olika delar av deponeringsområdet (undre bilden i figur 2-6). Detta innebär att alla deponeringstunnlar inom ett visst deponeringsområde inte kommer att vara öppna samtidigt. Översiktligt innebär den planerade utbyggnadsstrategin att vid en och samma tidpunkt kommer utsprängning eller deponering att pågå i upp till maximalt hälften av det totala antalet deponeringstunnlar inom ett visst deponeringsområde. Beskrivningen av grundvattenbortledningens effekter och konsekvenser (kapitel 5 och 6) utgår dock från ett förenklande, konservativt antagande om att hela förvaret är öppet samtidigt.

2.3 Uppförande och tätning av slutförvarsanläggningens undermarksdel

Med undantag för schakt och deponeringshål kommer förvarets undermarksdel att skapas genom borrhning och sprängning (schakt och deponeringshål kommer att borras). Injektering (tätning) av tunnlar och andra utrymmen under mark är en förebyggande åtgärd som syftar till att minska inläckaget av grundvatten. Principen för bergtätning genom injektering innebär att man via borrhål pressar in ett injekteringsmedel (vanligen används cementbruk) som sprids och härdar i sprickor och andra hålrum i berget och skapar en injekterad zon (eller injekterings-skärm).

Berginjektering utförs normalt genom så kallad förinjektering (kontinuerlig eller selektiv) där injektering görs inför sprängning och utlastning av lössprängt berg. Kontinuerlig förinjektering sker normalt i borrhål i en ”solfjäder” ut i det omgivande berget (se figur 2-7). Den injekterade zonen tjocklek och vattengenomsläpplighet (dess hydrauliska konduktivitet, här betecknad K_{inj}) beror på ett antal faktorer som kan variera lokalt. I kapitel 5 beaktas olika fall avseende K_{inj} , vilket innebär att dess betydelse kvantifieras i form av osäkerhetsintervall för exempelvis inläckaget av grundvatten och grundvattenytans avsänkning. Som beskrivs närmare nedan kommer det inte att bli nödvändigt att tätta överallt. Detta beaktas i de beräkningar som beskrivs i kapitel 5, genom att en injekterad zon endast ansätts där K_{inj} är lägre än vattengenomsläppligheten i omgivande berg.

Vid slutförvarsanläggningen i Forsmark kommer i huvudsak cementbaserade injekteringsmedel att användas /Brantberger och Jansson 2009, SKB 2009/. Vad gäller maximalt tillåtet inläckage av grundvatten har SKB definierat krav som är kopplade till bland annat stabilitet i återfyllnadsmaterial och buffert /SKB 2007/. För att uppnå dessa krav kommer icke cementbaserade injekteringsmedel av typ silica sol att finnas tillgängliga för kompletterande injektering av främst fina sprickor (sprickor med små öppningar), antingen genom kompletterande förinjektering eller genom efterinjektering av punktläckage. Denna typ av injekteringsmedel kommer huvudsakligen att användas vid injektering av deponeringstunnlar, eventuellt i kombination med cement.

Inför uppförandet kommer så kallad ridåinjektering att göras ned till ett djup på 50–100 m kring påslaget för rampen och kring schakten. Under uppförandet kommer injektering huvudsakligen att behöva göras ned till cirka 200 m djup på grund av bergets höga sprickfrekvens. På större djup är sprickfrekvensen betydligt lägre och injekteringsbehovet mindre. Skipschaktet görs som ett så kallat sänkschakt och kommer att injekteras i takt med schaktdrivningen. Kompletterande ridåinjektering kommer att göras kring de övriga schakten, som skapas genom så kallad stigortsborrning.



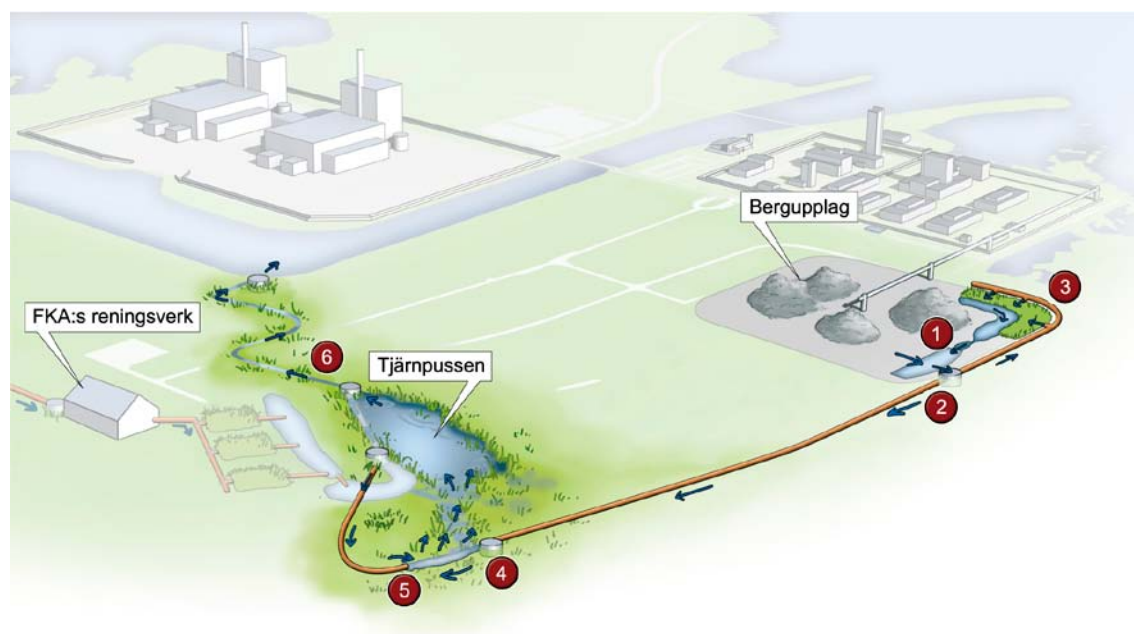
Figur 2-7. Illustration av del av en injekterad zon (injekterings-skärm) kring en tunnel /Emmelin et al. 2007/.

Under 200 m djup kommer injektering av tunnlar och andra undermarksutrymmen huvudsakligen att göras genom selektiv förinjektering. Enligt det framtagna injekteringskonceptet kommer injekteringsbehovet att bedömas via tester i sonderingshål. Bergrummen inom centralområdet injekteras huvudsakligen genom selektiv förinjektering och med systematisk förinjektering vid deformationszoner. Deponeringstunnlarna kommer att injekteras genom systematisk förinjektering vid passage av deformationszoner och med selektiv förinjektering mellan sådana zoner.

Som nämnts ovan kommer den injekterade zonens vattengenomsläpplighet att variera lokalt. Som en tumregel brukar man kunna förutsätta att en väl genomförd injektering kring en tunnel eller ett bergrum ger en reduktion av vattengenomsläppligheten i det närmast omgivande berget med en faktor 100. I slutförvarsanläggningen bedöms $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s kunna uppnås vid passage av deformationszoner genom att enbart använda cementbruk som injekteringsmedel, och $K_{inj} = 10^{-9}$ m/s kan vara möjligt att uppnå om även injekteringsmedel av typ silica sol används /Brantberger och Jansson 2009, SKB 2009/.

2.4 Vattenhantering

Allt vatten som samlas upp på förvarsnivå (inläckande grundvatten och bruksvatten) leds via pumpgröpar till två dränagebassänger i ett av bergrummen i centralområdet. Vattnet pumpas därefter upp till marknivå via ledningar och pumpgröpar vid hisschaktets mellanplan i nivåintervall om 100 m. Vatten från rampen pumpas upp till marknivå via samma pumpgröpar. Länshållningsvattnet samlas i en utjämningsbassäng under ventilationsbyggnaden (se figur 2-2) och leds till recipient. Dagvatten från driftområdet kan tas om hand genom lokal infiltration /Ridderstolpe och Stråe 2010/. Lakvattnet från bergupplaget kommer efter sedimentation och översilning (nr 1–3 i figur 2-8) att tillföras sjön Tjämpussen (nr 4 och 6). Spillvatten kommer att renas i Forsmarks Kraftgrupp AB:s (FKA:s) reningsverk, med möjlighet att leda en delström utgående renat spillvatten till sjön (nr 5).



Figur 2-8. Översiktbild som visar den planerade dag- och lakvattenhanteringen ovan mark.

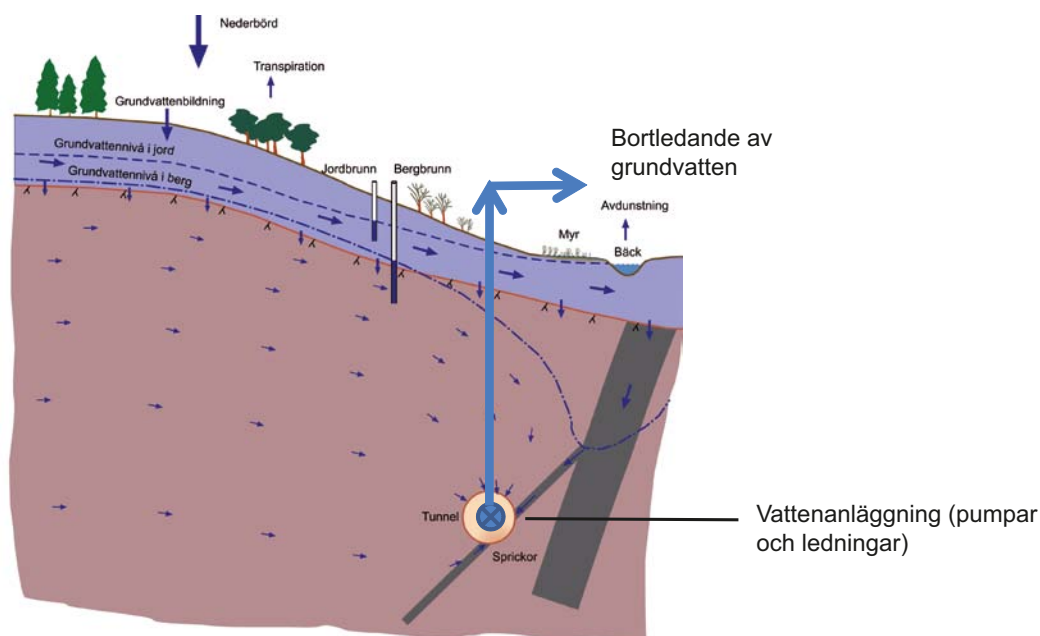
3 Bortledande av grundvatten vid undermarksbyggande

3.1 Definitioner av viktiga begrepp

Figur 3-1 visar några centrala begrepp i samband med bortledande av grundvatten från anläggningar under mark. I figuren pumpar man bort det grundvatten som läcker in till en bergtunnel. Som en effekt av grundvattenbortledningen (länshållningen av bergtunneln) uppstår en hydraulisk gradient mot och ett inläckage av grundvatten till tunneln.

Begreppen effekt och konsekvens definieras i avsnitt 1.1. Åtgärder kan indelas i förebyggande, begränsande och kompensatoriska åtgärder. Den förstnämnda typen av åtgärder syftar till att förebygga vattenverksamhetens effekter, till exempel genom att anpassa läget och utformningen på undermarksanläggningen och/eller att genom injektering minska inläckaget av grundvatten. Begränsande och kompensatoriska åtgärder inriktas på att begränsa eller kompensera grundvattenbortledningens konsekvenser. Exempel på sådana åtgärder är konstgjord infiltration för att upprätthålla grundvattennivån och därmed begränsa konsekvenser för grundvattenbaserad vattenförsörjning, eller att kompensera en enskild brunn med annan form av vattenförsörjning.

Vidare används begreppet påverkansområde frekvent i rapporten. Påverkansområdet avser det område inom vilket grundvattnets tryckhöjder på en viss nivå sänks, eller där grundvattenytan avsänks till följd av grundvattenbortledningen (dessa begrepp förklaras i avsnitt 3.2.2). Påverkansområdets storlek för en viss sänkings- eller avsänkingsgräns avser storleken på det område där sänkningen/avsänkningen överstiger den gränsen. Definitionen av påverkansområdet är helt godtycklig, exempelvis vad gäller avsänkningen vid påverkansområdets gräns. I denna rapport anges därför dels vilken tidperiod som avses (till exempel års- eller månadsmedelvärden), dels storleken på avsänkningen vid påverkansområdets gräns.



Figur 3-1. Översikt över några grundläggande begrepp vid bortledande av grundvatten från undermarksanläggningar. Modifierad från /Axelsson och Follin 2000/.

3.2 Hydrogeologiska och hydrologiska effekter

Figur 3-2 ger en översikt över möjliga hydrogeologiska och hydrologiska effekter vid bortledande av grundvatten från undermarksanläggningar.

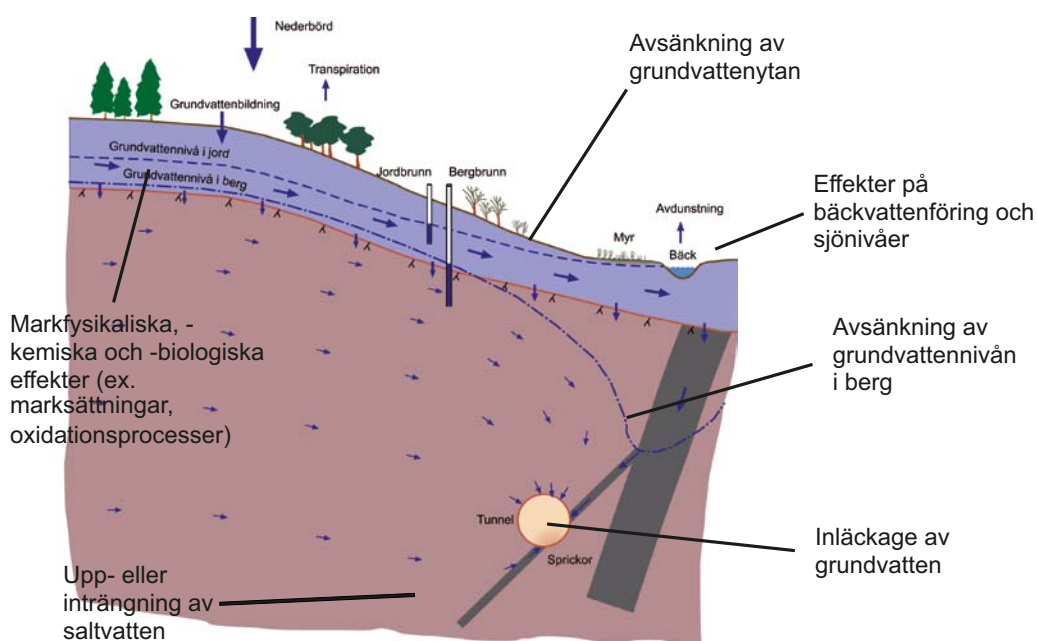
3.2.1 Inläckage av grundvatten

Inläckage av grundvatten till en anläggning förlagd under grundvattenytan i berg sker främst där anläggningen är i kontakt med grundvattenförande sprickor och sprickzoner i berget. Inläckagets storlek styrs framför allt av bergets vattengenomsläpplighet /Axelsson och Follin 2000/. Som nämnts tidigare brukar grundvattenförande sprickor och sprickzoner som är i kontakt med anläggningen injekteras för att minska inläckaget. Det är dock inte praktiskt möjligt att konstruera en större undermarksanläggning som är helt tät, varför ett visst inläckage av grundvatten kommer att ske även om injektering utförs.

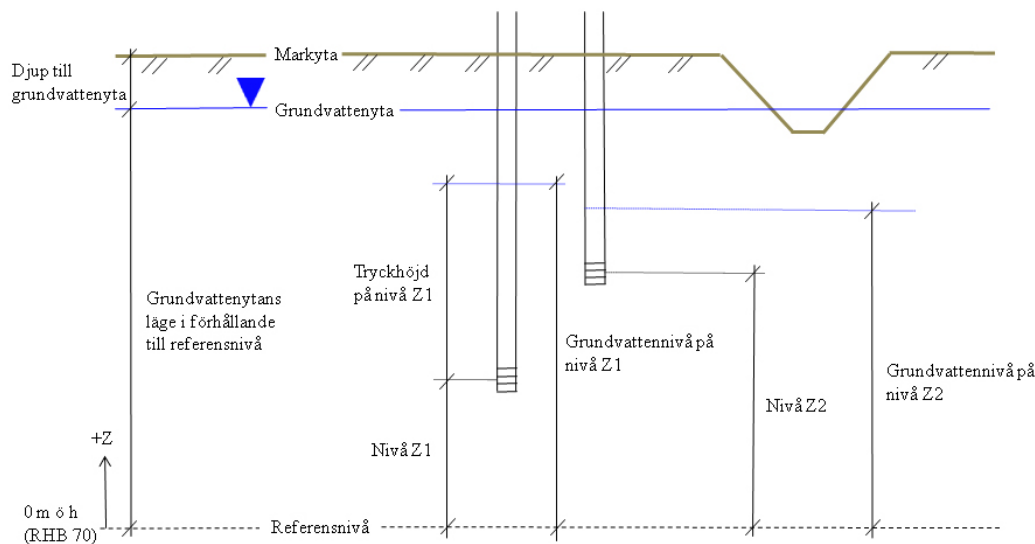
3.2.2 Inläckagets effekter på grundvattennivåer i berg och jord

Det är viktigt att skilja på begreppen grundvattennivå och grundvattenyta (figur 3-3). Om ett rör som är öppet i båda ändarna drivs ner i marken är grundvattennivån vid den nedre rörspetsen lika med nivån för vattenytan i röret. Denna nivå representerar dels rörspetsens höjd över ett referensplan (nivån Z1 i figur 3-3), dels grundvattnets tryckhöjd vid spetsen. En grundvattennivå (eller tryckhöjd) avser därför alltid den punkt där mätningen görs. I figur 3-3 är grundvattennivån på nivån Z1 i det vänstra röret högre än grundvattennivån på nivån Z2 i det högra (röret har sina nedre rörspetsar på olika nivåer).

Grundvattenytan kan definieras som gränsen mellan den mättade och den omättade zonen. Grundvattenytan har direktkontakt med och samma tryck som atmosfären och framträder endast som en distinkt yta i en brunn, en grop, i ett öppet perforerat rör eller i ett schakt som går ner i gränsen mellan den mättade och den omättade zonen. Förändring (avsänkning) av grundvattenytan är av speciellt intresse i detta sammanhang, eftersom sådana förändringar har inverkan på det yttnära vattensystem som till exempel växter och djur är beroende av. Förändring (sänkning) av grundvattnets tryckhöjder i berget är dock viktigt för en bergborrad brunn eftersom en sänkning av tryckhöjden kan försämra brunnens kapacitet.



Figur 3-2. Översikt över möjliga hydrogeologiska och hydrologiska effekter vid bortledande av grundvatten från undermarksanläggningar. Modifierad från /Axelsson och Follin 2000/.



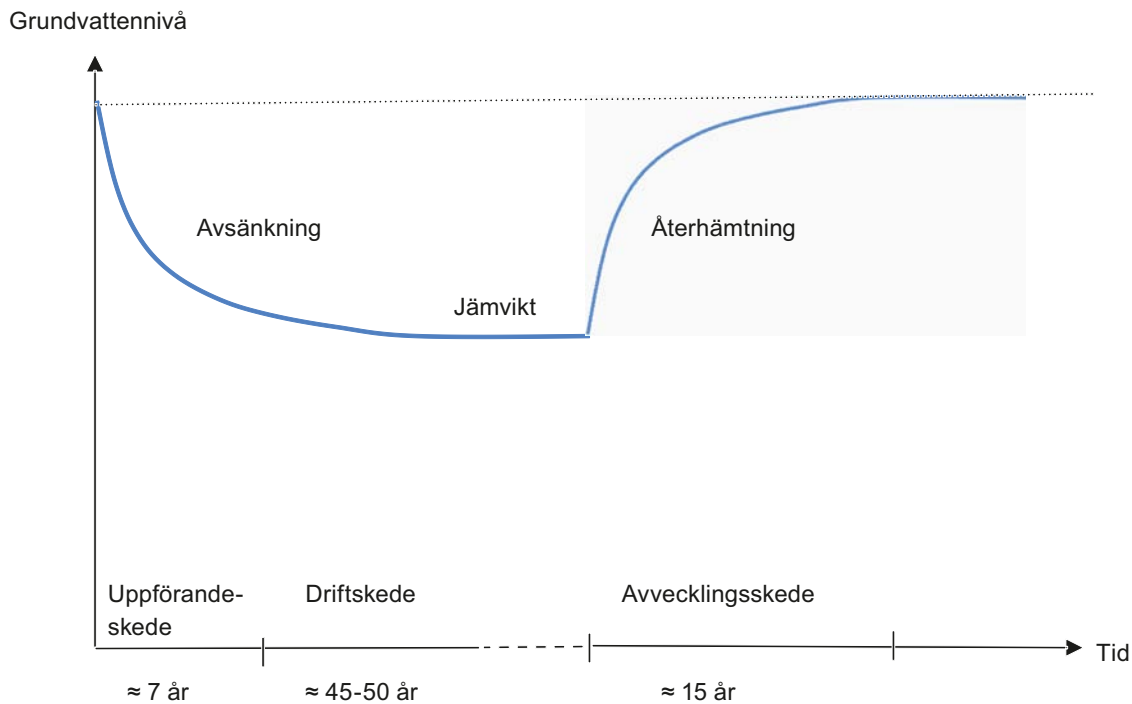
Figur 3-3. Illustration av begreppen grundvattennivå, tryckhöjd och grundvattenyta. Grundvattennivåer (eller tryckhöjder) finns överallt under grundvattenytan. Grundvattenytan är en distinkt yta.

Länshållningen av och inläckaget till en undermarksanläggning medför en sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berget kring anläggningen, se till exempel /Knutsson och Morfeldt 1993/. Trycksänkningen blir störst närmast anläggningen och avtar sedan med avståndet från denna. Trycksänkning på längre avstånd sker främst längs med sprickzoner som är i kontakt med anläggningen. Om sådana sprickzoner i sin tur är i kontakt med större sjöar, bäckar eller med havet begränsas påverkansområdets storlek, eftersom dessa kan fungera som infiltrationsmagasin. En förutsättning för att grundvattenytan ska avsänkas är att grundvattnets tryckhöjd sänks någonstans under grundvattenytan, och att det finns en hydraulisk kontakt mellan den punkt där trycksänkningen sker och grundvattenytan. En djupt belägen undermarksanläggning i berg kan endast orsaka en märkbar sänkning av grundvattnets tryckhöjder i bergets övre delar om det finns sammanhängande, grundvattenförande sprickor eller sprickzoner upp mot de övre delarna av berget /Axelsson och Follin 2000/.

I fallet med en grundvattenyta i jordlagren beror storleken på grundvattenytans avsänkning på sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berget, jordlagrens vattengenomsläpplighet, vattenhållande egenskaper och storleken på grundvattenbildningen till jordlagren. Jordlager med låg vattengenomsläpplighet, exempelvis lerig eller siltig morän, medger endast ett litet grundvattenflöde från jord till berg. Samma sak gäller om det finns sammanhängande skikt med tätare lager i en jord som i övrigt är vattengenomsläpplig. Grundvattenflödet från jord till berg, och därmed avsänkningen av grundvattenytan, blir större om jordlagren består av grova jordarter som sand, grus eller sandig-grusig morän.

Storleken och formen på avsänkningens påverkansområde beror således på ett antal faktorer, såsom geometri och egenskaper för sprickzoner i berget, den hydrauliska kontakten mellan grund- och ytvatten och mellan jord och berg, jordlagrens vattengenomsläpplighet och mäktighet samt i viss mån topografin, som återspeglar de hydrogeologiska förhållandena. Påverkansområdet kan därför ha en mycket oregelbunden form och det krävs detaljerad kunskap om till exempel sprickzoners egenskaper för att med någon precision kunna förutse storleken och formen på påverkansområdet innan en undermarksanläggning är uppförd. Erfarenheten har visat att grundvattenavsänkningen kring anläggningar i berg brukar bli störst i lågpunkter i terrängen, som ofta sammanfaller med utgåendet av grundvattenförande sprickzoner i berget /Axelsson och Follin 2000/. I synnerhet är risken för grundvattenavsänkning stor i sådana lågpunkter om det finns grova jordarter ovanpå bergövertytan.

Enligt figur 3-4 uppstår och fortgår avsänkningen av grundvattenytan under slutförvarsanläggningens uppförande- och driftskeden. Avsänkningen och storleken på påverkansområdet ökar tills det råder balans mellan inläckaget till slutförvarsanläggningen och grundvattenflödet till berget från jordlager, bäckar, sjöar och hav. Det sker en återhämtning i samband med att förslutningen av förvaret påbörjas och grundvattenbortledningen avtar.



Figur 3-4. Avsänkningen och återhämtningens principiella tidsförlopp under skedena uppförande, drift och avveckling. Modifierad från /Axelsson och Follin 2000/.

3.2.3 Uppträngning eller inträngning av saltvatten

Saltvatten har högre densitet än sötvatten. Detta innebär att salt grundvatten (relikt saltvatten från tidigare havsstadier, eller saltvatten från nuvarande hav) i regel återfinns under det söta grundvattnet. Djupet till det salta grundvattnet varierar och beror till exempel på höjden över och avståndet till havet. Bortledning av grundvatten från en anläggning i berg kan medföra en uppträngning av salt grundvatten från större djup och/eller inträngning av saltvatten (bräckvatten) från havet, om anläggningen är belägen nära kusten.

3.2.4 Hydrologiska effekter

Förändringar av grundvattnets tryckhöjder i berg och grundvattenytans nivå kan påverka områdets vattenbalans och leda till en minskad utströmning av grundvatten. En minskad grundvattenutströmning kan i sin tur minska ytvattennivåer i sjöar och våtmarker och vattenföring i bäckar. Speciellt känsliga för detta är våtmarker som helt eller till största delen försörjs via utströmmande grundvatten (till exempel källflöden). Känsligheten är generellt mindre för sjöar och våtmarker som helt eller till största delen försörjs via bäckar (om vattenföringen i dessa inte påverkas av grundvattenbortledningen), nederbörd eller smältvatten.

3.3 Markfysikaliska effekter och effekter på mark- och vattenkemiska förhållanden

3.3.1 Markfysikaliska effekter

I jord bärs en del av belastningen ovanifrån (jordens egenvikt, byggnader och så vidare) av jordpartiklarna och en del av belastningen bärs av grundvattnet. En avsänkning av grundvattenytan ger därför en ökad mekanisk belastning på jordpartiklarna (lyftkraften från vattnet minskar), motsvarande ungefär 1 ton/m² per avsänkt meter. Denna belastningsökning kan orsaka en konsolidering (volymminskning) av marken. Detta kan i sin tur orsaka marksättningar, det vill säga att marknivån sjunker. Vid en långvarig eller permanent grundvattenavsänkning uppstår de mest märkbara marksättningarna i organogena jordar (torv, gyttja och dy) och kohesionsjordar (lera och i viss mån även silt). Det finns

verkliga fall där dikning av torvmarker medfört en sättning av markytan på 10–30 % av torvlagrets tjocklek /SKBdoc 1247715/. I friktionsjord (korndiameter större än 0,06 mm) stödjer mineralkornen varandra, vilket innebär att en avsänkning av grundvattenytan inte ger någon volymminskning av betydelse. Den primära sänkningen av marknivån (sättning, konsolidering och krympning) dominerar de första åren efter en avsänkning av grundvattenytan. I organogena jordar kan det även ske en långsammare, sekundär sänkning som orsakas av nedbrytning av organiskt material.

3.3.2 Effekter på mark- och vattenkemiska förhållanden

Bortledande av grundvatten förändrar grundvattnets flödesvägar och kan därmed inverka på förekomst och transport av olika ämnen i mark och vatten. En långvarig avsänkning av grundvattenytan kan påverka de kemiska förhållandena i marken, i ytnära grundvatten och därmed i bäckar och andra ytvatten /SKBdoc 1247715/. En avsänkning kan exempelvis förändra markens redoxförhållanden, som har stor inverkan på kemiska och biologiska processer i mark och vatten (redox står för en grupp kemiska reaktioner som innebär att elektroner överförs). En ökad tillgång på syre vid en avsänkning av grundvattenytan kan leda till en ökad oxidation (aerob nedbrytning) av organiskt material. Den ökade nedbrytningen kan i sin tur påverka omsättningen av kol och kväve i marken. Detta gäller främst i mark med högt innehåll av kol och kväve, till exempel torvmarker.

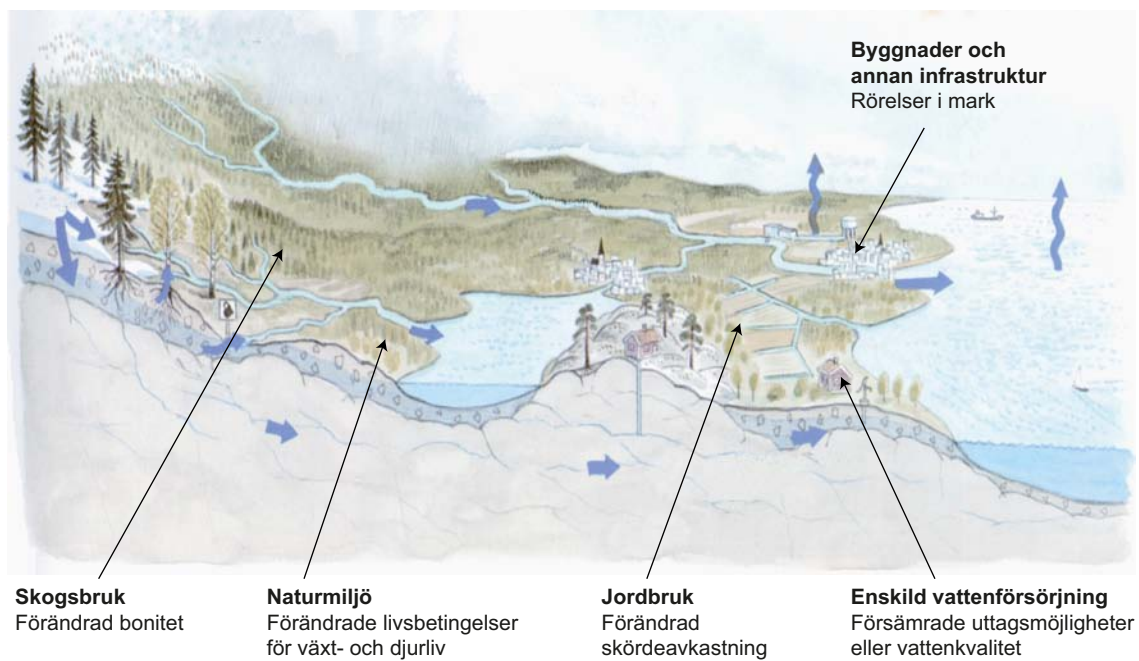
Vid nedbrytningen bildas koldioxid som är en växthusgas. Organiskt bundet kväve kan mineraliseras (oxideras) till ammonium, vilket kan bilda nitrit och därefter nitrat. Denna process är försurande och kan bidra till övergödning. Det kan även ske oxidation av oorganiska mineral som innehåller svavel, järn och mangan. Ett exempel är oxidation av sulfidmineral, vilken är en försurande process som kan frigöra ämnen som arsenik och kadmium. Det ska betonas att samtliga de processer som nämns ovan även sker naturligt.

Ett ökat grundvattenflöde från jord till berg i samband med bortledande av grundvatten kan förändra de grundvattenkemiska förhållandena i berget. Berggrundvattnet kan få en vattenkemisk sammansättning som liknar det ytnära grundvattnet, till exempel minskad kloridhalt. Det kan uppstå grundvattenkemiska förändringar i de övre delarna av berget i områden där det sker en avsänkning av grundvattenytan i jordlagren och där grundvattenflödet från jord till berg ökar (se till exempel /Hultberg et al. 2005/).

3.4 Konsekvenser vid bortledande av grundvatten

Figur 3-5 ger en översikt över olika typer av konsekvenser som kan uppstå vid bortledande av grundvatten från undermarksanläggningar. Konsekvenser för naturvärden kan främst uppkomma i utströmningsområden eller i områden som genom ytvattentillförsel är anpassade för blöta eller fuktiga förhållanden. Det finns praktiska erfarenheter, främst vad gäller markavvattning, som kan användas för att prognostisera konsekvenser för vegetation och biologisk mångfald /Florgård et al. 2000, Hamrén och Collinder 2010, Sidenvall och Birgersson 1998/. Erfarenheter från undermarksanläggningar visar generellt på måttliga konsekvenser för växter och djur i ytnära vattensystem. Irreversibla ekologiska konsekvenser kan uppstå vid en avsänkning som varar under ett antal år. En viktig hypotes är att en avsänkning av grundvattenytan generellt gynnar vissa arter på bekostnad av andra. Exempel på detta är att vissa kärlväxter och mossor gynnas på bekostnad av ”våtmarksarter”, att sumpskogar och kärr ersätts av friska gran- och blandskogar, eller att ört-kalkbarrskogar övergår i artfattigare och mer homogen skog.

En avsänkning av grundvattenytan kan medföra negativa konsekvenser för jord- och skogsbruk i form av minskad skördetillväxt respektive minskad bonitet (skogens virkesproducerande förmåga), speciellt under torrperioder. Vidare kan brunnar som används för vatten- eller energiförsörjning (till exempel bergvärme) få försämrade kapacitet. En möjlig konsekvens är också försämrade vattenkvalitet på grund av uppträngning eller inträngning av saltvatten (avsnitt 3.2.3) och/eller effekter på markkemiska processer (avsnitt 3.3.2). Bortledande av grundvatten kan ge konsekvenser för byggnader och infrastruktur (vägar samt ledningar för vatten, avlopp och telekommunikation) i form av marksättningar (avsnitt 3.3.1).



Figur 3-5. Översikt över möjliga konsekvenser vid bortledande av grundvatten från undermarksanläggningar. Med bonitet (bördighet) menas skogens virkesproducerande förmåga.

4 Nuvarande förhållanden i Forsmarksområdet

I detta kapitel ges en kortfattad översikt över nuvarande förhållanden i Forsmarksområdet. Beskrivningen är fokuserad på aspekter som är relevanta för de bedömningar av vattenverksamhetens effekter och konsekvenser som presenteras i kapitel 5 och 6. För närmare beskrivningar av Forsmarksområdet och de aspekter som behandlas i detta kapitel, se /Follin 2008, Johansson 2008, Lindborg 2008, SKB 2008a/.

4.1 Topografiska, meteorologiska och hydrologiska förhållanden

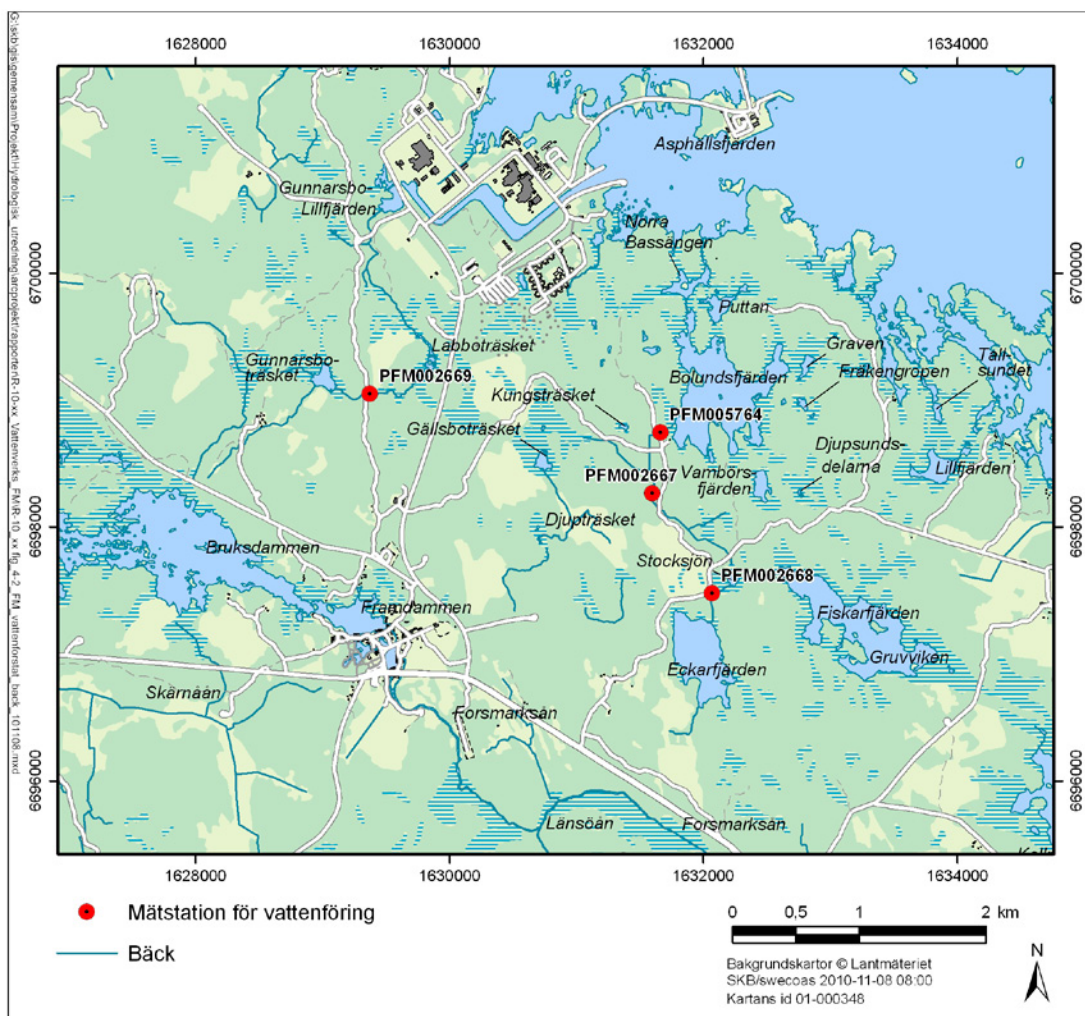
Forsmarksområdet är låglänt och karaktäriseras av en småskalig topografi; nästan hela området är beläget under nivån 20 meter över havet (m ö h). För den så kallade referensnormalperioden 1961–1990 har medelvärdet på årsnederbörden skattats till 559 mm och den årliga avrinningen har skattats till 150–160 mm/år /Johansson 2008/. De flesta sjöarna i området är små och grunda, med medeldjup och största djup mellan 0,1 och 1 m respektive 0,4 och 2 m. De största sjöarna i området är Fiskarfjärden (0,75 km²), Bolundsfjärden (0,61 km²), Eckarfjärden (0,28 km²) och Gällsboträsket (0,19 km²). Under perioder med höga havsnivåer sker inträngning av havsvatten till de lägst belägna sjöarna närmast kusten (Norra Bassängen, Bolundsfjärden, Puttan och Lillfjärden, vid extremt höga havsnivåer även Fiskarfjärden).



Figur 4-1. Översiktskarta som visar lägena för de största sjöarna i Forsmarksområdet. Kartan visar även lägena för de elva ytvattennivåstationerna.

Sjöarnas lägen visas i figur 4-1. För de minsta sjöarna är det svårt att dra en gräns mellan sjö och göl. En göl brukar beteckna en liten, naturligt bildad sjö i eller i anslutning till myrmark. I de ekologiska beskrivningarna i avsnitt 4.4 ingår vissa av de minsta sjöarna under begreppet våtmark, där våtmarker delas in i kärr och gölar. I figur 4-1 gäller detta sjöarna Tjärnpussen, Labboträsket, Kungsträsket och Fräkengropen. I figuren visas även lägena för de elva befintliga ytvattennivåstationerna (pegelrören) i området. Av dessa är sex installerade i sjöar (Tjärnpussen räknas då som en sjö), fyra i gölar (SFM000111, -113, -115, och -117) och en i havet. Dessa stationer, och även de vattenföringsstationer som visas i figur 4-2, har installerats inom ramen för SKB:s platsundersökning i Forsmark.

Inom området finns det många våtmarker och små bäckar. Vattenföring förekommer normalt under större delen av året i bäckarna nedströms sjöarna Gunnarsboträsket, Eckarfjärden och Gällsboträsket (se figur 4-2). Även dessa bäckar kan dock vara torrlagda under varma perioder på somrarna. Många av bäckarna har tidigare fördjupats för att erhålla en förbättrad markdränering. Bäckarna i området visas i översiktskartan i figur 4-2, som också visar lägena för de fyra befintliga vattenföringsstationerna i området.



Figur 4-2. Översiktskarta som visar lägena för de största bäckarna i Forsmarksområdet. Kartan visar även lägena för de fyra vattenföringsstationerna.

4.2 Hydrogeologiska förhållanden

4.2.1 Hydrogeologiska förhållanden i berget

Omfattande hydrogeologiska undersökningar har utförts inom ramen för SKB:s platsundersökning i Forsmark under perioden 2002–2007 /Follin 2008, Johansson 2008/. Dessa undersökningar inkluderar bland annat undersökningar i hammar- och kärnbrorrhål i berget, grundvattenrör i jordlagren och rör som är installerade med intagsdelen i övergången mellan jord och berg. I detta sammanhang är bergets vattengenomsläpplighet en nyckelfaktor för inläckaget av grundvatten till slutförvarsanläggningen och grundvattenbortledningens effekter i förvarets omgivningar. Bedömningen av bergets hydrogeologiska egenskaper baseras på en kombination av direkta fältundersökningar, analys av data och numerisk modellering.

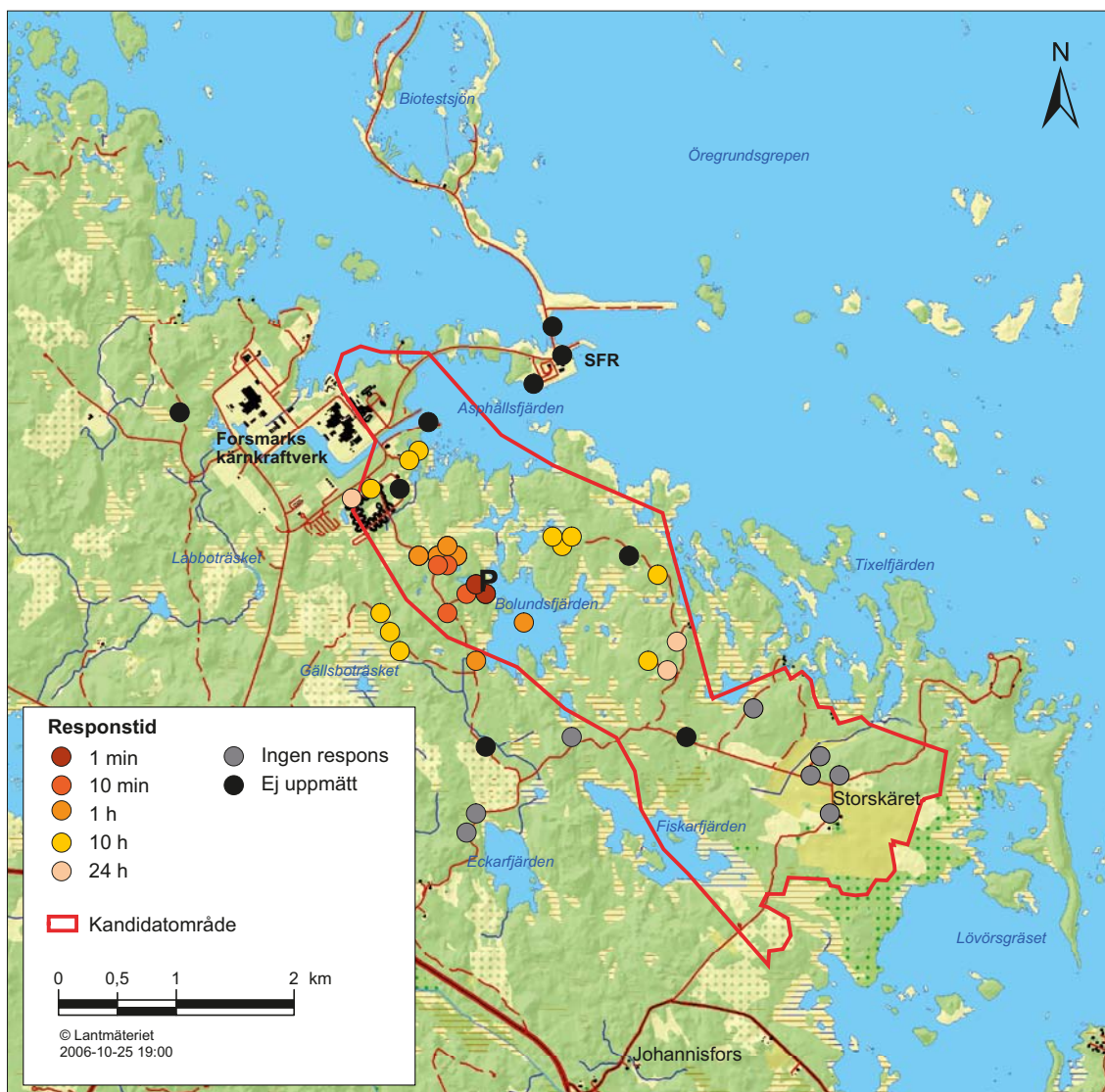
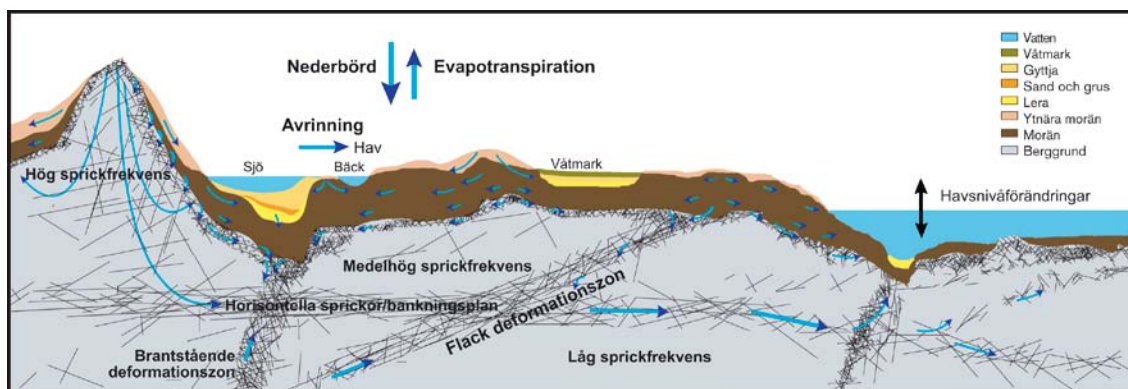
Granit är den dominerande bergarten i området. I denna typ av berg kan grundvattenflöde endast ske i öppna och konnekterade (sammanbundna) sprickor. I Forsmark har omfattande fältundersökningar genomförts för att mäta de grundvattenförande sprickornas grad av öppenhet. Resultaten visar att endast 25 % av alla sprickor som påträffats i kärnbrorrhål mellan 100 och 1 000 m djup är öppna, medan resterande är karterade som ”läkta” (fyllda med sprickmineral, till exempel kalcit). Eftersom mindre än en tiondel av de öppna sprickorna inom detta djupintervall har mätbara grundvattenflöden, indikerar undersökningarna att mindre än 2 % av alla sprickor i berget mellan 100 och 1 000 m djup är både öppna och konnekterade.

De hydrogeologiska förhållandena i de övre cirka 150 m av berget i Forsmark kan anses som ovanliga för Sverige. De hammarborrhål som först borrades inom ramen för platsundersökningen i Forsmark har en genomsnittlig kapacitet på ungefär 12 000 liter per timme, vilket kan jämföras med den genomsnittliga kapaciteten för bergborrade brunnar i Sverige som är cirka 600 liter per timme /Follin 2008/. Man kan därför beteckna de övre delarna av berget som en ”ytlig bergakvifer”. Detta begrepp och akviferens tänkta inverkan på grundvattenflödena i de övre delarna av berget illustreras i den övre bilden i figur 4-3.

Den ytliga bergakviferen har rumsligt varierande hydrogeologiska egenskaper och är på många ställen anisotrop (de hydrogeologiska egenskaperna är olika i olika riktningar). Akviferen består av ett nätverk av flacka sprickzoner (där vissa kan vara så kallade bankningsplan) med hög horisontell hydraulisk konduktivitet i det ungefärliga intervallet 10^{-6} – 10^{-3} m/s. Den mellanliggande bergmassan är betydligt mindre vattengenomsläpplig (10^{-11} – 10^{-8} m/s), förutom i brantstående sprickzoner med hög vattengenomsläpplighet. Dessa zoner har i vissa fall kontakt med de ovanliggande jordlagren.

Enligt den konceptuella modellen kortsluter spricknätverket vattenflöden både uppifrån och nerifrån. Förutom en hög frekvens av öppna och sammanbundna sprickor, är de uppmätta transmissiviteterna (hydraulisk konduktivitet gånger bredd) höga i både bankningsplan och enskilda sprickor. Den nedre bilden i figur 4-3 ger en bild av den ytliga bergakviferens geografiska utsträckning. Bilden visar responstider (h = timmar) för sänkning av grundvattnets tryckhöjder i borrhål i berg vid ett storskaligt interferenstest som gjordes under sommaren 2006 (översatt till svenska från /Follin 2008/). Interferenstest är en metod för att i fält skatta jordens och/eller bergets hydrogeologiska egenskaper. I figur 4-3 betecknar P det borrhål som pumpades vid testet.

Som nämns ovan avtar bergets vattengenomsläpplighet kraftigt med djupet. Under ungefär 150 m djup är sprickfrekvensen betydligt lägre, och även sprickornas vattengenomsläpplighet avtar. På 400–500 m djup är bergets vattengenomsläpplighet därför avsevärt lägre än i de övre delarna av berget. På 400–500 m djup är det långa avstånd mellan de observerade grundvattenförande sprickorna, i genomsnitt mer än 100 m. Dessa viktiga observationer bekräftas av det faktum att många obrutna borrhål från det djupa berget har hämtats upp i samband med kärnbrörningarna (se bilden till höger i figur 4-4).



Figur 4-3. Övre bilden: Konceptuell tvärsnitt som illustrerar begreppet ytlig bergakvifer. Nedre bilden: Responstider vid ett storskaligt interferenstest sommaren 2006.



Figur 4-4. Två bilder som illustrerar två viktiga hydrogeologiska berggenskaper i Forsmark. Bilden till vänster: Höga borrhålskapaciteter har observerats i de övre delarna av berget. Bilden till höger: Många obrutna borrhärlor har hämtats upp ur det djupa berget i samband med kärnbronningarna.

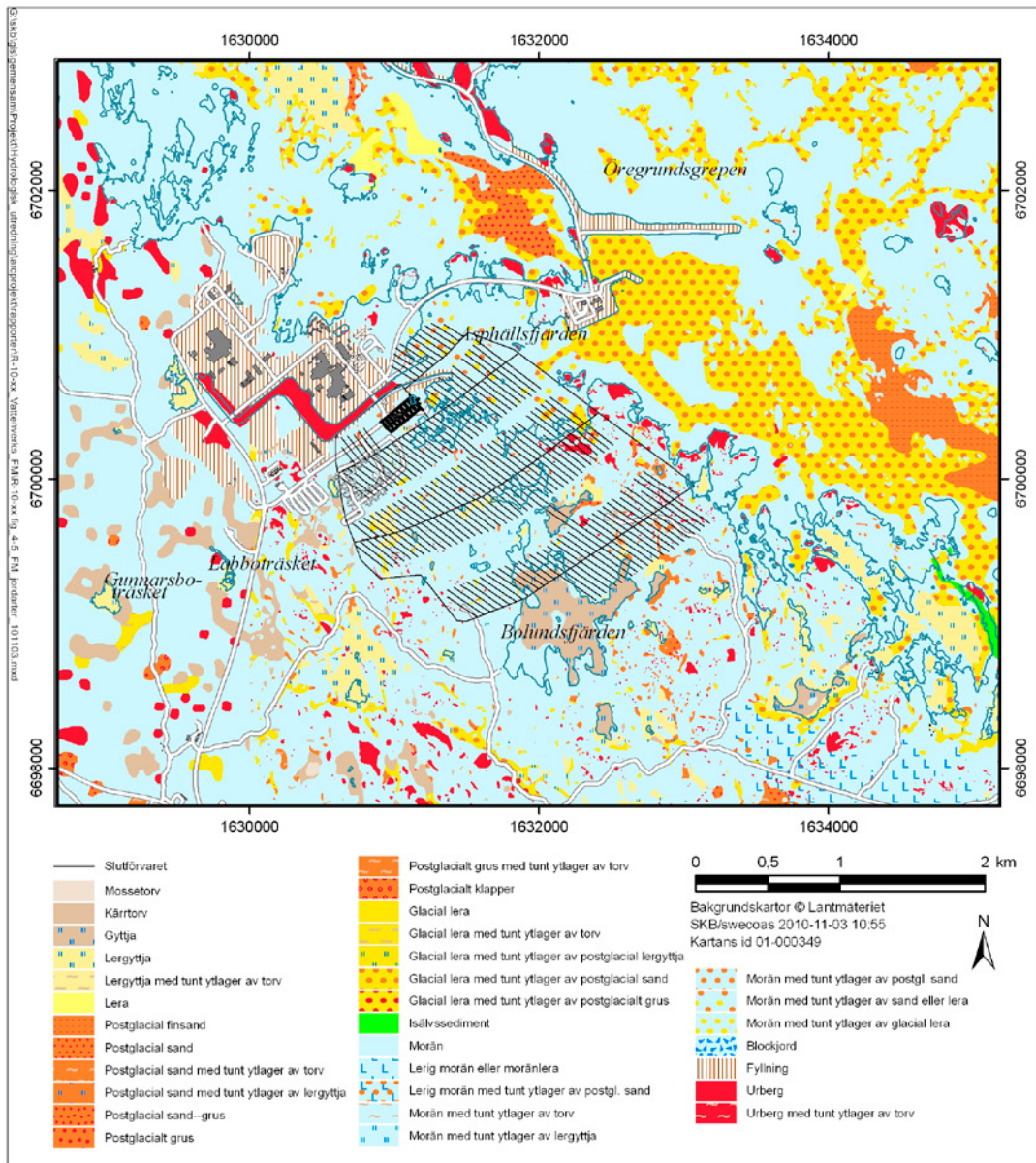
4.2.2 Ytnära hydrogeologiska förhållanden

Morän är den dominerande kvartära avlagringen i området (se figur 4-5) och täcker ungefär 75 % av landytan. Generellt är moränen sandig-siltig inom den största delen av landområdena, med förekomst av lerig morän i områdena kring Storskäret och blockig morän kring Börstilåsen. Det finns många små områden med berg i dagen, men de täcker totalt sett endast en liten del (cirka 5 %) av området /Hedenström och Sohlenius 2008/. De kvartära avlagringarna är relativt tunna, med en mäktighet som typiskt är under 5 m (se figur 4-6). De kvartärgeologiska undersökningarna visar att halten av organiskt material är hög främst i torvjordarna och i de postglaciala lerorna (inklusive gyttjelera, lergyttja och gyttja). Sulfidmineral förekommer främst i de postglaciala lerorna. Morän, glaciala leror samt postglaciala sand- och grusavlagringar i området har låga halter av kol, kväve och sulfidmineral.

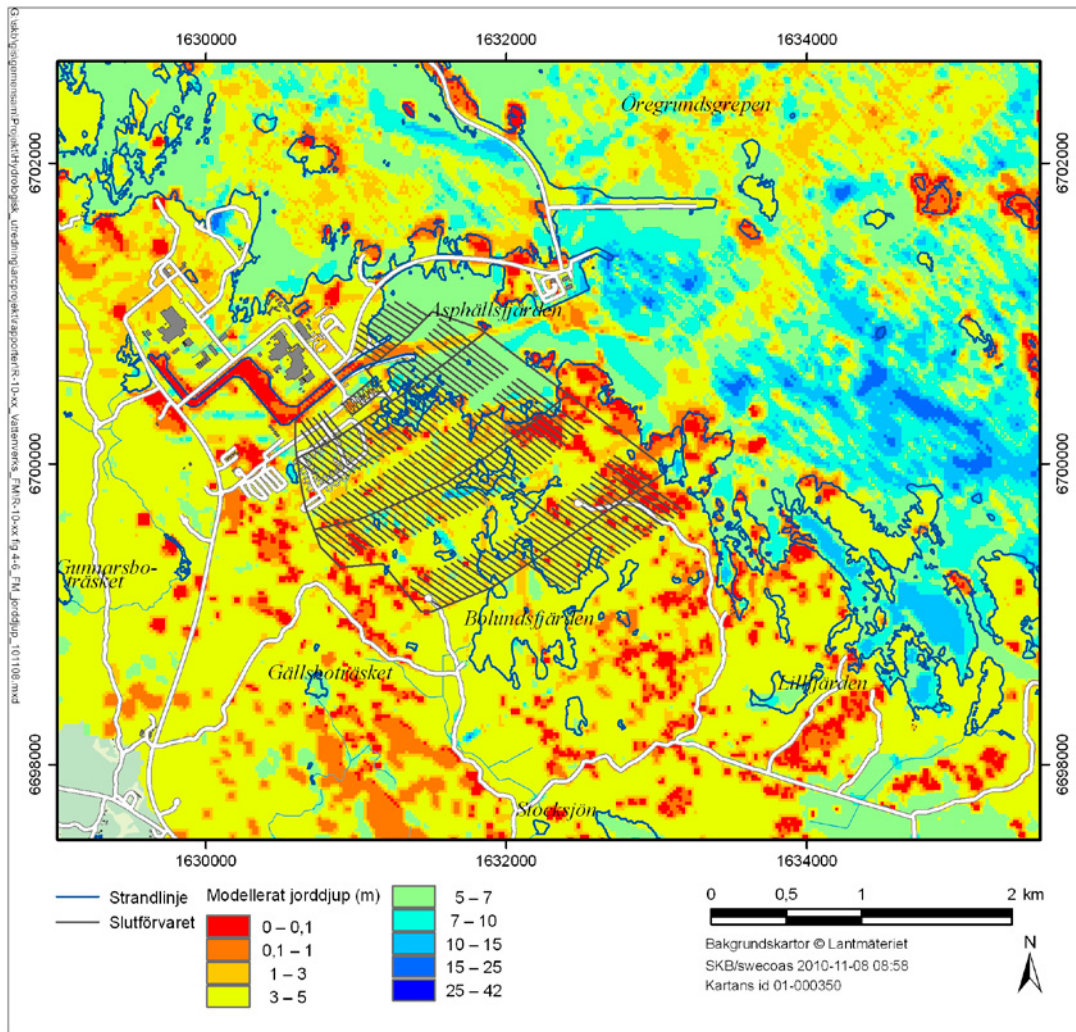
En konceptuell jordlagermodell har tagits fram för Forsmarksområdet /Hedenström och Sohlenius 2008/. Denna modell är baserad på en stor mängd borrhningar, sonderingar och andra typer av undersökningar. Enligt denna konceptuella modell består jordlagerföljden från berget och uppåt generellt av morän – glaciofluviala sediment – glaciärra – postglacial sand/grus – lergyttja/gyttjelera – kärrtorv – mossetorv. Det bör dock observeras att alla dessa jordlager inte finns överallt i området.

De ytligaste delarna av moränen har en vattengenomsläpplighet på i storleksordningen 10^{-5} m/s, som minskar till 10^{-7} – 10^{-6} m/s djupare ner i moränen /Johansson 2008/. Mindre vattengenomsläppliga jordarter som glaciärra, gyttjelera och även torv förekommer inom vissa begränsade områden, främst i anslutning till våtmarker och sjöar. På flera platser i området har man påträffat en mycket kompakt morän med låg vattengenomsläpplighet. Isälvsavlagringar (sand och grus) förekommer inom den så kallade Börstilåsen. Denna ås är belägen cirka två km öster om slutförvarsanläggningen och syns delvis i den högra kanten i figur 4-5.

Mätdata tyder på ett komplext utbyte mellan ytvatten och grundvatten i Forsmarksområdet. Jämförelser mellan grundvattennivåer och sjönivåer visar generellt på täta sjösediment. Dessa mätningar visar vidare att grundvattenbildning kan ske från sjöarna Bolundsfjärden och Eckarfjärden till de underliggande jordlagren sommartid, då grundvattennivåerna är låga på grund av den stora evapotranspirationen. Med avseende på våtmarker visar kvartärgeologiska undersökningar att täta sediment i form av glaciärra under vissa våtmarker förekommer under hela våtmarken, och under delar av våtmarken i andra fall.



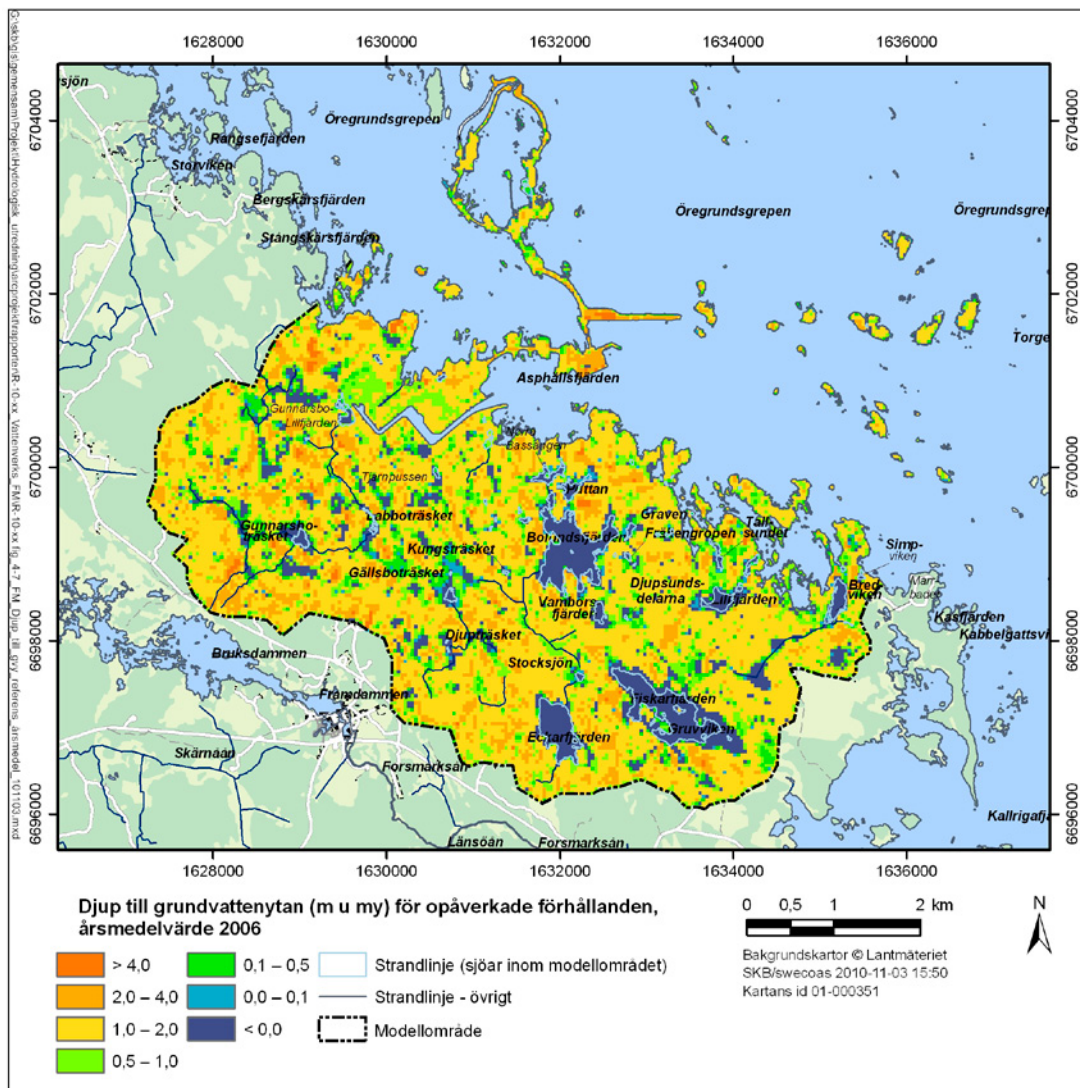
Figur 4-5. Karta över jordarter i områdena närmast kring slutförvarsanläggningen i Forsmark. För att få viss orientering i bilden, visas även utformningen på slutförvarsanläggningens undermarksdel (jämför med figur 2-1 och figur 2-3). Blockig morän förekommer kring Börstilåsen, vars västra del syns i den högra kanten av kartbilden. I den sydöstra delen av kartbilden förekommer lerig morän.



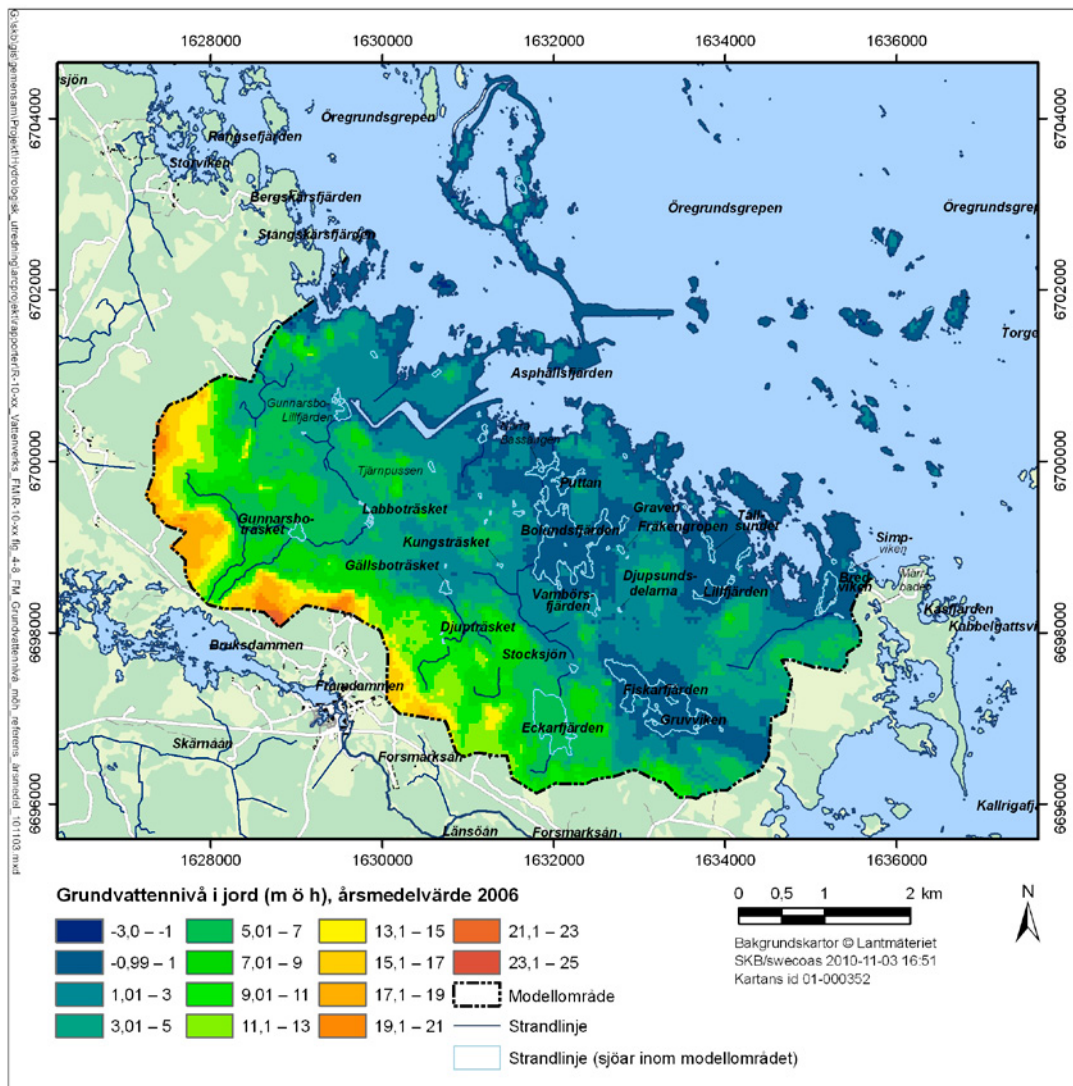
Figur 4-6. Karta över jorddjup enligt en modell som beskriver jordlagrens stratigrafi (jordlagerföljden) och mäktighet i Forsmark. För att få viss orientering i bilden, visas även utformningen på slutförvarsanläggningens undermarksdel.

Grundvattennivåmätningar i borrhål i den övre delen av berget visar på små horisontella hydrauliska gradienter, vilket sannolikt beror på bankningsplanen med hög horisontell vattengenomsläpplighet. Grundvattennivåerna i den övre delen av berget har således endast ett svagt samband med den lokala topografin. Grundvattennivåerna i jordlagren är generellt högre än grundvattennivåerna i det övre berget, vilket skapar förutsättning för grundvattenbildning från jord till berg. Grundvattenytan är belägen nära markytan (i regel närmare markytan än 1 m) och följer alltså i stort den småskaliga topografin. Även i områden som bedöms vara typiska inströmningsområden är grundvattenytan i medeltal belägen endast drygt 1 m under markytan. Grundvattennivåns variation i jord är under året oftast mindre än 1 m i utströmningsområden och cirka 1,5 m i typiska inströmningsområden.

Ovanstående förhållanden innebär att Forsmarksområdet har många små avrinningsområden med lokala ytliga grundvattensystem /Johansson 2008/. Detta illustreras i figurerna 4-7 och 4-8, som visar grundvattenytans djup under markytan (Figur 4-7) och grundvattenytans nivå (figur 4-8) enligt beräkningar med den så kallade MIKE SHE-modellen /Mårtensson och Gustafsson 2010/ (för en beskrivning av MIKE SHE, se avsnitt 5.1.1 och bilaga 4). Notera att i de modellberäkningar som ligger till grund för figurerna 4-7 och 4-8 är slutförvarsanläggningen inte med, vilket innebär att resultaten återspeglar opåverkade (naturliga) förhållanden. De beräknade djupen och nivåerna avser årsmedelvärden för år 2006.



Figur 4-7. Årsmedelvärde på grundvattenytans djup under markytan, beräknat med MIKE SHE-modellen (se bilaga 4) för opåverkade förhållanden utan något förvar. Mörkblå områden (< 0,0) symboliserar ytvatten.



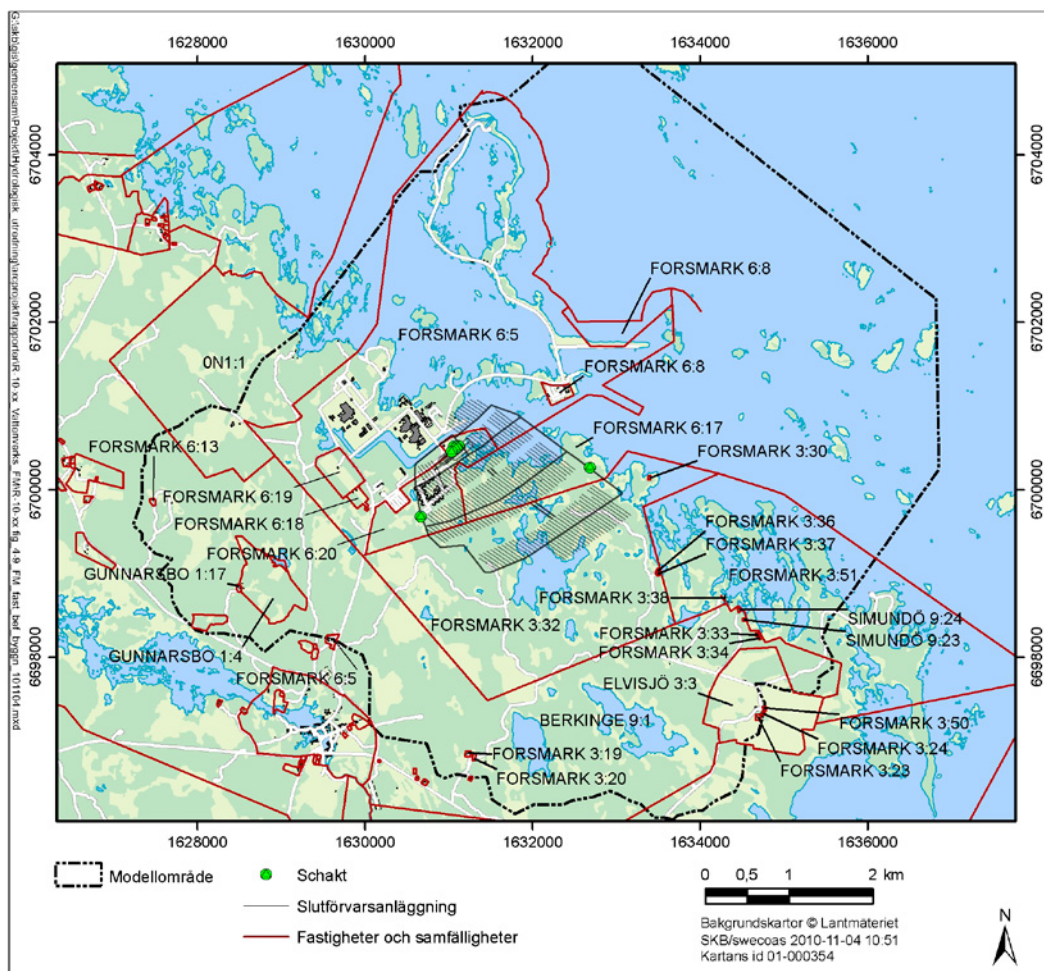
Figur 4-8. Årsmedelvärde på grundvattennivån.

Den småskaliga topografin, i kombination med kontrasten mellan jordlagrens/det övre bergets och det underliggande bergets vattengenomsläpplighet, medför att den största delen av grundvattenflödena inom området sker relativt nära markytan. Detta ytnära flödessystem med lokala in- och utströmningssområden överlagras djupare och mer storskaliga flödessystem i berget. Detta innebär att endast en ytterst liten andel (bråkdelar av procent) av nettonederbörden i området når det planerade djupet för slutförvarsanläggningens deponeringstunnlar (400–500 m).

4.3 Fastigheter, byggnader och infrastruktur

Översiktskartan i figur 4-9 visar aktuella fastighetsgränser och befintliga byggnader på markytan. SKB äger fastigheterna Forsmark 3:32, 6:17 och 6:20.

FKA:s byggnader är belägna i nära anslutning till slutförvarsanläggningen. Dessa byggnader omfattar bland annat de tre reaktorbyggnaderna F1–F3, administrationsbyggnad, förråd, gästförläggning, bostadsområde, vattenverk och Forsmarks hamn på fastigheten Forsmark 6:5. SKB äger fastigheten Forsmark 6:8, med byggnader vid Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR). På dessa fastigheter finns också tillhörande infrastruktur såsom vägar, kraftledningar och VA-ledningssystem.



Figur 4-9. Översiktsskarta som visar fastighetsgränser och byggnader på markytan.

Enligt figur 4-9 finns det även byggnader på ett antal andra fastigheter i slutförvarsanläggningens omgivningar, inklusive Forsmark 6:18 och 6:19, Ön 1:1, Gunnarsbo 1:4, Berkinge 9:1, Forsmark 3:36, Forsmark 3:37, Forsmark 3:38, Forsmark 3:51, Elvisjö 3:3, Forsmark 3:23, Forsmark 3:24, Forsmark 3:33, Forsmark 3:34, Forsmark 3:50 och Simundö 9:24.

4.4 Ekologiska förhållanden och områdesskydd

4.4.1 Allmänt

Omfattande och detaljerade undersökningar har genomförts av Forsmarksområdets ekologiska förhållanden, inklusive terrestra /Löfgren 2008/, limnologiska /Nordén et al. 2008/ och marina förhållanden /Wijnblad et al. 2008/. /Hamrén och Collinder 2010/ genomförde ekologiska fältinventeringar med fokus på ekologiska förhållanden som kan förändras till följd av grundvattenbortledningen från förvaret. Ur naturvårdssynpunkt är Forsmarksområdet ett mycket värdefullt område med många våtmarker. Det stora antalet våtmarker med höga naturvärden beror på ett antal samverkande omständigheter enligt följande:

- Ett kustnära läge med en flack topografi, med relativt snabba effekter av landhöjningen och med små men betydelsefulla höjdvariationer inom området. Detta ger också ett relativt ungt landskap med många grunda gölar och kärr som ännu inte fyllts med sediment och torv. Avsaknaden av torv i många våtmarksmiljöer gör att en stor del av vegetationen växer direkt i den kalkrika moränen.
- En kalkrik morän, med ursprung i sedimentär kalkberggrund från Gävlebukten.
- Områdets geografiska läge, i skärningspunkten mellan nordliga och sydliga naturtyper.
- Ett förhållandevis östört läge, undantaget kärnkraftverket och tillhörande verksamheter.

I Sverige finns kombinationen av samtliga dessa förutsättningar enbart i norra Uppland och ger ett område med en mycket stor artrikedom. I ett större geografiskt sammanhang ingår Forsmarksområdet i en region med likartade naturtyper (Nordupplands flacka landhöjningskust) som sträcker sig från Hällnåshalvön i norr till Väddö i söder. Forsmarksområdet ingår i ett område med likartade våtmarks- och skogsmiljöer, från kärnkraftverket i norr till Eckarfjärden och Kallrigafjärden i söder.

4.4.2 Sjöar och bäckar

Sjöarna i Forsmark (se figur 4-1 i avsnitt 4.1) domineras av så kallade kalkoligotrofa sjöar /Hamrén och Collinder 2010/. Med kalkoligotrof menas en sjö i ett område med kalkrik jord och med låg halt av näringsämnet fosfor. Denna sjötyp är relativt vanlig i norra Uppland men ovanlig i övriga delar av landet /Nordén et al. 2008/. Samtliga sjöar inom det område som undersökts av /Hamrén och Collinder 2010/ är nyligen avsnörda havsvikar. De utgör en del av en successionskedja som innebär att avsnörda havsvikar utvecklas till sjöar och så småningom till kärr och skogsmiljöer /Löfgren 2008/. Nedan ges en sammanfattande ekologisk beskrivning av de sjöar som ingår i det område som undersökts. Som nämnts tidigare beskrivs vissa av de minsta sjöarna under begreppet göl (våtmark), se avsnitt 4.4.3.

Bolundsfjärden, Norra Bassängen och Puttan

Sjöarna Bolundsfjärden och Norra Bassängen är att betrakta som en enhet ur ekologisk synpunkt. Bolundsfjärden och Norra Bassängen har ett stort värde som yngelkammare för fisk, med fiskvandring mellan Bolundsfjärden och havet via Norra Bassängen /Loreth 2005/. Puttans sjötröskel är belägen på nivån 0,48 m ö h /Nordén et al. 2008/, vilket är högre än sjötrösklarna för Norra Bassängen (0,19 m ö h) och Bolundsfjärden (0,28 m ö h). Tidsserier på havets nivå, sjöarnas nivåer samt de avvägda sjötrösklarna visar att det är mycket begränsade möjligheter för fiskvandring mellan Puttan och havet via Norra Bassängen/Bolundsfjärden.

Bolundsfjärden är den största sjön i området. Vid höga havsnivåer kan havsvatten tränga in i sjön /Johansson 2008/. Sjön är grund och omges av tjocka vassbälten, äldre barrskog och öppna, flacka strandängar. En relativt intakt bård av örtrik granskog finns längs stränderna (varav delar utgör nyckelbiotoper), med högt lövinslag av framför allt al. I söder finns dock en slutavverkad udde, men med en smal yttre bård av träd mot vattnet. Sjön har en mycket hög biomassa av undervattensvegetation som domineras av kransalger och borstnate. Även den sällsynta arten havsnajas förekommer i sjön. Eftersom sjön har ett större djup än de mindre sjöarna i området finns det även ett pelagiskt habitat, det vill säga djur- och växtliv i sjöns fria vattenmassa. Sjön är en klarvattensjö där ljuset når ned till botten. I sjön förekommer vanliga fiskarter, såsom gädda, abborre, mört, ruda, sutare, gärs och lake. Sjön hyser flera arter häckande och födosökande fåglar, såsom havsörn, vigg, knölsvan, gräsand, häger, fisktärna, svarttärna, skräntärna och fiskgjuse. Bolundsfjärden är framför allt värdefull ur limnologisk och ornitologisk synpunkt.

Norra Bassängen är belägen mellan Bolundsfjärden och havet, och dess ekologiska förhållanden motsvarar Bolundsfjärdens. Sjöns in- och utlopp utgörs av otydligt definierade bäckar, som rinner över steniga partier bevuxna med bladvass. Båda dessa bäckmiljöer är av betydelse för lekvandrande fisk. Vid ett provfiske under lektid infångades en omfattande mängd gärs, mört, abborre och gädda. Ur naturvärdessynpunkt bedöms sjöarna Bolundsfjärden, Norra Bassängen och Puttan enligt /Hamrén och Collinder 2010/ ha ett regionalt värde (klass 2; se förklaring i avsnitt 6.1).

Gällsboträsket, Graven och Vambörsfjärden

Växtlivet i Gällsboträsket domineras av flytblads- och övervattensvegetation. Sjön har ett klart och grunt vatten, vilket innebär att ljuset når botten. Graven omges av omfattande vassar och sjön är av brunvattentyp. Vambörsfjärden omges av vassar och rikkärr. Ingen av dessa sjöar har någon betydelse som yngelkammare för fisk. Ur naturvärdessynpunkt bedöms sjöarna ha kommunalt värde (Gällsboträsket, klass 3), lokalt värde (Graven, klass 4) respektive regionalt värde (Vambörsfjärden, klass 2).

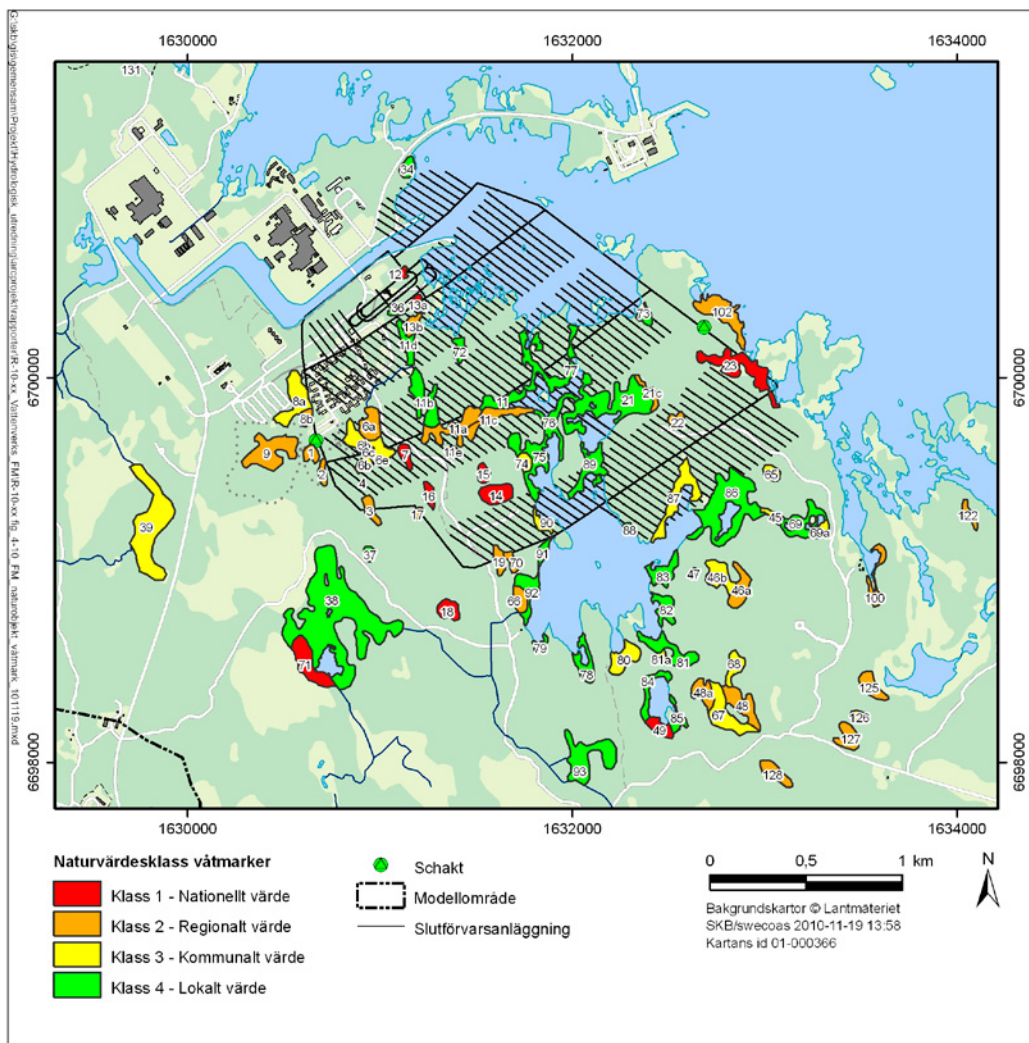
Bäckar

De två bäcksektioner som förbinder Bolundsfjärden, Norra Bassängen och havet är som nämnts ovan av betydelse för lekvandrande fisk. I övrigt är inga speciella naturvärden associerade med bäckarna i området /Hamrén och Collinder 2010/.

4.4.3 Våtmarker

Som nämnts tidigare finns det många små våtmarker i Forsmarksområdet. Den kalkrika moränen innebär att ett flertal våtmarker består av kalkrika gölar (kalkgölar) och rikkärr. Dessa motsvarar Natura 2000-naturtyperna kalkrika oligo-mesotrofa vatten med kransalger (naturtyp 3140) samt rikkärr (naturtyp 7230); naturtypkoderna är definierade i EU:s art- och habitatdirektiv. Våtmarkstyperna är ovanliga i Sverige, de hyser ofta höga naturvärden och de är viktiga för den biologiska mångfalden. Flera våtmarker i området utgör livsmiljö för rödlistade och/eller skyddade arter (se avsnitt 4.4.5).

Totalt har 79 våtmarksobjekt identifierats och naturvärdesklassats /Hamrén och Collinder 2010/. Våtmarksobjekten är förtecknade i bilaga 1 och deras lägen och bedömda naturvärden visas i översiktskartan i figur 4-10. Fyra våtmarksobjekt (12, 13a, 13b och 36) kommer att fyllas igen i samband med anläggandet av slutförvarsanläggningens driftområde ovan mark /SKB 2010/ och berörs därför inte av grundvattenbortledningen. Det medför att konsekvensbeskrivningen (avsnitt 6.1.4) omfattar sammanlagt 75 våtmarksobjekt. De ekologiska konsekvenserna av igenfyllnaden av vattenområdena inom driftområdet beskrivs i /Werner et al. 2010/, inklusive beskrivning av möjliga åtgärder.



Figur 4-10. Identifierade och naturvärdesklassade våtmarksobjekt.

Av de 75 våtmarksobjekt som beaktas här är åtta stycken naturvärdesklassade som klass 1 (nationellt värde) och 25 stycken som klass 2 (regionalt värde). Av resterande 42 objekt är femton stycken naturvärdesklassade som klass 3 (kommunalt värde) och 27 stycken som klass 4 (lokalt värde). I samband med den ekologiska fältinventeringen identifierades även några våtmarker som endast innehåller triviala arter. Dessa våtmarker har inte några speciella naturvärden och återges därför inte i figur 4-10. I ett flertal fall utgör separata våtmarksobjekt med olika naturvärdesklasser ett geografiskt sammanhängande våtmarksområde. Antalet våtmarksobjekt är alltså inte samma sak som antalet våtmarker eller våtmarksområden, eftersom de senare kan bestå av delområden som definieras som våtmarksobjekt med olika naturvärden.

4.4.4 Skogar

Skogarna i Forsmarksområdet domineras av tall och gran, med en grandominans i områden med mäktigare jordlager och med högre vattenhållande kapacitet. Tall dominerar på hållmarker. Skogarna är generellt påverkade av det kommersiella skogsbruket, till exempel kalhyggen i olika successionsstadier. De vanligaste lövträden är björk, al och rönn, men även lönn och ask är förhållandevis vanliga. Ek och alm är här nära sin nordliga utbredningsgräns och är därför sällsynta inom området. Fältskiktet präglas av örter som blåsippa och smultron, och bredbladiga gräs såsom lundelm, tillsammans med flera orkidéarter, bland annat skogsknipprot. Bottenskiktet i området domineras av tjocka mattor av friskmarksmossor såsom hus-, vägg- och kammossa. Det långvariga skogsbruket innebär en låg andel riktigt grova träd samt få torrakor och lågor. Den kalkrika moränen i Forsmark innebär att det förekommer artrika ört-kalkbarrskogar i området. Fältskiktet i ört-kalkbarrskogarna domineras helt av örter. Det finns ett stort inslag av bredbladiga gräs, som lundelm och lundskäfting. Vidare förekommer rikligt med tvåblad, skogsknipprot, trolldruva, getrams och det finns även inslag av storrans.

Ört-kalkbarrskogar är ovanliga i Sverige men vanliga i norra Uppland. Trots inverkan av skogsbruket finns det i Forsmark vissa äldre och relativt orörda skogsbestånd, som av Skogsstyrelsen eller skogsbolaget Sveaskog klassats som skogliga nyckelbiotoper eller objekt med naturvärden (områden som inte riktigt når upp till nyckelbiotopsstatus). Även Länsstyrelsen Uppsala län har inventerat örtrika barrskogar i området, vilket bland annat inkluderat studier av svampfloran. Flera av Länsstyrelsens objekt överlappar med de skogsobjekt som identifierats av Skogsstyrelsen.

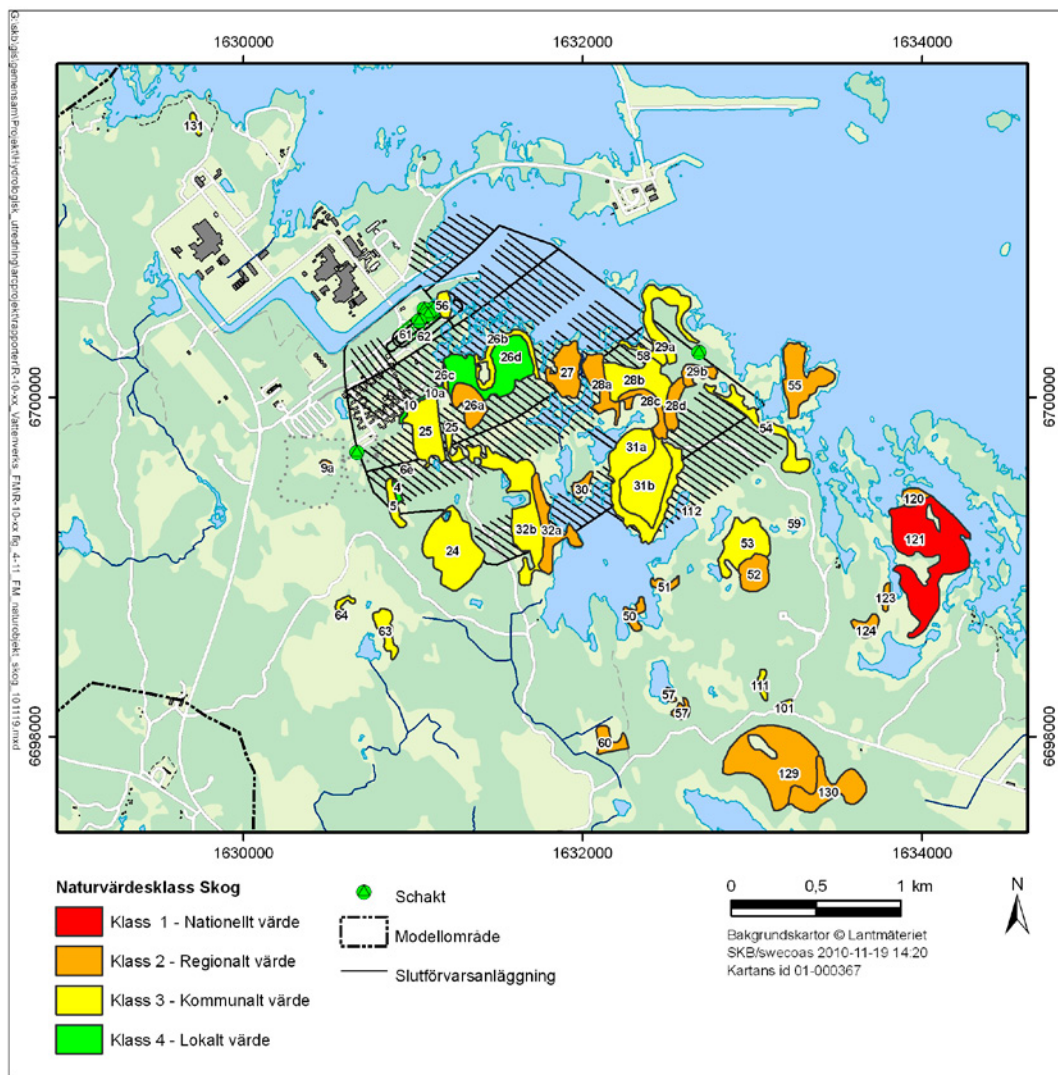
Många av de objekt som enligt Skogsstyrelsen och Länsstyrelsen har höga naturvärden har ansatts dessa naturvärden på grund av faktorer som gammal skog och död ved. Sådana värden är inte direkt beroende av grundvattenytans nivå. I Forsmark finns det dock friska-fuktiga skogspartier där grundvattenytan är belägen på litet djup, samt stråk med rörligt syrerikt grundvatten. Detta i kombination med den kalkrika moränen ger särskilt goda förutsättningar för en stor artrikedom i skogarna.

Totalt har 49 skogsobjekt identifierats och naturvärdesklassats. Skogsobjekten är förtecknade i bilaga 2 och deras lägen och bedömda naturvärden visas i översiktskartan i figur 4-11. Bland de identifierade skogsobjekten finns det ett antal skogliga nyckelbiotoper och objekt med naturvärden enligt ovanstående beskrivning. Tre skogsobjekt (objekt 56, 61 och 62, se figur 4-11) är belägna inom det planerade driftområdet ovan mark. Dessa objekt påverkas därmed på annat sätt än genom grundvattenbortledning. Det innebär att konsekvensbeskrivningen (avsnitt 6.1.5) omfattar sammanlagt 46 skogsobjekt.

Av de 46 skogsobjekten har ett objekt klass 1 (nationellt värde) och 23 objekt klass 2 (regionalt värde). Av resterande 22 objekt är 18 stycken klassade som klass 3 (kommunalt värde) och fyra stycken som klass 4 (lokalt värde). Liksom för våtmarksobjekten utgör i ett flertal fall separata skogsobjekt med olika naturvärdesklasser ett geografiskt sammanhängande skogsområde. Antalet skogsobjekt är inte samma sak som antalet skogsområden, eftersom de senare kan bestå av delområden som definieras som skogsobjekt med olika naturvärden.

4.4.5 Rödlistade och skyddade arter

ArtDatabanken vid SLU (Sveriges Lantbruksuniversitet) är ansvarig för de svenska rödlistorna över hotade och missgynnade växter, svampar och djur. Syftet med det system med hotkategorier som används i rödlistorna är att ge en översiktlig och objektiv bild av arters status, men de utgör inte någon prioriteringsordning för praktiska bevarandeinsatser.



Figur 4-11. Identifierade och naturvärdesklassade skogsobjekt.

I undersökningsområdet har totalt 43 rödlistade arter observerats i samband med de ekologiska inventeringarna /Hamrén och Collinder 2010/. Av dessa är fem arter knutna till rikkärr och kalkgölar (gölgroda, gulyxne, loppstarr, kalkkärrsgrynsnäcka och käppkrokmossa), 24 är svamparter i ört-kalkbarrskogar och tre är svamparter knutna till död grov ved. Det bör noteras att svampinventeringen genomfördes år 2008, vilket var ett exceptionellt bra svampår. Detta innebär att svampfynden är fler än vad som skulle ha varit fallet ett mer normalt svampår. Inom området förekommer även rödlistade däggdjur (utter och lo) och fåglar (till exempel mindre hackspett, havsörn och göktyta). Fiskfaunan i områdets sjöar innefattar inga rödlistade arter. Det förekommer ål och tånglake i havet utanför kylvattenkanalen /Adill et al. 2006/.

Det lagliga skyddet av växt- och djurarter i Sverige (inklusive fridlysta arter) är till största delen samlat i artskyddsförordningen (SFS 2007:845). Starkast skydd har arter med strikt skydd varhelst de förekommer. Vissa arter är skyddade inom avsatta Natura 2000-områden. En verksamhet eller en åtgärd som kan medföra negativa konsekvenser för arter som är skyddade enligt artskyddsförordningen kräver dispens för att få genomföras. I samband med de ekologiska fältinventeringarna har det observerats ett flertal arter som är upptagna i artskyddsförordningen, inklusive 22 fridlysta arter. Arter med strikt skydd som observerats är bland annat gölgroda, gulyxne, åkergroda, större vattensalamander, citronfläckad kärrtrollslända och pudrad kärrtrollslända.

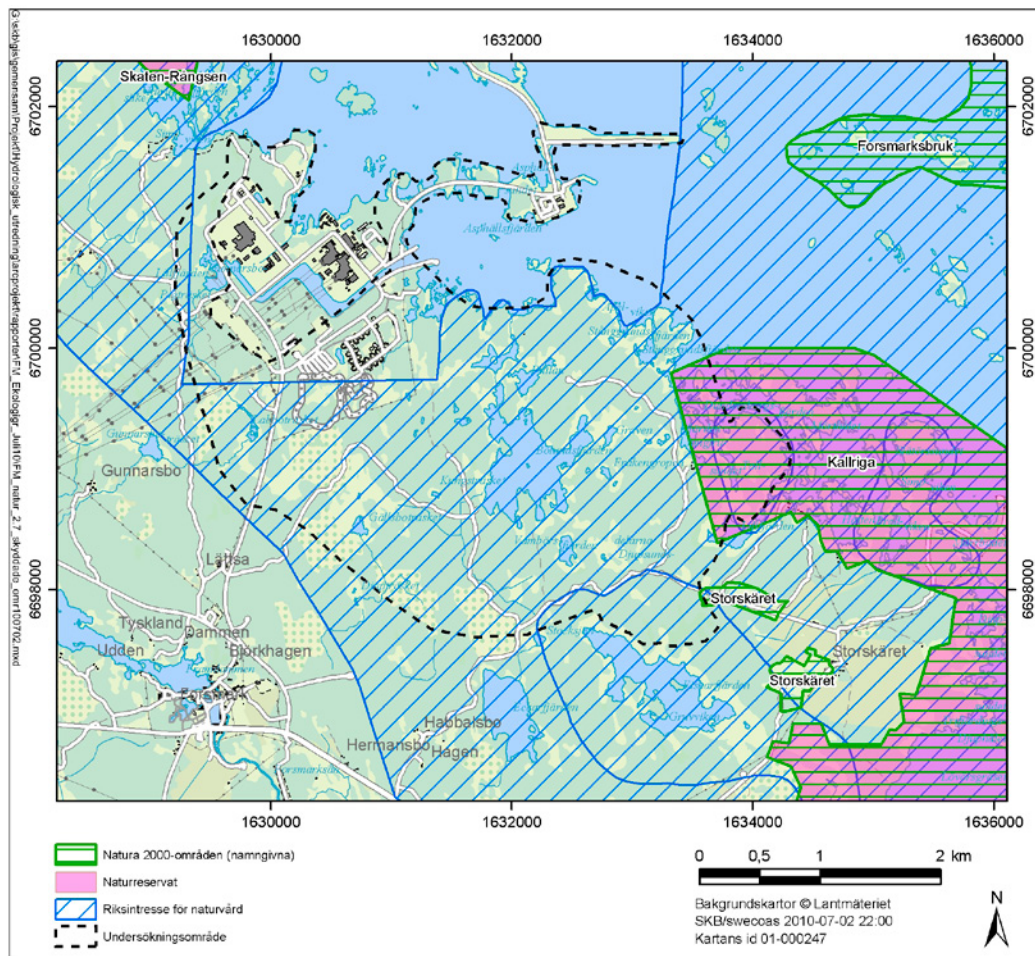
Vad gäller rödlistad och skyddad flora/fauna bedöms gulyxne och gölgroda utgöra de största enskilda naturvärdena i Forsmarksområdet. Dessa arter har observerats i fyra respektive sju våtmarker i området, av ungefär 100 respektive 150 kända lokaler i landet. Kärnområdet för gulyxne är norra Uppland och

södra Gästrikland, och samtliga kända gölgrodelokaler i Sverige finns längs norra Upplands kust. Gölgrödan inplanterades i Forsmark under 1990-talet. För en närmare beskrivning av rödlistade och skyddade arter i Forsmarksområdet, se /Hamrén och Collinder 2010/.

4.4.6 Utpekade värdefulla och skyddade områden

Översiktskartan i figur 4-12 visar den geografiska utbredningen av områden avsatta som Natura 2000-områden, naturreservat och riksintresse för naturvård. Inom det område som omfattas av kartbilden finns det fyra Natura 2000-områden: Skaten-Rångsen, Forsmarksbruk, Kallriga och Bruksdammen. Natura 2000 är EU:s nätverk för skyddad natur. Enligt miljöbalken krävs tillstånd för att bedriva en verksamhet eller vidta en åtgärd som på ett betydande sätt kan medföra negativa konsekvenser för naturmiljön i Natura 2000-områden. Inom kartbilden finns det även två naturreservat som geografiskt sammanfaller med Natura 2000-områdena Skaten-Rångsen och Kallriga.

Inom kartan finns det tre områden som är utpekade som riksintresse för naturvård och som enligt miljöbalken ska skyddas mot åtgärder som påtagligt kan skada naturmiljön: Forsmark-Kallrigafjärden, Östra Hållnäs-kusten och Forsmarksån. Dessa områden inkluderar Natura 2000-områdena Kallriga, Skaten-Rångsen respektive Bruksdammen. Det fanns tidigare förslag på naturreservat och ekopark. Med ekopark menas ett större sammanhängande skogslandskap med höga naturvärden och höga naturvårdsambitioner, dock utan lagstadgat skydd. Ekoparken, med en yta på 1 800 hektar (ha; en hektar är lika med 10 000 m²), inrättades av Sveaskog år 2007 men har ännu inte formellt bildats. Länsstyrelsen Uppsala län har för närvarande inga planer på naturreservatsbildning av de föreslagna naturreservaten /Hamrén och Collinder 2010/.



Figur 4-12. Översiktskarta som visar geografisk utbredning av områden avsatta som Natura 2000-områden, naturreservat samt riksintresse för naturvård i Forsmark. Kartan visar även det område (innanför den streckade linjen) som undersökts av /Hamrén och Collinder 2010/, vilket är mindre än det område som omfattades av SKB:s platsundersökning under perioden 2002–2007 /SKB 2008a/.

4.5 Jord- och skogsbruk

Markanvändningen i Forsmark dominerades tidigare av det skogsbruk som bedrevs av Sveaskog. I början av år 2008 köpte SKB markområden (cirka 600 ha) av Sveaskog på fastigheten med beteckningen Forsmark 3:32 i figur 4-9, inklusive delar av den tidigare föreslagna ekoparken. SKB kommer att genomföra naturvårdsinriktad skötsel av skogen i Forsmark, motsvarande Sveaskogs tidigare ekoparksintentioner (se avsnitt 7.3). Enligt uppgift från Sveaskog domineras skogen i Forsmark av gran och tall, med en jämn fördelning mellan dessa båda trädslag. Lövträd utgör vanliga inslag i barrskogsbestånden. Aktivt jordbruk bedrivs vid Storskäret, cirka två km öster om förvarsområdets östra gräns.

4.6 Befintlig vattenhantering och vattenverksamhet

4.6.1 Befintlig vattenhantering

Dricksvattenförsörjning och enskilda brunnar

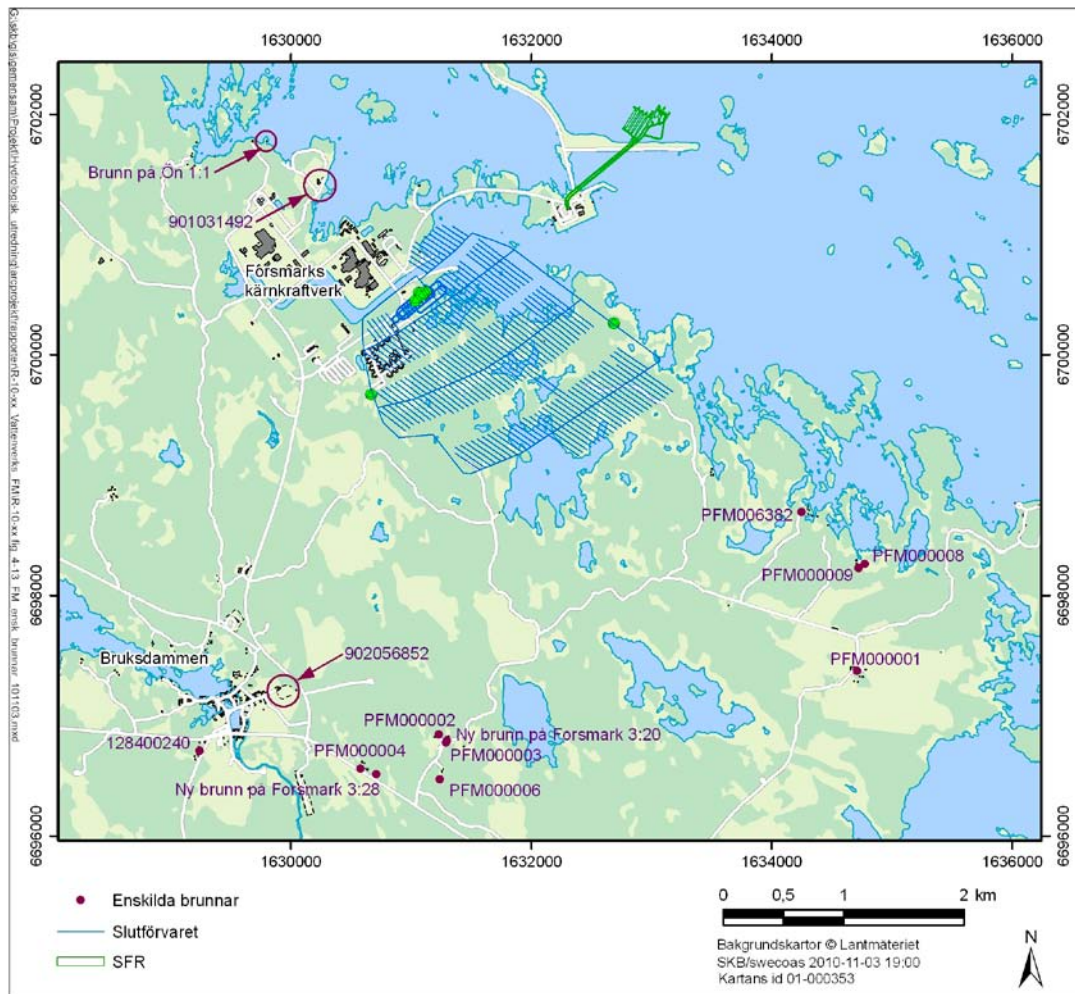
Med undantag för Forsmark (se avsnitt 4.6.2) baseras all dricksvattenförsörjning i Östhammars kommun på grundvatten /Östhammars kommun 2003a/. Den kommunala dricksvattenförsörjningen försörjer 70 % av kommunens invånare och baseras på grundvatten från större åsformationer. Det uttagsområde som är närmast slutförvarsanläggningen är beläget i Börstilåsen, ungefär åtta km sydöst om anläggningens östra del. I den kommunala översiktsplanen utpekas inga ytterligare behov av uttag i åssträckan norr om Östhammars tätort. Uttagsområdena för nuvarande och tillkommande kommunal vattenförsörjning är således lokaliserade på stora avstånd från slutförvarsanläggningen, vilket innebär att bortledning av grundvatten från förvaret inte kommer att påverka den kommunala vattenförsörjningen i Östhammars kommun.

I dagsläget försörjs 30 % av kommunens invånare via enskild vattenförsörjning från brunnar. Information om enskilda brunnar har hämtats från en brunnsinventering som genomfördes sommaren 2001 /Ludvigson 2002/, från SGU:s brunnsarkiv (© Sveriges geologiska undersökning (SGU)) och från en uppföljande brunnsinventering i fält som genomfördes i december 2009. Information från brunnsarkivet inhämtades senast i början av september 2009, då arkivet inkluderade brunnar som borrats till och med slutet av år 2007. Brunnsinventeringen 2001 omfattade även FKA:s tolv ”vattenprospekteringshål”. Dessa kom aldrig i bruk och det finns i dagsläget inga planer på att ersätta sjön Bruksdammen (avsnitt 4.6.2) med grundvattenbaserad vattenförsörjning. Vattenprospekteringshålen betraktas därför som borrhål och inte som brunnar. På motsvarande sätt bortses från de undersökningshål som borrats av SKB inom ramen för platsundersökningen.

Tabell B3-1 i bilaga 3 sammanfattar information rörande enskilda brunnar i ett område inom tre km från den yttre gränsen för slutförvarsanläggningens förvarsområde. Tabellen innehåller även information om vissa äldre brunnar som inte längre är i bruk. I avsnitt 6.3.1 diskuteras specifikt de brunnar som potentiellt kan påverkas av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. Sammanlagt har 14 enskilda brunnar identifierats (figur 4-13). Av dessa är fyra jordbrunnar, nio är bergbrunnar och en är av okänd brunntyp. Av de fyra jordbrunnarna är en numera ersatt med en bergborrad brunn på samma fastighet och en jordbrunn används för andra behov än dricksvatten. En av jordbrunnarna används för närvarande inte. Av de nio bergbrunnarna används en som energibrunn och en används för bevattning, matlagning och tvätt. En bergbrunn finns i brunnsarkivet men har trots bistånd från fastighetsägaren (FKA) inte kunnat lokaliseras.

Grundvattenbortledning från SFR

Undermarksanläggningen SFR är belägen i berget cirka 50 m under havets botten nära Forsmarks hamn. Anläggningen består bland annat av två parallella tillfartstunnlar, fyra bergrum och en silo /Odén 2009/. Läget för SFR visas i figur 4-13. Från SFR pumpas i dagsläget totalt cirka 6 l/s /Johansson 2008/. En utbyggnad av SFR är planerad /SKB 2008b/.



Figur 4-13. Översiktskarta som visar lägen för de enskilda brunnar som identifierats inom tre km från slutförvarsanläggningens förvarsområde. Kartan visar även undermarksanläggningen SFR, Forsmarks kärnkraftverk och sjön Bruksdammen.

Grundvattendränning och dagvattenhantering vid Forsmarks kärnkraftverk

Vid Forsmarks kärnkraftverk finns ett system för grundvattendränning. Bortdränerat grundvatten (1–2 l/s) pumpas från en pumpgröp på nivån –20 m ö h /Johansson 2008/. Huvuddelen av dagvattnet från FKA:s dagvattensystem leds till kylvattenkanalens inlopp.

4.6.2 Befintliga vattenverksamheter

FKA innehar tillstånd för följande vattenverksamheter (figur 4-13):

- Uttag på 85 l/s från sjön Bruksdammen vid Forsmarks Bruk.
- Uttag av havsvatten via en anlagd kanal för tillhandahållande av kylvatten till Forsmarks kärnkraftverk. Enligt vattendomen är tillåtet uttag 200 m³/s. Uttaget är för närvarande maximalt 130 m³/s /Johansson 2008/.
- I övrigt finns tidigare tillstånd för farledsmuddring, anläggande av en hamn med kaj, vågbrytare samt en biotestanläggning (Biotestsjön) jämte fångstdammar.

4.6.3 Markavvattningsföretag och källor

I området har sedvanlig skogsdikning genomförts. Inga markavvattningsföretag är registrerade i området /Brunberg och Blomqvist 1998/. Utloppsfåran från sjön Eckarfjärden (se figur 4-1) är uppenbarligen grävd, varigenom sjön sänkts.

En kontroll i SGU:s källarkiv visar att det inte finns några registrerade källor i Forsmarksområdet. I samband med platsundersökningen har dock ett antal små källutflöden observerats. Dessa finns inte i några register och har såvitt känt inga kulturhistoriska värden. Vatten från en liten källa (SKB ID PFM4179), belägen ungefär 600 m sydöst om sjön Fiskarfjärden, provtogs och analyserades vid ett par tillfällen under åren 2003–2005 /Nilsson och Borgiel 2005/.

4.7 Förändringar av förhållandena i Forsmarksområdet fram till år 2100

Detta avsnitt ger en översikt över möjliga framtida förändringar av förhållandena i Forsmarksområdet, med fokus på sådana förändringar som kan ha betydelse för den planerade grundvattenbortledningen samt dess effekter och konsekvenser. Översikten är främst inriktad på det så kallade nollalternativet, det vill säga förändringar i området som kommer att ske även om slutförvarsanläggningen inte uppförs. Vidare ska framtida planer i övrigt för ett område tas i beaktande då en vattenverksamhet planeras. Vid sådana bedömningar av framtida förändringar kan en tidsperiod på tio år anses som rimlig /Naturvårdsverket 2008/. Givet tidsperspektivet för slutförvarsanläggningen (avsnitt 2.2) används här år 2100 som borte tidshorisont vad gäller övriga verksamheter (avsnitt 4.7.1) och områdets naturliga utveckling (avsnitt 4.7.2). Bedömningarnas omfattning och precision begränsas givetvis av möjligheterna att göra meningsfulla förutsägelser över en så lång tidsperiod.

4.7.1 Förändringar avseende övriga verksamheter

Vad gäller vattenförsörjning från enskilda brunnar får enligt miljöbalken fritidsbebyggelse endast komma till stånd i form av komplettering av befintlig bebyggelse längs kusten upp till Forsmark. Kommunen har därför en restriktiv hållning mot tillkommande fritidsbebyggelse längs kusten /Östhammars kommun 2003b/. Man kan därför inte förvänta sig någon tillkommande bebyggelse vars vattenförsörjning kan komma att påverkas av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. Som nämnts tidigare har FKA inte några planer på att ersätta sin vattenförsörjning från sjön Bruksdammen med något annat alternativ.

Vad gäller framtiden för Forsmarks kärnkraftverk är den aktuella referensen 50 års drifttid för reaktorerna /SKB 2008c/. Detta skulle innebära att kärnkraftverket och tillhörande system drivs vidare en bit in på 2030-talet. Vid uppförande av slutförvarsanläggningen kommer FKA:s befintliga anläggningar för tillfälligt boende att avvecklas /SKB 2010/. Inverkan av ett utbyggt SFR beskrivs närmare i avsnitt 5.7.3.

4.7.2 Forsmarksområdets naturliga utveckling

Landhöjning – uppkomst av sjöar och våtmarker

Den landhöjning som ännu pågår efter den senaste nedisningen är i Forsmarksområdet cirka sex mm/år /Ekman 1996, Söderbäck 2008/, vilket ger en landhöjning på ungefär 0,5 m fram till år 2100. Landhöjningen efter deglaciationen har kontinuerligt gett upphov till nya sjöar längs Forsmarksområdets kust, och kommer att göra så även i framtiden. Naturlig succession innebär att nya våtmarker kontinuerligt bildas i området, antingen efter ett sjöstadium eller direkt efter avsnörningen från havet /Löfgren 2008/.

Baserat på /Påsse 1997/, utarbetade och kalibrerade /Brydsten 2004, 2006/ modeller som kan användas för att beskriva bildande samt sedimentation och igenväxning av sjöar i Forsmarksområdet. Enligt en modifierad variant av sjöbildningsmodellen avsnördes de i dag existerande sjöarna i Forsmark från havet för 100–150 år sedan (Bolundsfjärden, Norra Bassängen, Fiskarfjärden och Bredviken), 350–400 år sedan (Puttan och Gällsboträsket) och upp till för 900–1 000 år sedan (Eckarfjärden och Gunnarsboträsket). Baserat på /Brydsten 2006/ kan man dra slutsatsen att ingen ny sjö kommer att bildas i Forsmarksområdet på grund av landhöjningen innan år 2100.

En modifierad variant av sjöigenväxningsmodellen visar att sjöarna kommer att vara helt sedimentfyllda och igenväxta om mellan 600 år (Puttan och Norra Bassängen) och 7 300 år (Fiskarfjärden). Enligt modellen får en sjö ha ett vattendjup på högst 2 m och en sjöyta på högst cirka 1 700 m² för att den ska växa igen (och övergå till att bli en våtmark) fram till år 2100. Det är därför rimligt att anta att ingen av de idag existerande sjöarna kommer att övergå till att bli en våtmark innan år 2100.

Utveckling av våtmarker och skogsmiljöer

Våtmarker kan ses som övergångar från akvatiska system (vattensystem) till terrestra system (system på land). Flera typer av miljöer ingår i begreppet våtmark, såsom myrar och strandmiljöer /Kellner 2003/. I denna rapport ingår dock inte mossar (en typ av myr) i begreppet våtmark. Mossar försörjs med vatten främst via nederbörden och de är inte beroende av grundvattensytans nivå för sin vattenförsörjning. Eftersom igenväxning av våtmarker sker långsamt kommer sannolikt inte någon befintlig våtmark i Forsmark att växa igen helt fram till år 2100. Oaktat tidigare markavvattningsföretag har dock utvecklingen under 1900-talet generellt gått mot en ökad igenväxning av rikkärr och andra typer av myrar i Sverige, bland annat på grund av klimatförändringar /Hamrén och Collinder 2010/. Denna pågående igenväxning kan komma att öka och göra våtmarksmiljöerna mer beroende av skötsel för att bibehålla sin öppenhet och sina naturvärden.

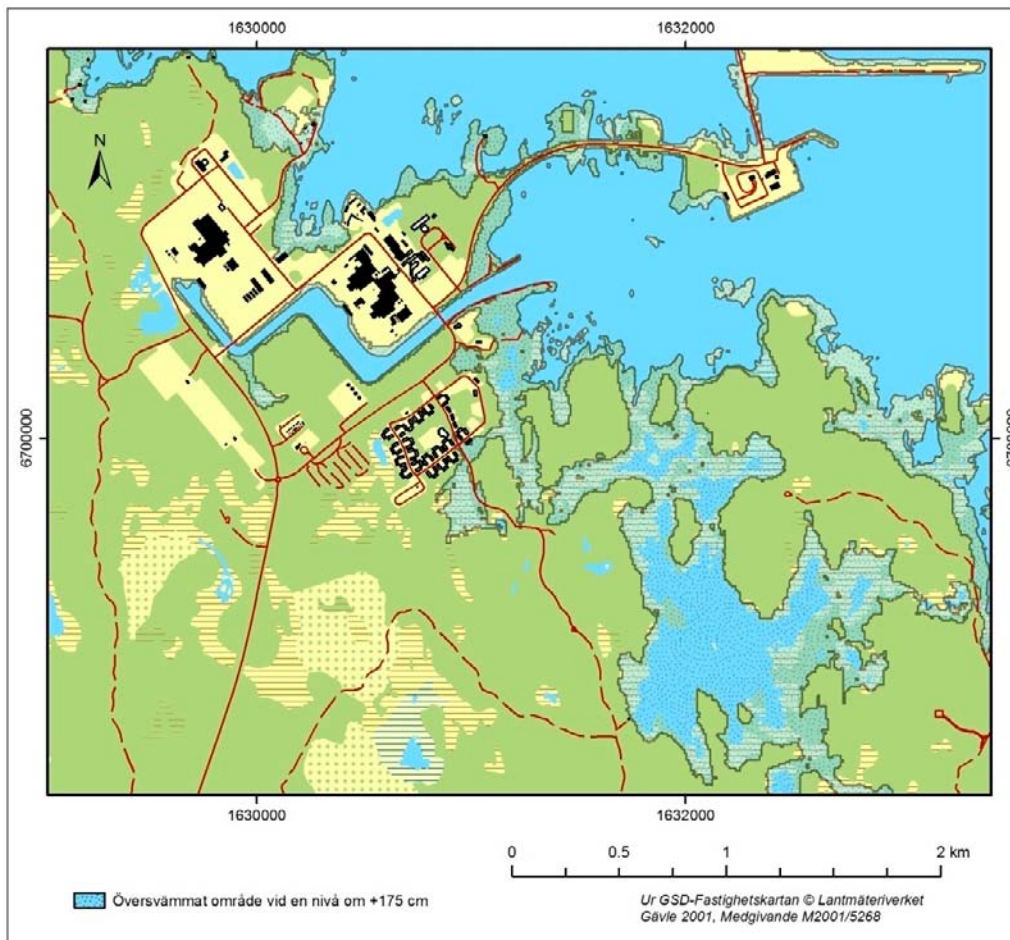
Som nämnts tidigare har SKB köpt markområden av Sveaskog. Om slutförvarsanläggningen inte uppförs i Forsmark kommer SKB eventuellt att avyttra dessa markområden. Om så sker är det rimligt att anta att naturvårdsanpassad skötsel kommer att bedrivas åtminstone i delar av skogen. I dessa delar kommer i så fall skogens naturvärden att öka fram till år 2100, allt eftersom skyddade skogspartier blir äldre och får en ökad andel död ved och andra strukturer som hör gamla skogar till.

Klimatförändring och havsnivåhöjning

Klimatförändring och global uppvärmning i kombination med andra faktorer kan orsaka en höjning av havsnivån fram till år 2100. Dels kan havets medelnivå höjas, dels kan förändringar ske av amplituden och återkomsttiden för kortvariga havsnivåvariationer. Sådana förändringar är viktiga faktorer för förhållandena i mark- och vattenområden längs kusten. Kortvariga, extrema havsnivåer ger upphov till översvämningar av kustnära områden, och en förändring av havets medelnivå kan medföra att nettolandhöjningen (strandlinjeförskjutningen) minskar eller blir negativ.

Framtida förändringar av havets nivå är en öppen forskningsfråga och prognoser av framtida havsnivåer är behäftade med stora osäkerheter. /Brydsten et al. 2009/ redovisar beräkningar från tre olika forskargrupper avseende förändringar av den globala havsnivån fram till år 2100 /IPCC 2007, Pfeffer et al. 2008, Rahmstorf 2007/. För den snabbaste förändringen enligt /Rahmstorf 2007/ är förändringen 1,38 m fram till år 2100. Med hänsyn till den lokala landhöjningen på 6 mm per år är då höjningen 0,56 m fram till år 2100 vad gäller strandlinjens medelnivå vid Forsmark.

För perioden 2050–2150 redovisar /Brydsten et al. 2009/ kortvariga extrema havsnivåer i intervallet 1,75 till 3,16 m, baserat på data från de ovannämnda forskargrupperna. Figur 4-14 visar strandlinjen i Forsmark vid en extrem havsnivå på 1,75 m, således med hänsyn även till kortvariga nivåvariationer. Vid denna havsnivå täcks nuvarande mark- och vattenområden längs kustlinjen av havet, inklusive våtmarksområdena kring sjöarna Bolundsfjärden, Norra Bassängen och Puttan samt områdena söder om kylvattenkanalen. Även idag sker ett periodiskt inflöde av havsvatten till dessa sjöar vid hög havsnivå /Johansson 2008/. Sjöträsklarnas nivåer innebär att förhållandena i sjöar och våtmarksområden längs kusten påverkas även vid en havsnivå på 0,56 m ö h.



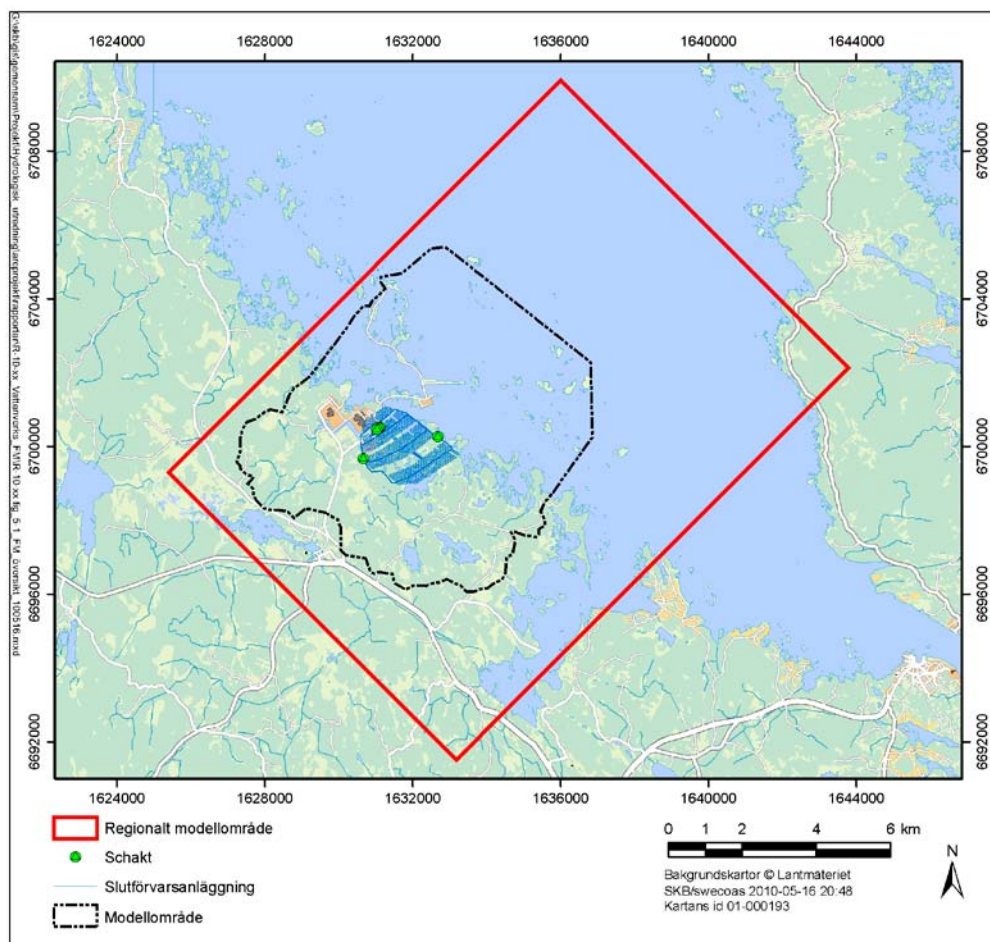
Figur 4-14. Översiktskarta som visar översvämmade områden vid en havsnivå på 1,75 m ö h /Brydsten et al. 2009/.

5 Grundvattenbortledningens hydrogeologiska och hydrologiska effekter

5.1 Underlag och genomförda bedömningar

Detta kapitel sammanfattar bedömningsmetoder och -resultat avseende de hydrogeologiska och hydrologiska effekterna av bortledning av grundvatten från slutförvarsanläggningen i Forsmark. Viktiga underlag utgörs av den omfattande platsundersökningen och de resulterande konceptuella beskrivningarna /Follin 2008, Johansson 2008, Lindborg 2008, SKB 2008a/. Två olika modelleringsverktyg (vattenflödesmodellerna MIKE SHE /Mårtensson och Gustafsson 2010/ och DarcyTools /Svensson och Follin 2010/) har använts för att stödja och illustrera prognoserna. En orsak till att två olika flödesmodeller använts är att det är svårt att i en och samma modell hantera hela slutförvarsanläggningen, berget och förhållandena nära markytan i detalj. Både MIKE SHE (bilaga 4) och DarcyTools (bilaga 5) är kvalificerade och utprovade modelleringsverktyg för att prognostisera hydrogeologiska och hydrologiska effekter av grundvattenbortledning.

I detta sammanhang har främst resultat från MIKE SHE-modellen använts som stöd och för att illustrera grundvattenbortledningens effekter. Detta motiveras bland annat av att MIKE SHE i mer detalj kan beskriva egenskaper och processer nära och på markytan, det vill säga inom den del av systemet där konsekvenser kan uppstå för miljö och hälsa. Resultaten från DarcyTools-modellen har i första hand använts för att stämma av att MOUSE SHE-resultaten är rimliga, främst vad gäller inläckage av grundvatten till förvaret. Figur 5-1 visar MIKE SHE-modellens modellområde och den utformning av slutförvarsanläggningen (Forsmark Layout D2, version 1.0, april 2008) som



Figur 5-1. Översiktskarta som visar MIKE SHE-modellens modellområde, gränsen för det regionala modellområdet som används i platsbeskrivningen för Forsmark /SKB 2008a/, samt den utformning av slutförvarsanläggningen som använts i MIKE SHE.

använts i MIKE SHE-modellen och som återges på kartorna i detta kapitel. Modellberäkningarna utgår från en försvarsutformning med ett ”maximalt utnyttjande av platsen”, med en reserv på hela 27 % för potentiellt bortfall av kapselpositioner. Specifikt innehåller denna försvarsutformning fler deponeringstunnlar i slutförvarsanläggningens nordvästra och södra del, jämfört med den utformning som inkluderar en reserv på 13 % (kapitel 2).

Om inget annat sägs är MIKE SHE-resultaten hämtade från /Mårtensson och Gustafsson 2010/ och avser ett hypotetiskt fall med ett helt öppet förvar, det vill säga ett värsta fall som inte kommer att uppstå i verkligheten. Vidare redovisas resultaten i form av årsmedelvärden för typåret 2006 (se bilaga 4). I samtliga beräkningsfall där förvaret är inkluderat har den injekterade zonen ansatts en tjocklek på 5 m, vilket är ett rimligt antagande åtminstone för tunnlar på försvarsnivå /SKB 2009/.

5.2 Inläckage av grundvatten till slutförvarsanläggningen

5.2.1 Prognostiserat inläckage till slutförvarsanläggningen

Både MIKE SHE och DarcyTools har använts för att bedöma hur stort inläckaget av grundvatten blir till slutförvarsanläggningen. Enligt MIKE SHE-beräkningarna (tabell 5-1) skulle det totala inläckaget till ett helt öppet förvar bli i storleksordningen 15–50 l/s, där intervallet återspeglar olika värden på vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen. För tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s ger både MIKE SHE och DarcyTools ett inläckage på 31 l/s till ett helt öppet förvar.

Rampen, tunnarna och bergrummen inom centralområdet samt de fyra schakten mellan driftområdet och centralområdet är de delar av slutförvarsanläggningen som kommer att vara öppna under förvarets hela driftskede. 45–90 % av det totala inläckaget till rampen kommer att ske på de nivåer där rampen korsar bankningsplan (andelen minskar med K_{inj}). På dessa nivåer är också det specifika inläckaget (inläckage per längdenhet) avsevärt större jämfört med övriga delar av rampen och jämfört med undermarksutrymmen på försvarsnivå. Det beräknade inläckaget till de sex schakten är relativt litet, mellan 1 och 7 l/s (vilket motsvarar mellan 5 och 15 % av det totala inläckaget) beroende på K_{inj} . Denna andel ökar något med K_{inj} . För de tre tätningsfallen motsvarar det beräknade inläckaget till både rampen och samtliga sex schakt 20–60 % av det totala inläckaget till ett helt öppet förvar. Denna andel minskar med minskande värden på K_{inj} . Det beräknade inläckaget under de olika utbyggnadsstegen presenteras i avsnitt 5.2.2.

Enligt beräkningarna beror alltså det totala inläckaget och dess fördelning på olika delar av förvaret på vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen, K_{inj} . Sett till det totala inläckaget till förvaret kommer mellan 40 % och 80 % av inläckaget att ske på försvarsnivå. Enligt beräkningarna ökar denna andel för lägre värden på K_{inj} . Enligt /Gustafsson et al. 2009/ uppvisar det beräknade inläckaget endast små variationer (mindre än 1 l/s) under det studerade året. Beräkningarna visar att inläckaget är något större under perioder på året med hög nederbörd och/eller snösmältning, främst i de övre delarna av ramp och schakt.

Tabell 5-1. MIKE SHE-beräknat inläckage av grundvatten för olika värden på den injekterade zonen vattengenomsläpplighet, K_{inj} . Beräkningarna avser ett hypotetiskt fall med hela förvaret öppet samtidigt.

K_{inj} (m/s)	Beräknat inläckage					
	l/s			m ³ /år		
	Ramp	Schakt	Tunnelsystem	Ramp	Schakt	Tunnelsystem
10^{-7}	21,3	7,2	18,9	$6,72 \cdot 10^5$	$2,27 \cdot 10^5$	$5,96 \cdot 10^5$
10^{-8}	9,3	3,2	18,0	$2,93 \cdot 10^5$	$1,01 \cdot 10^5$	$5,68 \cdot 10^5$
10^{-9}	2,5	0,8	12,2	$7,88 \cdot 10^4$	$2,52 \cdot 10^4$	$3,85 \cdot 10^5$

5.2.2 Inläckage under olika utbyggnadssteg

I flödesmodelleringen måste av praktiska skäl förvarets successiva utbyggnad beskrivas som diskreta ”utbyggnadssteg”. De utbyggnadssteg som diskuteras här är därför en förenkling av den verkliga utbyggnaden av förvarsområdet. Tabell 5-2 redovisar det MIKE SHE-beräknade inläckaget under uppförandeskedet (”utbyggnadssteg 0”) och ett av de tre utbyggnadsstegen under förvarets driftskede (utbyggnadssteg 3). För uppförandeskedet redovisas resultat för två tätningsfall ($K_{inj} = 10^{-7}$ och 10^{-8} m/s) och för utbyggnadssteg 3 visas resultat för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s. Uppförandeskedet har definierats på så sätt att de öppna förvarsdelarna inkluderar rampen, de fyra schakten mellan driftområdet och centralområdet, samt tunnlar och bergrummen inom centralområdet. Utbyggnadssteg 3 är definierat på så sätt att även de två yttre ventilationsschakten, samtliga transporttunnlar samt stam- och deponeringstunnlar i det östra deponeringsområdet är öppna.

Tabell 5-2 visar att inläckaget kommer att bli mindre under uppförande- och driftskedena jämfört med ett helt öppet förvar. Det beräknade inläckaget under uppförandeskedet är 40–60 % av inläckaget för det hypotetiska fallet med ett helt öppet förvar. Motsvarande andel för utbyggnadssteg 3 är 90 %. Som jämförelse kan nämnas att DarcyTools-beräkningarna /Svensson och Follin 2010/ ger ett inläckage på 8–51 l/s, beroende på utbyggnadssteg och tätningsfall. För tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s prognostiserar DarcyTools-modellen ett inläckage som är i intervallet 17 l/s (utbyggnadssteg 1) till 28 l/s (utbyggnadssteg 3), vilket motsvarar 50–90 % av inläckaget till ett helt öppet förvar. För utbyggnadssteg 3 och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s ger DarcyTools-modellen ett inläckage på 28 l/s, vilket är i god överensstämmelse med motsvarande MIKE SHE-resultat.

Som en annan jämförelse kan det noteras att analytiska beräkningar /SKB 2009/ ger ett inläckage under utbyggnadssteg 3 som är i storleksordningen 10–15 l/s med K_{inj} i intervallet 10^{-9} till 10^{-8} m/s. Sammanfattningsvis kan det alltså konstateras att MIKE SHE och DarcyTools prognostiserar ett inläckage till slutförvarsanläggningen som är mellan 10–50 l/s, beroende på vilka delar av förvaret som i modellerna antas vara öppna samtidigt samt vattengenomsläpligheten i den injicerade zonen.

Ovanstående jämförelser visar att antagandet att alla deponeringsområdena är öppna samtidigt ger en överskattning av inläckaget av grundvatten till förvaret. Det är dock inga större skillnader mellan det prognostiserade inläckaget till ett helt öppet förvar och till förvaret under de olika utbyggnadsstegen, vilket innebär att antagandet är på den säkra sidan men inte orimligt konservativt. I MIKE SHE- och DarcyTools-modellerna antas även att alla deponeringstunnlar är öppna samtidigt. Detta gäller både fallet med ett helt öppet förvar (tabell 5-1) och i de olika utbyggnadsstegen (tabell 5-2). Deponeringstunnlarna utgör en dominerande andel av den totala längden av alla tunnlar på förvarsnivå. Både den modellering som utförts med MIKE SHE och den med DarcyTools visar dock att inläckaget till deponeringstunnlarna utgör en relativt liten andel av det totala inläckaget under de olika utbyggnadsstegen. Med MIKE SHE erhålls för ett hypotetiskt fall med ett helt öppet förvar utan stam- och deponeringstunnlar ett inläckage på 22,1 l/s för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s. Detta är drygt 70 % av inläckaget till ett helt öppet förvar (30,5 l/s). Enligt beräkningsexemplet utgör inläckaget till samtliga stam- och deponeringstunnlar endast en fjärdedel av det totala inläckaget till hela förvaret.

Tabell 5-2. MIKE SHE-beräknat inläckage till förvaret under uppförandeskedet och utbyggnadssteg 3.

Utbyggnadssteg	K_{inj} (m/s)	Beräknat inläckage					
		l/s			m ³ /år		
		Ramp	Schakt	Tunnelsystem	Ramp	Schakt	Tunnelsystem
Uppförandeskede	10^{-7}	23,6	3,9	0	$7,44 \cdot 10^5$	$1,23 \cdot 10^5$	0
	10^{-8}	10,2	1,3	0	$3,22 \cdot 10^5$	$4,10 \cdot 10^4$	0
Utbyggnadssteg 3	10^{-8}	9,6	3,3	14,9	$3,03 \cdot 10^5$	$1,04 \cdot 10^5$	$4,70 \cdot 10^5$

Modellberäkningarna visar alltså att den största delen av inläckaget på förvarsnivå sker till de kringgärdande transporttunnlarna, som fungerar som ett slags bur som skärmar av grundvattenflödet in mot deponeringstunnlarna. Motsvarande slutsatser drogs även i en generisk förstudie kring metoder att modellera inläckaget till en anläggning av aktuell typ /Painter och Sun 2005/. Konkret innebär detta att antalet deponeringstunnlar som är öppna samtidigt inom ett enskilt deponeringsområde endast bör ha liten inverkan på inläckaget till förvaret, och inte behöver respresenteras i detalj i flödesmodelleringen.

Som nämnts tidigare har SKB definierat inläckagekrav som är kopplade till bland annat stabilitet i återfyllnadsmaterial och buffert /SKB 2007/. Dessa krav är formulerade i termer av maximalt specifikt inläckage, det vill säga tillåtet inläckage per tunnellängd, schaktlängd och liknande. Exempelvis begränsas det maximalt tillåtna inläckaget till 10 l/minut per 100 m tunnel- eller schaktlängd till rampen, schakten samt transport- och stamtunnlarna. Motsvarande krav för deponeringstunnlarna är 1,7 l/minut per 100 m tunnellängd. Med vissa förenklade antaganden kan inläckagekraven räknas om till ett totalt inläckage, för en översiktlig jämförelse med modellberäknade inläckage.

Med de sammanlagda längderna för rampen, tunnlar och schakten motsvarar inläckagekraven ett totalt inläckage på 45 l/s till ett helt öppet förvar, om man exkluderar tunnlar och bergrummen i centralområdet samt deponeringshålen. En jämförelse med tabell 5-1 visar att inläckagekraven motsvarar tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Med samma definition av uppförandeskedet respektive utbyggnadssteg 3 som används i MIKE SHE-modelleringen (tabell 5-2) innebär de krav som anges i /SKB 2007/ ett totalt inläckage på 11 l/s respektive 29 l/s (om centralområdet exkluderas). Dessa inläckage motsvarar ungefär tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s i tabell 5-2. De inläckagekrav som anges i /SKB 2007/ motsvarar alltså totala inläckage som är jämförbara med MIKE SHE-beräknade inläckage för K_{inj} i intervallet 10^{-8} – 10^{-7} m/s.

5.2.3 Erfarenheter från andra undermarksanläggningar i berg

Prognosernas rimlighet kan bedömas genom erfarenheter från uppmätta inläckage till andra undermarksanläggningar i berg. /Axelsson och Follin 2000/ har gjort en sammanställning av uppmätta inläckage till bland annat ett antal svenska gruvor. De gjorde en uppdelning på undermarksanläggningar i berg med låg respektive hög genomsnittlig vattengenomsläpplighet. Den förra kategorin är mest relevant eftersom förvaret utformats bland annat i syfte att undvika vattengenomsläppliga sprickzoner i berget.

Tabell 5-3 sammanfattar ungefärliga värden på djup, uppmätta inläckage samt bergets genomsnittliga vattengenomsläpplighet vid undermarksanläggningar i berg med låg vattensläpplighet. Uppgifterna var aktuella då de togs fram, och i vissa fall kan förhållandena ha ändrats jämfört med vad som anges i tabellen. Bland annat visar erfarenheter från många undermarksanläggningar att inläckaget i regel avtar med tiden. Till exempel visar fleråriga inläckagemätningar i SKB:s anläggning under ön Äspö i Oskarshamns kommun /Hartley et al. 2007/ att inläckaget av grundvatten successivt avtagit sedan anläggningen uppfördes.

Sammanställningen visar att uppmätta inläckage varierar inom vida intervall, men att det inläckage som beräknats med MIKE SHE och DarcyTools (10–50 l/s) är i samma storleksordning med det som uppmätts vid liknande, befintliga undermarksanläggningar. Bergets genomsnittliga vattengenomsläpplighet som anges i tabell 5-3 kan delvis vara missvisande, eftersom man kan få relativt stora inläckage vid kontakt mellan en undermarksanläggning och en eller ett fåtal enskilda högkonduktiva zoner i berget. I regel är det stora variationer i bergets vattengenomsläpplighet mellan olika delar av berget, även för ”närliggande” bergsvolymer. I sammanställningen ovan beaktas heller inte eventuella tätningsåtgärder som gjorts vid de olika anläggningarna. En generell slutsats från erfarenhetssammanställningen är att inläckaget per enhetsvolym generellt är större till en tunnel än till ett bergrum, eftersom en tunnel har större kontaktyta mot berget.

Tabell 5-3. Uppmätta inläckage av grundvatten till undermarksanläggningar i berg med låg genomsnittlig vattengenomsläpplighet.

Plats	Djup (m)	Inläckage (l/s)	Bergets genomsnittliga vattengenomsläpplighet (m/s)
¹ SFR (Forsmark)	140	6	–
Gruvor:			
Dannemora	620	7	0,7–1,6·10 ⁻⁸
Stripa	460	8	1,5–3,7·10 ⁻⁸
Saxberget	745	4	0,4–0,7·10 ⁻⁸
Kristineberg	1 210	15	0,7–1,0·10 ⁻⁸
Renström	900	10	0,8–1,2·10 ⁻⁸
Garpenberg	645	19	2,4–4,4·10 ⁻⁸
Kiruna	795	103	2,9–7,2·10 ⁻⁸
Grängesberg	690	75	3,7·10 ⁻⁸
Aitik (dagbrott)	170	72	3,5·10 ⁻⁸

¹Data från /Johansson 2008/. SFR har i /Axelsson och Follin 2000/ inte klassats enligt indelningen låg eller hög vattengenomsläpplighet. Anläggningen är medtagen i tabellen eftersom den är belägen nära den planerade slutförvarsanläggningen i Forsmark.

5.3 Grundvattenbortledningens effekter på grundvattennivåer i berg och jord

Både MIKE SHE och DarcyTools har använts för att bedöma grundvattenbortledningens effekter på grundvattennivåer i berg och jord. Redovisningen har här delats upp på sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg (avsnitt 5.3.1) och avsänkningen av grundvattenytan (avsnitt 5.3.2). Som framgår av avsnitt 3.2.2 är det viktigt att skilja på dessa två begrepp. Avsnitten 5.3.1–2 behandlar därför olika typer av påverkansområden i olika delar av systemet. Sänkning av tryckhöjder i berg har relevans för bland annat enskild vattenförsörjning från bergborrade brunnar, medan en avsänkning av grundvattenytan är en effekt inom den del av systemet där djur och växter lever. Trycksänkning i berg är en förutsättning för att grundvattenytan ska sänkas av. Påverkansområdet för avsänkningen kan dock vara avsevärt mindre jämfört med påverkansområdet för trycksänkningen, eftersom avsänkningen beror på bland annat tillgången på vatten nära markytan och kontakten mellan jord och berg.

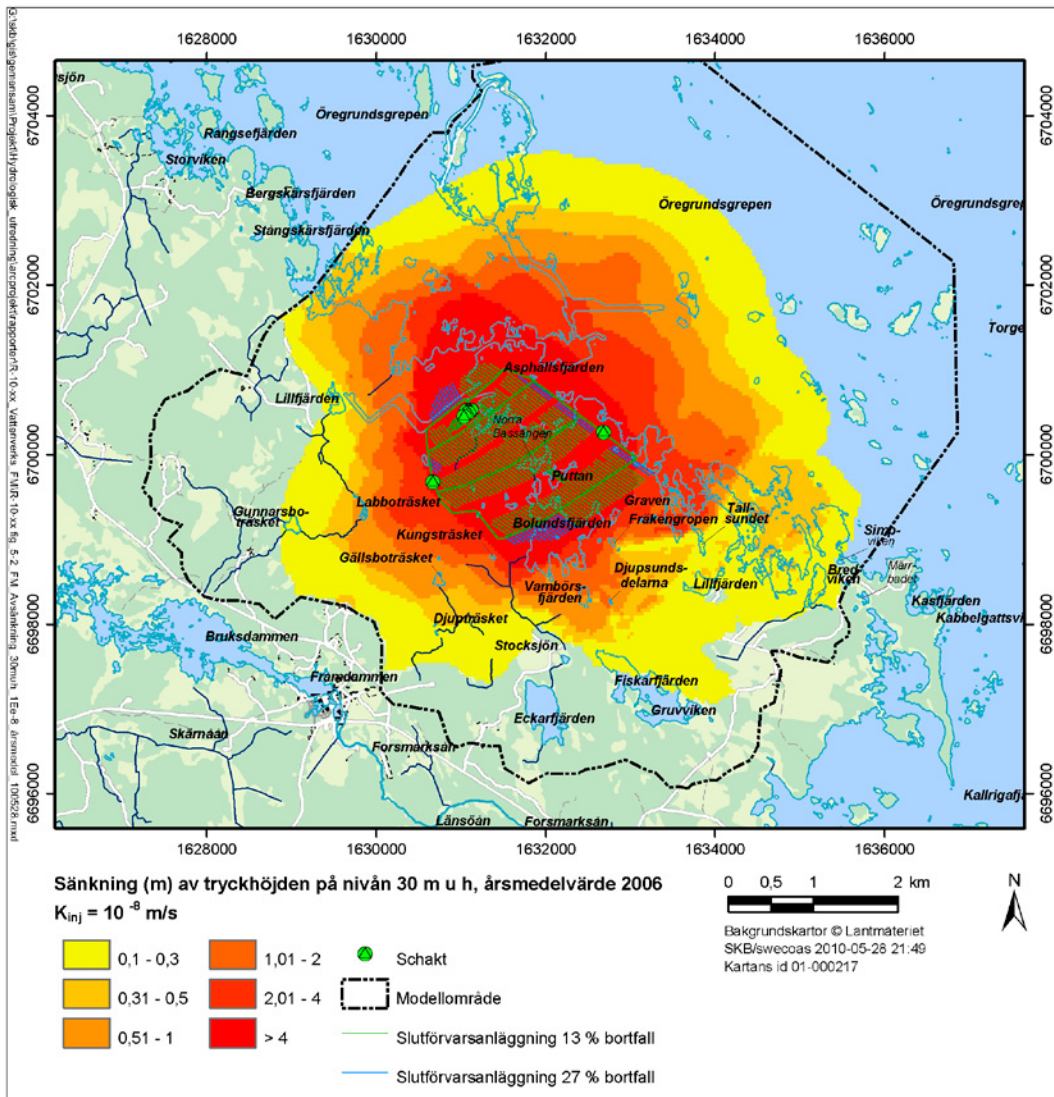
5.3.1 Sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg

I detta avsnitt redovisas sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg som skillnaden mellan grundvattnets beräknade tryckhöjder för opåverkade förhållanden (utan förvar) och motsvarande tryckhöjder med förvar. Påverkansområdet på en viss nivå i berget definieras här som det geografiska område inom vilket grundvattnets tryckhöjder i berg sänks på denna nivå.

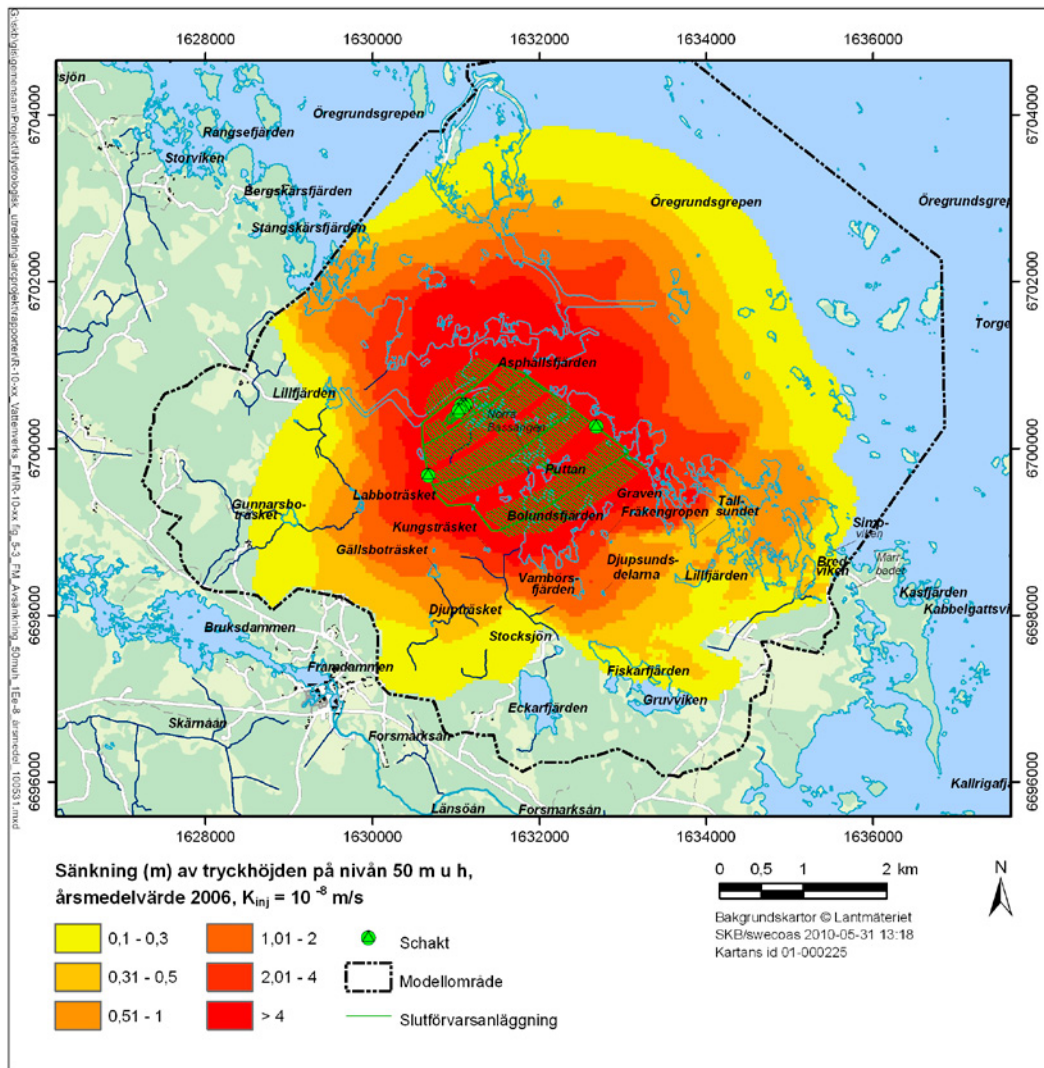
Figurerna 5-2 och 5-3 redovisar den MIKE SHE-beräknade sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivåerna –30 m ö h respektive –50 m ö h, för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s. Figur 5-4 visar sänkningen på nivån –50 m ö h för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Figur 5-2 illustrerar även skillnaden mellan den förvarsutformning som använts i MIKE SHE-beräkningarna, med 27 % reserv för potentiellt bortfall av kapselpositioner, och utformningen med en reserv på 13 % som visas i kapitel 2.

En jämförelse mellan figurerna 5-2 och 5-3 visar att storleken på sänkningen och det påverkade området ökar med djupet. Den höga horisontella vattengenomsläppligheten i bankningsplanen innebär att dessa ”sprider ut” trycksänkningen inom relativt stora områden kring förvaret. Om påverkansområdets gräns sätts vid en sänkning av tryckhöjden på 0,3 m, omfattar påverkansområdet på nivån –50 m ö h en yta på cirka 20, 27 och 30 km² för tätningsfallen $K_{inj} = 10^{-9}$, 10^{-8} respektive 10^{-7} m/s.

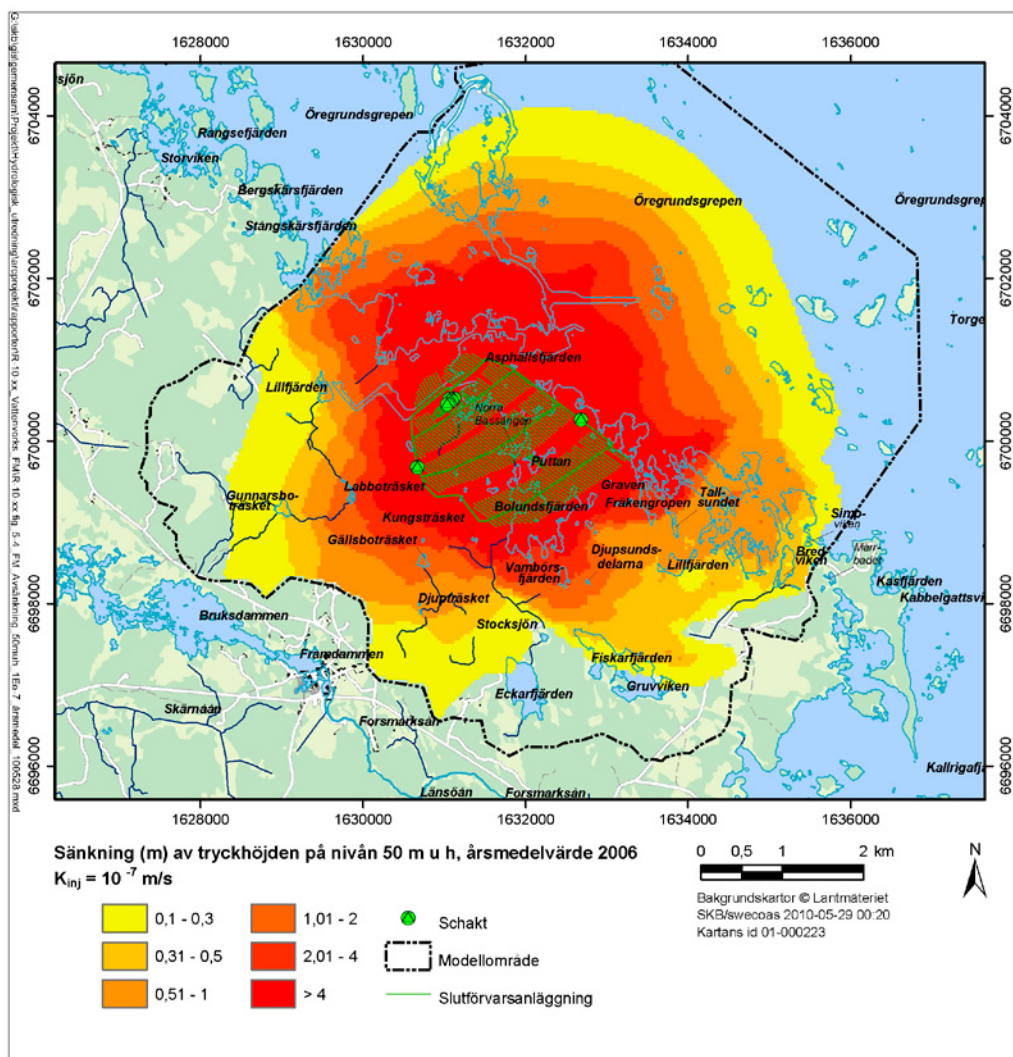
En utvärdering har även gjorts av sänkningen på nivån –50 m ö h under de utbyggnadssteg som beskrivs i avsnitt 5.2.2. Om påverkansområdets gräns sätts vid en sänkning av tryckhöjden på 0,3 m, omfattar påverkansområdet under uppförandeskedet en yta på 17–20 km² för intervallet $K_{inj} = 10^{-8}$ – 10^{-7} m/s. Under det tredje utbyggnadssteget omfattar påverkansområdet en yta på 26 km² för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s. En jämförelse med det hypotetiska fallet med ett helt öppet förvar visar att påverkansområdets storlek är cirka 30 % mindre under uppförandeskedet, men ungefär lika stort under det tredje utbyggnadssteget.



Figur 5-2. Sänkning (m) av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivån $-30 \text{ m } \ddot{o} \text{ h}$ (30 meter under havet, $m \text{ u } h$), $K_{inj} = 10^{-8} \text{ m/s}$.



Figur 5-3. Sänkning (m) av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivån -50 m ö h, $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s.



Figur 5-4. Sänkning (m) av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivån -50 m ö h, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

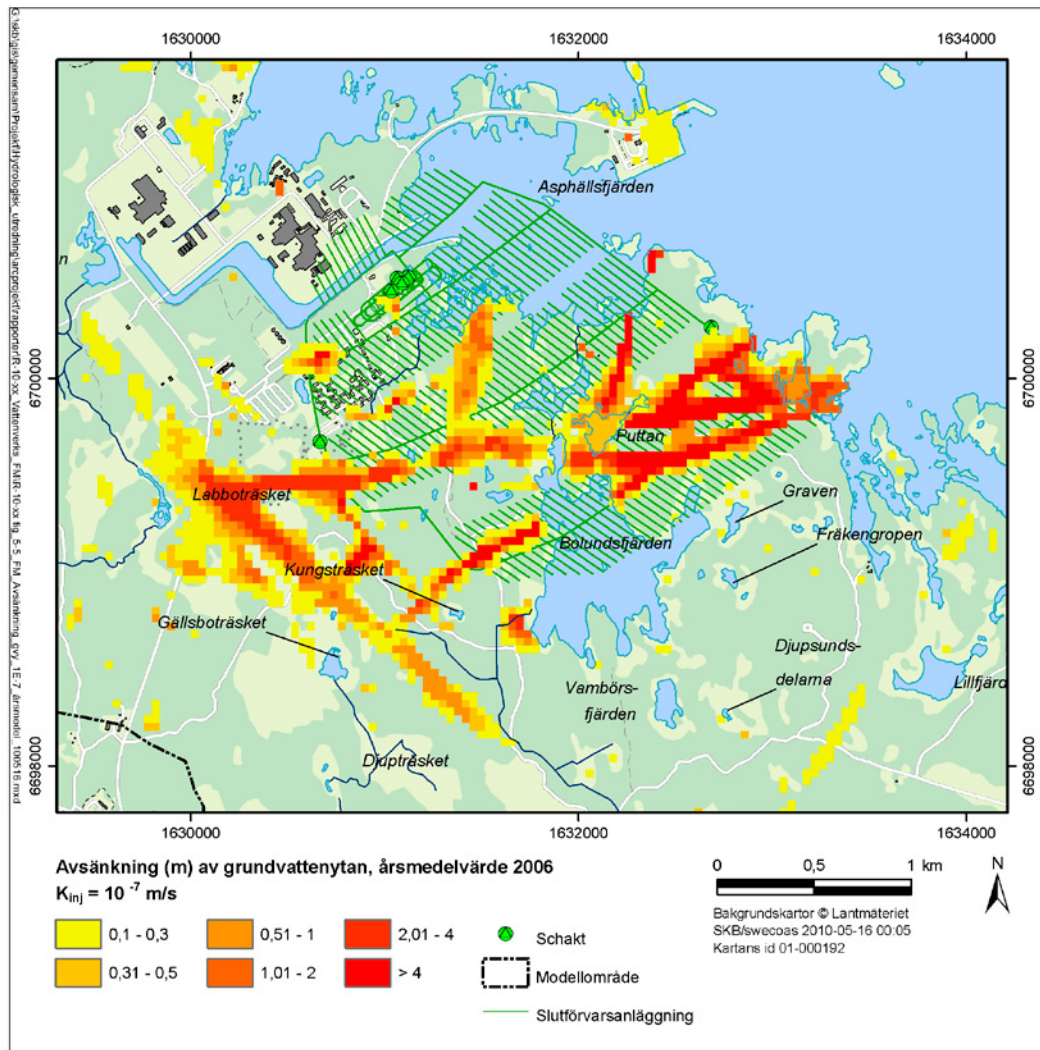
5.3.2 Avsänkning av grundvattenytan

I detta avsnitt definieras avsänkningen av grundvattenytan som skillnaden mellan grundvattenytans nivå för opåverkade förhållanden (utan förvar) och motsvarande nivå med förvar.

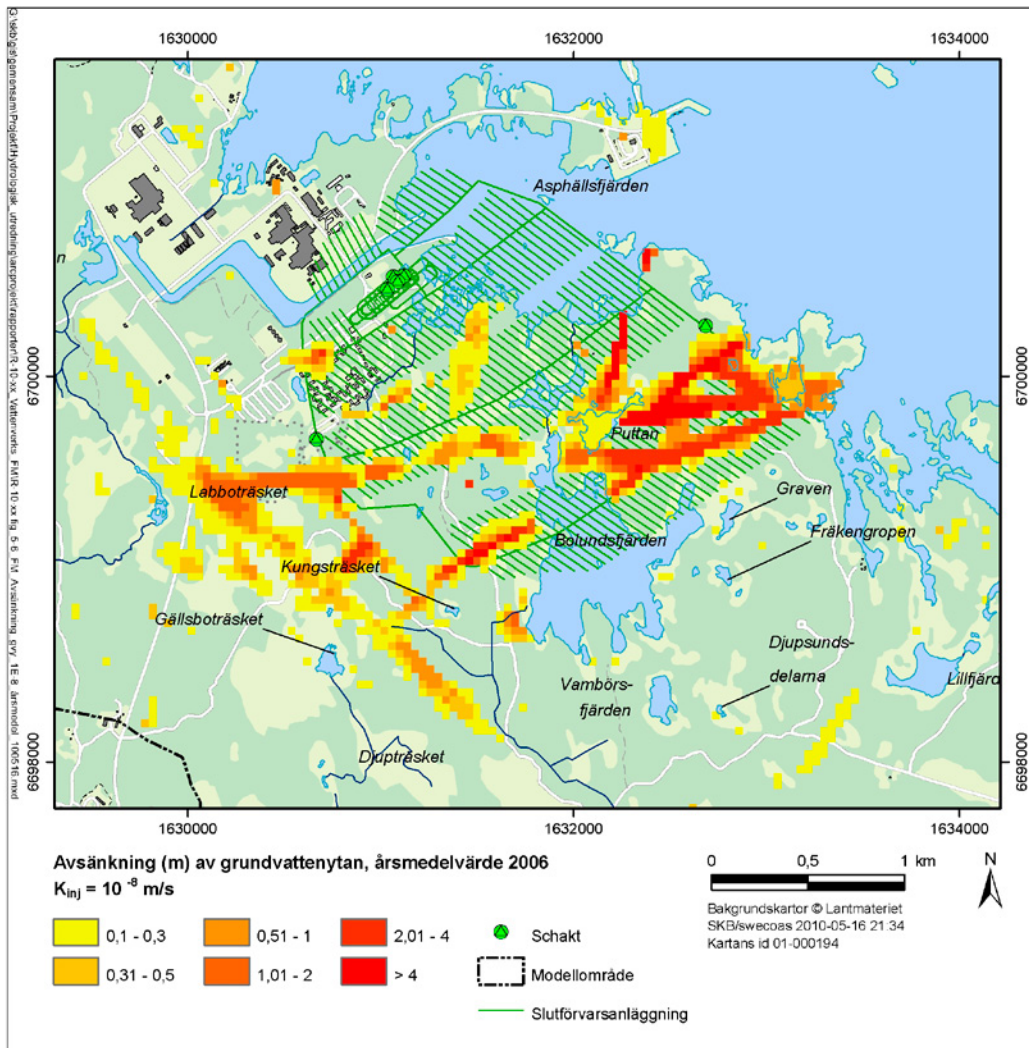
Inverkan av den injekterade zonen vattengenomsläpplighet

Figurena 5-5 till 5-7 visar den MIKE SHE-beräknade avsänkningen för tätningsfallen $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s (figur 5-5), $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s (figur 5-6) och $K_{inj} = 10^{-9}$ m/s (figur 5-7). Den modellberäknade storleken på påverkansområdet för dessa tre tätningsfall sammanfattas i tabell 5-4. Modelleringsresultaten redovisas även i bilaga 7 i form av tvärprofiler över modellberäknade nivåer för grundvattenytan för de tre tätningsfallen.

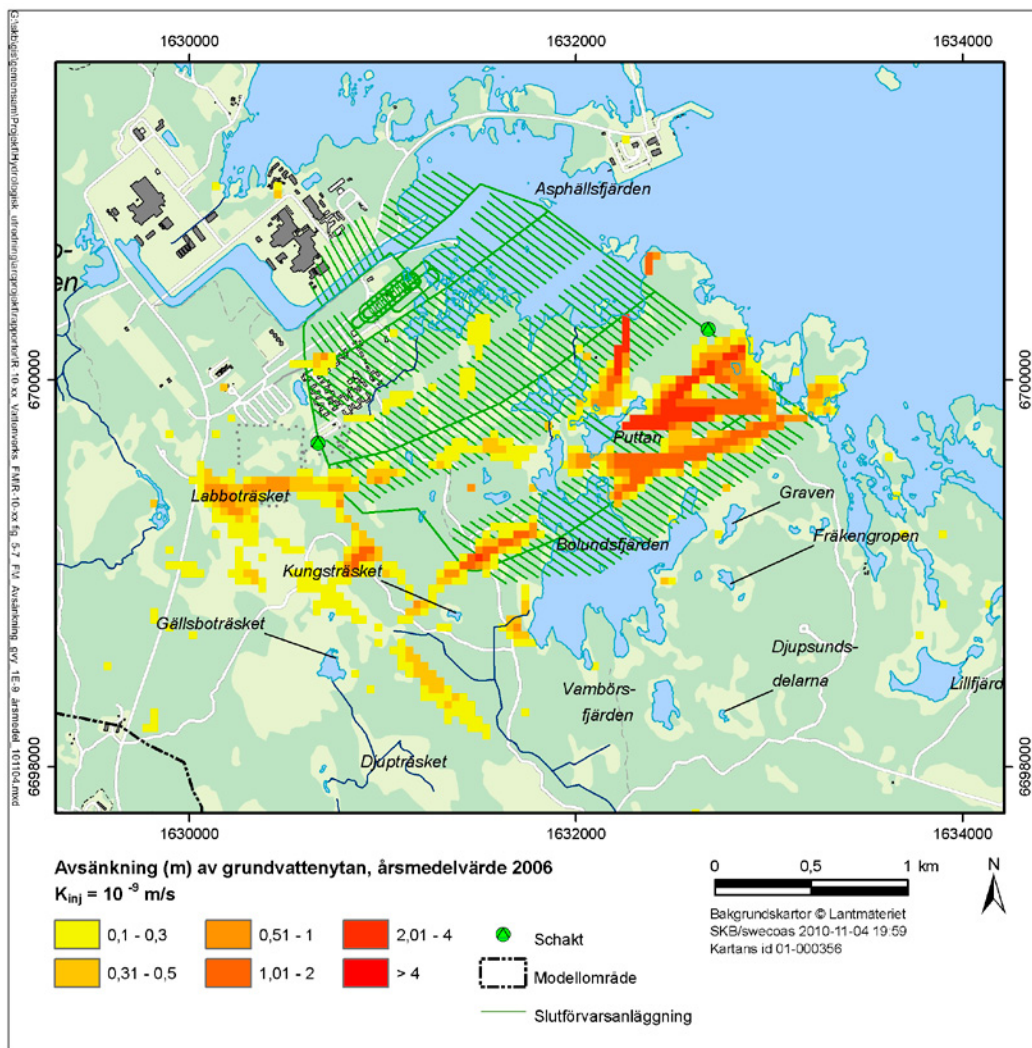
För alla de tre tätningsfallen erhålls en avsänkning av grundvattenytan inom dels ett antal ”stråk” i öst-västlig och nord-sydlig riktning ovan förvaret, dels inom områden kring kylvattenkanalen. Enligt figurerna är påverkansområdets form likartad, oavsett den injekterade zonen vattengenomsläpplighet. Påverkansområdet är dock något mindre med en tätare injekterad zon. I tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s och med en avsänkning på 0,3 m vid påverkansområdets gräns omfattar påverkansområdet en yta på cirka 1 km². Storleken är 1,4 km² för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s och ungefär 0,6 km² för fallet $K_{inj} = 10^{-9}$ m/s. Med en avsänkingsgräns på 0,1 m är påverkansområdets storlek i intervallet 1,2–2,5 km² för de olika tätningsfallen.



Figur 5-5. Avsänkning (m) av grundvattenytan, $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$.



Figur 5-6. Avsänkning (m) av grundvattenytan, $K_{inj} = 10^{-8} \text{ m/s}$.



Figur 5-7. Avsänkning (m) av grundvattenytan, $K_{inj} = 10^{-9}$ m/s.

Tabell 5-4. Påverkansområde (km²) för grundvattenytans avsänkning för ett hypotetiskt fall med hela förvaret öppet samtidigt. Påverkansområdets storlek för en viss avsänkingsgräns avser storleken på det område där avsänkningen överstiger den gränsen.

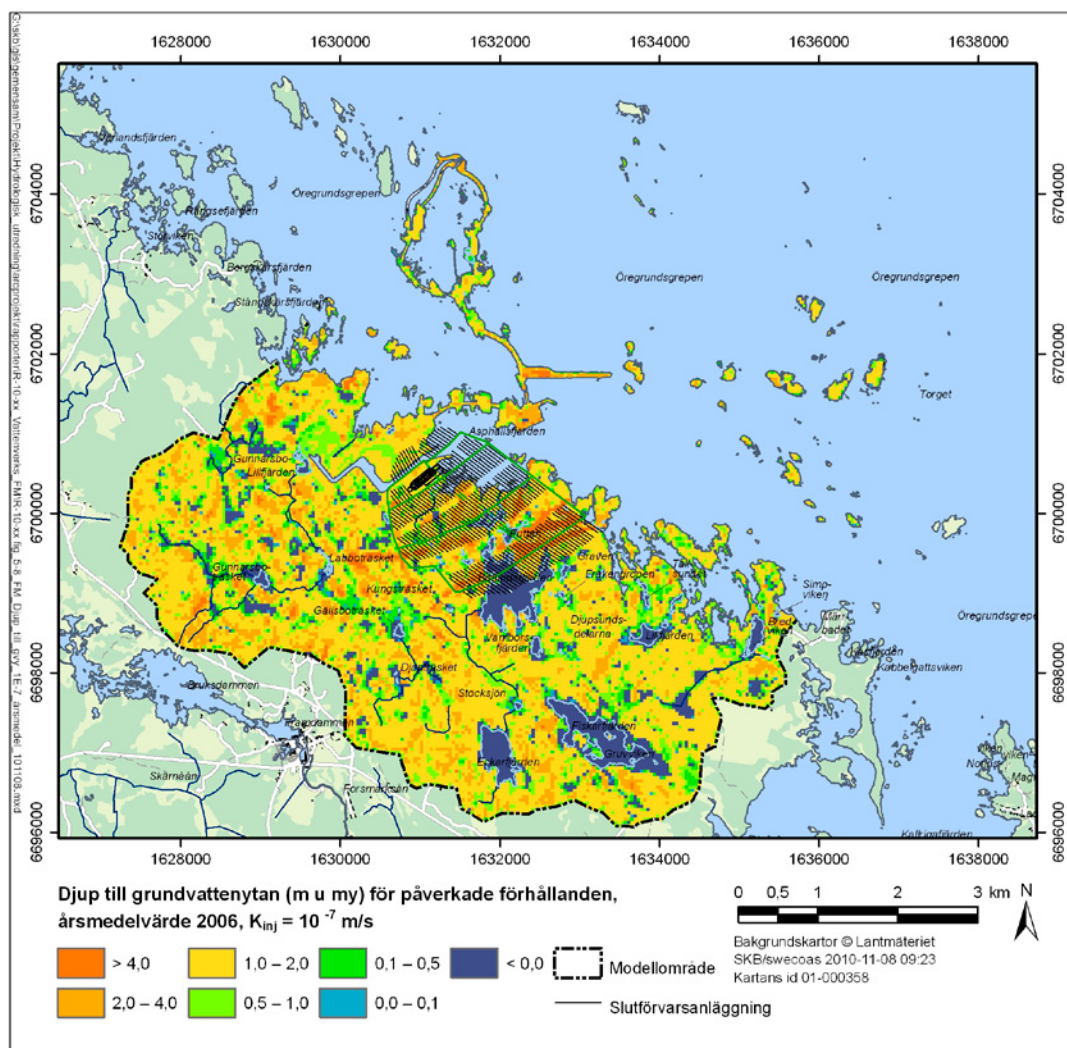
K_{inj} (m/s)	Max. grundvatten-avsänkning (m)	Påverkansområdets storlek (km ²)			
		Avsänkingsgräns 0,1 m	Avsänkingsgräns 0,3 m	Avsänkingsgräns 0,5 m	Avsänkingsgräns 1 m
10^{-7}	16,5	2,45	1,38	1,05	0,69
10^{-8}	9,2	1,96	1,05	0,72	0,47
10^{-9}	3,9	1,20	0,64	0,40	0,24

Som även illustreras i bilaga 7 kan formen på påverkansområdet förklaras genom den hydrogeologiska beskrivningen av bergets egenskaper i Forsmark. Som nämnts tidigare sprids trycksänkningen inom bankningsplanen i den övre delen av berget. Denna trycksänkning kommuniceras vertikalt via brantstående sprickzoner med hög vattengenomsläpplighet, som ger en avsänkning av grundvattenytan främst inom de områden där sådana zoner har kontakt med jordlagren. MIKE SHE-resultaten visar alltså att påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning är avsevärt mindre än det område inom vilket tryckhöjderna i berget sänks. Man kan notera att avsänkningen enligt modellberäkningarna blir liten kring tillfarterna i driftområdet (ramp och schakt). Detta beror bland annat på att modellen inte innehåller några brantstående sprickzoner med hög vattengenomsläpplighet vid dessa tillfarter.

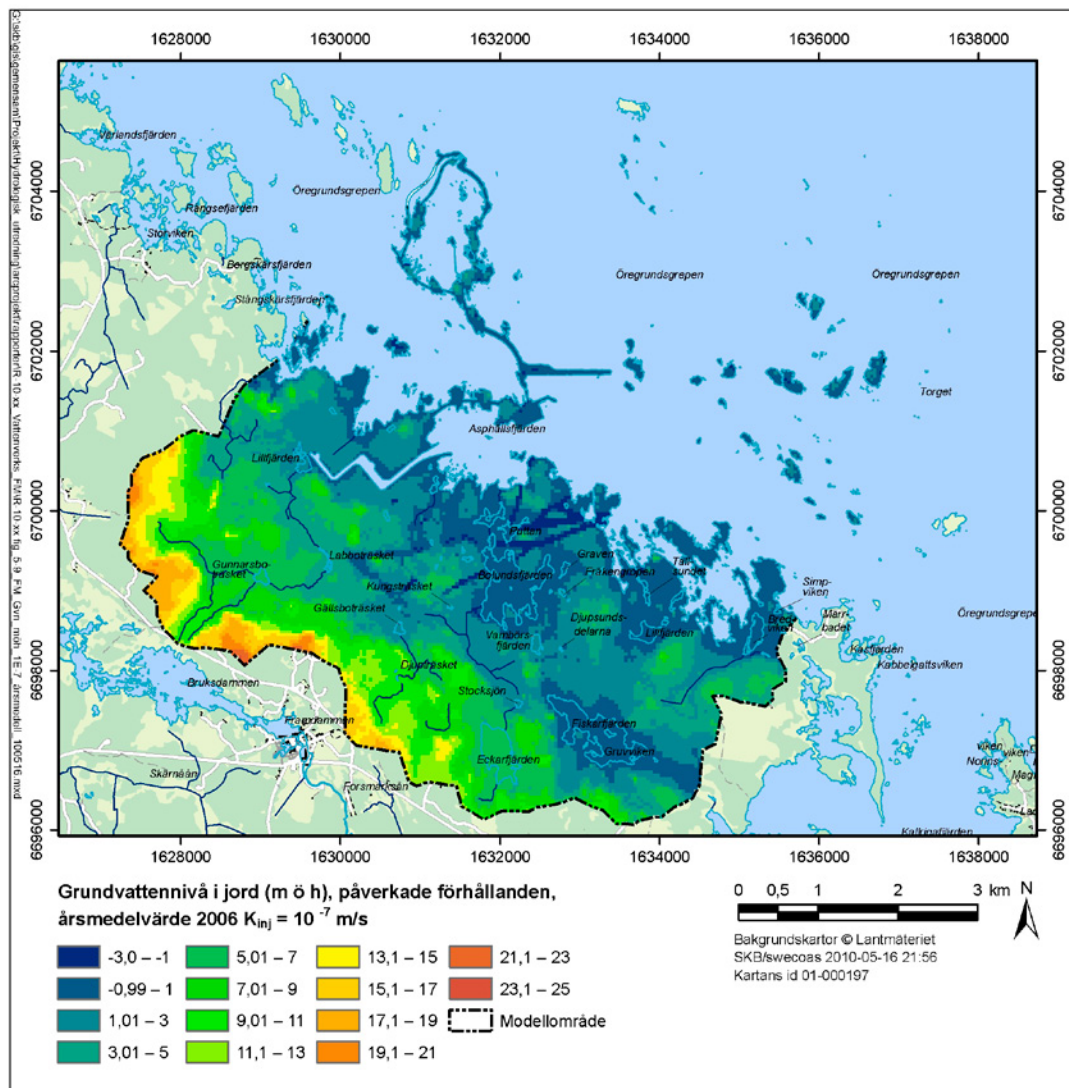
För tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s visar figurerna 5-8 och 5-9 grundvattenbortledningens effekter på grundvattenytans nivå, i figur 5-8 i form av grundvattenytans djup under markytan (meter under markytan; m u my) och i figur 5-9 grundvattenytans nivå (m ö h). Det är alltså samma MIKE SHE-beräkning som ligger bakom dessa figurer och figur 5-5, enbart sättet att redovisa resultaten skiljer. En jämförelse kan göras mellan figur 5-8 och motsvarande figur för opåverkade förhållanden (figur 4-7 i avsnitt 4.2.2). Inom påverkansområdet finns det områden som för opåverkade förhållanden har relativt måttligt djup till grundvattenytan. I vissa sådana områden innebär avsänkningen att djupet till grundvattenytan ökar till ett flertal meter. Motsvarande jämförelse mellan figur 5-9 och situationen utan förvar (figur 4-8 i avsnitt 4.2.2) visar att avsänkningen av grundvattenytan ger stråkformade lågområden av grundvattenytan inom påverkansområdet.

Påverkansområdets variationer under året

I Sverige varierar de processer som inverkar på grundvattenflöden och -nivåer kraftigt under året, vilket innebär att till exempel påverkansområdets utsträckning kan variera under året. Detta avsnitt illustrerar sådana inomårsvariationer och redogör för om årsmedelvärden ger ett tillräckligt stöd för en geografisk avgränsning av påverkansområdet. Figurerna 5-10 och 5-11 visar månadsmedelvärden för grundvattenytans avsänkning för två månader under typåret 2006 för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s. Liksom tidigare definieras avsänkningen som skillnaden mellan grundvattenytans nivå för opåverkade förhållanden (utan förvar) och påverkade förhållanden, här dock baserat på månadsmedelvärden.



Figur 5-8. Grundvattenytans djup under markytan, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

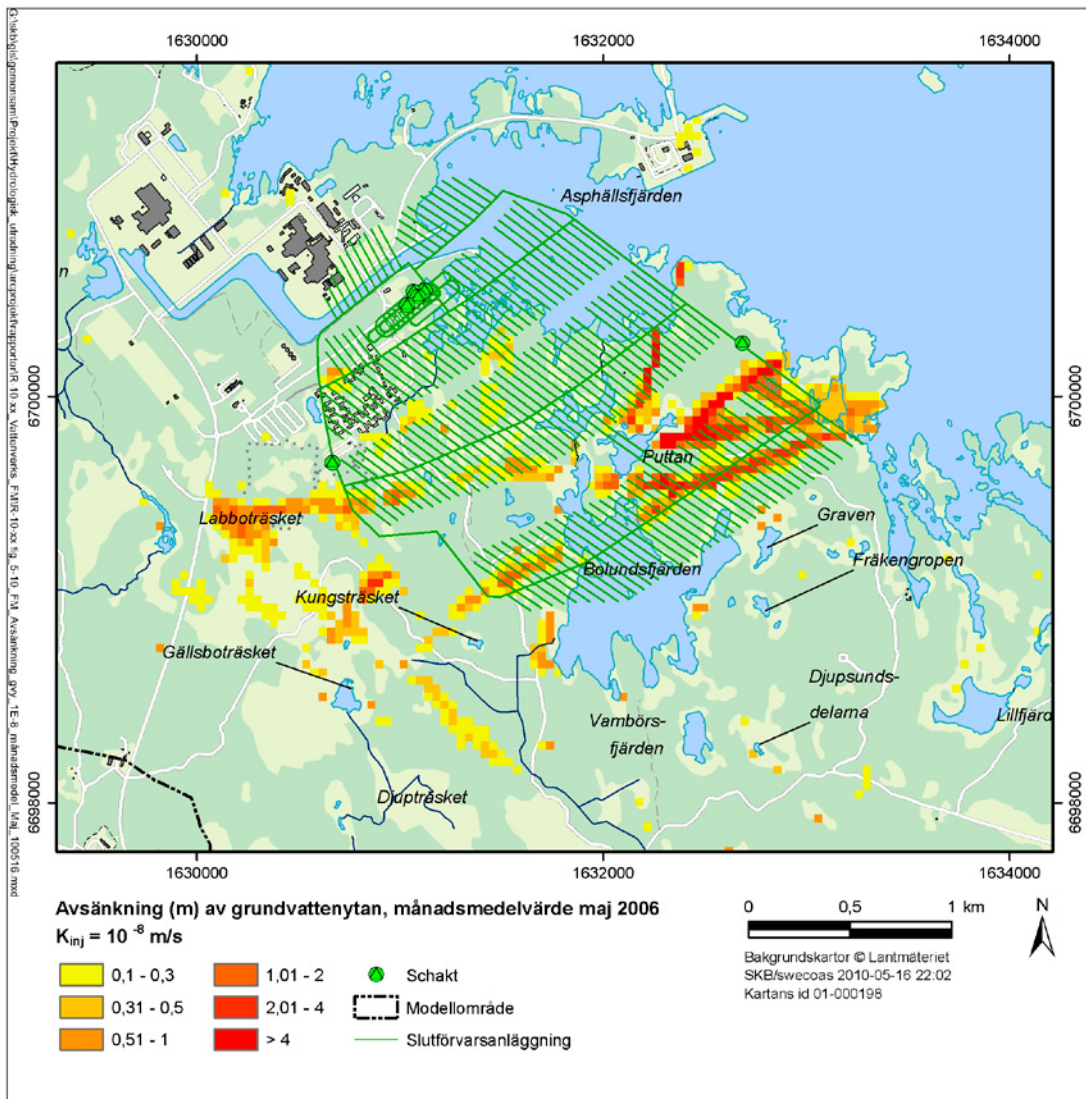


Figur 5-9. Grundvattennivå (m ö h) i jord, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

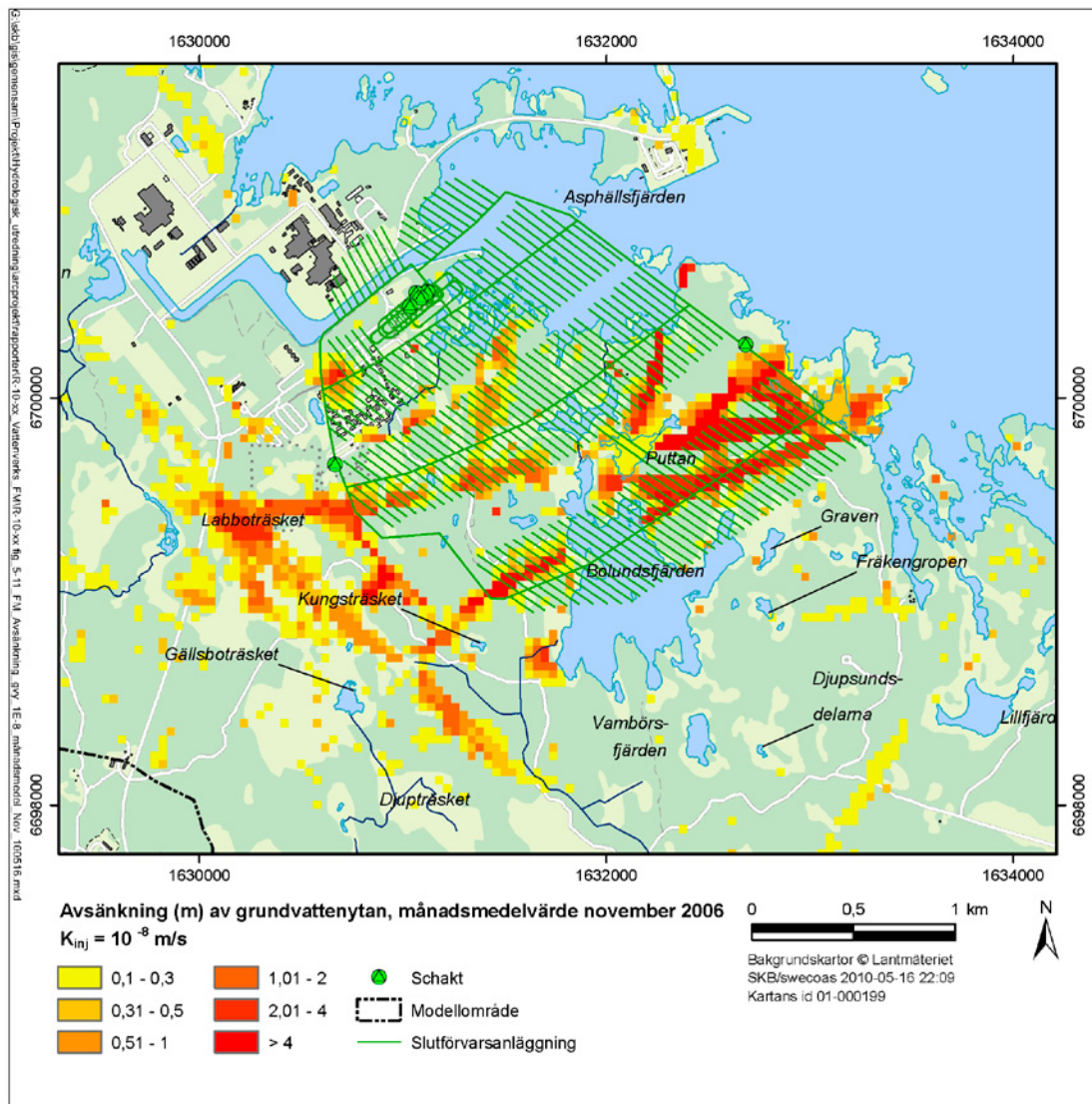
Figur 5-10 visar påverkansområdets utsträckning under en våtperiod med små djup till grundvattenytan (maj 2006) och figur 5-11 visar motsvarande område under en torrperiod (november 2006) med större djup till grundvattenytan. Tabell 5-5 redovisar resultat för samtliga månadsmedelvärden under typåret. Påverkansområdets storlek varierar under året i intervallet 0,8–1,4 km². Påverkansområdet är större under månaderna januari–april och september–december, och minst under maj–augusti. Den maximala avsänkningen uppvisar dock små variationer under året. Den mindre avsänkningen under sommarmånaderna kan förklaras med att denna period, även för opåverkade förhållanden, karaktäriseras av en hög evapotranspiration och därmed av förhållandevis stort djup till grundvattenytan.

Avsänkning av grundvattenytan under slutförvarsanläggningens olika utbyggnadssteg

Figureerna 5-12 och 5-13 visar MIKE SHE-beräknad avsänkning av grundvattenytan under uppförandeskedet (figur 5-12) och utbyggnadssteg 3 (figur 5-13). Som nämnts tidigare förutsätts under uppförandeskedet endast rampen, de fyra schakten mellan driftområdet och centralområdet samt berggrummen inom centralområdet vara öppna. Som en illustration av deponeringsområdenas begränsade inverkan på avsänkningen visar figur 5-14 den modellberäknade avsänkningen för ett hypotetiskt fall med ett helt öppet förvar, dock utan stam- och deponeringstunnlar. Beräkningarna är gjorda för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s. Enligt tabell 5-6 är påverkansområdet minst under uppförandeskedet och störst under utbyggnadssteg 3, motsvarande ungefär 40–70 % respektive 90 % av det modellberäknade påverkansområdet för det hypotetiska fallet med ett helt öppet förvar.



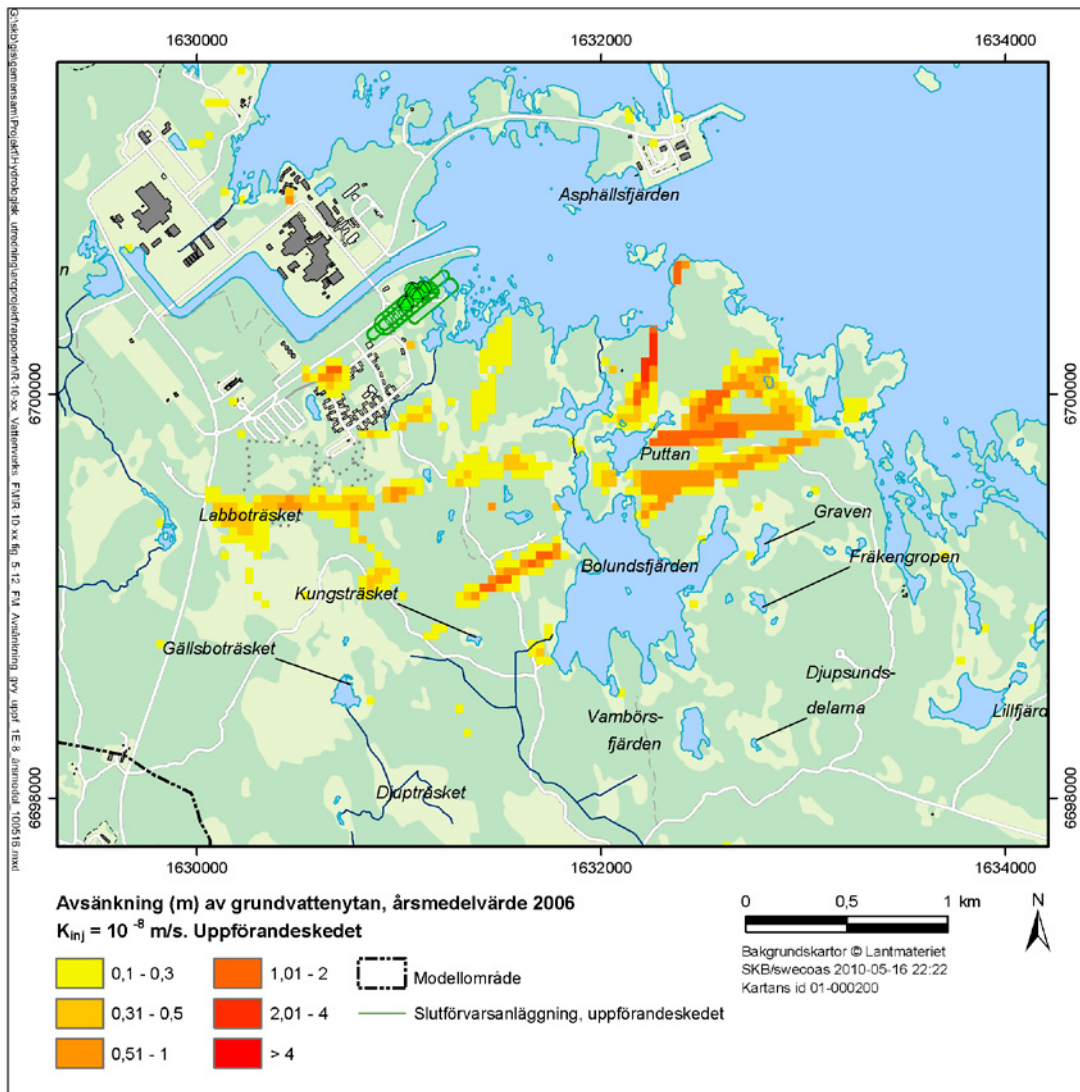
Figur 5-10. Månadsmedelvärde på grundvattenytans avsänkning under en våtperiod, $K_{inj} = 10^{-8} \text{ m/s}$.



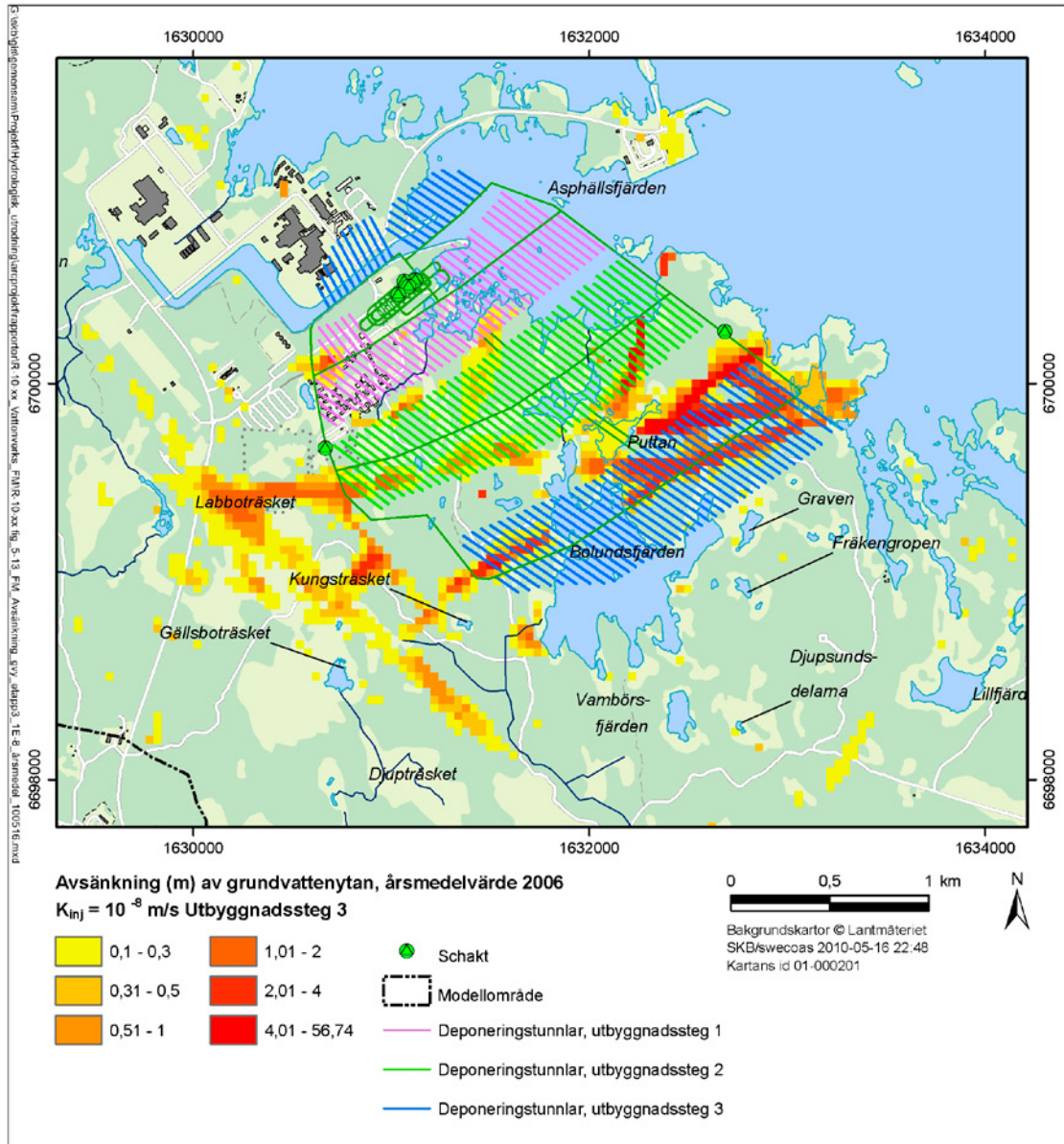
Figur 5-11. Månadsmedelvärde på grundvattenytans avsänkning under en torrperiod, $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s.

Tabell 5-5. Påverkansområde (km²) för grundvattenytans avsänkning baserat på månadsmedelvärden, $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s. Påverkansområdets storlek för en viss avsänkingsgräns avser storleken på det område där avsänkningen överstiger den gränsen.

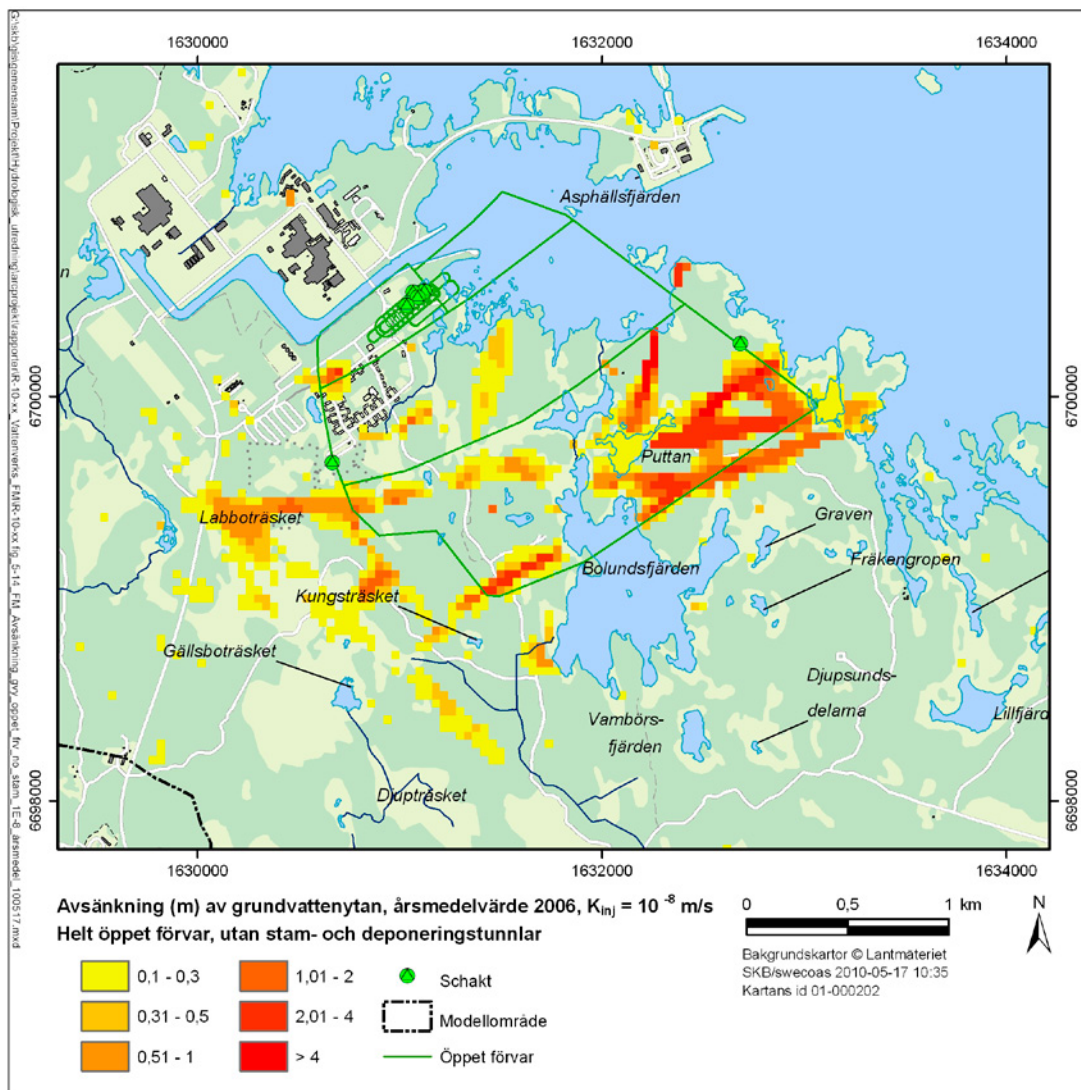
Månad	Max. grundvatten-avsänkning (m)	Avsänkingsgräns 0,3 m	Avsänkingsgräns 0,5 m	Avsänkingsgräns 1 m
Jan	9,38	1,03	0,68	0,43
Feb	9,36	0,97	0,64	0,40
Mar	9,37	1,02	0,69	0,43
Apr	9,49	0,94	0,64	0,40
Maj	9,14	0,70	0,47	0,24
Jun	8,86	0,83	0,56	0,31
Jul	8,86	0,80	0,56	0,35
Aug	8,97	0,92	0,68	0,41
Sep	9,15	1,11	0,82	0,51
Okt	9,19	1,34	0,98	0,61
Nov	9,40	1,39	1,00	0,64
Dec	9,82	1,29	0,94	0,57
Årsmedelvärde, 2006	9,17	1,05	0,72	0,47



Figur 5-12. Avsänkning (m) av grundvattenytan under uppförandeskedet, $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s.



Figur 5-13. Avsänkning (m) av grundvattenytan under utbyggnadssteg 3, $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s.



Figur 5-14. Avsänkning (m) av grundvattenytan för ett helt öppet förvar utan stam- och deponeringstunnlar, $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s.

Tabell 5-6. Påverkansområde (km²) för grundvattenytans avsänkning under uppförandeskedet och utbyggnadssteg 3. Som jämförelse redovisas även hypotetiska fall, dels utbyggnadssteg 3 utan transport- och stamtunnlar, dels ett helt öppet förvar. Modellberäkningarna avser tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s (för uppförandeskedet redovisas även resultat för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s). Påverkansområdets storlek för en viss avsänkingsgräns avser storleken på det område där avsänkning överstiger den gränsen.

Utbyggnadssteg	Avsänkingsgräns 0,1 m	Avsänkingsgräns 0,3 m	Avsänkingsgräns 0,5 m	Avsänkingsgräns 1 m
Uppförandeskedet				
$K_{inj} = 10^{-7}$ m/s	1,88	0,92	0,69	0,46
$K_{inj} = 10^{-8}$ m/s	0,93	0,45	0,25	0,08
Utbyggnadssteg 3	1,85	0,99	0,67	0,43
Helt öppet förvar, dock utan stam- och deponeringstunnlar (hypotetiskt fall)	1,49	0,76	0,55	0,32
Helt öppet förvar (hypotetiskt fall)	1,96	1,05	0,72	0,47

Påverkansområdets storlek under uppförande- och driftskedena bedöms således bli mindre än i fallet med ett helt öppet förvar, men påverkansområdets form är dock likartad under uppförandeskedet, utbyggnadssteg 3 och för det hypotetiska fallet. Man kan också notera att det endast är liten skillnad på påverkansområdets storlek mellan fallet med ett helt öppet förvar och det beräkningsfall där alla stam- och deponeringstunnlar tagits bort från modellen; det senare påverkansområdets storlek är drygt 70 % av det förra. Vad gäller grundvattenytans avsänkning är därför slutsatsen att de förenklande antaganden som görs i MIKE SHE- och DarcyTools-modellerna gällande de delar av förvaret som är öppna samtidigt är på den säkra sidan, men inte orimligt konservativa.

Påverkansområdets utveckling över tid

MIKE SHE-beräkningarna baseras på lokalt uppmätta meteorologiska data och havsnivådata från perioden 2005–2006, där de redovisade beräkningsresultaten som tidigare nämnts avser typåret 2006. Det kan vara befogat att undersöka om de redovisade prognoserna är realistiska i den meningen att påverkansområdet eventuellt inte helt har ställt in sig efter två år; det är tänkbart att avsänkning av grundvattenytan skulle fortsätta även efter en simuleringsperiod på två år. /Gustafsson et al. 2009/ undersökte detta genom MIKE SHE-beräkningar för en längre tidsperiod på åtta år, där perioden 2005–2006 upprepades tre gånger efter den första simuleringsperioden. Beräkningarna gjordes för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s.

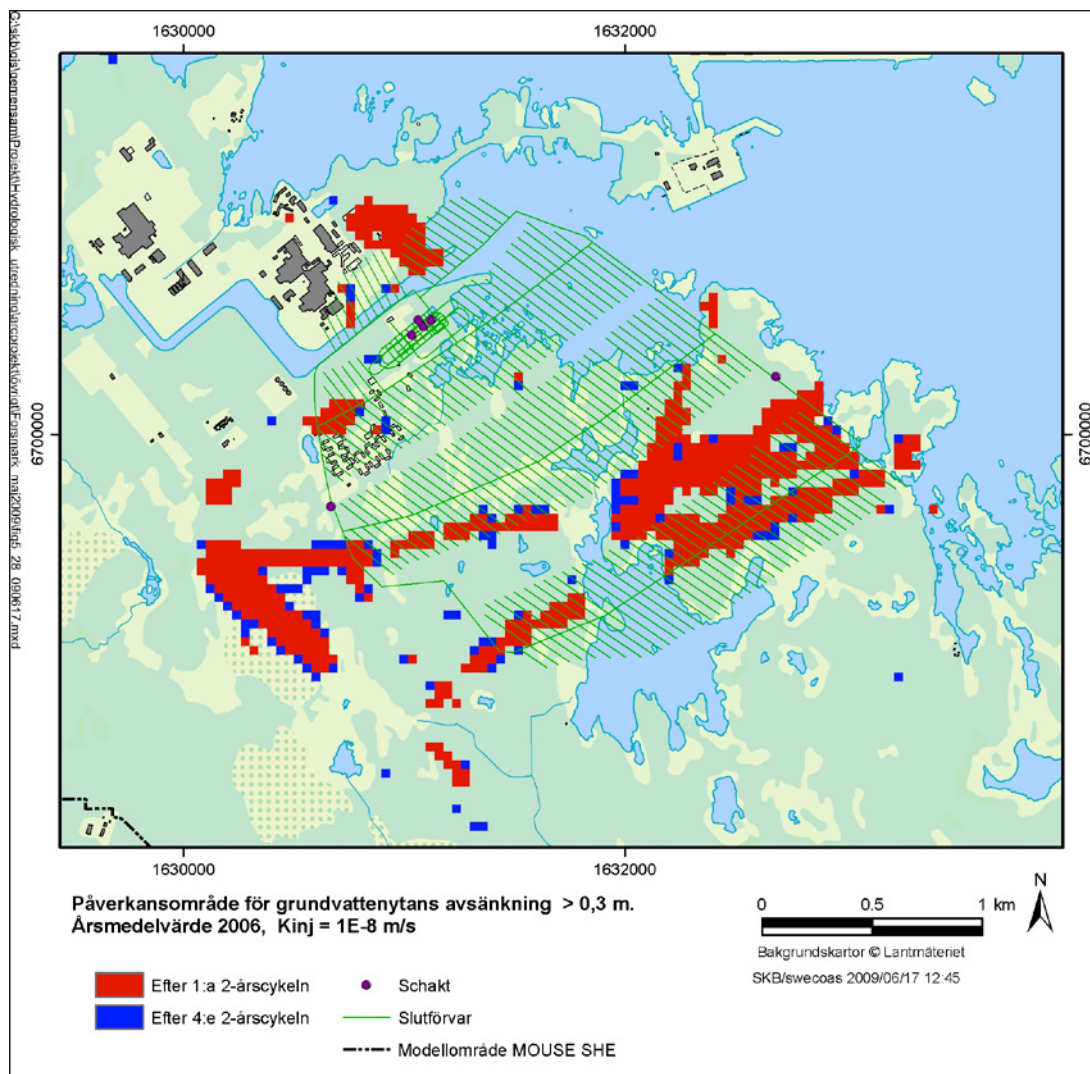
Resultaten visar att storleken på påverkansområdet är 13 %, 17 % respektive 18 % större efter den första, andra och tredje upprepningen, jämfört med den första tvåårsperioden. Efter den andra upprepningen (efter sex år) sker alltså endast mycket små förändringar av påverkansområdets storlek. Figur 5-15 illustrerar påverkansområdet efter den första respektive tredje upprepningen, det vill säga figuren visar hur mycket påverkansområdet utökas (de blåa områdena) om man låter modellberäkningen fortsätta ”några år till”. Utifrån figur 5-15 kan man dra slutsatsen att MIKE SHE-beräkningarna kan begränsas till en tidsperiod på två år och ändå anses realistiska.

5.3.3 Erfarenheter från andra undermarksanläggningar i berg

Det finns dokumentation från vissa undermarksanläggningar i berg avseende grundvattenavsänkning /Axelsson och Follin 2000/. Under byggnationen av Bolmentunneln avsänktes grundvattennivån i berg med cirka 1 m i den södra delen av tunneln och 5–16 m i den centrala och norra delen. Grundvattennivån i jord avsänktes endast lokalt ovanför tunneln, förutom längs en sprickzon i berg där grundvattenavsänkning observerades upp till 800 m från tunneln. Grundvattenavsänkning i jord var i regel mindre än 1 m, förutom i de lägre belägna områden där den övre delen av berget har relativt hög vattengenomsläpplighet. I dessa områden var avsänkning upp till 3 m. Ingen eller liten grundvattenavsänkning observerades i jordbrunnar i högre belägna moränområden. Från Bolmentunneln finns ingen dokumentation rörande konsekvenser för växtlighet, dock avsänktes vattennivån i myrar (belägna ovanför sprickzoner i berget) med 0,6–0,7 m upp till 200 m från tunneln.

För svenska gruvor har man i olika utredningar bedömt att hydrogeologiska effekter i form av sänkt grundvattennivå kan uppstå i områden på avstånd upp till 500–2 000 m från gruvan. För Juktans pumpkraftverk har man beräknat att det område inom vilket grundvattennivåerna kan ha sänkts är cirka 50 km². Bland annat har brunnar cirka två km från anläggningen uppvisat sänkt grundvattennivå. Vid Äspötunneln har man observerat en grundvattennivåavsänkning på några meter på stora djup i berget på den norra delen av ön. Den största observerade effekten är en sänkning av grundvattennivån på cirka 85 m direkt ovanför tunneln i den södra delen av Äspö.

Analyser av grundvattennivåer fram till år 2000 i samband med tunnelbygget genom Hallandsås visar en avsänkning av grundvattenytan längs tunnellen som i medel var 0,6 m och maximalt 3,5 m. Det ska dock betonas att det är stora skillnader mellan Hallandsås och Forsmark vad gäller de hydrogeologiska förhållandena i berget. Hallandsås är en så kallad urbergshorst (bergås) som är kraftigt påverkad av tektoniska processer. Berget är betydligt mer uppsprucket än normalt svenskt berg, och liknar bitvis sprick- och krosszoner. Berget är speciellt uppsprucket längs bergåsens kanter och det finns tre mäktiga krosszoner längs tunnellen.



Figur 5-15. Avsänkning (m) av grundvattenytan efter den första simuleringsperioden och efter den tredje upprepningen av randvillkoren för åren 2005–2006, $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s /Gustafsson et al. 2009/.

I sammanhanget kan också nämnas ett flerårigt forskningsprojekt, där man genom fältförsök bland annat studerade effekter på grundvattennivåer, vattenbalans och grundvattenkemi vid långtidspumpning (1999–2002) i ett bergborrhål på Äspö /Ericsson och Hultberg 2003/. En slutsats från fältförsöken var att de meteorologiska förhållandena gav större förändringar av grundvattennivån i både jord och berg än vattenuttaget från borrhålet.

5.4 Effekter på grundvattnets salthalt

/Svensson och Follin 2010/ använde DarcyTools-modellen för att studera grundvattenbortledningens effekter på grundvattnets salthalt. Enligt modellresultaten orsakar bortledningen både en nedträngning av grundvatten från nivåer i berget ovan förvarsnivån och en viss uppträngning av saltare grundvatten från berget under förvarsnivån. Enligt modellberäkningarna är saltvattenuppträngningen begränsad och kan inte förändra grundvattnets salthalt ovan förvaret, på de förhållandevis små djup som är aktuella för bergborrade enskilda brunnar. Grundvattenbortledningen kan ge upphov till en viss ökning av salthalten på vissa nivåer i berget ovan förvaret, på grund av inflöde från havet via bankningsplanen i bergets övre del.

5.5 Vattenmättnad och återhämtning efter förslutning av slutförvaret

Avvecklingskedet innebär bland annat att slutförvarsanläggningen försluts och att länshållningen upphör. Förslutningen kommer att ske genom en återfyllnad med svällande lera av typ bentonit, bergkross eller en kombination av dessa. Då länshållningen upphör börjar återfyllnaden vattenmättas, parallellt med en återhämtning av grundvattnets tryckhöjder i berget och grundvattenytans nivå. Tiden för återhämtning till ursprungliga (ostörda) förhållanden beror bland annat på inläckaget av grundvatten till det återfyllda förvaret. Ett större inläckage ger en snabbare vattenmättnad av återfyllnaden jämfört med ett litet inläckage, givet att den volym som ska vattenmättas är samma. Ett större inläckage ger dock större effekter på grundvattnets tryckhöjder och grundvattenytans nivå under den tid som vattenmättnaden sker.

Under driftskedet kommer deponeringstunnlar successivt att återfyllas parallellt med förundersökningar, borrhning/sprängning och injektering. Då avvecklingskedet påbörjas pågår därför vattenmättnadsprocessen i deponeringstunnlarna. Detta innebär att återhämtningen av grundvattnets tryckhöjder i berget i viss utsträckning har påbörjats redan innan avvecklingskedet.

/Gustafsson et al. 2009/ använde MIKE SHE-modellen för att bedöma hur lång tid det kommer att ta för grundvattenytan att återhämta sig efter det att inläckaget av grundvatten till förvaret upphört. Detta undersöktes genom att ta bort hela slutförvarsanläggningen från MIKE SHE-modellen och därefter starta beräkningen av återhämtningsförloppet, baserat på meteorologiska data och havsnivådata för åren 2005–2006. I beräkningen beaktades således inte inläckaget av grundvatten till förvaret under vattenmättnadsprocessen. Med avseende på grundvattenytans avsänkning visar MIKE SHE-beräkningarna att påverkansområdets storlek är reducerat till ungefär en tredjedel efter sex månader och ungefär en tjugondel efter ett år. Enligt den konceptuella beskrivningen i kapitel 3 (figur 3-4) kan återhämtningsförloppet liknas vid en spegelbild av avsänkingsförloppet. En jämförelse med avsnitt 5.3.2 (delavsnittet om påverkansområdets utveckling över tid) visar att återhämtningen av grundvattenytans nivå sker något snabbare än avsänkningen.

/Svensson och Follin 2010/ använde DarcyTools-modellen för att i detalj studera inläckaget av grundvatten och vattenmättnaden av återfyllnaden. I beräkningen antas förvaret vara återfyllt med lera med låg vattengenomsläpplighet. Enligt resultaten innebär en sådan återfyllnad ett mycket litet inläckage av grundvatten, vilket följaktligen innebär att vattenmättnaden tar mycket lång tid (i storleksordningen hundratals år).

/Mårtensson och Gustafsson 2010/ studerade återkopplingen mellan inläckage, vattenmättnad och återhämtning av tryckhöjder och grundvattenyta med MIKE SHE-modellen. I beräkningen beaktas inte schakten eftersom de inte ingår i tunnelsystemet. Tunnlarna och bergrummen inom centralområdet samt de övre delarna av rampen antas vara fyllda med bergkross med olika porositet (hålrumsvolym per volymenhet) i olika delar. Deponeringstunnlarna, stam- och transporttunnlarna samt de nedre delarna av rampen antas vara fyllda med lera, med lägre vattengenomsläpplighet i deponeringstunnlarna. Beräkningen utgår från ett dränerat förvar (återfyllnadsmaterialet är initialt tomt på vatten), vilket innebär att man inte beaktar att vissa delar av återfyllnaden är vattenmättad och att återhämtningen delvis redan har påbörjats i avvecklingskedets början.

För tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s visar resultaten på ett inläckage av grundvatten till ett återfyllt förvar på cirka 26 l/s. De återfyllnadsmaterial som ansatts i MOUSE (se förklaring i bilaga 4) har alltså ingen större inverkan på inläckaget. Enligt MIKE SHE-beräkningarna är förvarets undermarksdel helt vattenmättat drygt ett år efter det att länshållningen upphört. MIKE SHE underskattar troligen tiden för vattenmättnad av återfyllnaden i de delar av förvaret där lera används som återfyllnad. Detta har dock mindre betydelse för frågan om återhämtningen av grundvattnets tryckhöjder och av grundvattenytan, eftersom inläckaget av grundvatten till dessa delar av förvaret blir litet.

Med avseende på återhämtningen av grundvattenytan visar alltså resultaten på ungefär motsvarande förlopp som i /Gustafsson et al. 2009/. Påverkansområdets storlek är reducerat till ungefär hälften efter sex månader, ungefär en tredjedel efter ett år och en tjugondel efter två och ett halvt år. Återhämtningen av grundvattnets tryckhöjder på förvarsnivå är långsammare, med kvarstående sänkning vid och närmast kring själva förvaret två år efter det att förvaret tagits bort från modellen. På förvarsnivå fortgår tryckåterhämtningen efter sex år, då beräkningen avslutas.

Modellberäkningarna visar att återhämtningen av grundvattenytans nivå är en snabbare process jämfört med återhämtningen av grundvattnets tryckhöjder i berg på förvarsnivå. Den tid som krävs för återhämtningen är beroende av inläckaget av grundvatten till det återfyllda förvaret, som i sin tur beror på bland annat vilken typ av återfyllnadsmaterial som används. Återfyllnadsmaterial med hög vattengenomsläpplighet ger ett större inläckage av grundvatten och långsammare återhämtningstakt under själva vattenmättnadsprocessen, som dock avslutas snabbare jämfört med återfyllnadsmaterial med låg vattengenomsläpplighet. Då återfyllnadsmaterialet är vattenmättat upphör inläckaget av grundvatten och återhämtningen sker snabbt. Återfyllnadsmaterial med låg vattengenomsläpplighet innebär att inläckaget blir mindre, vilket i sin tur innebär att vattenmättnadsprocessen tar längre tid. Ett litet inläckage innebär dock att återhämtningen av tryckhöjder i berg och framför allt återhämtningen av grundvattenytans nivå är avsevärt snabbare än vattenmättnaden av återfyllnadsmaterialet.

5.6 Grundvattenbortledningens hydrologiska effekter

5.6.1 Effekter på sjöarnas vattennivå

MIKE SHE-modellen har använts för att bedöma grundvattenbortledningens effekter på vattennivån i de större sjöarna i området (Bolundsfjärden, Fiskarfjärden, Eckarfjärden, Gällsboträsket och Lillfjärden). Effekterna har även bedömts för sjöarna Puttan och Norra Bassängen, belägna mellan Bolundsfjärden och havet (se figur 4-1). I modellen beaktas att vissa sjöar har in- och/eller utflöden via bäckar (till exempel Bolundsfjärden och Eckarfjärden) och andra inte (till exempel Fiskarfjärden). DarcyTools-modellen är mindre lämpad än MIKE SHE för att bedöma effekter på sjöar och bäckar.

Enligt modellberäkningarna ger grundvattenbortledningen upphov till en obetydlig sänkning av vattennivån i sjöarna Eckarfjärden, Fiskarfjärden och Lillfjärden. Den största sjönivåsänkningen under typåret 2006 är enligt beräkningsresultaten mindre än 0,005 m för Eckarfjärden och Fiskarfjärden, och mindre än 0,025 m för Lillfjärden. Enligt beräkningarna kommer det att uppstå en vattennivåsänkning i sjöarna Gällsboträsket, Bolundsfjärden och Puttan. Beroende på värdet på K_{inj} är den största sjönivåsänkningen i Gällsboträsket under den simulerade perioden 0,05–0,12 m, med ett årsmedelvärde på 0,01–0,03 m.

För Bolundsfjärden är motsvarande största sjönivåsänkning 0,02–0,07 m, med ett årsmedelvärde på 0,01–0,02 m beroende på K_{inj} . Den modellberäknade sjönivån i Norra Bassängen uppvisar tydlig samvariation med Bolundsfjärdens sjönivå både för opåverkade och påverkade förhållanden, i det senare fallet med en största sjönivåsänkning på 0,05–0,07 m. Enligt beräkningarna uppstår den största sjönivåsänkningen i sjön Puttan, med en största sjönivåsänkning på 0,15–0,85 m beroende på tätningsfall.

Dessa resultat kan förklaras av lägena för de olika sjöarnas avrinningsområden i förhållanden till påverkansområdet för sänkningen av tryckhöjderna i berg respektive grundvattenytans avsänkning. Alla de studerade sjöarna och deras avrinningsområden är belägna inom påverkansområdet för sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg. Med en avsänkingsgräns på 0,1 m är avrinningsområdena för sjöarna Eckarfjärden och Fiskarfjärden belägna utanför påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Gällsboträskets och Bolundsfjärdens avrinningsområden är belägna nära gränsen för påverkansområdet och Puttans avrinningsområde inom påverkansområdet.

5.6.2 Effekter på bäckarnas vattenföring

MIKE SHE-modellen har även använts för att bedöma grundvattenbortledningens effekter på bäckarnas vattenföring. MIKE SHE-modellen användes för att undersöka effekter på vattenföringen i följande fyra punkter inom modellområdet (se figur 4-2):

- Utflödet från Eckarfjärden (motsvarande läget för vattenföringsstation PFM002668).
- Utflödet från Stocksjön (motsvarande läget för vattenföringsstation PFM002667).
- Utflödet från Gunnarsboträsket (motsvarande läget för vattenföringsstation PFM002669).
- Inflödet till Bolundsfjärden (motsvarande läget för vattenföringsstation PFM005764).

Enligt tabell 5-7 bedöms grundvattenbortledningen ge upphov till en reducering av bäckflödet till Bolundsfjärden, med en minskning av det ackumulerade inflödet på upp till 13 % ($K_{inj} = 10^{-7}$ m/s). Effekterna på vattenföringen i de andra studerade bäckarna bedöms bli marginella. Liksom i fallet med sjöarna kan geografiska skillnader i effekter förklaras av de olika bäckarnas (och deras avrinningsområdens) lägen i förhållanden till påverkansområdet för sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg respektive grundvattenytans avsänkning. Till skillnad från de andra bäckarna är avrinningsområdet för bäcken uppströms Bolundsfjärden delvis inom påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Minskningen av bäckvattenföringen in till Bolundsfjärden kan även antas bidra till den modellberäknade sänkningen av sjöns vattennivå.

5.6.3 Effekter på områdets vattenbalans

/Mårtensson och Gustafsson 2010/ redovisar MIKE SHE-beräknade vattenbalanser för typåret 2006, med en uppdelning på modellområdet (land och hav), landdelarna av modellområdet respektive påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. I det senare fallet avser påverkansområdet tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s och avsänkingsgränsen 0,3 m.

Tabell 5-8 redovisar den modellberäknade vattenbalansen för landdelarna av modellområdet (31 km² av totalt 56 km²). Gränsen för det område som ingår i vattenbalansen går alltså vid strandlinjen. Detta innebär att vattenbalansen inte inkluderar inläckaget av grundvatten till de delar av förvaret som är belägna under havet. Vattenbalansens komponenter uttrycks som totala flöden (volym per år) delat med ytan för landdelarna av modellområdet, vilket ger längd (mm) per år. Evapotranspiration är summan av vattnets evaporation (avdunstning) från mark/ytvatten, interception och transpiration (se även bilaga 8).

”Till bäckar” är ytavrinning och grundvattenutströmning till bäckar med avrinning från landdelarna av modellområdet. ”Till havet” är ytavrinning och grundvattenutströmning från landdelarna av modellområdet till havet. ”Till förvaret” är grundvatten som läcker in till slutförvarsanläggningens undermarksdel. Enligt tabellen ger inläckaget till förvaret främst effekter på områdets vattenbalans i termer av en minskad avrinning. Specifikt visar modellresultaten att grundvattenbortledningen från förvaret ger upphov till en minskning av ytavrinningen till bäckarna. Vidare minskar nettoutflödet från land till hav, främst genom att nettoinflödet i berget ökar.

Enligt tabell 5-8 är den totala avrinningen (till bäckar och till havet) 158 mm/år i det opåverkade fallet och exempelvis 124 mm/år (om samtliga deltermer adderas) för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. I detta fall motsvarar inläckaget till förvaret 45 mm/år, vilket ”kompenseras” av en minskad avrinning på 34 mm/år och genom en minskning av evapotranspirationen med 6 mm/år. Resterande kan hänföras till mindre förändringar av lagringstermerna. Inläckaget till förvaret representerar alltså 28 % av avrinningen från landområdet för opåverkade förhållanden och 36 % av avrinningen för påverkade förhållanden.

Tabell 5-7. Modellberäknad ackumulerad bäckvattenföring (i % av fallet utan förvar) för olika värden på K_{inj} . Beräkningarna med förvar avser det hypotetiska fallet med hela förvaret öppet samtidigt.

K_{inj} (m/s)	Ack. utflöde från Eckarfjärden	Ack. utflöde från Stocksjön	Ack. utflöde från Gunnarsboträsket	Ack. inflöde till Bolundsfjärden
10^{-7}	99	99	> 99	87
10^{-8}	> 99	> 99	> 99	91
10^{-9}	> 99	> 99	> 99	95

Tabell 5-8. Modellberäknad vattenbalans (mm/år) för opåverkade och påverkade förhållanden, för olika värden på K_{inj} . Resultaten avser landdelarna av MIKE SHE-modellens modellområde.

Injekterings-skärmens genomsläpplighet (K_{inj}), m/s	Evapo-transpiration	Till bäckar	Till havet	Till förvaret
Utan förvar	407	92	66	–
10^{-7}	401	79	44	45
10^{-8}	404	83	52	28
10^{-9}	405	87	58	14

/Mårtensson och Gustafsson 2010/ presenterar även en grundvattenbalans för berget inom landdelarna av modellområdet. För tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s visar grundvattenbalansen att utbytet mellan grundvatten i berg och havet ändras med 16 mm/år, från ett nettoutflöde på 2 mm/år till ett nettoinflöde på 14 mm/år. Resultaten visar vidare att grundvattenflödet mellan jord och berg ändras med 25 mm/år (vilket motsvarar totalt 24 l/s), från ett nettoinflöde på 2 mm/år till ett nettoinflöde på 27 mm/år. Resterande 4 mm/år upp till de 45 mm/år som utgör inläckaget till förvaret hänförs till ändringar av olika lagringstermer.

Enligt motsvarande grundvattenbalans för hela modellområdet ökar (för samma tätningsfall som ovan) grundvattenflödet mellan jord och berg med 43 l/s. Med en ökning inom landdelarna av modellområdet på 24 l/s är alltså ökningen 19 l/s inom de delar av modellområdet som utgörs av hav. Balansen visar vidare att grundvatteninflödet över modellområdets gräns i havet ökar från noll till 0,5 l/s. Randvillkorens inverkan diskuteras närmare i avsnitt 5.7.1.

Tabell 5-9 redovisar den MIKE SHE-beräknade vattenbalansen för typåret 2006, specifikt med avseende på påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s och med avsänkingsgränsen 0,3 m. För tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s minskar avrinningen från påverkansområdet med 93 mm under det studerade året, det vill säga en avsevärt större förändring jämfört med hela landområdet (tabell 5-8). Grundvattenbalansen för påverkansområdet visar att grundvattenbortledningen ger upphov till en ökning av grundvattenflödet från jord till berg i intervallet 6–13 l/s, beroende på tätningsfall. Den större avrinningen i tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s jämfört med de två andra tätningsfallen beror på ett större grundvattenflöde i berget mot rampen för detta tätningsfall. Med en avsänkingsgräns på 0,3 m är rampen belägen utanför påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning, och grundvatten från påverkansområdet som flödar mot rampen räknas därmed in i grundvattenavrinningen.

Sett till hela modellområdet (både land och hav) är ökningen av grundvattenflödet från jord till berg i intervallet 15–43 l/s, och inom landdelarna av modellområdet (se ovan) är motsvarande ökning i intervallet 9–24 l/s. Enligt denna jämförelse kommer alltså 55–60 % av den totala ökningen av grundvattenflödet från jord till berg att ske inom landområdena och resterande del inom de områden som utgörs av hav. 30–40 % av den totala ökningen (motsvarande drygt hälften av ökningen inom landområdena) kommer att ske inom de relativt begränsade ytor som motsvaras av påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning.

Sammanfattningsvis visar alltså de vattenbalanser som presenteras av /Mårtensson och Gustafsson 2010/ att ungefär hälften av det grundvatten som läcker in till förvaret härstammar från landområden och hälften från havet. Inom landområdena sker drygt hälften av den totala ökningen av grundvattenflödena från jord till berg inom påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Detta område utgör endast 2–4 % av landdelarna av MIKE SHE-modellens modellområde.

Tabell 5-9. Modellberäknad vattenbalans (mm/år) för opåverkade och påverkade förhållanden, för olika värden på K_{inj} . Resultaten avser områden med ett årsmedelvärde på avsänkningen som är större än 0,3 m för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

Injekteringskärmens genomsläpplighet (K_{inj}), m/s	Evapotranspiration	Yt- och grundvatten- avrinning	Till förvaret
Utan förvar	434	148	–
10^{-7}	425	55	186
10^{-8}	431	13.5	177
10^{-9}	432	49	117

5.7 Käslighetsanalyser

I nedanstående avsnitt redovisas inverkan av ett urval faktorer på inläckaget av grundvatten, sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg och avsänkningen av grundvattenytan.

5.7.1 Inverkan av de hydrogeologiska egenskaperna i berg, i övergången mellan jord och berg samt under sjöar och hav

Som nämnts tidigare beskriver den konceptuella hydrogeologiska modellen för berget i Forsmark att en sänkning av grundvattnets tryckhöjder sprids ut i de delar av berget där det finns bankningsplan med hög horisontell vattengenomsläpplighet. Vidare finns det brantstående sprickzoner med hög vattengenomsläpplighet som ger en hydraulisk kontakt mellan bankningsplanen och jordlagren. Lägena och egenskaperna för brantstående sprickzoner är alltså viktiga, eftersom de styr var en avsänkning av grundvattenytan kan uppstå. Enligt den konceptuella kvartärgeologiska modellen för Forsmark /Hedenström och Sohlenius 2008/ förekommer det täta sediment under de större sjöarna och även på delar av havsbotten. Som nämnts tidigare har man på flera platser i området påträffat en mycket kompakt morän med låg vattengenomsläpplighet, vilket också kan bidra till att reducera effekterna på yt- och grundvattenförhållandena.

/Gustafsson et al. 2009/ använde MIKE SHE-modellen för att undersöka inverkan av osäkerheter i dessa delar av den konceptuella hydrogeologiska modellen på prognoserna av grundvattenbortledningens effekter. Käslighetsanalyserna gjordes för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s. Som en kontroll av rimligheten i de olika käslighetsfallen (se nedan) beräknades även avvikelser mellan modellberäknade och uppmätta sjönivåer, bäckvattenföring samt grundvattennivåer i jord och berg för opåverkade förhållanden (utan förvar), eftersom det är denna situation som mätningarna representerar. Beräkningarna gjordes för en serie beräkningsfall som beaktar inverkan av följande faktorer:

- Den horisontella (K_h , inom beräkningslager med bankningsplan) och den vertikala (K_v) hydrauliska konduktiviteten i de övre 200 m av berget (inom hela modellområdet). Specifikt reducerades K_h till 1/10 och K_v ökades med en faktor 10 relativt sina ursprungsvärden.
- K_h och K_v i de övre 20 m av berget. Relativt sina ursprungsvärden ökades K_h med en faktor 10, och K_v reducerades till 1/10 respektive ökades med en faktor 10.
- Inverkan av att i modellen öka mäktigheten på det övre bankningsplanet, upp till bergets överkant.
- K_h och K_v i övergången mellan jord och berg. Specifikt reducerades både K_h och K_v till 1/20 respektive ökades med en faktor 10 relativt sina ursprungsvärden.
- Inverkan av att i modellen ta bort bottensedimenten i havet, sjöarna och våtmarkerna och ersätta dessa med morän.

Samtliga beräkningsfall utvärderades genom att jämföra med referensfallet, det vill säga ett beräkningsfall för påverkade förhållanden utan några parameterförändringar, men med samma förutsättningar i övrigt. De viktigaste slutsatserna kan sammanfattas som följer:

- **Inläckaget och påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning:** En tiofaldig ökning av den vertikala hydrauliska konduktiviteten i de övre 200 m av berget ger ett större inläckage och ett större påverkansområde jämfört med referensfallet. Inläckaget ökar med 6 l/s (27 %) och påverkansområdets storlek ökar med 0,7 km² (65 %). Motsvarande ökning är 5 l/s respektive 0,6 km² för det käslighetsfall som även innefattar en samtidig reduktion (till 1/10 av referensfallet) av K_h i de övre 200 m av berget. En minskning av K_v i de övre 20 m av berget minskar påverkansområdets storlek med 0,4 km². Minskningen av inläckaget är dock relativt liten (1 l/s). I övrigt är förändringarna små jämfört med referensfallet.
- **Sjönivån i sjön Bolundsfjärden:** Samtliga käslighetsfall uppvisar små förändringar jämfört med referensfallet, inklusive fallet där bottensedimenten tagits bort och ersatts med morän.
- **Bäckflödet till Bolundsfjärden:** En tiofaldig ökning av K_v i de övre 200 m av berget ger en minskning av det ackumulerade flödet med 5 %, jämfört med 7 % i referensfallet. Detta beror på en minskad avsänkning inom bäckens avrinningsområde. En samtidig reduktion av K_h (till 1/10 av referensfallet) minskar effekten på vattenflödet ytterligare. I övrigt är förändringarna små jämfört med referensfallet.

Sammanfattningsvis är K_v i de övre 200 m av berget den undersökta egenskap som genomgående har störst inverkan på prognoserna. Ett ”värsta fall” (med K_v tio gånger större än för referensfallet) ökar inläckaget med 6 l/s och storleken på påverkansområdet med 0,7 km² jämfört med referensfallet. För detta känslighetsfall motsvarar avvikelserna mellan modellberäkningar och mätningar den för referensfallet. Jämfört med referensfallet är det dock sämre passning mot så kallade interferenstester (pumptester) som utförts i Forsmark /Bosson et al. 2008/. Detta minskar tilltron till att känslighetsfallet är realistiskt.

/Mårtensson och Gustafsson 2010/ gjorde vissa uppföljande känslighetsanalyser som omfattade följande:

- Inverkan av K_h och K_v i de övre 200 m av berget. Känslighetsfallen innefattade att minska K_h till 1/5 respektive att öka K_h till det dubbla jämfört med ursprungsvärdena. Vidare ökades K_v med en faktor 5 respektive minskades till hälften jämfört med ursprungsvärdena.
- Inverkan av specificerade grundvattennivåer i berget längs modellområdets gränser. Randvillkoren i referensfallet innebär att det inte kan ske något in- eller utflöde genom modellens ytterkanter på land.
- Inverkan av att använda samma hydrogeologiska egenskaper i de övre 20 m av modelldomänen och motsvarande randvillkor som i DarcyTools /Svensson och Follin 2010/. Observera att DarcyTools-modelleringen fokuserar på grundvattenflöden och andra processer på förvarsnivå. Modellen har därför en förenklad beskrivning av jordlagren och den övre delen av berget.

Notera att /Mårtensson och Gustafsson 2010/ använde en uppdaterad modell för bergets hydrogeologiska egenskaper (bilaga 4), vilket innebär att känslighetsanalyserna inte utgår från samma referensfall som /Gustafsson et al. 2009/. De viktigaste slutsatserna från känslighetsanalysen kan sammanfattas som följer:

- **Inläckaget och påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning:** En femfaldig minskning och en lika stor ökning av K_h respektive K_v i de övre 200 m av berget ger en minskning av inläckaget och påverkansområdets storlek med 10 l/s respektive 0,06 km². En dubbling av K_h och en samtidig halvering av K_v ger en ökning av inläckaget med 6 l/s och en ökning av påverkansområdets storlek med 0,17 km². Fallet där de hydrogeologiska egenskaperna i de övre 20 m av modelldomänen ersätts med data från DarcyTools-modellen ger en ökning av inläckaget med cirka 5 l/s och en dryg fördubbling av påverkansområdets storlek. Känslighetsfallet med fasthållna grundvattennivåer i berget längs modellområdets gränser ger endast små förändringar av inläckaget och påverkansområdets storlek.
- **Sjönivån i sjön Bolundsfjärden:** Känslighetsfallen uppvisar generellt små förändringar jämfört med referensfallet. Undantaget är fallet med egenskaper från DarcyTools-modellen, vilket ger en dryg fördubbling av sjönivåensänkning i Bolundsfjärden.
- **Bäckflödet till Bolundsfjärden:** En femfaldig minskning och en lika stor ökning av K_h respektive K_v i berget ger en minskning av det ackumulerade vattenflödet med 4 %, jämfört med 13 % i referensfallet. En dubbling av den K_h och en samtidig halvering av K_v ger en minskning av det ackumulerade vattenflödet med 19 %. Fallet där de hydrogeologiska egenskaperna i de övre 20 m av modelldomänen ersätts med data från DarcyTools-modellen ger en minskning av vattenflödet med 24 %. Specificerade grundvattennivåer ger en minskning av bäckflödet med endast 1 %.

Av de undersökta känslighetsfallen är därmed ett värsta fall en dubbling av den horisontella hydrauliska konduktiviteten, med en samtidig halvering av den vertikala hydrauliska konduktiviteten i de övre 200 m av berget. Detta ökar det beräknade inläckaget och storleken på påverkansområdet med 6 l/s (till 53 l/s) och med 0,17 km² (till 1,55 km²) jämfört med referensfallet. Analyserna visar att modellområdets storlek och randvillkor har relativt liten betydelse för prognoserna av inläckaget och dess hydrogeologiska och hydrologiska effekter. Av de studerade känslighetsfallen är skillnaden mot referensfallet störst om de hydrogeologiska egenskaperna i de övre 20 m av modelldomänen ersätts med data från DarcyTools-modellen. Detta ger en viss ökning av inläckaget, men framförallt en dryg fördubbling av påverkansområdets storlek.

5.7.2 Inverkan av hårdgjorda ytor inom driftområdet

Dagvatten kommer att ledas bort från hårdgjorda ytor inom slutförvarsanläggningens driftområde ovan mark. Inverkan av dagvattenbortledningen på grundvattenytans nivå undersöktes av /Mårtensson et al. 2010/. I MIKE SHE-modellen ansattes vägar, hustak, parkeringar, gårdar samt bergupplaget som

hårdgjorda ytor. Lakvatten från bergupplaget kommer att ledas bort för kompletterande rening och utsläpp till recipient, och dagvatten från övriga hårdgjorda ytor kan komma att tas om hand lokalt genom infiltration i närliggande grönytor och liknande. Generellt gäller att hårdgörning av tidigare vegetationsklädda ytor och lokal infiltration av dagvatten kan ge en ökning av grundvattenbildningen. Det ska därför betonas att undersökningen endast beaktar grundvattenytans avsänkning till följd av att ytorna är hårdgjorda, och att övrig dag- och lakvattenhantering inte beaktas i modellen.

Resultaten visar att de hårdgjorda ytorna i sig kan ge en viss höjning av grundvattenytans nivå under bergupplaget. Detta beror på att en hårdgjord yta visserligen reducerar infiltration av nederbörd och snösmältning, men en sådan yta minskar även evapotranspirationen som för bort vatten från marken. Hårdgjorda ytor inom driftområdet bedöms således ha liten inverkan på grundvattenytans nivå inom driftområdet. De hårdgjorda ytorna är små i förhållande till det område som omfattas av slutförvarsanläggningen och ger ingen höjning eller avsänkning av grundvattenytan utanför driftområdet.

5.7.3 Inverkan av ett utbyggt SFR

Planerade förändringar avseende grundvattenbortledning i Forsmarksområdet omfattar två undermarksanläggningar, slutförvarsanläggningen och den utbyggda delen av SFR (avsnitt 4.6.1). MIKE SHE och DarcyTools har använts för att undersöka kumulativa effekter av grundvattenbortledning från båda anläggningarna. Projekteringsarbete pågår vad gäller SFR-utbyggnadens utformning. Den utformning som användes i modellerna var en arbetsversion, som är preliminär främst vad gäller lägen för tillfartstunnel och bergrum.

I modelleringsverktyget MOUSE definierade /Mårtensson och Gustafsson 2010/ fyra beräkningsfall (I–IV, se tabell 5-10) som representerar olika kombinationer av slutförvarsanläggningen och SFR. Enligt nuvarande planeringsläge kommer avvecklingen av SFR att påbörjas ungefär samtidigt som avvecklingen av slutförvarsanläggningen /SKB 2008c/. Detta är motivet till att inget beräkningsfall ingår där enbart slutförvarsanläggningen är öppen. Med avseende på slutförvarsanläggningen är beräkningarna gjorda med en vattengenomsläpplighet i den injekterade zonen på $K_{inj, förvar} = 10^{-8}$ m/s. Motsvarande för befintligt SFR respektive SFR-utbyggnaden benämns $K_{inj, bef. SFR}$ respektive $K_{inj, SFR-utb.}$. Med ”förvar” avses slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle (SFR är också ett slutförvar). Vid modellering av SFR-utbyggnaden används $K_{inj, SFR-utb.} = 10^{-8}$ m/s.

Tabell 5-10 redovisar modellberäknade inläckage till slutförvarsanläggningen och SFR. Från befintligt SFR (beräkningsfall I) bortleds i dagsläget totalt cirka 6 l/s /Johansson 2008/. I MIKE SHE-modellen justerades värdet på $K_{inj, bef. SFR}$ för att efterlikna det uppmätta inläckaget, vilket ger ett beräknat inläckage på 5,7 l/s för $K_{inj, bef. SFR} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ m/s. Med DarcyTools erhöles för motsvarande beräkningsfall ett inläckage på 6–8 l/s för $K_{inj, bef. SFR} = 10^{-8}$ m/s (resultatet beror bland annat på havssedimentens vattengenomsläpplighet). I DarcyTools användes förutom det uppmätta inläckaget även uppmätta grundvattennivåer i borrhål kring SFR som underlag för anpassningen av $K_{inj, bef. SFR}$.

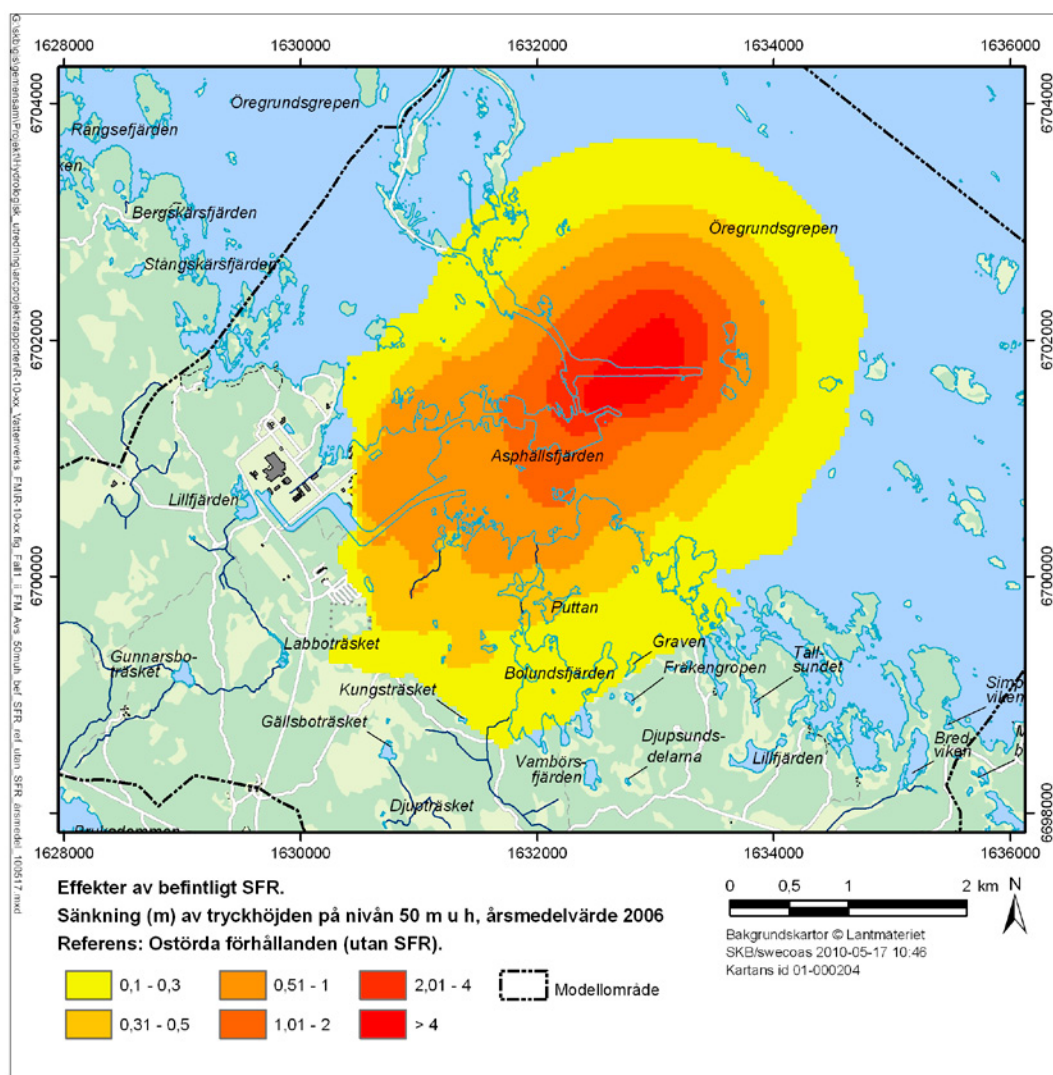
Tabell 5-10. MIKE SHE-beräknade inläckage av grundvatten (l/s) för olika kombinationer avseende slutförvarsanläggningen och SFR. För varje beräkningsfall anges den ansatta vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen kring respektive anläggning.

Beräkningsfall	Befintligt SFR	SFR-utbyggnad	Slutförvarsanläggningen
I: Befintligt SFR (utan slutförvarsanläggningen), $K_{bef. SFR} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ m/s	5,7	–	–
II: Slutförvarsanläggningen och befintligt SFR			
$K_{inj, förvar} = 10^{-7}$ m/s	5,1	–	47,4
$K_{inj, förvar} = 10^{-8}$ m/s	5,3	–	30,5
$K_{inj, förvar} = 10^{-9}$ m/s	5,5	–	15,5
III: Utbyggt SFR (utan slutförvarsanläggningen), $K_{inj, bef. SFR} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ m/s, $K_{inj, SFR-utb.} = 10^{-8}$ m/s	5,4	5,1	–
IV: Slutförvarsanläggningen ($K_{inj, förvar} = 10^{-8}$ m/s) och utbyggt SFR ($K_{inj, SFR-utb.} = 10^{-8}$ m/s)	5,1	4,8	30,5

Beräkningsfall II (slutförvarsanläggningen och befintligt SFR) är MIKE SHE-modellens referensfall i tidigare avsnitt i detta kapitel. Vad gäller slutförvarsanläggningen redovisas tre tätningsfall (tabell 5-1 i avsnitt 5.2.1). En jämförelse med beräkningsfall I visar att grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen ger en viss minskning av inläckaget till befintligt SFR, vilket alltså indikerar på en viss interaktion mellan de båda anläggningarna. Enligt beräkningarna kommer en utbyggnad av SFR (beräkningsfall III) att fördubbla inläckaget till SFR och inläckaget till den utbyggda delen minskar inläckaget till den befintliga delen.

I beräkningsfall IV, med både slutförvarsanläggningen och ett utbyggt SFR, är den totala grundvattenbortledningen från båda anläggningarna cirka 40 l/s för tätningsfallet $K_{inj, förvar} = 10^{-8}$ m/s. Detta kan jämföras med dagens inläckage på 6 l/s till befintligt SFR (uppmätt) och totalt cirka 35 l/s från slutförvarsanläggningen och befintligt SFR. Jämfört med beräkningsfall III (utan slutförvarsanläggningen) är inläckaget till ett utbyggt SFR något mindre med samtidig grundvattenbortledning från båda anläggningarna. Beräkningsfall II visar dock att SFR-utbyggnaden i sig inte har någon större betydelse för inläckaget till slutförvarsanläggningen. Prognoserna av inläckaget till slutförvarsanläggningen tycks därför inte vara beroende av en detaljerad beskrivning av den slutliga utformningen av SFR-utbyggnaden.

Figur 5-16 visar sänkningen av grundvattnets tryckhöjder på nivån -50 m ö h för beräkningsfall I (befintligt SFR). Sänkningen är beräknad med ostörda förhållanden utan SFR som referens, det vill säga sänkningen är definierad som tryckhöjder utan SFR minus tryckhöjder med befintligt SFR.

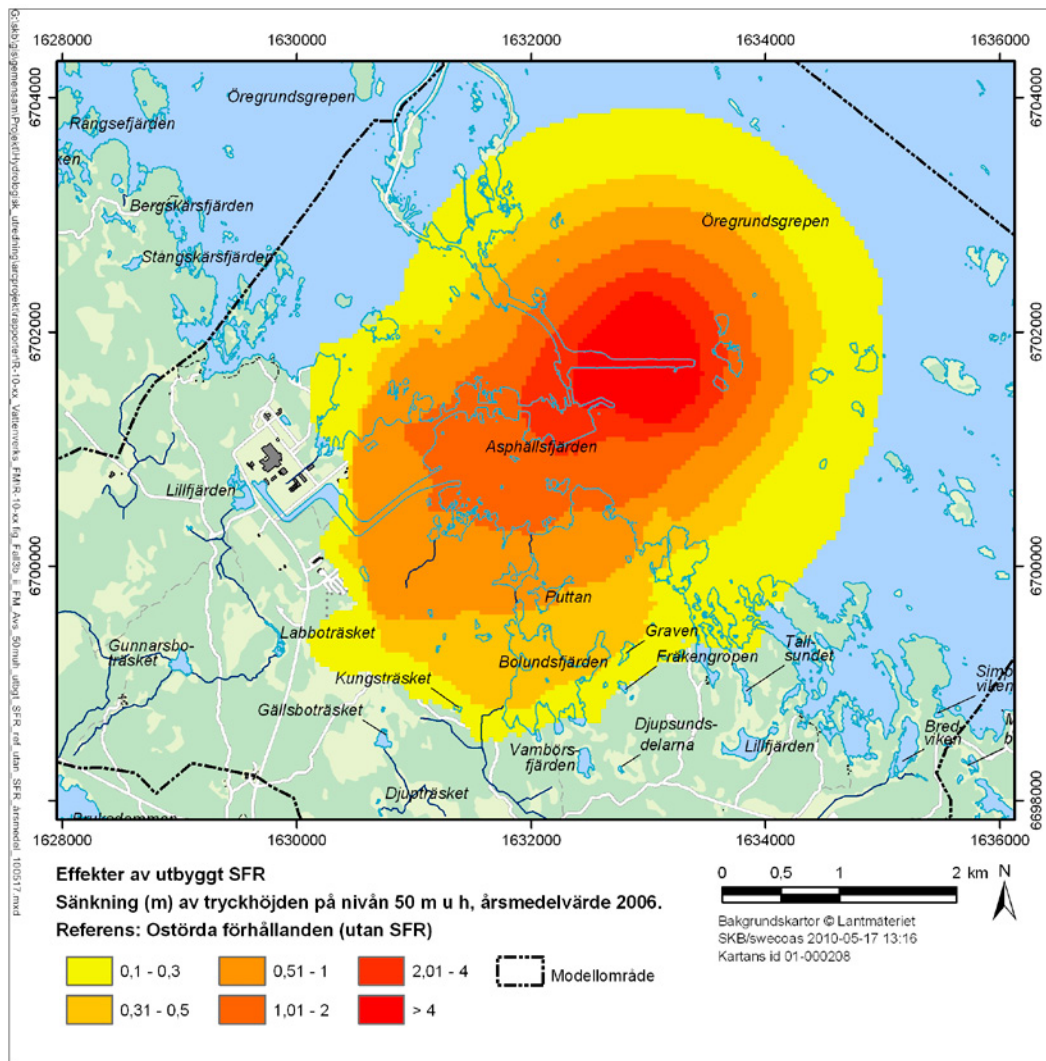


Figur 5-16. Sänkning (m) av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivån -50 m ö h för beräkningsfall I (befintligt SFR), med ostörda förhållanden utan SFR som referens.

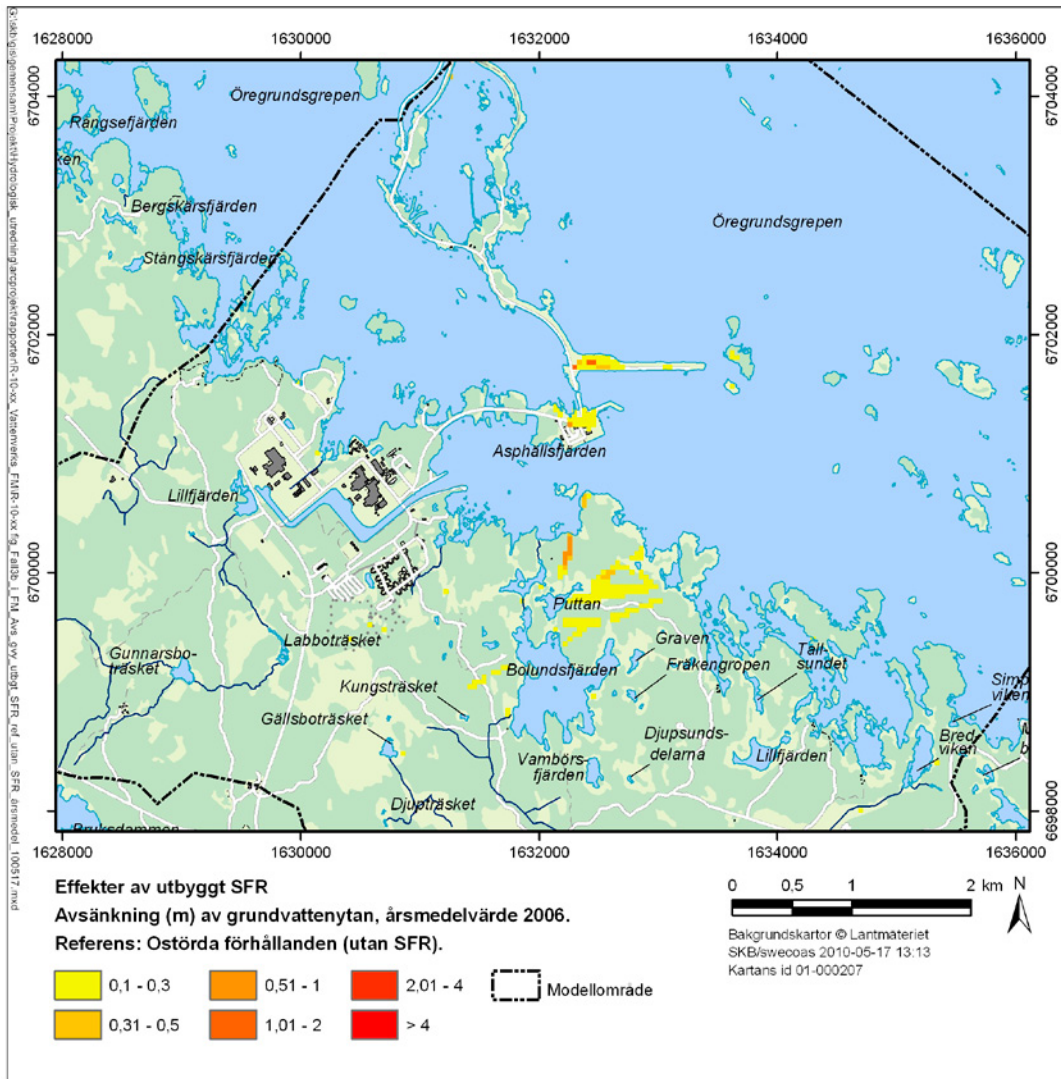
Enligt figuren sänker grundvattenbortledningen från befintligt SFR grundvattnets tryckhöjder delvis i det område där slutförvarsanläggningen kommer att uppföras. Figur 5-17 (beräkningsfall III, med enbart ett utbyggt SFR och med ostörda förhållanden som referens) visar att påverkansområdet ökar något vid en utbyggnad av SFR, dels i områden under havet, dels där slutförvarsanläggningen ska uppföras. Liknande resultat erhöles även med DarcyTools /Svensson och Follin 2010/. Figur 5-18 visar att grundvattenbortledningen från ett utbyggt SFR ger en avsänkning av grundvattenytan inom relativt små landområden mellan sjön Bolundsfjärden och havet.

Figur 5-19 och 5-20 visar sänkningen av grundvattnets tryckhöjder på nivån -50 m ö h (figur 5-19) och avsänkning av grundvattenytan (figur 5-20) för beräkningsfall IV, det vill säga fallet med slutförvarsanläggningen och ett utbyggt SFR (med ostörda förhållanden som referens). Figurerna visar alltså den kumulativa effekten av båda anläggningarna. Med en avsänkingsgräns på $0,3$ m är storleken på påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning $1,10$ km², vilket kan jämföras med motsvarande påverkansområde för slutförvarsanläggningen på $1,05$ km². Grundvattenbortledningen från ett utbyggt SFR ger alltså en liten avsänkning av grundvattenytan i jämförelse med slutförvarsanläggningen.

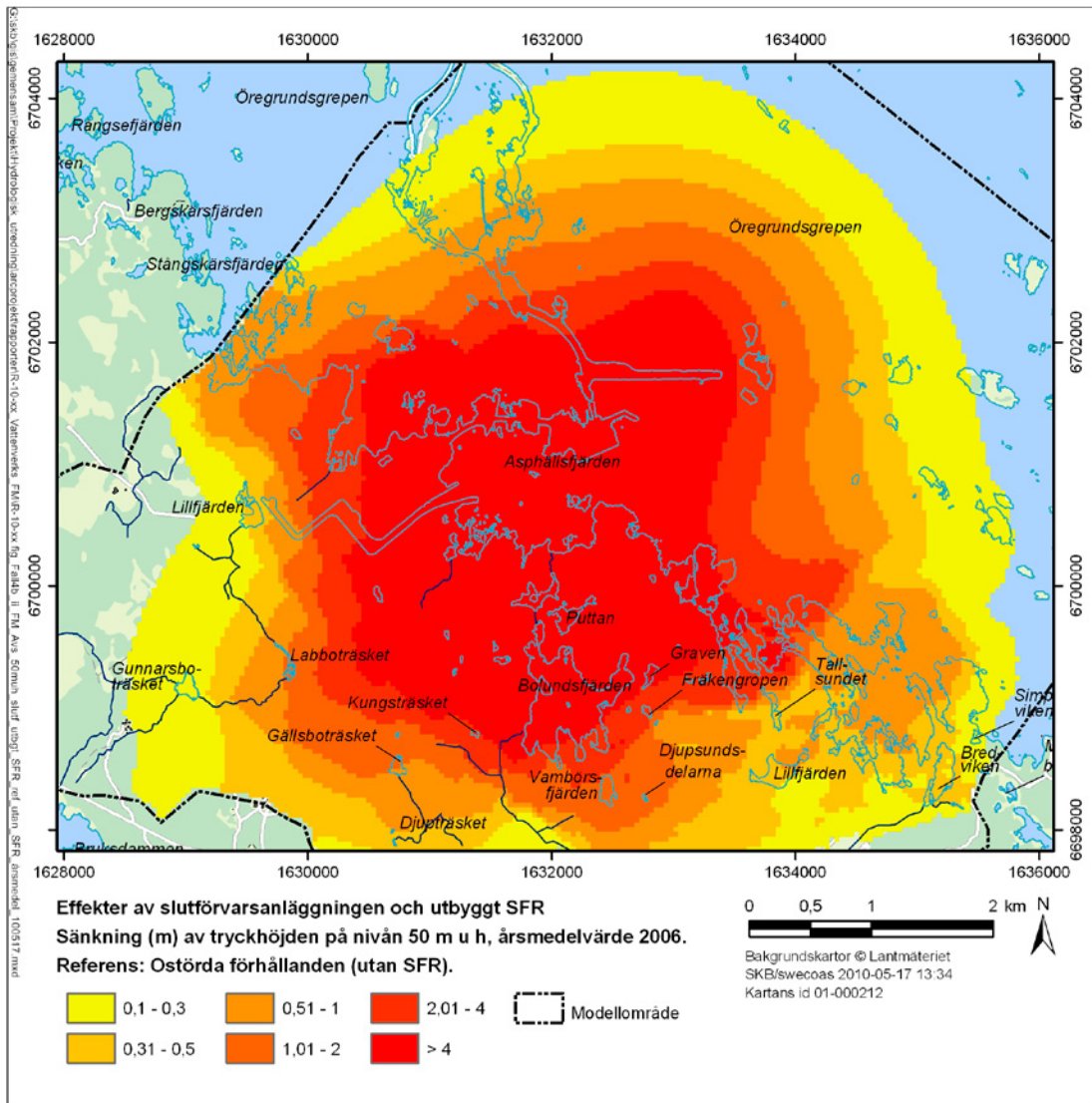
Figur 5-21 visar avsänkning av grundvattenytan för beräkningsfall IV, där situationen med befintligt SFR är referens. Figuren visar alltså den kumulativa effekten av slutförvarsanläggningen och SFR-utbyggnaden relativt dagens förhållanden. Med en avsänkingsgräns på $0,3$ m är storleken på påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning $1,06$ km². Detta visar att grundvattenbortledningen från SFR-utbyggnaden endast ger ett litet bidrag till det kumulativa påverkansområdet för slutförvarsanläggningen och SFR-utbyggnaden.



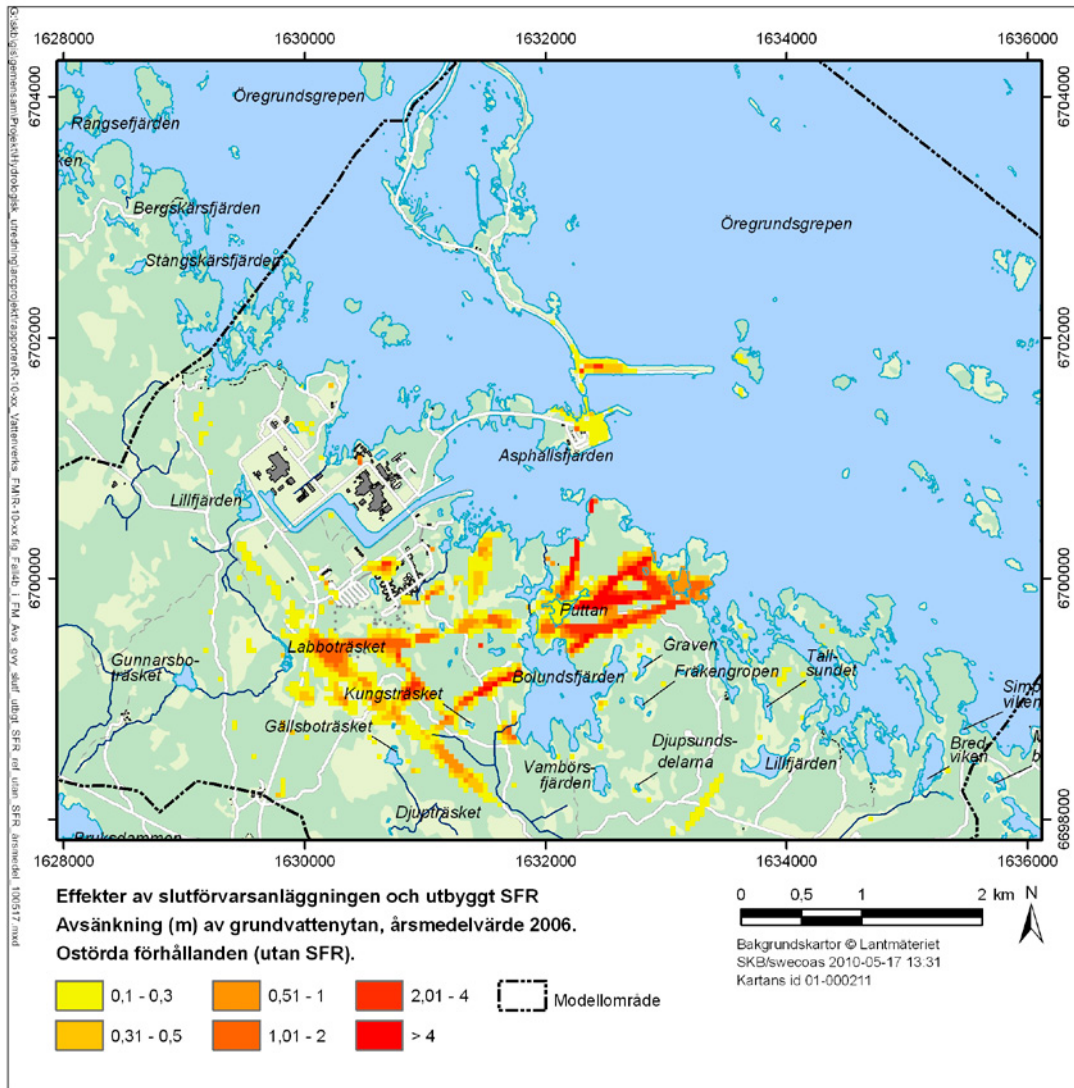
Figur 5-17. Sänkning (m) av grundvattnets tryckhöjder på nivån -50 m ö h för beräkningsfall III (utbyggt SFR), med ostörda förhållanden utan SFR som referens.



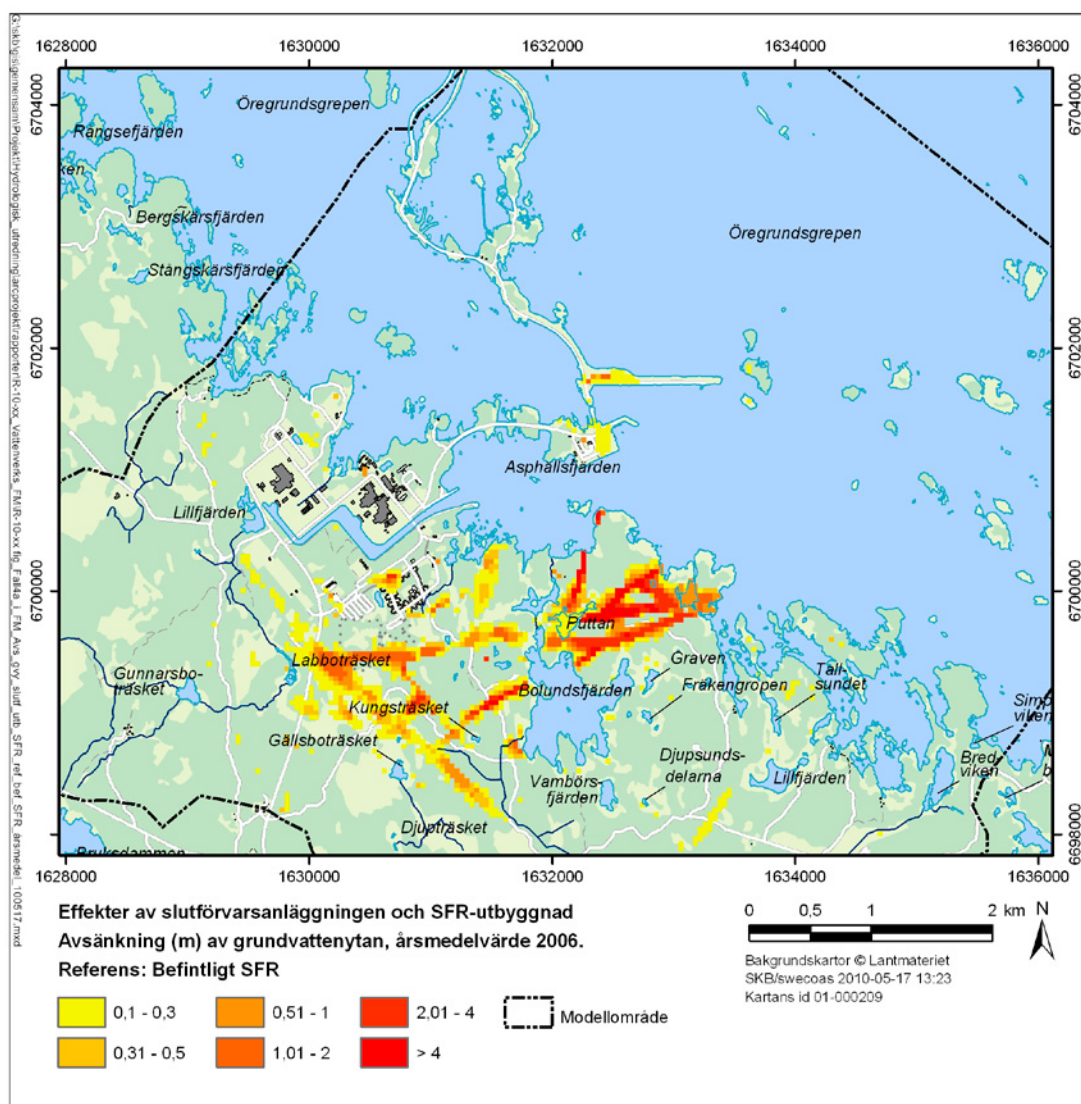
Figur 5-18. Avsänkning (m) av grundvattenytan för beräkningsfall III (utbyggt SFR), med ostörda förhållanden utan SFR som referens.



Figur 5-19. Sänkning (m) av grundvattnets tryckhöjder på nivån -50 m ö h för beräkningsfall IV (slutförvarsanläggningen och ett utbyggt SFR), med ostörda förhållanden utan SFR som referens.



Figur 5-20. Avsänkning (m) av grundvattenytan för beräkningsfall IV (slutförvarsanläggningen och ett utbyggt SFR), med ostörda förhållanden utan SFR som referens.



Figur 5-21. Avsänkning (m) av grundvattenytan för beräkningsfall IV (slutförvarsanläggningen och ett utbyggt SFR), med befintligt SFR som referens.

Sammanfattningsvis indikerar alltså MIKE SHE- och DarcyTools-beräkningarna på en viss hydrogeologisk interaktion mellan slutförvarsanläggningen och SFR, främst i form av delvis sammanfallande påverkansområden vad gäller sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berget. En framtida utbyggnad av SFR bedöms dock endast ge ett litet bidrag till de kumulativa effekterna av slutförvarsanläggningen och SFR-utbyggnaden vad gäller bortledning av grundvatten och avsänkning av grundvattenytans nivå.

5.7.4 Inverkan av meteorologiska förhållanden

MIKE SHE-resultaten baseras på meteorologiska data från två specifika år (se bilaga 4). Detta kan förstås betraktas som en begränsning, även om exempelvis nederbörden under typåret 2006 var nära det skattade långtidsmedelvärdet och därför kan ses som representativt för området. Under den långa tid som förvaret kommer att vara i drift kan det förekomma perioder då de meteorologiska förhållandena avviker från de normala. /Mårtensson et al. 2010/ redovisar kompletterande MIKE SHE-beräkningar för både opåverkade och påverkade förhållanden (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s) för ett statistiskt normalår med avseende på nederbörden samt för torr- respektive våtår med återkomsttider på hundra år. För opåverkade respektive påverkade förhållanden gjordes beräkningarna dels med en sekvens där normalåret följs av två på varandra följande torrår, dels med två på varandra följande våtår. Resultaten jämfördes med motsvarande resultat för typåret 2006. För påverkade förhållanden gjordes jämförelsen på ett sådant sätt att grundvattenbortledningens effekter kan särskiljas från inverkan av nederbörden. Som underlag för jämförelsen gjordes således parallella beräkningar för påverkade förhållanden, baserade på olika nederbördsdata.

Nederbördsstatistiken som definierar normal-, torr- och våtåren avser referensnormalperioden 1961–1990. För normalåret användes lokalt uppmätt nederbörd från perioden september 2003–augusti 2004 (604 mm). Den uppmätta nederbörden för denna period var relativt nära årsmedelvärdet för hela perioden med lokalt uppmätt nederbörd vid tiden för modelleringen (juni 2003–maj 2007; 563 mm). Årsnederbörden under normalåret är även nära långtidsmedelvärdet på 559 mm för referensnormalperioden /Johansson 2008/. Med en återkomsttid på hundra år har torråret en ackumulerad nederbörd på 373 mm och våtåret 851 mm.

Djupet till grundvattenytan för opåverkade förhållanden

Modellberäkningarna för opåverkade förhållanden visar att grundvattenytans nivå till stor del styrs av de meteorologiska förhållandena. Årsmedelvärdet av grundvattenytans nivå inom MIKE SHE-modellens modellområde är drygt 0,2 m högre under normalåret jämfört med typåret 2006. Under det första respektive det andra torråret är grundvattenytan ungefär 0,1 m respektive 0,4 m lägre jämfört med typåret. Under det första våtåret är grundvattenytan belägen cirka 0,4 m högre jämfört med typåret och ytterligare 0,1 m högre under det andra våtåret.

Påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning

Beräkningarna visar på ett något mindre påverkansområde för normalåret (1,2 km²) jämfört med typåret (1,6 km²). Med påverkansområde menas alltså det område inom vilket grundvattenytans nivå är lägre till följd av grundvattenbortledningen, jämfört med en situation utan grundvattenbortledning men med samma nederbördsdata. Begreppet avsänkning ska därför inte förväxlas med lägre grundvattenyta till följd av mindre nederbörd, vilket även gäller vattennivå och bäckvattenflöde (se nedan).

Påverkansområdets storlek är 1,3 km² under det första torråret, medan det andra torråret ger ett betydligt större påverkansområde (2,7 km²). Under det första och det andra våtåret omfattar påverkansområdet en yta på 0,9 km². Resultaten tyder alltså på att det finns en viss tröghet i grundvattensystemet som innebär att ett enstaka extremt torrår endast ger upphov till små förändringar av grundvattenytans nivå, jämfört med effekterna av grundvattenbortledningen. Ett direkt efterföljande torrår har en större inverkan, men en direkt tvåårsföljd med extrema torrår är å andra sidan betydligt mindre sannolik.

Vattennivån i sjön Bolundsfjärden

Beräkningarna visar att sänkningen av vattennivån i sjön Bolundsfjärden till följd av grundvattenbortledningen från förvaret blir obetydlig, oavsett om beräkningarna baseras på data för normalåret, ett enstaka torrår, våtår eller typåret 2006. Under ett andra torrår är sänkningen något större (0,3 m). Detta kan jämföras med opåverkade förhållanden utan förvaret, då ett första respektive ett andra torrår i sig ger en sjönivåsänkning på 0,1 m respektive 0,2 m.

Bäckvattenflödet till Bolundsfjärden

Under normalåret ger grundvattenbortledningen en minskning av det årligen ackumulerade bäckvattenflödet med 8 %, vilket kan jämföras med en minskning på 13 % under typåret 2006. För ett enstaka torrår är minskningen 14 %, medan ett efterföljande torrår ger en minskning på 9 %. Under ett första respektive ett andra våtår är minskningen 5 % respektive 4 %. Effekten av grundvattenbortledningen avtar därför under ett andra torr- respektive våtår. För opåverkade förhållanden ger ett första respektive ett andra torrår i sig en minskning med nästan 80 % respektive över 90 %. Även ett enstaka torrår ger således en betydligt större minskning av bäckvattenflödet än vad som orsakas av grundvattenbortledningen.

5.7.5 Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden i Forsmarksområdet år 2100

Framtida meteorologiska förhållanden i Forsmarksområdet

De normal-, torr- och våtår som diskuteras i avsnitt 5.7.4 baseras på nederbördsstatistik för referensnormalperioden 1961–1990. I detta avsnitt används data framtagna av SMHI:s klimatforskningsenhet Rossby Centre, som stöd för en diskussion kring möjliga klimatförhållanden under den framtida referensnormalperioden 2071–2100. Syftet med denna analys är att klargöra om de MIKE SHE-

resultat och känslighetsanalyser som presenteras ovan fångar in de klimatförhållanden som kan komma att råda i framtiden innan förvaret avvecklats.

De data som levererats från SMHI inkluderar modellberäknade dygnsvärden på nederbörd (regn och snö), lufttemperatur samt potentiell avdunstning för perioderna 1961–1990 samt 2071–2100, för ett område på 150 km gånger 150 km med centrum i Forsmark. Data avser två fall (A2 och B2) vad gäller utsläpp av växthusgaser som är utarbetade av FN:s klimatpanel IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Scenarierna baseras på antaganden om den framtida utvecklingen av bland annat befolkningstillväxt och omställning till miljövänlig teknik. A2 baseras på snabb befolkningstillväxt och intensiv energianvändning, medan B2 baseras på långsammare befolkningstillväxt och mindre intensiv energianvändning.

I dessa klimatscenarier blir årsmedelnederbörden i Forsmarksområdet 15–20 % högre under referensnormalperioden 2071–2100 jämfört med perioden 1961–1990. I avsnitt 5.7.4 har det studerade vååret 40 % mer nederbörd än normalåret. I scenarierna förutspås de största relativa nederbördsskillnaderna mellan perioderna 1961–1990 och 2071–2100 under senhöst, vinter och tidig vår, medan skillnaderna mot i dag är mindre under sommaren. De modellberäkningar som redovisas i avsnitt 5.7.4 fångar därmed in även framtida klimatscenarier vad gäller förändringar av årsmedelnederbörden, och i viss mån även framtida extrema år.

Lufttemperaturens årsmedelvärde kommer att bli någon grad högre i framtiden. I scenarierna förutspås bland annat månadsmedeltemperaturer under vintern på över noll grader Celsius. Jämfört med perioden 1961–1990 (med genomgående negativa månadsmedeltemperaturer under vintern) kommer under perioden 2071–2100 en mindre andel av årsnederbörden att falla och ackumuleras i form av snö. Högre framtida lufttemperaturer ger även en ökning av den potentiella avdunstningen, vilket delvis kan komma att kompensera för en ökning av nederbörden. Sett över året förutspås en ökning på 30–40 %, med den största relativa ökningen under vinter och tidig vår.

Hydrogeologiska och hydrologiska effekter av strandlinjeförsjutning

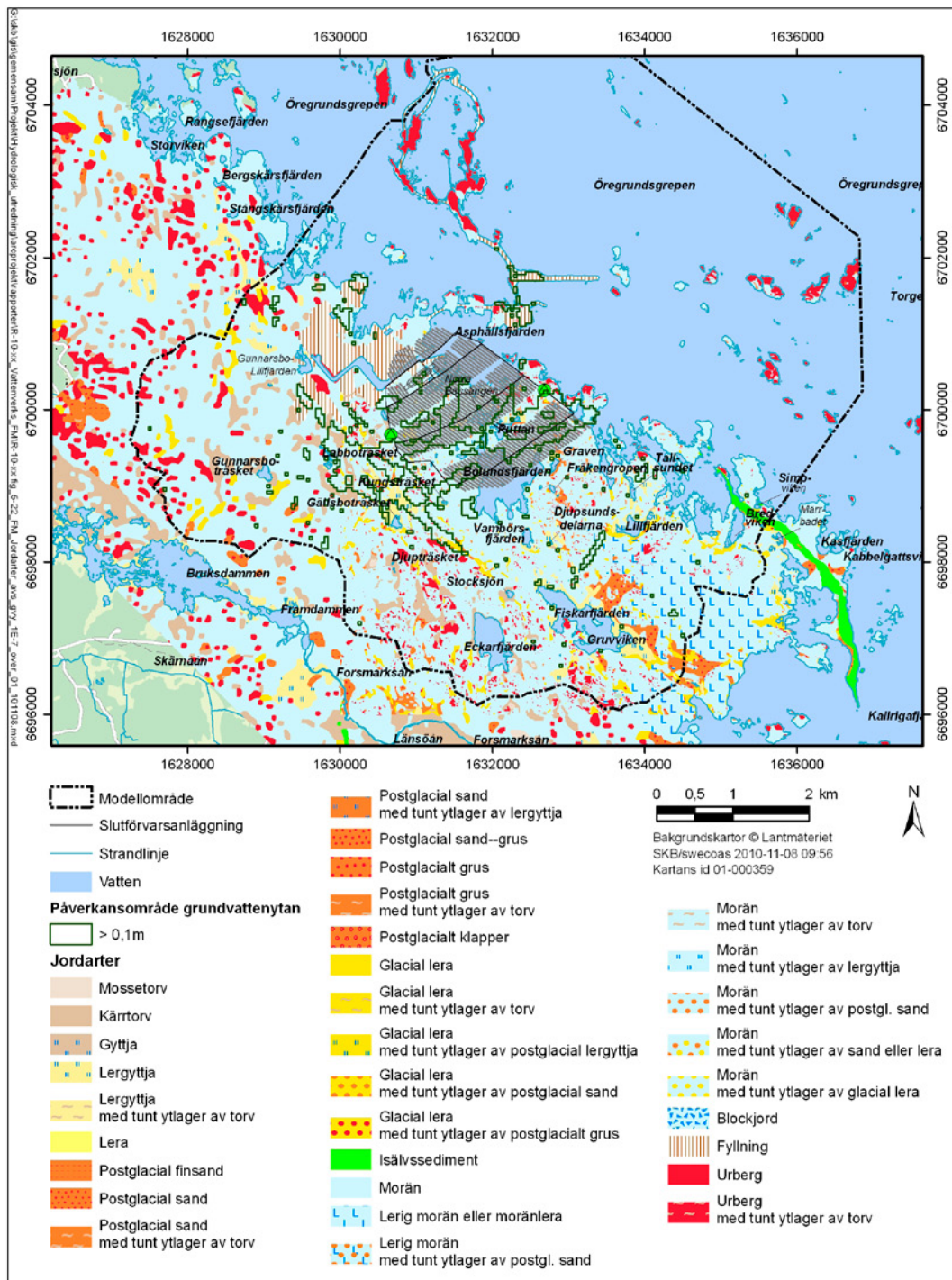
/Bosson et al. 2010/ redovisar beräkningsresultat som illustrerar inverkan av den långsiktiga landhöjningen (flera tusen år framåt i tiden) på bland annat Forsmarksområdets vattenbalans och på djupet till grundvattenytan. Beräkningsresultaten avser därmed en betydligt större landhöjning än landhöjningen fram till år 2100 och kan användas för att bedöma om landhöjning i sig är en viktig faktor i detta sammanhang. Utgångspunkten här är ett fall med en strandlinje mot havet på nivån –18 m ö h år 5000.

Förutom att nya landområden givetvis tillkommer i de områden som för närvarande är kustnära hav, visar modellresultaten överlag på små förändringar av de hydrogeologiska och hydrologiska förhållandena i området, även för en betydligt större landhöjning än höjningen fram till år 2100. Det modellberäknade medeldjupet till grundvattenytan är endast något större år 5000 än i dag, sett till de områden som i dag utgör land. Vidare visar beräkningarna på en något lägre sjönivå i Bolundsfjärden, delvis beroende på en minskning av bäckinflödet till sjön. Slutsatsen är därför att landhöjningen fram till år 2100 endast bör ge marginella förändringar av de hydrogeologiska och hydrologiska förhållandena i Forsmark jämfört med dagens förhållanden. Denna bedömning tar dock inte hänsyn till en eventuell framtida höjning av havsnivån.

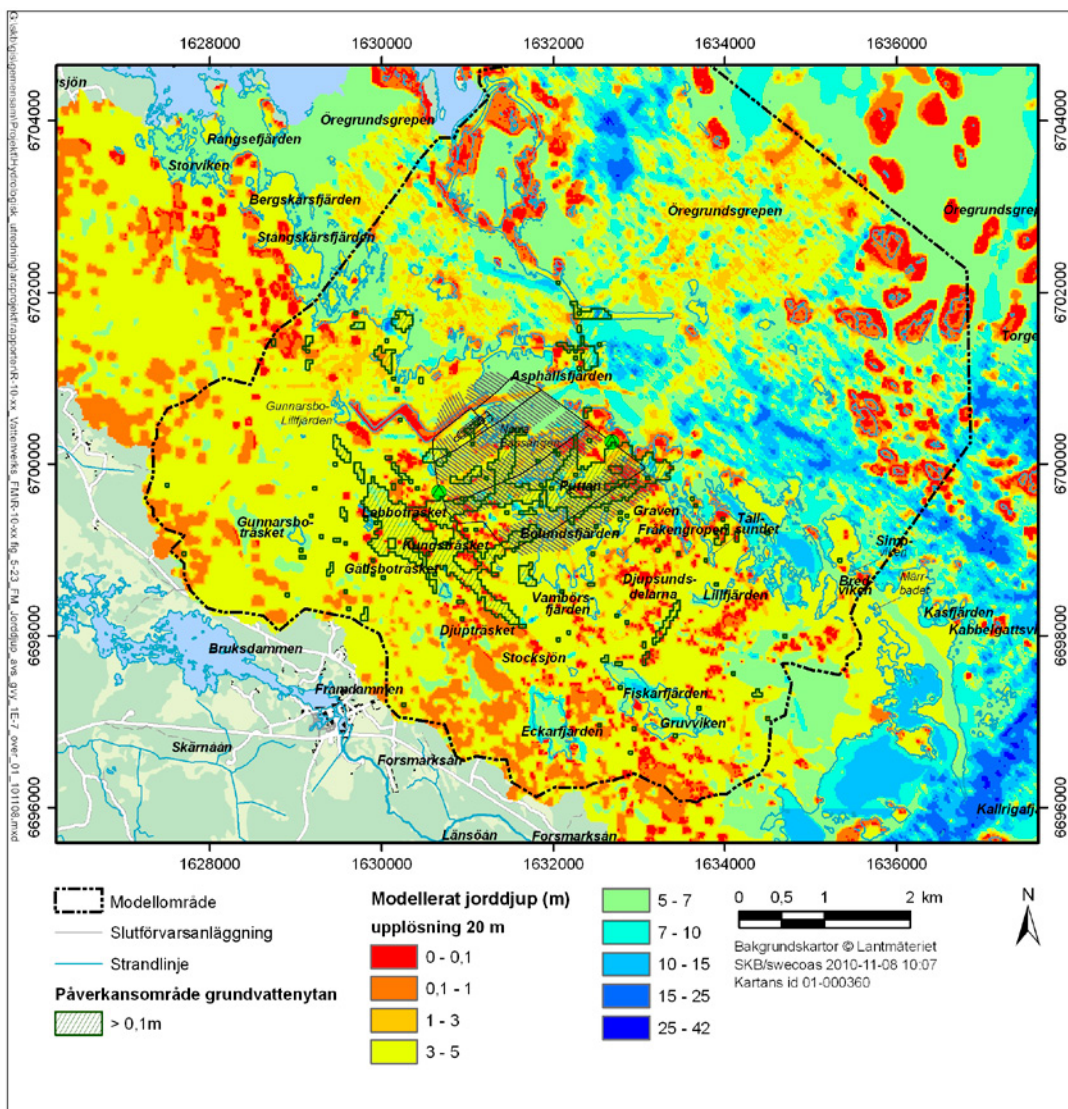
/Mårtensson och Gustafsson 2010/ studerade inverkan av kombinationen av landhöjning och havsnivåförändring (strandlinjeförsjutning) för fallet med en höjning på 0,56 m av strandlinjens medelnivå fram till år 2100. Resultaten visar på ett cirka 10 % mindre påverkansområde för grundvattenytans avsänkning till följd av grundvattenbortledningen från förvaret, jämfört med det modellberäknade påverkansområdet baserat på dagens strandlinje. En höjd strandlinje ger en marginell ökning av inläckaget av grundvatten till slutförvarsanläggningen, vilket beror på en ökning av de vertikala hydrauliska gradienterna mellan ytsystemet och berget i områden direkt vid kusten.

5.8 Effekter på mark- och vattenkemiska förhållanden

I avsnitt 3.3.2 konstaterades att främst torv- och gyttejordar med höga halter organiskt material (kol och kväve) och sulfidmineral kan förändra de mark- och vattenkemiska förhållandena vid en avsänkning av grundvattenytan. Figurerna 5-22 och 5-23 visar den geografiska fördelningen av olika jordarter inom det regionala modellområdet i Forsmark /Hedenström och Sohlenius 2008/ samt jorddjup enligt jordlagermodellen för Forsmark /Hedenström et al. 2008/. Kartorna visar även gränserna för det MIKE SHE-beräknade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Liksom området i övrigt är de kvartära avlagringarna inom påverkansområdet generellt tunna och domineras av morän. Torv och gytjtja förekommer främst i anslutning till sjöar och våtmarker.



Figur 5-22. Karta över jordarter i Forsmark samt påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning beräknat med MIKE SHE-modellen för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



Figur 5-23. Karta över jorddjup (m) enligt en modell som beskriver jordlagrens stratigrafi och mäktighet i Forsmark samt påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning beräknat med MIKE SHE-modellen för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

Tabell 5-11 anger relativa och absoluta ytuppgifter för torv- och gyttjejordar samt glaciala leror, dels inom det regionala modellområdet, dels ungefärliga uppgifter för påverkansområdet. Enligt tabellen finns dessa jordarter i 16 % av landdelen av det regionala modellområdet och i 7–8 % i påverkansområdet. Klassen torv i tabellen avser områden med torvmäktigheter större än 0,5 m, medan klassen postglaciala och glaciala leror innehåller vissa mindre områden med tunnare torvlager. Postglaciala och glaciala leror underlagras i regel torven inom områden med torvmäktigheter större än 0,5 m. Ett litet påverkansområde och en liten andel jordar med höga halter av kol, kväve och sulfidmineral ger totalt sett en liten total yta med sådana jordarter. Enligt borrhningar och andra typer av jordlagerundersökningar har torv i området ett medeldjup på 0,4–1,4 m (beroende på markens höjd över havet) och gyttjelera 0,15 m. Detta innebär att även de totala volymerna torv och gyttjelera blir små inom påverkansområdet; ungefär 24 500 m³ torv (antagen medelmäktighet 1 m) och 40 000 m³ gyttjelera. Vid beräkningen har gyttjelagrets mäktighet inom områden med gyttjelera på jordartskartan ansatts till 0,5 m, vilket motsvarar karteringsdjupet vid jordartskarteringen.

Baserat på de små ytor och volymer torv- och gyttjejordar som förekommer inom påverkansområdet bedöms grundvattenbortledningen endast ge upphov till små och lokala effekter på de mark- och vattenkemiska förhållandena. Förekomst av täta jordlager i områden med torv- och gyttjejordar innebär att avsänkningen av grundvattenytan sannolikt blir begränsad i de områden där dessa jordarter finns.

Tabell 5-11. Jordartsfördelning inom landdelen av det regionala modellområdet och inom påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning.

Jordart	Regionalt modellområde (%)	Påverkansområde (%)
Torv (mäktighet > 0,5 m)	8	1,5
Postglaciala leror (inklusive gyttjelera, lergyttja och gyttja, samt områden med tunna ytlager av torv)	4	5
Glaciala leror (inkl. områden med tunna ytlager av torv)	4	1

Lokalt kan en avsänkning av grundvattenytan ge upphov till en ökad koldioxidavgång samt en ökad nitrifikation i områden med torv- och gyttjejordar. En avsänkning av grundvattenytan inom områden med gyttjejordar kan potentiellt medföra en viss ökad oxidation av sulfidmineral. Vattenkemisk provtagning och analys indikerar att bäckarna i Forsmarksområdet är påverkade av sulfidoxidation redan i dag /Tröjbom et al. 2007/. Sulfidoxidation och nitrifikation har en försurande effekt, som dock motverkas av den höga halten av kalciumkarbonat i moränen. Lokalt kan en ökad sulfidoxidation ge en ökning av bäckvattnets sulfat- och järnhalt.

Grundvattenbortledningen kan också inverka på mark- och vattenkemiska förhållanden med avseende på transport av grundvattenburna ämnen i jord och berg under uppförande och drift. /Mårtensson och Gustafsson 2010/ belyste sådana frågor med MIKE SHE genom en metodik som kallas partikelspårning. Metodiken innebär att ”märkta partiklar” släpps i modellen och sedan tillåts följa grundvattnets flödesvägar. Genom att registrera de märkta partiklarnas rörelser och var de kommer fram till olika plan eller objekt i modellen kan man få en bild av grundvattnets flödesmönster. Vid partikelspårningen släpptes partiklar inom hela den mättade zonen (i både jord och berg) inom hela modellvolymen. Beräkningarna gjordes för uppförandeskedet och för ett helt öppet förvar, i båda fallen för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s.

Resultaten från partikelspårningen visar bland annat de områden i berget som på olika nivåer bidrar till inläckaget av grundvatten till förvaret. Resultaten visar att med undantag för förvarsområdets sydligaste del, kan eventuella grundvattenburna ämnen inte spridas från förvarets undermarksdel till dess omgivningar under uppförande och drift. Detta beror på att förekommande grundvattenflöden i det omkringliggande berget på grund av grundvattenbortledningen är riktade mot förvaret. På motsvarande sätt är förekommande grundvattenflöden i berget kring SFR riktade mot SFR, även vid samtidig grundvattenbortledning från slutförvarsanläggningen och SFR.

Vidare indikerar resultaten från partikelspårningen att grundvattenflödet i jord i en stor del av det intilliggande industriområdet är riktat mot dräneringssystemet vid Forsmarks kärnkraftverk. Under förvarets uppförande- och driftskeden kommer dock grundvattenbortledningen att öka grundvattenflödet från jord till berg även i områden norr om kylvattenkanalen. Specifikt indikerar partikelspårningen att grundvattenbortledningen från förvaret kan förändra grundvattnets flödesvägar och omsättningstid i områden längs kylvattenkanalen. Dessa områden är dock relativt opåverkade av industriella aktiviteter och det bedöms därför vara liten sannolikhet för mobilisering av eventuella föroreningar.

6 Grundvattenbortledningens konsekvenser

Detta kapitel beskriver grundvattenbortledningens konsekvenser. Kapitlet är uppdelat på följande typer av konsekvenser:

- Konsekvenser för naturvärden (avsnitt 6.1).
- Konsekvenser för produktionsmark (avsnitt 6.2).
- Konsekvenser för befintlig vattenhantering och vattenverksamhet (avsnitt 6.3).
- Konsekvenser för byggnader och infrastruktur (avsnitt 6.4).

Metoder, arbetsgång och bedömningsgrunder är förstas olika för olika typer av konsekvenser. I avsnitten 6.1 till 6.4 beskrivs de konsekvensspecifika metoderna, arbetsgången och de bedömningsgrunder som tillämpats. Prognoserna av grundvattenbortledningens effekter i kapitel 5 är en viktig utgångspunkt för konsekvensbeskrivningarna, specifikt vad gäller förändringar av hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden vid olika typer av objekt. De följande avsnitten inleds därför med en genomgång av MIKE SHE-beräknade effekter. Konsekvensbeskrivningarna utgår från ett värsta fall med ett helt öppet förvar och det mest konservativa tätningsfallet ($K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).

Andra utgångspunkter är objektens känslighet och värde. Känslighet kan beskrivas som hur ett objekts funktion och/eller egenskaper förändras vid en viss förändring av de hydrogeologiska och/eller hydrologiska förhållandena. Vad gäller ett objekts värde så innebär en stor hydrogeologisk eller hydrologisk förändring för ett objekt med litet värde en mindre konsekvens än en lika stor effekt för ett objekt med stort värde, givet att de två objektens känslighet är lika.

6.1 Konsekvenser för naturvärden

/Hamrén och Collinder 2010/ redovisar metodik och resultat från ekologiska fältinventeringar och klassning av naturvärden i Forsmark. Inventeringarna och klassningarna är inriktade på naturobjekt och naturvärden för vilka negativa konsekvenser kan uppstå till följd av grundvattenbortledningen. Beskrivningar av konsekvenser för naturvärden (naturobjekt och arter) presenteras i detalj av /Hamrén et al. 2010/. Det område som inventerades sammanfaller i stort med det prognostiserade påverkansområdet för sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivån -50 m ö h. Detta innebär att det inventerade området är avsevärt mycket större än påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning, vilket framgår av figurerna 5-4 och 5-5.

6.1.1 Metodik för konsekvensbeskrivning avseende naturvärden

En beskrivning av en vattenverksamhets konsekvenser för naturvärden är av olika skäl fokuserad på värdefulla naturmiljöer och arter. En typisk orsak till att en naturmiljö eller art anses värdefull är att den är ovanlig eller starkt minskande. Särskilt stora värden tillmäts naturmiljöer med lång kontinuitet, det vill säga naturmiljöer som är svåra att återskapa om de försvinner. En konsekvensbeskrivning för naturvärden brukar således vara inriktad på ”beslutsviktiga” naturmiljöer och arter, vilket innebär att konsekvenser för vanliga naturmiljöer och triviala arter endast brukar beskrivas mycket översiktligt. Klassningen av naturvärden i Forsmarksområdet följer här en fyrgradig skala, enligt en metodik som utarbetats av Naturvårdsverket:

- Klass 1, nationellt värde. Denna klass ska inte sammanblandas med utpekade riksintressen för naturvård enligt miljöbalken.
- Klass 2, regionalt värde.
- Klass 3, kommunalt värde.
- Klass 4, lokalt värde. Detta är en ”extra” klass som inte ingår i Naturvårdsverkets metodik.

Vid naturvärdesklassningen beaktas som nämns ovan naturtypens ovanlighet, men även faktorer som naturobjektets storlek och kontinuitet samt dess ekologiska samband med intilliggande miljöer. Vidare beaktas förekomst av ekologiskt viktiga strukturer eller småmiljöer, rödlistade arter,

Natura 2000-naturtyper (som inte ska sammanblandas med utpekade Natura 2000-områden) samt så kallade habitatarter (enligt EU:s art- och habitatdirektiv). För en mer detaljerad beskrivning av de bedömningsgrunder som använts vid naturvärdesklassningen, se /Hamrén och Collinder 2010/.

Klassningen av naturobjektens känslighet följer en femgradig skala. Denna skala används för att beskriva hur ett objekts funktion och/eller egenskaper förändras vid en viss storlek på förändringen av de hydrogeologiska och/eller hydrologiska förhållandena:

- Klass 1, mycket stor känslighet. Exempel på denna känslighetsklass är gölar eller kärr utan täta bottensediment i utströmningsområden för grundvatten. För denna klass kan ekologiska konsekvenser uppstå vid en varaktig avsänkning av grundvattenytan som är mindre än 0,1 m.
- Klass 2, stor känslighet. Exempel är gölar eller kärr med täta bottensediment samt fuktiga skogsmarker. För denna klass kan ekologiska konsekvenser uppstå vid en varaktig avsänkning av grundvattenytan som är 0,1–0,3 m eller större.
- Klass 3, känsligt. Exempel är fuktiga skogsmarker och strandängar. För denna klass kan ekologiska konsekvenser uppstå vid en varaktig avsänkning av grundvattenytan som är 0,3–1 m eller större.
- Klass 4, mindre känsligt. Exempel på denna känslighetsklass är friska skogsmarker. För denna klass kan ekologiska konsekvenser uppstå vid en varaktig avsänkning av grundvattenytan som är 1–2 m eller större.
- Klass 5, inte känsligt. Exempel på denna känslighetsklass är torra skogsmarker och havsstrandängar. För denna klass kan ekologiska konsekvenser inte uppstå vid en avsänkning av grundvattenytan.

Baserat på naturvärde och känslighet används i nästa steg prognostiserade hydrogeologiska och/eller hydrologiska effekter för att beskriva ekologiska konsekvenser. Specifikt vad gäller våtmarks- och skogsobjekt görs detta genom att kombinera känslighetsklass med ”effektklass” för klassning av påverkan i fem klasser, från obetydlig till mycket stor. Klassningen av effekter baseras på avsänkningen av grundvattenytan enligt en sexgradig skala: > 2 m, 0,5–2 m, 0,1–0,5 m, samt tre klasser inom en ”buffertzona” 0–100 m, 100–200 m respektive 200–300 m från påverkansområdets gräns (avsänkingsgräns på 0,1 m). I nästa steg klassas konsekvenser baserat på klassning av påverkan och naturvärde /Hamrén et al. 2010/. I Sverige finns det i dagsläget inte något enhetligt system för klassning av ekologiska konsekvenser. I enlighet med ett flertal liknande projekt, använde /Hamrén et al. 2010/ följande femgradiga skala i den aktuella klassningen av ekologiska konsekvenser:

- Klass 1, mycket stora konsekvenser. Denna konsekvensklass innebär utsläckande av något av de naturvärden som utgör värdegrunden för ett naturobjekt med nationellt värde (klass 1), riksintresse för naturvärden enligt miljöbalken eller internationellt skyddsvärda objekt (exempelvis Natura 2000-områden).
- Klass 2, stora konsekvenser. Exempel på denna konsekvensklass är betydande förändringar av ett naturobjekt av regionalt värde, eller tydliga förändringar av värden som utgör värdegrunden för ett naturobjekt med nationellt värde eller motsvarande värdeklass, såsom utplånande av skyddsvärd art eller biotop.
- Klass 3, märkbara konsekvenser. Exempel är utsläckande av naturvärde för ett naturobjekt av kommunalt intresse, eller utsläckande av delar av naturvärdena för ett naturobjekt med regionalt värde.
- Klass 4, små konsekvenser. Exempel är utsläckande av naturvärden för naturobjekt med lokalt värde, eller begränsade förändringar av naturvärdena i naturobjekt med kommunalt värde.
- Klass 5, obetydliga konsekvenser. Exempel på denna konsekvensklass är mycket små eller marginella förändringar av naturvärdena i ett naturobjekt.

6.1.2 Ekologiska konsekvenser på landskapsnivå

Som nämnts tidigare ingår Forsmarksområdet i ett helhetsområde med likartade våtmarks- och skogsmiljöer, från kärnkraftverket i norr ned till Eckarfjärden och Kallrigafjärden i söder. Ett mosaikartat landskap med korta avstånd mellan våtmarker och skogsmiljöer innebär att de förstärker varandras värden. Många av de arter som finns i våtmarkerna behöver ett nätverk av lämpliga miljöer för att arterna på sikt ska kunna fortleva; om en våtmark torkar ut finns det ändå möjlighet för en art att sprida sig till andra, närliggande våtmarker. På motsvarande sätt gäller att om en art dör ut i en våtmark kan arten återkomma från andra våtmarker då förutsättningarna förbättrats.

Arten gölgröda är av speciellt intresse i området och ett exempel på en svårspriidd art. I och med att gölgrödan har en så begränsad utbredning i landet är det viktigt att förhindra att dess utbredningsområde fragmenteras. Om avståndet till lämpliga miljöer blir för stort (säg, längre än en km) kan arten på sikt bli isolerad i små populationer som generellt löper större risk för utdöende /Hamrén et al. 2010/. En förändring av de hydrologiska förhållandena i en göl där gölgrödan förekommer medför sämre betingelser för grodornas lek och livsmiljö. Vidare kan en avsänkning av grundvattenytan medföra torrare förhållanden i kringliggande områden, vilket också kan försämra artens spridningsförutsättningar. Man kan alltså konstatera att de gölar i Forsmarksområdet där gölgröda förekommer sammantaget utgör ett viktigt spridningscentrum för arten. Detta gäller även för orkidén gulyxne i rikkärren och för de kalkgynnade marksvamparna i skogarna, även om spridningsmekanismerna förstås är annorlunda och till stora delar betydligt sämre kända.

Ur ett landskapsekologiskt perspektiv bedöms grundvattenbortledningen medföra mycket stora konsekvenser för helhetsområdet om inga åtgärder vidtas. Detta motiveras främst av att spridningsförutsättningarna kan komma att försämrats avsevärt för de lokala populationerna av gölgröda och gulyxne. Dessa två arter tillhör de mest krävande, men grundvattenbortledningen kan medföra att även andra arter får försämrade spridningsmöjligheter i Forsmarksområdet. Med de åtgärder som beskrivs i avsnitten 7.2–3 bedöms grundvattenbortledningen konsekvenser för helhetsområdet minska från mycket stora till märkbara.

6.1.3 Konsekvenser för sjöar och bäckar

Enligt modellberäkningarna i avsnitten 5.6.1–2 ger grundvattenbortledningen upphov till en obetydlig sänkning av vattennivån i sjöarna Eckarfjärden och Fiskarfjärden. Enligt beräkningarna kan det uppstå en mycket begränsad sänkning på maximalt någon cm av medelvattennivån i sjöarna Gällsboträsket, Bolundsfjärden och Norra Bassängen. Sjönivåsänkningen i sjön Puttan blir enligt beräkningarna maximalt 0,15–0,85 m beroende på tätningsfall. Vidare bedöms grundvattenbortledningen ge upphov till en reducering på upp till maximalt 13 % av det under året ackumulerade bäckinflödet till Bolundsfjärden. Effekterna på vattenföringen i de andra studerade bäckarna bedöms bli marginella.

Med undantag för Puttan, bedöms således grundvattenbortledningens ge upphov till mycket begränsade effekter på sjöarnas vattennivåer. Minskningen av Puttans sjönivå och sjöyta ger en ökad igenväxningstakt, vilket bedöms medföra stora ekologiska konsekvenser. På grund av de mycket begränsade möjligheterna för fiskvandring mellan Puttan och havet via Norra Bassängen/Bolundsfjärden har dock sjön ingen betydelse som yngelkammare för fisk. Den lilla sänkningen av sjönivån i Bolundsfjärden och Norra Bassängen kan medföra att sjöarna under ytterligare ett antal dagar på sensommar och tidig höst är utan förbindelse med havet (vilket sker även i dagsläget). Detta bedöms inte medföra att sjöarnas betydelse som yngelkammare för fisk eller fiskvandringen mellan Bolundsfjärden och havet påverkas i någon betydande grad.

Sammantaget bedöms grundvattenbortledningen endast ge upphov till obetydliga konsekvenser för det kustnära fisket och de ekologiska förhållandena i sjöarna i Forsmark. De ekologiska konsekvenserna för sjön Graven bedöms bli små. Vad gäller sjön Puttan (klass 2, regionalt värde) bedöms dock de ekologiska konsekvenserna bli stora. Som nämnts tidigare är inga speciella naturvärden associerade med bäckarna i området. Detta innebär att konsekvenserna av grundvattenbortledningen bedöms bli obetydliga även för bäckarna.

6.1.4 Konsekvenser för våtmarksobjekt

Hydrogeologiska och hydrologiska effekter

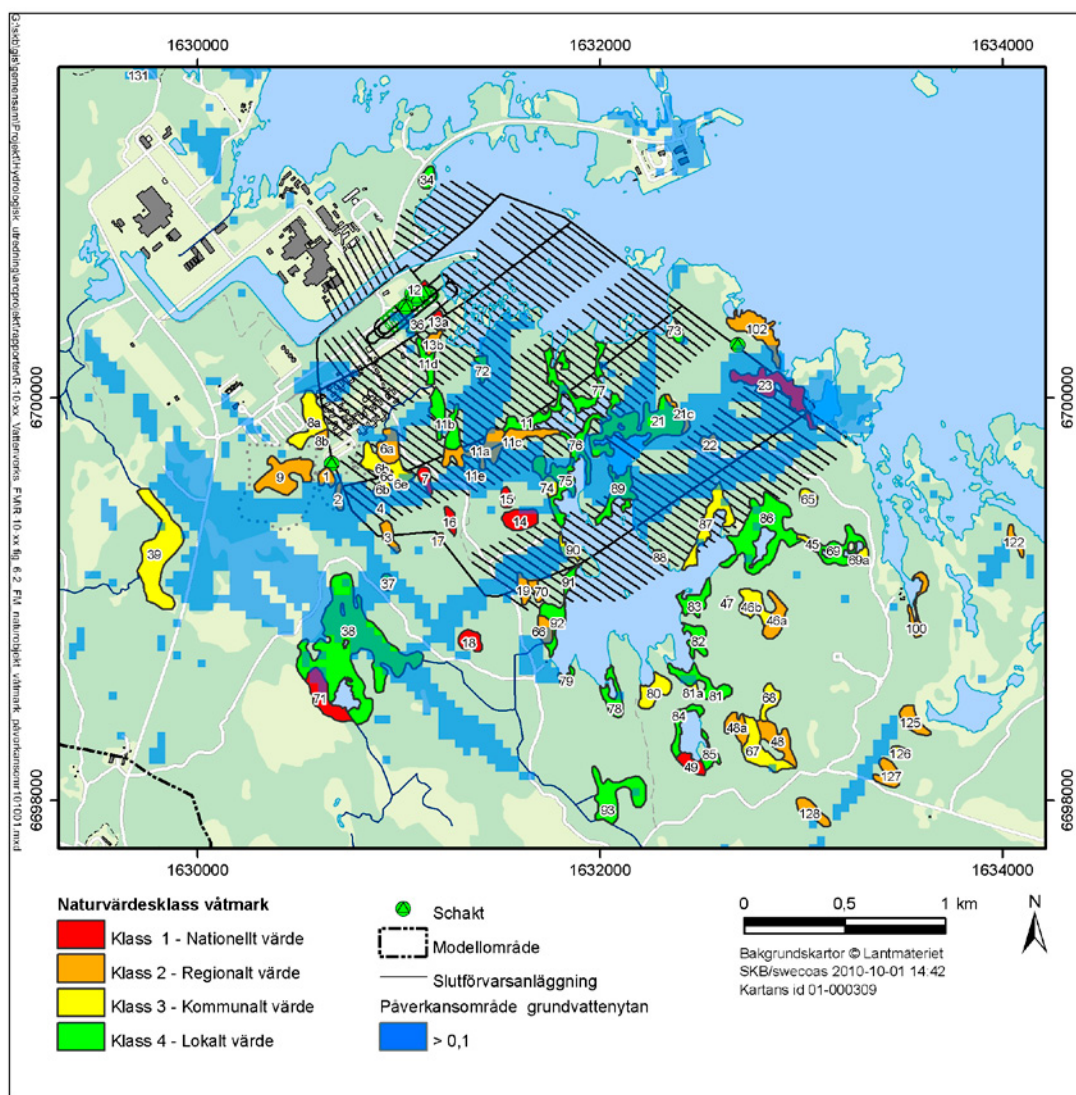
De höga naturvärdena i Forsmarksområdets våtmarker (kalkgölar och rikkärr) är knutna till arter som är beroende av blöta eller fuktiga förhållanden. Detta innebär att konsekvensbeskrivningen avseende områdets våtmarker utgår från prognostiserade förändringar av de hydrogeologiska och hydrologiska förhållandena i anslutning till våtmarkerna. Som underlag för att bedöma konsekvenserna för de identifierade och naturvärdesklassade våtmarksobjekten har följande aspekter beaktats:

- Våtmarksobjektens geografiska lägen i förhållande till det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning.
- Grundvattenavsänkningens effekter på våtmarkernas vattenomsättning.
- Jordlagrens stratigrafi (jordlagerföljden) i anslutning till våtmarksobjekten.

Våtmarksobjektens geografiska lägen i förhållande till det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning

Avsänkningen av grundvattenytan har inverkan på det ytnära vattensystem som växter och djur inom och kring våtmarkerna är beroende av. Figur 6-1 visar våtmarksobjektens geografiska lägen i förhållande till det modellberäknade påverkansområdet (de blåfärgade områdena i kartan) baserat på tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. I kartan är påverkansområdet definierat så att avsänkningen av grundvattenytan är 0,1 m (som årsmedelvärde) vid påverkansområdets gräns. Den försvarsutformning som visas i figuren är den som använts i MIKE SHE-beräkningarna (kapitel 5), det vill säga med en reserv på 27 % för potentiellt bortfall av kapselpositioner.

Som nämnts tidigare (avsnitt 4.4.3) omfattar konsekvensbeskrivningen sammanlagt 75 våtmarksobjekt. Drygt 30 stycken våtmarksobjekt är helt eller delvis belägna inom det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. De åtta högst naturvärdesklassade våtmarksobjekten (klass 1, nationellt värde) är 7, 14–16, 18, 23, 49 och 71. Av dessa är fyra stycken (7, 14, 23 och 71) helt eller delvis inom påverkansområdet och objekten 15, 16 och 18 är nära påverkansområdets gräns. Av de 25 våtmarksobjekt som är naturvärdesklassade som klass 2, regionalt värde är tretton stycken (1–3, 6a, 6c, 11a, 11c, 11e, 19, 21c, 22, 66 och 102) helt eller delvis inom påverkansområdet. Klass 2-objekten 9, 122, 125, 127 och 128 är nära påverkansområdets gräns.



Figur 6-1. Översiktsskarta som visar prognostiserat påverkansområde för grundvattenytans avsänkning (avsänkingsgräns 0,1 m) samt geografiska lägen för identifierade och naturvärdesklassade våtmarksobjekt.

Avsänkning av grundvattenyta och ytvattennivå

Tabell 6-1 sammanfattar den MIKE SHE-beräknade avsänkningen av grundvattenytan i anslutning till våtmarksobjekten för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s /Mårtensson et al. 2010/. Resultat visas dels för typåret 2006, dels för normalåret. Sett till samtliga våtmarksobjekt är grundvattenytan för opåverkade förhållanden i genomsnitt ungefär 0,5 m under markytan. För påverkade förhållanden är medelavsänkningen för samtliga våtmarksobjekt 0,2–0,3 m. Avsänkningen är betydligt större (2–3 m) för de våtmarksobjekt som helt är belägna inom påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning (med en avsänkingsgräns på 0.1 m). Det som redovisas i tabellen är medelvärden för många objekt, vilket innebär att den modellberäknade avsänkningen för vissa enskilda våtmarksobjekt är större än vad som anges i tabellen. Vidare baseras tabellen på objektspecifika medelvärden, vilket betyder att en stor lokal avsänkning (inom en del av ett objekt) delvis kan kompenseras av en liten prognostiserad avsänkning inom övriga delar av objektet.

Baserat på typåret 2006 är den största medelavsänkningen av grundvattenytan mellan 0,5 och 5 m inom objekten 2, 7, 11e, 21, 21c, 22, 23, 89 och 102, och någon dm för objekten 11, 11a, 19, 74, 75, 90 och 102. Medelavsänkningen för övriga objekt är i stort sett noll. Av objekten med högst naturvärden (nationellt eller regionalt värde) prognostiserar modellen en avsänkning som blir 0,5 m eller mer för sju objekt (2, 7, 11e, 21c, 22, 23 och 102), varav objekten 7 och 23 bedöms ha nationellt naturvärde. Sammantaget visar därmed beräkningsresultaten att åtgärder kan behövas för att upprätthålla grundvattenytan och/eller ytvattennivån inom ett antal våtmarksobjekt med höga naturvärden. Sådana åtgärder beskrivs närmare i avsnitt 7.2.

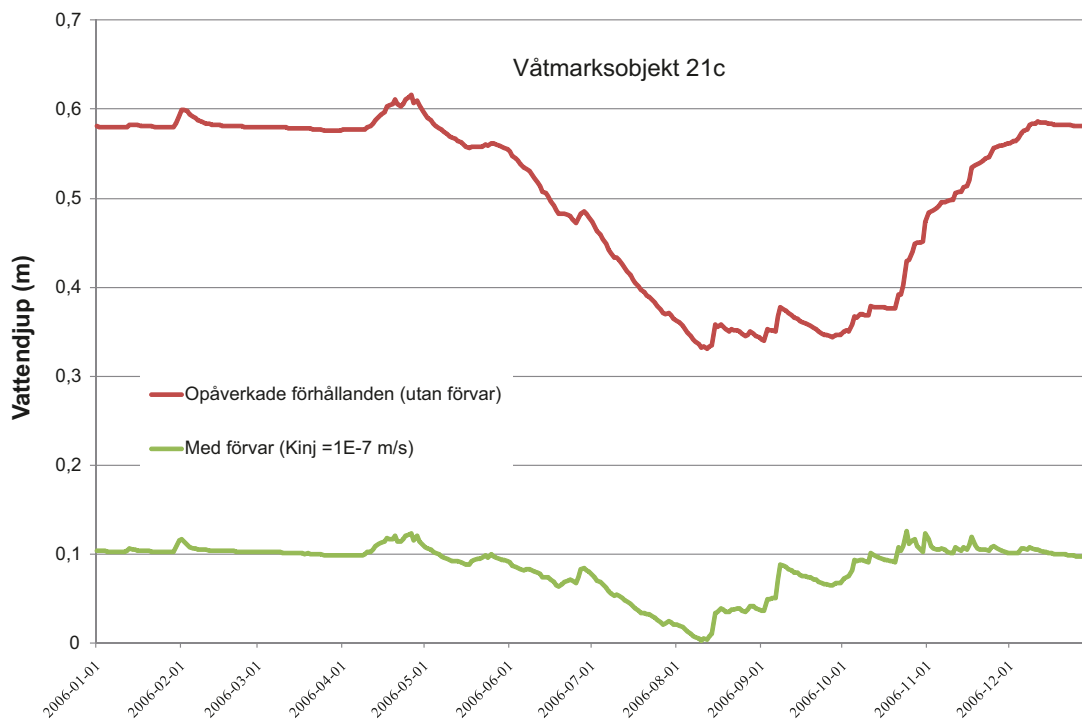
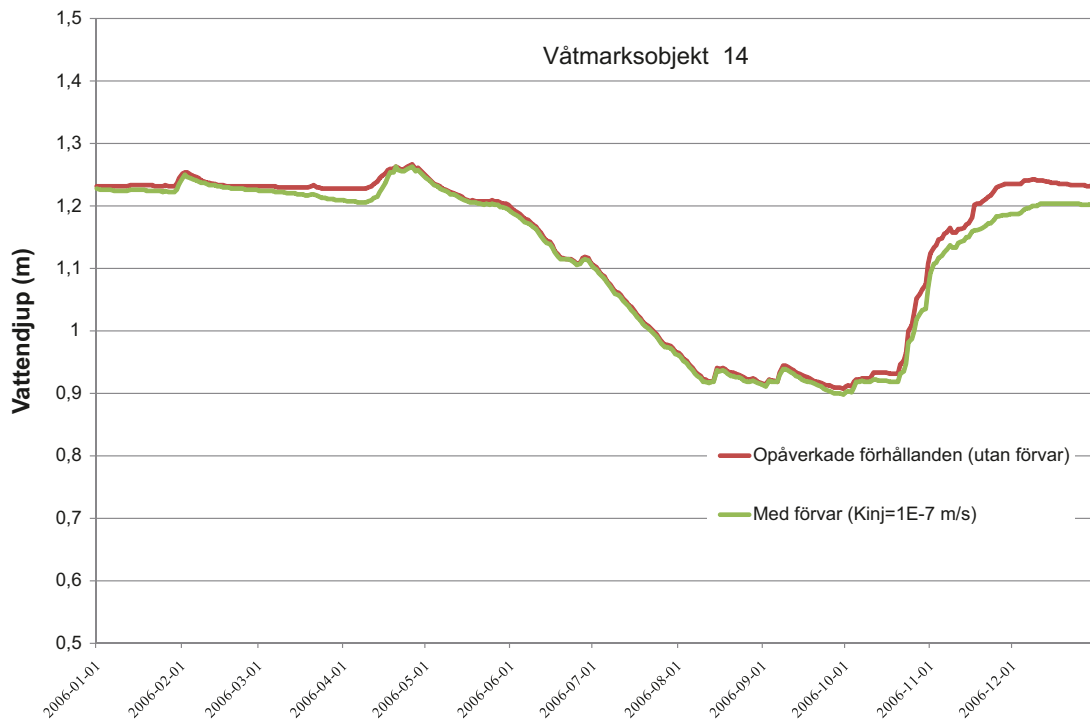
/Mårtensson et al. 2010/ redovisar även sänkningen av ytvattennivån inom ett urval på 14 våtmarksobjekt. De som valts ut (6a, 11, 11a, 11b, 11c, 14–18, 21, 22, 49 och 71) är utvalda för att de har höga naturvärden (se bilaga 1) och/eller för att de är belägna i olika lägen i förhållande till påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning (se figur 6-1). De utvalda objekten ger därför en bild av grundvattenbortledningens effekter på ytvattennivån i områden som är belägna på olika avstånd från påverkansområdet.

Våtmarkerna har generellt små ytvattendjup även för opåverkade förhållanden. Med undantag för objekt 14 och 49, med ytvattendjup som enligt modellen är drygt 1 m, är de flesta våtmarksobjekten grunda (i genomsnitt mindre än 1 m). Resultaten indikerar vidare att många våtmarker i Forsmark torkar ut periodvis även under opåverkade förhållanden, särskilt under kortare perioder på sommarhalvåret.

För de flesta av de analyserade våtmarksobjekten minskar enligt MIKE SHE-beräkningarna ytvattendjupet som årsmedelvärde med en eller ett par cm (se exempel i den övre bilden i figur 6-2). En större minskning, i storleksordningen 0,5 m, kan noteras för objekt 21c. Enligt den nedre bilden i figur 6-2 är ytvattendjupet litet under hela året i denna våtmark för påverkade förhållanden, och våtmarken är helt torr en kort period under den senare delen av sommaren. Med några undantag, visar modelleringsresultaten att grundvattenbortledningens effekter på de studerade våtmarkernas (gölarnas) ytvattennivå är relativt små. Generellt kan de största effekterna noteras under torrperioder. Resultaten visar att en konstant och stor avsänkning av grundvattenytan i anslutning till en våtmark inte behövs innebära en konstant och stor minskning av tillgången på ytvatten. Denna slutsats är viktig i sammanhanget eftersom tillgången på ytvatten, som nämnts tidigare, är en viktig faktor för till exempel gölgröda.

Tabell 6-1. MIKE SHE-beräknade medelvärden för grundvattenytans avsänkning för samtliga våtmarksobjekt, samt för våtmarksobjekt belägna helt eller delvis inom det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Beräkningarna avser tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

	År 2006		Normalår	
	Djup till grundvattenytan (m u my), opåverkade förhållanden	Avsänkning (m), påverkade förhållanden	Djup till grundvattenytan (m u my), opåverkade förhållanden	Avsänkning (m), påverkade förhållanden
Samtliga våtmarksobjekt	0,4	0,3	0,3	0,2
Våtmarksobjekt belägna helt inom påverkansområdet	0,6	2,7	0,5	1,8
Våtmarksobjekt belägna delvis inom påverkansområdet	0,5	0,2	0,3	0,1



Figur 6-2. MIKE SHE-beräknade tidsserier på ytvattendjupet inom våtmarksobjekten 14 (övre bilden) och 21c (nedre bilden) för opåverkade förhållanden (utan förvar) och med ett förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

Inverkan på våtmarkernas vattenomsättning

/Mårtensson et al. 2010/ genomförde partikelspårning med MIKE SHE-modellen för att illustrera hur våtmarkernas vattenomsättning kan komma att påverkas av grundvattenbortledningen. Partikelspårningen ger ett viktigt underlag för att bedöma ekologiska konsekvenser och bidrar till den övergripande förståelsen för grundvattenbortledningens effekter på grundvattenflöden på olika djup och i olika delar av Forsmarksområdet. Partikelspårningen gjordes genom att släppa partiklar nära markytan inom hela modellområdet i takt med infiltrationen. Resultaten ger ett direkt mått på hur grundvattenflödet till våtmarkerna förändras på grund av grundvattenbortledningen från förvaret.

Resultaten visar att den (relativa) förändringen av grundvattenflödet till en viss våtmark är starkt beroende på dess geografiska läge i förhållande till påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Sett till samtliga våtmarksobjekt inom det område som undersöktes av /Hamrén och Collinder 2010/ minskar enligt MIKE SHE-beräkningarna grundvattenflödet med i storleksordningen 10 %. De största förändringarna kan noteras för objekten 2, 7, 21, 21c, 22 och 73, med relativa förändringar mellan 50 % och nästan 100 % (det vill säga, inflödet av grundvatten upphör nästan helt). För de våtmarksobjekt som helt eller delvis är belägna innanför påverkansområdet, minskar grundvattenflödet med i medel 25 %. För de våtmarksobjekt som är belägna inom 50–100 m från påverkansområdets gräns, är minskningen i storleksordningen 5 %. För övriga objekt är minskningarna marginella (0,5–2 %) /Mårtensson et al. 2010/.

I ett andra beräkningsfall släpptes partiklar inom den mättade zonen inom hela modellvolymen. Resultaten visar att grundvattenbortledningen ger upphov till nedåtriktade hydrauliska gradienter i berget, vilket generellt innebär djupare (och längre) flödesvägar för grundvattnet. Resultaten visar vidare att även för opåverkade förhållanden passerar endast en liten andel av det grundvatten som flödar in i våtmarkerna berget under sin flödesväg mellan in- och utströmning. Detta innebär att förändrade hydrauliska gradienter i berget har liten betydelse för våtmarkernas vattenomsättning.

För ett urval objekt användes MIKE SHE-modellen för att studera förändringarna av ytavrinningen till objekten. Resultaten visar endast på små förändringar av ytavrinningen, även för våtmarksobjekt belägna inom påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Detta kan vara en delförklaring till att grundvattenbortledningen tycks ha små effekter på våtmarkernas (gölarnas) ytvattennivå (se figur 6-2). MIKE SHE-modelleringen visar alltså att i termer av mängden tillflödande grundvatten, har grundvattenbortledningen störst inverkan på grundvattenflödet till de våtmarksobjekt som är belägna inom eller i anslutning till påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Med en avsänkingsgräns på 0,1 m har grundvattenbortledningen avsevärt mindre inverkan på mängden tillflödande grundvatten för de våtmarksobjekt som är belägna utanför påverkansområdet. Inom påverkansområdet för sänkningen av tryckhöjderna i berget innebär grundvattenbortledningen att grundvattnet generellt följer djupare flödesvägar. Denna förändring av grundvattnets flödesvägar medför dock endast små effekter på mängden tillflödande grundvatten till våtmarksobjekten. Detta beror på att även för opåverkade förhållanden består endast en liten andel av det grundvatten som flödar till våtmarkerna av grundvatten som mellan in- och utströmning passerat berget. En ytterligare minskad andel av sådant grundvatten på grund av grundvattenbortledningen bedöms i sig heller inte medföra några negativa konsekvenser för våtmarksobjektens vattenkvalitet.

För att klargöra avsänkningens inverkan på våtmarkernas vattenbalans redovisar /Mårtensson et al. 2010/ vattenbalanser för ett urval på 14 stycken våtmarksobjekt. Urvalet omfattar samma objekt som för vilka sänkningen av ytvattennivån analyserats ovan. Som väntat visar analysen att förvaret har större inverkan på vattenbalansen för de våtmarksobjekt som är belägna inom eller nära påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Med en avsänkingsgräns på 0,1 m kan ingen inverkan ses i resultaten för de våtmarksobjekt som är belägna utanför påverkansområdet. Resultaten från studien illustrerar dock det faktum att grundvattenytans avsänkning inom ett visst objekt (till exempel en våtmark) inte ger all nödvändig information för att beskriva de ekologiska konsekvenserna för objektet. Vattenomsättningen (vattenbalansen) kan påverkas av förändringar som sker inom objektets avrinningsområde, det vill säga även utanför själva objektet, om det definierats baserat på naturvärden och inte avrinningsområdesgränser.

Analysen visar att i de fall där vattenbalansen påverkas sker detta framförallt i form av minskade nettotillflöden av grundvatten och minskade nettoutflöden av ytvatten. Detta kan tolkas som att minskade tillflöden kompenseras av minskade utflöden. Under opåverkade förhållanden skulle detta

innebära att det under delar av året uppstår ett överskott på ytvatten som avrinner från våtmarkerna. En avsänkning av grundvattenytan i anslutning till våtmarken, och som innebär att tillflödet av grundvatten minskar, leder då till en minskning av detta ytvattenöverskott och därmed till en minskad ytvattenavrinning. Inom exempelvis våtmarksobjekt 21c ger grundvattenbortledningen enligt MIKE SHE-beräkningarna upphov till en relativt stor avsänkning av grundvattenytan och ett minskat ytvattendjup (se ovan). För detta objekt kan man i vattenbalansen notera att delar av det vatten som avrinner som ytvatten under opåverkade förhållanden istället infiltrerar genom markytan inom objektet /Mårtensson et al. 2010/.

Kvartärgeologiska förhållanden i anslutning till våtmarkerna

Som beskrivits tidigare är klassning av våtmarkernas känslighet en faktor som ingår i konsekvensbeskrivningen. Specifikt har de kvartärgeologiska förhållandena i anslutning till de naturvärdesklassade våtmarkerna betydelse för avsänkningen av grundvattenytan vid en sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg. Ett lågkonduktivt jordlager under en våtmark kan innebära att två lokala grundvattensystem förekommer i jordlagren; en öppen akvifer med en fri grundvattenyta ovan och en sluten eller läckande akvifer under det lågkonduktiva jordlagret. Ett lågkonduktivt jordlager under en våtmark kan därmed fungera som ett slags barriär, som minskar eller förhindrar en avsänkning av den fria grundvattenytan. Med andra ord kan barriären innebära att en sänkning av grundvattnets tryckhöjd under det lågkonduktiva jordlagret endast medför en begränsad eller ingen avsänkning av grundvattenytan ovanför lagret, det vill säga det vatten som ingår i det vattensystem som växter och djur är beroende av.

Som nämnts i avsnitt 4.2.2 har en konceptuell jordlagermodell tagits fram för Forsmarksområdet /Hedenström och Sohlenius 2008/. Enligt denna modell förekommer glacialera under många våtmarker i området. Glacialera har generellt en mycket låg vattengenomsläpplighet, och skulle således kunna utgöra en barriär mot en avsänkning av grundvattenytan om grundvattnets tryckhöjd sänks under glacialeran. Det kan även finnas relativt täta postglaciala sediment ovan moränen på vissa ställen, även i områden där det inte finns glacialera.

/Sohlenius och Hedenström 2009/ sammanställde befintlig information om jordlagerföljder och genomförde även kompletterande så kallad sticksondering i 20 våtmarksobjekt. Detta genomfördes för att stämma av hur väl den konceptuella jordlagermodellen överensstämmer med lagerföljden under de våtmarker (kalkgölar och rikkärr) som identifierats och naturvärdesklassats. De våtmarksobjekt som valdes ut för den kompletterande sonderingen är de med högst naturvärden, ligger inom eller i anslutning till det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning, och/eller bedöms vara kvartärgeologiskt viktiga att undersöka eftersom de inte undersökts tidigare.

Enligt den genomförda sonderingen överensstämmer de undersökta våtmarkernas jordlagerföljd generellt väl med den konceptuella jordlagermodellen för Forsmarksområdet. Glacialera konstaterades i minst en sonderingspunkt i 15 av de 20 undersökta våtmarkerna. Överensstämmande resultat har även erhållits vid rödrivning för installation av grundvatten- och pegelrör i våtmarksobjekten 7, 8, 14, 16, 18 och 23 /Werner et al. 2009/. Vid sonderingen var det dock i regel svårt att penetrera det lager med postglacial sand/grus som ofta förekommer ovan glacialeran. Detta innebär att förekomst av glacialera inte alltid har kunnat bekräftas, även om det sannolikt finns under sand/gruslagret.

I denna rapport har jordartskartan över Forsmarksområdet (figur 4-5) och kunskap om jordlagerföljden i andra, liknande våtmarker i området /Hedenström och Sohlenius 2008, Sohlenius och Hedenström 2009/ använts som underlag för att bedöma jordlagerföljden även i våtmarker som inte undersökts. Våtmarker som inte undersökts omfattar främst de med lägre naturvärden och de som är belägna i mer perifera delar av området. Sammantaget bedöms ungefär hälften av de identifierade och naturvärdesklassade våtmarksobjekten helt eller till största delen sakna lågkonduktiv glacialera ovan moränen. För övriga våtmarker bedöms glacialera överlagra moränen helt eller under största delen av våtmarken. Med andra ord finns det våtmarker där glacialera förekommer endast ställvis under våtmarken. Vid sonderingen i de våtmarker som består av en kalkgöl omgiven av ett rikkärr har i ett flertal fall glacialera påträffats under gölen, medan i regel torv eller postglacial lera överlagrar moränen inom rikkärret.

Av de högst naturvärdesklassade våtmarksobjekten (7, 14–16, 18, 23, 49 och 71), saknas enligt de genomförda sonderingarna glacialera i jordlagerföljden för fyra objekt (våtmarksobjekt 7, 14, 15

och 23). Dessa objekt saknar därmed den barriär som diskuteras ovan. Sannolikt saknas glaciallera även under delar av våtmarksobjekt 16. Av de 25 våtmarksobjekt som är naturvärdesklassade som klass 2, regionalt värde saknas enligt fältundersökningarna glaciallera i jordlagerföljden för tre objekt (våtmarksobjekt 11c, 70, 102).

Sammanfattande bedömning av de ekologiska konsekvenserna för våtmarksobjekt

/Hamrén et al. 2010/ ger detaljerade beskrivningar av grundvattenbortledningens ekologiska konsekvenser för våtmarksobjekt i Forsmark. Enligt den tidigare beskrivna metodiken utgår konsekvensbeskrivningarna från objektens naturvärden, känslighet och prognoserna av grundvattenbortledningens effekter. Om inga åtgärder vidtas bedöms de ekologiska konsekvenserna bli mycket stora för de två klass 1-objekten 7 och 23 och stora för 15 stycken klass 1- och 2-objekt (1–3, 6a, 6c, 8b, 11e, 14, 15, 18, 19, 21c, 22, 66, 70), se figur 6-3. Konsekvenserna bedöms bli märkbara för åtta objekt, små för åtta objekt och obetydliga för 19 objekt. Inga ekologiska konsekvenser bedöms uppstå för 23 stycken våtmarksobjekt.

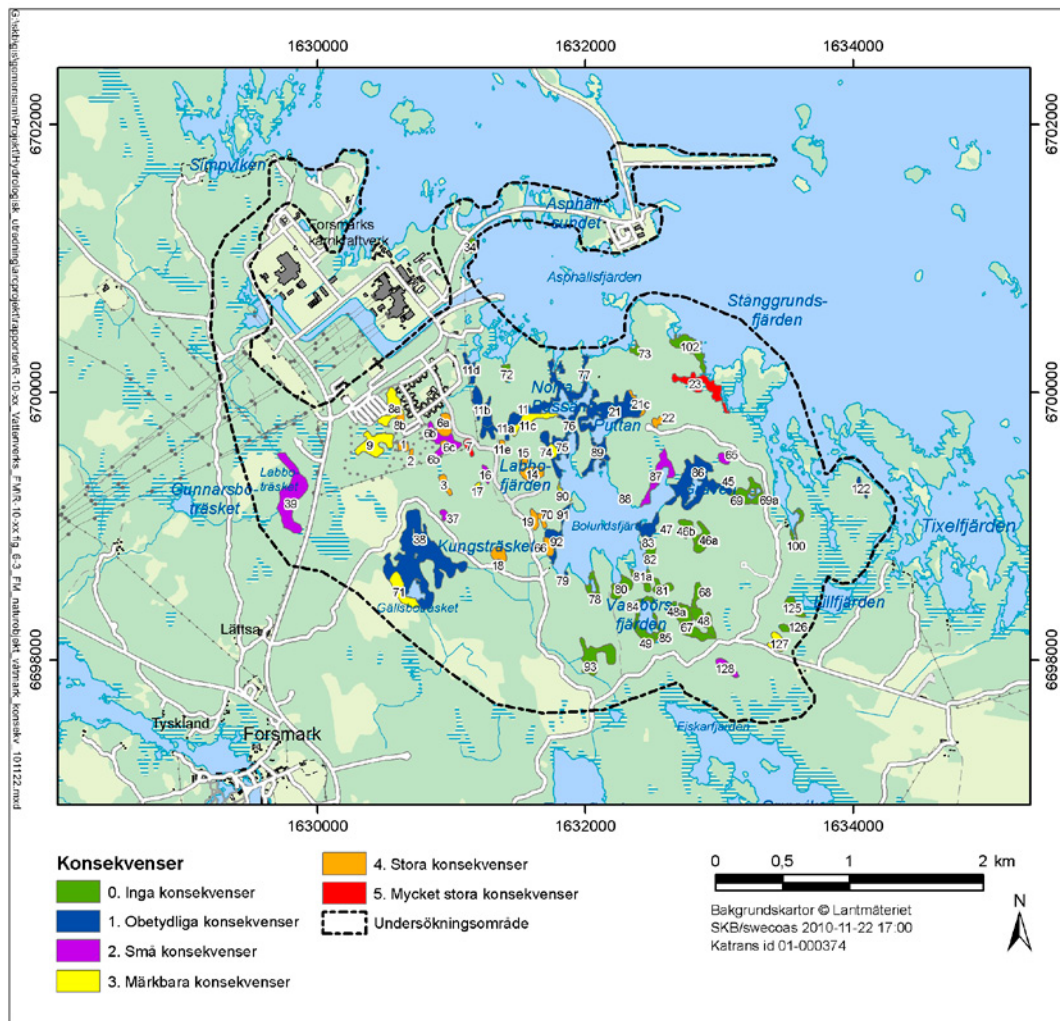
De vattentillförselåtgärder som föreslås i avsnitt 7.2 kan av praktiska skäl inte genomföras överallt i Forsmarksområdet och åtgärderna fokuserar därför på rödlistade och skyddade arter (se avsnitt 6.1.6) i objekten 7, 14–16 och 18. Med dessa åtgärder bedöms grundvattenbortledningen medföra mycket stora konsekvenser för ett objekt (objekt 23), stora konsekvenser för tolv objekt, märkbara konsekvenser för åtta objekt och små konsekvenser för sju stycken objekt. Åtgärderna omfattar inget av de 19 objekten med obetydliga konsekvenser. Som beskrivs i avsnitt 7.3 kommer SKB även att bedriva naturvårdsinriktad skötsel av bland annat våtmarker i Forsmark. Åtgärder i form av röjning och slåtter kommer att bidra till att hålla våtmarker med höga naturvärden öppna, vilket motverkar eventuellt torrare förhållanden till följd av grundvattenbortledningen.

- Hela eller delar av klass 1-objekten 7, 14, 15, 18 och 23 utgörs av Natura 2000-naturtyperna rikkärr (naturtyp 7230) och/eller kalkrika oligo-mesotrofa vatten med bentiska kransalger (naturtyp 3140).
- Objekt 7 består av en kalkgöl som omges av ett rikkärr (bilaga 1). I samband med de ekologiska fältinventeringarna har man bland annat observerat arterna gölgröda, gulyxne och kalkkärrsgrynsnäcka.
- Våtmarksobjekt 14 (Norra Labbofjärden) är en liten kalkgöl som omges av ett extremrikkärr. De arter som observerats i kalkgölen omfattar gölgröda, större vattensalamander, blodigel samt kransalgerna röd- och mellansträfsa. Vid inventeringen av kärret har man funnit loppstarr, orkidéer (bland annat kärrknipprot och ängsnycklar) och kalkkärrsgrynsnäcka.
- Våtmarksobjekt 15 (Norra Labbokärret) är en kalkgöl som omges av ett medelrikkärr. Arter som observerats omfattar bland annat gölgröda, käppkrokmossa och citronfläckad kärrtrollslända.
- Objekt 18 (Kungsträsket) är en kalkgöl som omges av ett rikkärr. I kalkgölen har bland annat gölgröda och blodigel observerats. För en närmare redogörelse av den ekologiska konsekvensbeskrivningen, se /Hamrén et al. 2010/. Konsekvenserna för rödlistade och skyddade arter beskrivs i avsnitt 6.1.6.
- Våtmarksobjekt 23 består av ett kustnära extremrikkärr och en göl. I extremrikkärret förekommer arten loppstarr.

6.1.5 Konsekvenser för skogsobjekt

Kvartärgeologiska förhållanden och hydrogeologiska effekter

Utgångspunkten för att bedöma konsekvenser för skogsobjekt är deras geografiska lägen i förhållande till det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Samtliga skogsobjekt är belägna inom områden som enligt jordartskartan /Hedenström och Sohlenius 2008/ huvudsakligen består av morän. Det förekommer mindre delområden inom vissa större skogsobjekt med glaciallera i jordlagerföljden. Sammantaget bedöms konsekvenser i form av markkompaktering och påverkan på markfauna (till exempel svampar) vara mycket begränsade. För skogsobjekten bedöms det dock huvudsakligen inte finnas någon barriär som kan minska eller förhindra en avsänkning av grundvattenytan. Den kompakta morän med låg vattengenomsläpplighet som man hittat på flera platser i Forsmarksområdet (se avsnitt 4.2.2) kan dock ha en sådan minskande eller förhindrande effekt i de skogsområden där denna typ av morän förekommer.



Figur 6-3. Översiktsskarta som visar klassindelade konsekvenser för våtmarksobjekt, utan åtgärder /Hamrén et al. 2010/.

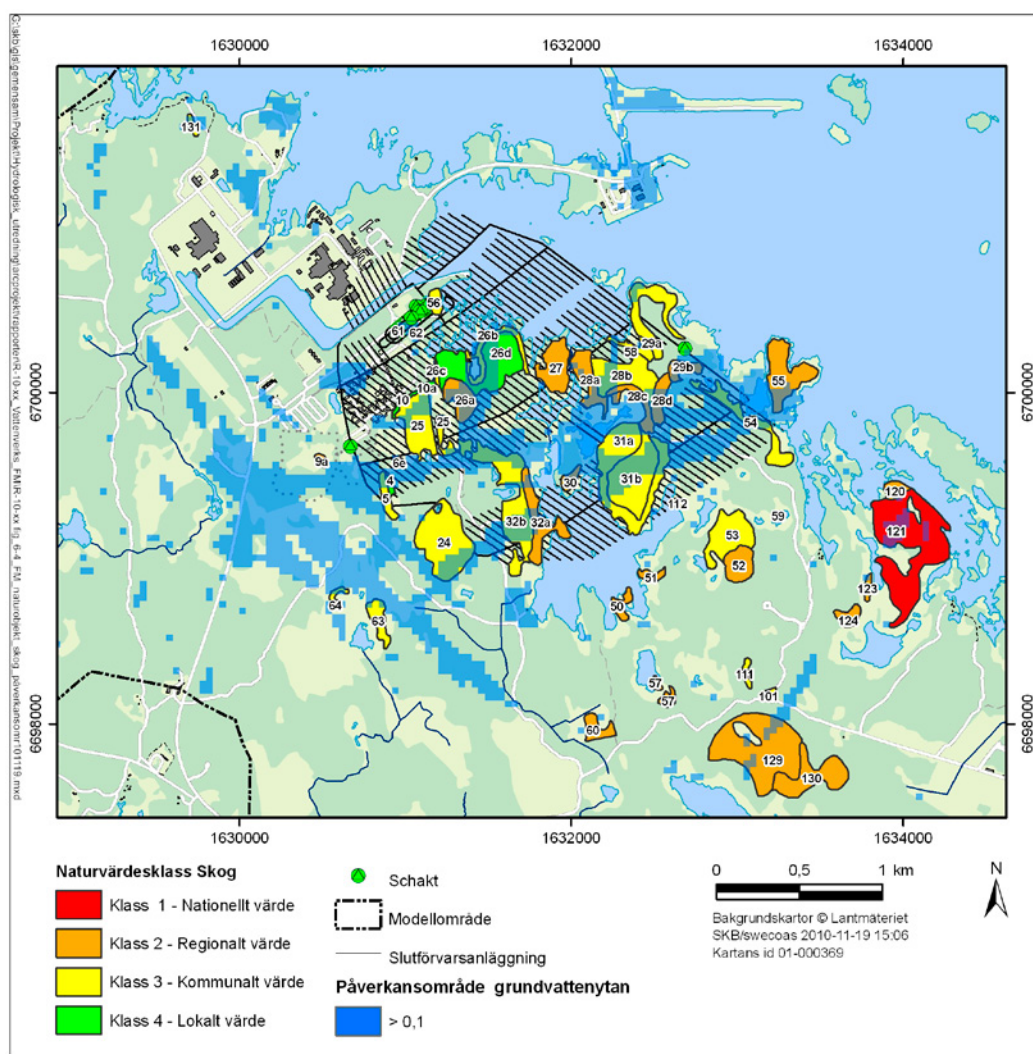
Som nämnts tidigare (avsnitt 4.4.4) omfattar konsekvensbeskrivningen sammanlagt 46 skogsobjekt. Figur 6-4 visar skogsobjektens lägen i förhållande till det modellberäknade påverkansområdet (de blåfärgade områdena i kartan) baserat på tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Påverkansområdet är även här definierat så att avsänkning är 0,1 m (som årsmedelvärde) vid påverkansområdets gräns. Nästan 30 skogsobjekt är helt eller delvis inom påverkansområdet. Av de högst naturvärdesklassade skogsobjekten (klass 1, nationellt värde och klass 2, regionalt värde) är elva objekt (6e, 26a, 28a, 28c, 28d, 29b, 30, 32a, 55, 121 och 129) helt eller delvis inom påverkansområdet. Skogsobjekt 9a är nära påverkansområdets gräns. Sett till samtliga skogsobjekt är grundvattenytan för opåverkade förhållanden belägen i genomsnitt drygt 1 m under markytan /Mårtensson et al. 2010/. Den beräknade medelavsänkning för samtliga skogsobjekt är 0,8 m för typåret 2006 och 0,5 m för normalåret. Medelavsänkning är något större (1,2 m respektive 0,7 m) för de skogsobjekt som helt eller delvis är belägna inom påverkansområdet.

Den största medelavsänkning av grundvattenytan (0,5–6 m) uppstår i objekten 5, 28a–d, 29, 30, 31a–b, 32a–b, 54 och 58. För övriga objekt är avsänkning liten, från noll upp till 0,1 m. Av de objekt som har störst prognostiserad medelavsänkning är fem objekt (28a, 28c–d, 30 och 32a) klassade som naturvärdesklass 2. Enligt MIKE SHE-resultaten kan marken inom skogsobjekten generellt klassas som frisk (djup till grundvattenytan 1–2 m u my). Med avseende på de skogsobjekt som helt eller delvis är belägna inom det prognostiserade påverkansområdet övergår marken generellt till att bli torr (djup till grundvattenytan större än 2 m).

Sammanfattande bedömning av de ekologiska konsekvenserna för skogsobjekt

Skogsmarkerna i Forsmarksområdet har varierande markfuktighetsförhållanden men domineras av frisk till fuktig mark, med ett genomsnittligt djup till grundvattenytan under vegetationsperioden i intervallet 0,1–2 m under markytan. En minskning av andelen fuktiga till blöta skogspartier bedöms medföra märkbara konsekvenser för sådana skogspartier, på grund av långsamma vegetationsförändringar som på sikt leder till att dessa delar av skogen blir artfattigare. För frisk skogsmark bedöms konsekvenserna bli små till måttliga. De varierande markfuktighetsförhållandena innebär således att en viss avsänkning av grundvattenytan medför olika ekologiska konsekvenser på olika ställen. Konsekvenserna för skogsobjekten är dock inte jämförbara med våtmarkerna. I våtmarkerna är arterna mer direkt beroende av grundvattenytans nivå och av att det finns alternativa miljöer i närheten. Enligt den ekologiska konsekvensbeskrivningen /Hamrén et al. 2010/ blir konsekvenserna inte mycket stora eller stora för något skogsobjekt. Det bedöms således inte bli någon tydlig påverkan på de naturvärden som utgör värdegrunden för skogsområdena. Konsekvenserna bedöms bli märkbara för elva skogsobjekt och små eller obetydliga för 17 objekt. Grundvattenbortledningen bedöms inte medföra några negativa konsekvenser alls för 18 skogsobjekt. För skogsobjekten planeras ingen vattentillförsel (avsnitt 7.2). Som beskrivs närmare i avsnitt 7.3 kommer dock SKB att bedriva en naturvårdsinriktad skötsel av skogen i Forsmark. Skötseln innebär att skogens naturvärden i Forsmark totalt sett ökar med tiden, även om andelen fuktiga till blöta skogspartier skulle minska till följd av grundvattenbortledningen.

Bedömningen av märkbara konsekvenser för vissa skogsobjekt baseras på att ört-kalkbarrskogarna i Forsmark är en ovanlig biotop och med förekomst av rödlistade arter. Skogsobjektens naturvärden stärks även av sambandet med flera andra närliggande bestånd av mogen eller gammal ört-kalkbarrskog.



Figur 6-4. Översiktsskarta som visar prognostiserat påverkansområde för grundvattenytans avsänkning (avsänkingsgräns 0,1 m) samt geografiska lägen för identifierade och naturvärdesklassade skogsobjekt.

Flera av de aktuella skogsobjekten är utpekade som nyckelbiotop av Skogsstyrelsen, och de uppvisar de värden och strukturer som krävs för att man skall kunna föra dem till Natura 2000-naturtypenen näringsrik granskog (naturtyp 9050). Kärnvärdena för de elva skogsobjekten består främst i det stora antalet rödlistade svamparter, exempelvis gul lammticka, grangråticka, flattoppad klubbsvamp, äggspindling och violgubbe. För ytterligare detaljer, se /Hamrén och Collinder 2010, Hamrén et al. 2010/.

6.1.6 Konsekvenser för rödlistade och skyddade arter

Som nämnts tidigare är 29 av de totalt 43 rödlistade arterna som observerats i området knutna till blöta eller fuktiga miljöer. Av dessa 29 utgörs 24 av svamparter i ört-kalkbarrskogar. Kunskapen rörande konsekvenserna för marklevande svampar vid en avsänkning av grundvattenytan i skogsmark är för närvarande bristfällig /Hamrén et al. 2010/. Generellt brukar man anse att skogsbruket är det främsta hotet mot sådana arter. Grundvattenbortledningen bedöms medföra märkbara konsekvenser för de rödlistade svamparterna. Konsekvenserna begränsas av att ett flertal av dessa arter inte är beroende av grundvattenytans nivå utan förekommer i marker med olika markfuktighetsförhållanden. Det finns även rödlistade svampar i torra och friska marker, där svamparnas vattenförsörjning till största delen sker via nederbörden.

Fem rödlistade arter är knutna till rikkärr och kalkgölar (gölgroda, gulyxne, loppstarr, kalkkärrsgrynsnäcka och käppkrokmossa). En uttorkning av en kalkgöl med förekomst av gölgroda innebär att gölgrodspopulationen i gölen försvinner. Det kan ske en migration till andra kalkgölar, men generellt innebär en uttorkning av en göl en ökad sårbarhet för den resterande populationen. I samband med de ekologiska fältinventeringarna har gölgroda observerats i sju kalkgölar (våtmarksobjekten 7, 12, 13a, 14, 15, 16 och 18), varav två kommer att fyllas igen i samband med uppförandet av slutförvarsanläggningens driftområde ovan mark (12 och 13a). Övriga fem är belägna inom eller i nära anslutning till det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Eftersom det endast finns ungefär 150 gölgrodslokaler i Sverige, skulle en förlust av samtliga gölgrodslokaler i Forsmarksområdet medföra en regional påverkan på gölgrodsbeståndet och därmed innebära mycket stora konsekvenser för arten om inga åtgärder vidtas. Att gölgrodan från början är inplanterad i området har inte någon betydelse i sammanhanget, eftersom arten reproducerar sig i området sedan flera år och därmed bör betraktas som en naturlig population. De vattentillförselåtgärder som beskrivs i avsnitt 7.2 är som nämnts tidigare fokuserade på rödlistade och skyddade arter. Med dessa åtgärder bedöms inga konsekvenser uppstå för gölgrodan i Forsmark.

Orkidén gulyxne har observerats i fyra rikkärr (våtmarksobjekten 7, 16, 49 och 71). Enligt MIKE SHE-modelleringen kommer grundvattenbortledningen att ge upphov till en grundvattenavsänkning vid eller nära tre av dessa objekt (7, 16 och 71). Vad gäller objekt våtmarksobjekt 71 har dock arten observerats i en del av objektet som är belägen utanför påverkansområdet. En grundvattenavsänkning kan därmed innebära att gulyxne försvinner från två av de fyra kända lokalerna i området. I hela Sverige finns färre än 100 kända lokaler med gulyxne, och arten är starkt minskande främst i södra Sverige. Grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen kan därmed orsaka en regional påverkan på artens population, och bedöms därför medföra mycket stora konsekvenser för arten om inga åtgärder vidtas. Med de åtgärder som beskrivs i avsnitt 7.2 bedöms inga konsekvenser uppstå för arten.

Kärlväxtarten loppstarr och molluskarten kalkkärrsgrynsnäcka har observerats i åtta (6c, 11c, 11a, 13a, 14, 23, 46a, och 69) respektive fem våtmarksobjekt (7, 9, 14, 16 och 22). För dessa arter skulle en grundvattenavsänkning medföra försämrade livsmiljöer i flera av de våtmarker där de förekommer. De största hoten mot dessa arter är generellt igenväxning av våtmarker. Även om båda dessa arter ännu är så pass talrika att den regionala statusen inte bör vara hotad, bedöms grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen medföra stora konsekvenser för de lokala populationerna av dessa två arter. Med de åtgärder som beskrivs i avsnitt 7.2 bedöms konsekvenserna bli små för arten kalkkärrsgrynsnäcka. Även med dessa åtgärder bedöms konsekvenserna dock bli stora för den lokala populationen av arten loppstarr. Den rödlistade mossarten käppkrokmossa har observerats i våtmarksobjekt 14. Grundvattenbortledningen bedöms medföra märkbara konsekvenser för denna art om inga åtgärder vidtas. Dess regionala status kommer dock inte att påverkas negativt. Med de åtgärder som beskrivs i avsnitt 7.2 bedöms inga konsekvenser uppstå för arten.

Om inga åtgärder vidtas, bedöms alltså grundvattenbortledningen medföra mycket stora eller stora konsekvenser för de fyra rödlistade arterna gölgroda, gulyxne, kalkkärrsgrynsnäcka och loppstarr. Konsekvenserna för arten käppkrokmossa bedöms bli märkbara. Med de åtgärder som beskrivs i avsnitt 7.2 bedöms inga konsekvenser uppstå för arterna gölgroda, gulyxne och käppkrokmossa.

Samtliga våtmarksobjekt i Forsmarksområdet där gölgröda förekommer föreslås bli föremål för åtgärder om sådana behov uppstår. Vad gäller gulyxne förelås två av de fyra våtmarkerna (objekten 7 och 16) där arten förekommer bli föremål för åtgärder. De andra två lokalerna där arten observerats (inom objekten 49 och 71) är belägna utanför det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Åtgärder föreslås för den våtmark där arten käppkrokmossa förekommer. Efter åtgärder bedöms konsekvenserna bli små för arten kalkkärrgrynsnäcka, eftersom tre av de fem våtmarkerna där arten förekommer föreslås bli föremål för åtgärder. Även med vidtagna åtgärder bedöms dock konsekvenserna bli stora för den lokala populationen av arten loppstarr, eftersom åtgärder av praktiska skäl föreslås för endast ett av de åtta våtmarksobjekt där arten observerats.

Av de skyddade arter som finns i Forsmarksområdet bedöms grundvattenbortledningen som beskrivits tidigare medföra mycket stora konsekvenser för våtmarksarterna gölgröda och gulyxne, om inga åtgärder vidtas. Denna bedömning baseras på deras förekomst i våtmarker inom det prognostiserade påverkansområdet samt arternas begränsade förekomst och spridningsförmåga och deras bevarandestatus. Inga konsekvenser bedöms uppstå för dessa arter med de åtgärder som föreslås i avsnitt 7.2. Grundvattenbortledningen bedöms medföra märkbara konsekvenser för våtmarksarterna större vattensalamander, brudsporre och käppkrokmossa om inga åtgärder vidtas. Inga konsekvenser bedöms uppstå för dessa arter med de åtgärder som föreslås i avsnitt 7.2. Konsekvenserna bedöms bli små för elva våtmarksarter (åkergröda, snok, vanlig gröda, vanlig padda, mindre vattensalamander, ängsnycklar, Jungfru Marie nycklar, kärrknipprot, nattviol, skogsnycklar och dvärglumner). För övriga skyddade våtmarksarter bedöms obetydliga eller inga konsekvenser uppstå till följd av grundvattenbortledningen. Denna bedömning motiveras av att grundvattenbortledningen inte medför några konsekvenser för arternas regionala status, eller att arterna endast har observerats vid lokaler utanför det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning /Hamrén et al. 2010/.

Vad gäller skyddade skogsarter bedöms grundvattenbortledningen endast medföra små konsekvenser för ett antal orkidéarter, exempelvis guckusko, skogsknipprot och nästrot. Detta motiveras bland annat av att arterna har gynnsam bevarandestatus och/eller förekommer i täta populationer.

De åtgärder som beskrivs i avsnitt 7.2 kommer även att vara en viktig komponent i en separat ansökan om dispens enligt artskyddsförordningen. Med dessa åtgärder bedöms således inga konsekvenser uppstå för de skyddade arterna gölgröda, gulyxne, större vattensalamander, brudsporre och käppkrokmossa. För några av de övriga skyddade arterna kommer åtgärderna att ge en förbättring jämfört med om åtgärderna inte vidtas. Dock förekommer vissa skyddade arter i områden som inte omfattas av åtgärderna. Sammantaget är därför bedömningen att grundvattenbortledningens konsekvenser blir märkbara för de skyddade arterna i området, även med de föreslagna åtgärderna.

6.1.7 Konsekvenser för utpekade värdefulla och skyddade områden

Riksintressen för naturvård

Grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen bedöms medföra påtaglig skada för det riksintresseområde för naturvärden som heter Forsmark-Kallrigafjärden (NR0 03017), se figur 4-12 i avsnitt 4.4.6. Riksintresseområdet består bland annat av områden med ovanlig vildmarksprägel, och det har stora geologiska och botaniska värden knutna till den snabba landhöjningen. Som huvudkriterier för områdets utpekande nämns följande /Hamrén et al. 2010/:

- Framstående exempel på kombinationer av naturtyper som väl visar landskapets utveckling.
- Väsentligt opåverkade områden.
- Hotade eller sårbara biotoper och arter.
- Rik flora och fauna.

Bedömningen rörande påtaglig skada baseras på att skadan inte är reversibel och att berörda naturvärden utgör grunden för riksintresset. Att skadan inte är reversibel motiveras av det som sägs i avsnitt 3.4, där det framgår att en avsänkning under mer än sex vegetationsperioder bedöms kunna ge upphov till irreversibla konsekvenser för naturvärden. Vidare kan avsänkningen av grundvattenytan beröra opåverkade områden (främst kärrmiljöer) med lång kontinuitet, miljöer med rödlistade arter och hotade biotoper (rikkärr och kalkbarrskogar) och områden med rik flora och fauna (främst rikkärrmiljöer). Skadan bedöms bli påtaglig även med de åtgärder som beskrivs i avsnitten 7.2–3, eftersom grundvattenbortledningen även med dessa åtgärder kan medföra konsekvenser för våtmarker och skogsmiljöer med regionala värden (klass 2), och i ett fall en våtmark med nationellt värde (klass 1).

Natura 2000-områden

De områden med områdesskydd som är belägna närmast slutförvarsanläggningen är Natura 2000-områdena Kallriga och Skaten-Rångsen (figur 4-12). Enligt genomförd MIKE SHE-modellering (avsnitt 5.3.2) kommer grundvattenbortledningen inte att medföra någon avsänkning av grundvattenytan inom Natura 2000-området Skaten-Rångsen.

För det hypotetiska fallet med ett helt öppet förvar och det mest konservativa tätningsfallet ($K_{inj} = 10^{-7}$ m/s) prognostiserar MIKE SHE-modellen en liten avsänkning av grundvattenytan (årsmedelvärde i intervallet 0,1–0,3 m) inom ett sydväst-nordöstligt stråk i den östra delen av modellområdet (se figur 5-6). För detta värsta fall berör den norra delen av detta stråk den västra delen av Kallriga Natura 2000-område. Resultaten från MIKE SHE-modelleringen visar att avsänkningen inom Natura 2000-området är mindre eller inte alls uppstår under alla delar på året, för lägre värden på K_{inj} samt under de enskilda utbyggnadsstegen, vardera med en längd i storleksordningen 15–20 år (se avsnitt 2.2). Det ska därför betonas att konsekvensbeskrivningen nedan utgår från ett värsta fall med ett helt öppet förvar och det mest konservativa tätningsfallet.

På motsvarande sätt som för övriga delar av påverkansområdet kan avsänkningen längs det sydväst-sydöstliga stråket förklaras av en trycksänkning i berget som kommuniceras vertikalt upp mot jordlagren via en sprickzon med hög vertikal hydraulisk konduktivitet. Även för opåverkade förhållanden (det vill säga, utan grundvattenbortledning från förvaret) är enligt beräkningarna med MIKE SHE-modellen grundvattenytans djup under markytan 2 m eller mer längs stråket och detta utgör ett inströmningsområde för grundvatten till jordlagren; grundvattenflödet är nedåtriktat även på nivån –50 m ö h i berget. Detta innebär att vattenförsörjningen till områden som är belägna ovanför zonen enbart sker via nederbörd och snösmältning.

I bevarandeplanen för Natura 2000-området omnämns inga kalkgölar, rikkärr eller andra grundvattenberoende naturmiljöer /Hamrén och Collinder 2010, Länsstyrelsen Uppsala län 2002/. En ekologisk fältinventering har utförts i den västra delen av Natura 2000-området, inklusive områden längs stråket. I samband med denna inventering identifierades ett våtmarksobjekt (objekt 122) och fyra skogsobjekt (120, 121, 123 och 124), se figurerna 6-1 och 6-4. Nedan ges en sammanfattande bedömning av de hydrologiska och hydrogeologiska effekterna längs det stråkformade påverkansområdet, resultaten från inventeringen samt beskrivningen av de ekologiska konsekvenserna, dels för de fem objekten, dels Natura 2000-området i sin helhet /Collinder och Hamrén 2010, Hamrén et al. 2010/.

- Skogsobjekt 120 utgörs av en hållmarktallskog som bedöms ha regionalt värde (klass 2). Objektet är beläget cirka 200 m från gränsen för påverkansområdet (avsänkingsgräns 0,1 m) och objektet utgör ett inströmningsområde för grundvatten. Objektet är karterat som berg i dagen, det vill säga med en jordlagermäktighet understigande 0,5 m.
- Skogsobjekt 121 utgörs av en örtrik barrskog som bedöms ha nationellt värde (klass 1). I bevarandeplanen kategoriseras objektet som primär landhöjningsskog, naturtyp 9030. En mindre del av objektet (cirka en femtedel av totalt 19 hektar) är belägen inom påverkansområdet. Den största delen av påverkansområdet inom objektet utgör inströmningsområde för grundvatten. De delar av objektet som är utströmningsområden försörjs även via andra inströmningsområden än den lilla del som motsvaras av påverkansområdet. Jordarten inom objektet utgörs av sandig-blockig morän, med motsvarande vattengenomsläpplighet som den sandiga morän som dominerar Forsmarksområdet i övrigt /Johansson 2008/.
- Våtmarksobjekt 122 utgörs av två starrkärr (kärr som domineras av halvgräset starr och därmed inte utgör rikkärr). Objektet bedöms ha regionalt värde (klass 2) och det klassas i bevarandeplanen som lagun, naturtyp 1150. Objektet är beläget inom 100 m från påverkansområdets gräns. Starrkärren utgör lokala utströmningsområden för grundvatten, som sannolikt endast till en mindre del (i storleksordningen 10 %) försörjs av grundvatteninströmning inom påverkansområdet. Detta indikeras av att grundvattenavsänkningen i objektet enligt modelleringsresultaten är mindre än 0,1 m. Enligt jordartskartan /Hedenström och Sohlenius 2008/ underlagras starrkärrarna av täta sediment med lergyttja respektive postglacial lera.
- Skogsobjekt 123 utgörs av en blåbärsgrenskog som bedöms ha regionalt värde (klass 2). En mindre del av objektet är belägen inom påverkansområdet. Objektet utgör ett utströmningsområde för grundvatten. Grundvattenutströmningen bedöms huvudsakligen bestå av grundvatten som bildas inom andra inströmningsområden än de som är belägna inom påverkansområdet. Enligt jordartskartan består jordarterna inom objektet av lergyttja i de norra och södra delarna av objektet, och sandig eller sandig-blockig morän däremellan.

- Skogsobjekt 124 utgörs av kalkbarrskog som bedöms ha regionalt värde (klass 2). Objektet är beläget cirka 300 m från påverkansområdets gräns. Objektet utgör ett inströmningsområde för grundvatten och domineras av sandig morän med vissa förekomster av lergyttja.

Sammanfattningsvis bedöms grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen för ett värsta fall kunna ge upphov till hydrogeologiska eller hydrologiska effekter av någon betydelse endast för ett mindre område inom objekt skogsobjekt 121 (örtrik barrskog) som utgör utströmningsområde för grundvatten. En avsänkning av grundvattenytan bedöms dock endast medföra små konsekvenser för vegetationen även i ett värsta fall. Något torrare förhållanden inom en del av objektet under några år bedöms inte ge upphov till några irreversibla förändringar, och heller inte inverka på förekomsten av typiska arter eller på habitatet på ett sådant sätt att dess naturvärden minskar. Bedömningen är därför att habitatet även fortsättningsvis kommer att ha gynnsam bevarandestatus. För våtmarksobjekt 122 (de två starrkärren) är bedömningen att ett ökat grundvattenflöde från jord till berg inom det angränsande påverkansområdet kan ge en obetydlig förändring av starrkärrens vattenomsättning, givet att utströmmande grundvatten bildas även inom andra inströmningsområden än inom påverkansområdet.

I bevarandeplanen har de två arterna guckusko och större vattensalamander särskilt pekats ut. Som del av den ekologiska fältinventeringen gjordes en riktad inventering av dessa två arter. Specifikt inventerades guckusko i områden längs stråket och större vattensalamander i de två starrkärren som utgör våtmarksobjekt 122. Inga exemplar av dessa arter påträffades, varför bedömningen är att de inte förekommer inom eller i anslutning till det stråkformade påverkansområdet.

Den sammantagna bedömningen är således att de livsmiljöer som avses skyddas med förordnandet av Natura 2000-området inte kommer att skadas på grund av grundvattenbortledningen från förvaret. Bedömningen är att de arter som ska skyddas inte kommer att utsättas för en störning som på ett betydande sätt kan försvåra bevarandet av utpekade arter i Natura 2000-området Kallriga /Hamrén et al. 2010/.

6.2 Konsekvenser för produktionsmark

6.2.1 Konsekvenser för skogsbruket i Forsmark

I detta avsnitt ges en översiktlig beskrivning av grundvattenbortledningens konsekvenser för skogsbruket. Specifikt görs en bedömning av konsekvenserna för skogens bonitet (virkesproduktionsförmåga). Skogsbonitet brukar anges som $m^3 \text{ sk}/(\text{ha}\cdot\text{år})$, det vill säga skogskubikmeter per hektar och år. Underlaget för bedömningen presenteras närmare i /Hamrén et al. 2010, SKBdoc 1247710/. Den metodik som använts avser strikt skogens långsiktiga bonitet. Detta innebär bland annat att skogens nuvarande ålder inte beaktas. Eftersom avsänkningen av grundvattenytan i det aktuella fallet kommer att bli långvarig men inte permanent, bedöms avsänkningen inte få några negativa konsekvenser för skogens produktionsförmåga på lång sikt. Baserat på vad som sägs i avsnitt 4.5 fokuserar konsekvensbedömningen på trädslagen gran och tall, med en antagen jämn fördelning (50 % gran, 50 % tall) inom samtliga skogsområden.

Generella samband mellan grundvattenytans djup och skogens bonitet

Generellt är inga drastiska förändringar att vänta när skogsträd utsätts för en avsänkning av grundvattenytan, och risken för traddöd är mycket liten /Hamrén et al. 2010/. Sett över året baseras skogsträdens vattenförsörjning till övervägande del på det markvatten som under sin väg ner till grundvattenytan passerar trädens rötter. Djupet till grundvattenytan är dock en viktig faktor för skogsträdens produktionsförmåga, eftersom en ytnära grundvattenyta kan vara viktig för trädens vattenförsörjning under torrperioder. Specifikt anses det långsiktiga genomsnittliga djupet till grundvattenytan under vegetationsperioden vara den styrande faktorn för boniteten hos till exempel gran och tall. Med avseende på detta djup används här följande vedertagna markfuktighetsklasser:

- Torr mark (> 2 m).
- Frisk mark (1–2 m).
- Frisk/fuktig mark (0,5–1 m).
- Fuktig mark (0,1–0,5 m).
- Blöt mark (0–0,1 m).

Det generella bonitetsmönstret är torr < fuktig < frisk < frisk/fuktig. Gran- och tallbestånd på impediment (blöta marker) uppträder endast undantagsvis. Den högsta skogsboniteten återfinns alltså i friska/fuktiga marker och den lägsta i torra och blöta marker. Detta innebär att en avsänkning av grundvattenytan kan ge både negativa och positiva konsekvenser för boniteten, beroende på djupet till grundvattenytan före avsänkningen.

Som underlag för en platspecifik konsekvensbedömning har det gjorts en sammanställning av uppgifter från Riksskogstaxeringens databas (omfattande östra Uppland under perioden 1993–2002) samt beståndsdata från Sveaskog avseende 4 000 hektar produktiv skogsmark för gran- och tallbonitet för olika markfuktighetsklasser /SKBdoc 1247710/. Sammanställningen visar att Sveaskogs bonitetsvärden generellt är något lägre än de som erhållits från Riksskogstaxeringen. Detta beror sannolikt på att skogsbolagens bonitetsbedömningar brukar baseras på en indelning i arealmässigt stora bestånd, till skillnad från Riksskogstaxeringens mindre provytor. En beståndsrelaterad bedömning ger mindre bonitetsskillnader mellan markfuktighetsklasser än en bedömning baserad på provytor. I det följande används därför följande ungefärliga bonitetsvärden enligt uppgifterna från Riksskogstaxeringen /Hamrén et al. 2010/:

- Gran: Torr mark = 5,5, frisk mark = 8, frisk/fuktig mark = 9, fuktig mark = 6,5 m³ sk/(ha·år).
- Tall: Torr mark = 4, frisk mark = 5, frisk/fuktig mark = 6, fuktig mark = 4 m³ sk/(ha·år).

För att beskriva konsekvenser för skogens bonitet krävs uppgifter om storleken på påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning, fördelningen av medelvärden på avsänkningen och det (långsiktiga) djupet till grundvattenytan under vegetationsperioden, samt fördelningen på trädslag (i det aktuella fallet gran och tall) inom påverkansområdet. Här görs konsekvensbeskrivningen utifrån ett antal förenklande antaganden, som ger ett relevant (men sannolikt överskattat) mått på konsekvenserna för skogens produktionsförmåga.

Konsekvenser av en avsänkning av grundvattenytan för skogens bonitet i Forsmark

Omfattande långtidsmätningar av grundvattennivåer i jord i Forsmark /Johansson 2008/ visar på en fördelning med ungefär 80 % av mätningarna motsvarande markfuktighetsklasserna fuktig-frisk mark (grundvattendjup 0,1–2 m) och 10 % motsvarande torr mark (> 2 m). Resterande 10 % utgörs av mätningar med grundvattenytan i markytan eller mätningar som visar på artesiska förhållanden. Översiktligt kan 90 % av påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning antas bestå av skog (med resterande delar bestående av våtmarker och övrig mark), fördelad på hälften gran respektive tall. Fördelningen på markfuktighetsklasser inom skogen antas vara 90 % fuktig-frisk mark (grundvattendjup 0,1–2 m) och 10 % torr mark (grundvattendjup > 2 m). Medelboniteten för gran och tall inom markfuktighetsklasserna 0,1–2 m respektive > 2 m är ungefär 8 respektive 5,5 m³ sk/(ha·år) för gran och 5 respektive 4 m³ sk/(ha·år) för tall. Vidare antas avsänkningen av grundvattenytan inom påverkansområdet innebära att all skogsmark inom markfuktighetsklasserna fuktig-frisk mark (grundvattendjup 0,1–2 m) övergår till torr mark. Boniteten för skog i torra marker antas alltså inte påverkas av en avsänkning av grundvattenytan.

Ovanstående förutsättningar ger en bonitetsminskning inom påverkansområdet på cirka 25 %. Detta kan visas med ett beräkningsexempel. Ett påverkansområde på 1 km² (innehållande 0,45 km² gran och 0,45 km² tall) ger en ursprunglig bonitet på

- $45(0,9 \cdot 8 + 0,1 \cdot 5,5) \approx 350 \text{ m}^3 \text{ sk/år}$ för gran och
- $45(0,9 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4) \approx 220 \text{ m}^3 \text{ sk/år}$ för tall,

vilket ger en sammanlagd bonitet på 570 m³ sk/år. En avsänkning av grundvattenytan skulle ge en bonitetsminskning på

- $45(0,9 \cdot 2,5) \approx 100 \text{ m}^3 \text{ sk/år}$ för gran och
- $45(0,9 \cdot 1) \approx 40 \text{ m}^3 \text{ sk/år}$ för tall,

vilket därmed skulle ge en sammanlagd bonitetsminskning på 140 m³ sk/år. Detta motsvarar en bonitetsminskning inom påverkansområdet på $140/570 \approx 0,25$ (25 %). I sammanhanget kan det noteras att det MIKE SHE-beräknade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning huvudsakligen omfattar skogsområden som i dag ägs av SKB.

En bonitetsminskning på 25 % inom påverkansområdet ska ses som en övre gräns, det vill säga ett värsta fall avseende bonitetsminskningen. Konsekvensbeskrivningen baseras på Riksskogstaxeringens bonitetsvärden. Dessa värden är generellt högre och karaktäriseras av större bonitetskillnader mellan olika markfuktighetsklasser, jämfört med uppgifterna som erhållits från Sveaskog. Vidare antas i konsekvensbeskrivningen att all skogsmark inom påverkansområdet som inte utgörs av torr mark övergår till torr mark. Det har heller inte tagits hänsyn till att en avsänkning av grundvattenytan i blöt skogsmark kan ge en högre bonitet i sådana områden. En avsänkning av grundvattenytan kan alltså medföra positiva konsekvenser för skogens tillväxt i vissa områden, som kompenserar för en bonitetsminskning inom andra områden.

Slutligen bör man beakta att påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning är litet i förhållande till de totala skogsarealerna i Forsmark. Ett påverkansområde på i storleksordningen 2 km² kan till exempel jämföras med den tidigare föreslagna ekoparken med en yta på 1 800 hektar (18 km²). En bonitetsminskning inom påverkansområdet på 25 % motsvarar då endast 2–3 % inom den större skogsarealen.

6.2.2 Konsekvenser för jordbruket i Forsmark

Som nämnts i avsnitt 4.5 bedrivs aktivt jordbruk vid Storskäret, cirka två km öster om försvarsområdets östra gräns. Enligt genomförd MIKE SHE-modellering kommer ingen avsänkning av grundvattenytan att uppstå inom detta område. Grundvattenbortledningen bedöms därför inte medföra några konsekvenser för jordbruket i Forsmark.

6.3 Konsekvenser för befintlig vattenhantering och vattenverksamhet

6.3.1 Konsekvenser för befintlig vattenhantering

Konsekvenser för pumpningen från SFR

Analysen med MIKE SHE-modellen indikerar att sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg kring slutförvarsanläggningen delvis kan interferera med trycksänkningen kring SFR och ge ett något minskat inläckage till SFR jämfört med rådande inläckage. Bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen bedöms således inte medföra några negativa konsekvenser för driften av SFR.

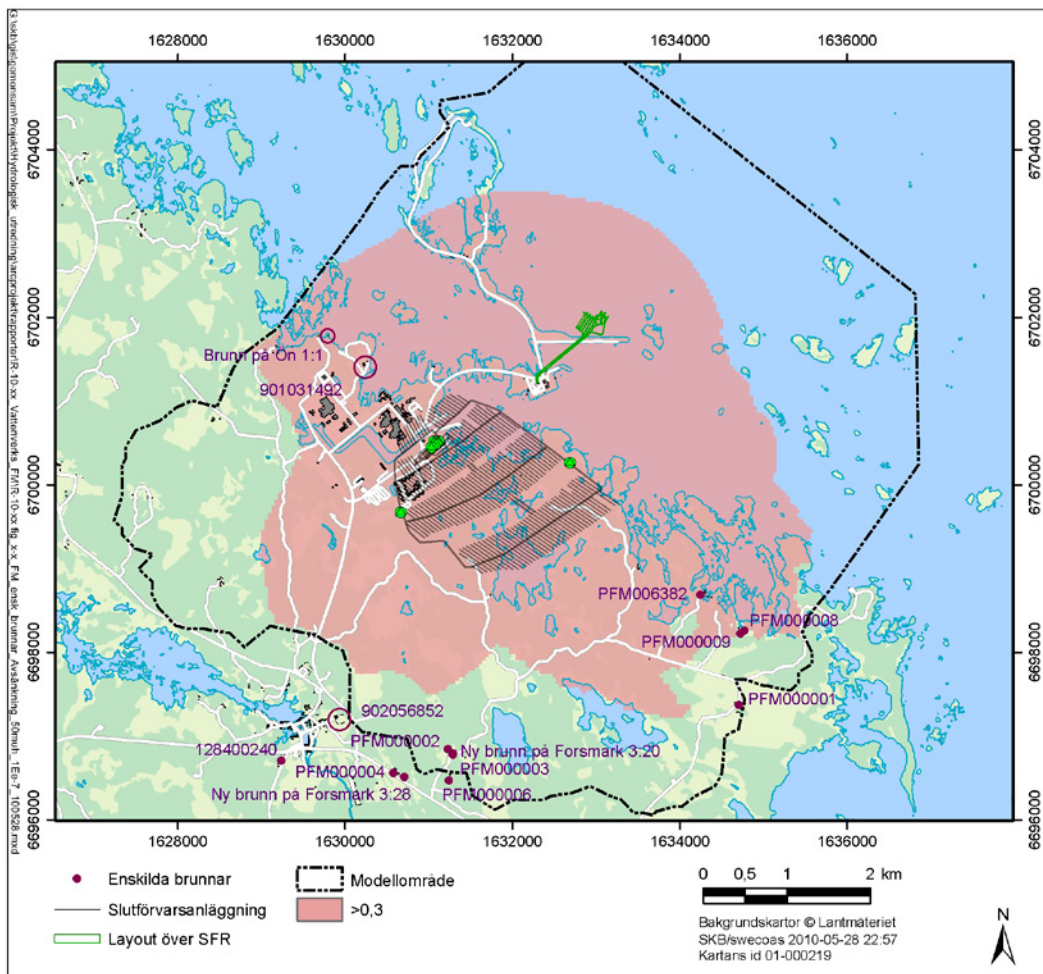
Konsekvenser för grundvattendräneringen vid kärnkraftverket

Grundvattendräneringen vid kärnkraftverket i Forsmark är belägen på nivån –20 m ö h. Analyser med MIKE SHE-modellen indikerar att slutförvarsanläggningen kan ge upphov till en sänkning av grundvattnets tryckhöjder på nivåerna –10 och –30 m ö h i anslutning till kärnkraftverket. En sådan sänkning kan innebära att mindre mängder grundvatten behöver dräneras bort. Med avseende på grundvattendräneringen bedöms därför bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen inte medföra några negativa konsekvenser för driften av kärnkraftverket. Konsekvenser i form av sättningar av reaktorbyggnaderna behandlas i avsnitt 6.4.1.

Konsekvenser för enskilda brunnar

Identifierade brunnar är förtecknade i tabell B3-1 i bilaga 3. Det MIKE SHE-beräknade påverkansområdet för sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivån –50 m ö h har använts för att identifiera de enskilda brunnar som potentiellt kan påverkas av bortledningen av grundvatten från slutförvarsanläggningen. De beräkningsresultat som använts baseras på årsmedelvärden för år 2006, det hypotetiska fallet med ett helt öppet förvar och det sämsta tätningsfallet ($K_{inj} = 10^{-7}$ m/s), se figur 5-4.

Tidigare brunnsinventering /Ludvigson 2002/ visar att nivån –50 m ö h är ett typiskt djup för bergborrade brunnar i Forsmarksområdet, varför påverkansområdet på denna nivå är relevant som utgångspunkt vad gäller bergborrade brunnar. Tabell B3-2 i bilaga 3 samt figur 6-5 visar vilka enskilda brunnar som är belägna inom eller i anslutning till detta påverkansområde. Det finns inga enskilda brunnar inom det modellberäknade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning.



Figur 6-5. Översiktsskarta som visar lägen för enskilda brunnar samt MIKE SHE-beräknat påverkansområde för sänkning av grundvattnets tryckhöjder på nivån -50 m ö h (sänkingsgräns $0,3$ m). Kartan visar även lägena för kärnkraftverket, SFR och den planerade slutförvarsanläggningens undermarksdel.

I den östra delen av påverkansområdet på nivån -50 m ö h finns bergbrunnen PFM006382, belägen på fastigheten Forsmark 3:51 (brunnen försörjer fastigheten Forsmark 3:38). I beräkningsfallet enligt ovan är som årsmedelvärde sänkning av grundvattnets tryckhöjd vid läget för denna brunn $0,5$ – 1 m. Det finns även två brunnar inom påverkansområdet på fastigheterna Forsmark 6:5 och Ön 1:1. Vid lägena för dessa två brunnar är den modellberäknade sänkning av tryckhöjden 2 – 4 m på nivån -50 m ö h. En av dessa brunnar (SGU brunnarsarkiv ID 901031492) är enligt SGU:s brunnarsarkiv belägen på fastigheten Forsmark 6:5, cirka 850 m norr om FKA:s kylvattenkanal. Brunnen har trots bistånd från fastighetsägaren (FKA) dock inte kunnat lokaliseras. Brunnen på fastigheten Ön 1:1 identifierades i samband med den kompletterande brunnsinventeringen i december 2009.

Därutöver finns det två brunnar vid gränsen för det modellberäknade påverkansområdet, jordbrunnen PFM000008 (på fastigheten Forsmark 3:33) och bergbrunnen PFM000009 (på fastigheten Forsmark 3:34). Bergbrunnen PFM000009 har enligt uppgift från fastighetsägaren ett järnhaltigt och salt vatten, och brunnen används för bevattning, matlagning och tvätt. Jordbrunnen PFM000008 är belägen i ett vassområde nära havet, cirka 150 m från PFM000009. Enligt uppgift översvämmas området där jordbrunnen är belägen vid hög havsnivå.

Resultat från DarcyTools-modelleringen kan användas för att beskriva konsekvenser för enskilda brunnar i form av saltvattenpåverkan. Enligt modellberäkningarna ger grundvattenbortledningen generellt inga effekter på grundvattnets salthalt på de förhållandevis begränsade djup som är aktuella för bergbore enskilda brunnar /Svensson och Follin 2010/.

Sammantaget bedöms grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen i ett värsta fall kunna ge en viss försämring av brunnskapaciteten för tre bergbrunnar: PFM006382 på fastigheten

Forsmark 3:51, SGU brunnsarkiv ID 901031492 på fastigheten Forsmark 6:5 (brunnen har dock inte kunnat lokaliseras) och en brunn på fastigheten Ön 1:1. Brunnarna är belägna inom det modellberäknade påverkansområdet för ett värsta fall, vilket innebär att konsekvenser i form av försämrade brunnskapacitet och/eller vattenkvalitet bör bli marginella om de alls uppstår.

6.3.2 Konsekvenser för befintlig vattenverksamhet, markavvattningsföretag och källor

Ingen av FKA:s vattenverksamheter påverkas av bortledandet av grundvatten från slutförvarsanläggningen. Sedvanlig skogsdikning har genomförts i skogsområdena i Forsmark, men inga markavvattningsföretag är registrerade. Vidare visar en kontroll i SGU:s källarkiv att inga källor finns registrerade i Forsmarksområdet. Några mindre källutflöden har observerats i Forsmarksområdet. En avsänkning av grundvattenytan kan generellt medföra att sådana små källutflöden minskar eller sinar. De källutflöden som observerats har såvitt känt inga kulturhistoriska värden. Den lilla källan sydöst om sjön Fiskarfjärden, som provtogs och analyserades ett par gånger 2003–2005, är belägen utanför det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning.

6.4 Konsekvenser för byggnader och infrastruktur

En avsänkning av grundvattenytan kan ge upphov till sättningar, vilket i sin tur kan orsaka sättningar av byggnader och infrastruktur. Grundläggningsförhållanden och jordart är viktiga faktorer för uppkomst av sådana sättningar, givet en viss avsänkning av grundvattenytan. Som beskrivs närmare nedan är förhållandena i den övre delen av berget i Forsmark speciella. Specifikt avses då förekomsten av grundvattenförande horisontella (flacka) sprickor inom de övre delarna av berget. Detta innebär att även sänkning av grundvattnets tryckhöjder i sådana sprickor behöver beaktas för att kunna bedöma grundvattenbortledningens konsekvenser i form av sättningar av befintliga byggnader som är grundlagda på berg. Befintliga byggnader och infrastruktur har identifierats inom det MIKE SHE-beräknade påverkansområdet för sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivån -50 m ö h (figur 6-6). Ett konservativt antagande har gjorts genom att utgå från det mest konservativa tätningsfallet, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

6.4.1 FKA:s byggnader

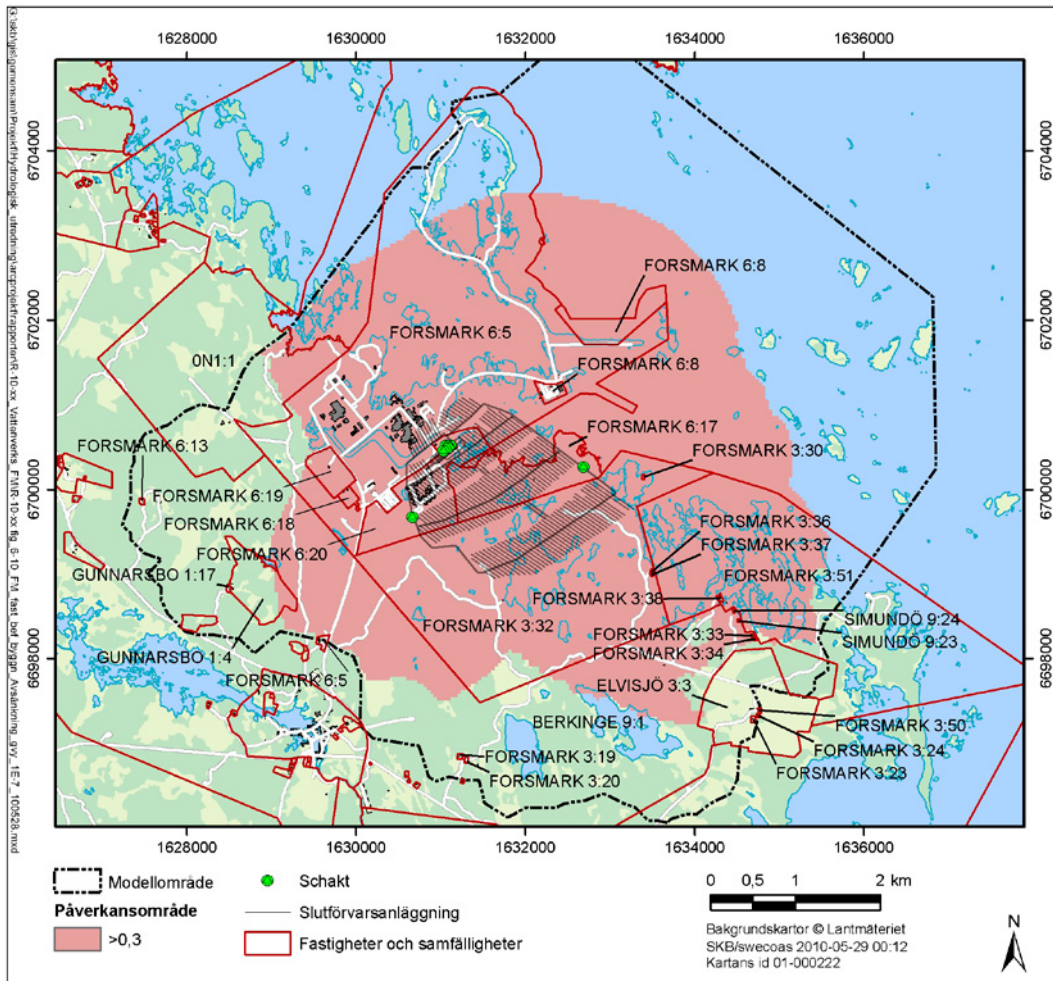
Bakgrund

FKA:s byggnader är belägna inom det prognostiserade påverkansområdet för sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivån -50 m ö h. Dessa byggnader är belägna på fastigheterna Forsmark 6:5, 6:18 och 6:19. Byggnaderna omfattar bland annat reaktorbyggnaderna F1–F3, administrationsbyggnad, förråd, gästförläggning, bostadsområde, vattenverk och Forsmarks hamn. På fastigheten Forsmark 6:8 (som ägs av SKB) finns byggnader tillhörande SFR. På dessa fastigheter finns tillhörande infrastruktur såsom vägar, kraftledningar och VA-ledningssystem. Som nämnts tidigare kommer området för tillfälligt boende att avvecklas i samband med uppförandet av slutförvarsanläggningen.

Reaktorbyggnaderna F1–F3 vid Forsmarks kärnkraftverk utgör sådana objekt för vilka konsekvenser i form av sättningar särskilt bör belysas. I /Bono et al. 2010/ sammanställs platsspecifik information och används för att bedöma ihoptryckning av horisontella sprickor i berg och sättningar som kan uppstå för de ovanföriggande reaktorbyggnaderna. De faktorer som styr sådan ihoptryckning och sättningar av byggnader inkluderar följande:

- De horisontella sprickornas förekomst, geometri och deformationsegenskaper.
- De ovanföriggande byggnadernas grundläggning.
- Tidigare förändringar av belastningarna och sättningar i samband med uppförande av byggnaderna.

Baserat på platsspecifik information om ovanstående faktorer samt MIKE SHE-beräknad sänkning av grundvattnets tryckhöjder på olika nivåer, redovisas i /Bono et al. 2010/ bedömningar gällande ihoptryckning och sättningar vid kärnkraftverket till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. Utredningen fokuseras på reaktorbyggnaden F1, eftersom detta är den reaktorbyggnad som är belägen närmast slutförvarsanläggningen. Nedanstående avsnitt beskriver huvuddragen och de viktigaste slutsatserna i utredningen.



Figur 6-6. Översiktskarta som visar fastigheter och befintliga byggnader i förhållande till påverkansområdet för den MIKE SHE-beräknade sänkningen av grundvattnets tryckhöjder på nivån -50 m ö h (sänkingsgräns $0,3$ m). Kartan visar även den planerade slutförvarsanläggningens undermarksdel.

Förekomst och ihoptryckning av horisontella sprickor i berg

Det ytnära berget i Forsmark innehåller så kallade bankningsplan, det vill säga flacka sprickor med stupning 0 – 20 grader från horisontalplanet. I fortsättningen används för enkelhets skull benämningen horisontella sprickor. I samband med uppförandet av kärnkraftverket och kylvattenkanalen på 1970-talet och under SKB:s platsundersökning 2002–2007, har öppna och/eller sedimentfyllda horisontella sprickor kunnat observeras ned till nivån -20 m ö h. De observerade sprickornas maximala vidd varierar mellan $0,2$ och $0,5$ m, generellt med en mindre vidd på större djup. Till exempel vid utsprängningen av kylvattenkanalen observerades sådana horisontella sprickor med en längd på upp till ungefär 250 m (eventuellt upp till 400 m). Data från SKB:s platsundersökning visar att de horisontella sprickorna som finns i de övre delarna av berget är grundvattenförande /Follin 2008/. En sänkning av grundvattnets tryckhöjd (eller vattentrycket) i en horisontell spricka i berget kan leda till att sprickan trycks ihop. Hur mycket sprickan trycks ihop beror på dess så kallade normalstyvhet.

Grundläggning av befintliga anläggningar och tidigare sättningar

Den första reaktorbyggnaden vid kärnkraftverket i Forsmark (F1) började byggas 1972. Samtliga byggnadsdelar vid F1 är grundlagda på berg. Vid denna tid var det väl känt att finkorniga sediment kan orsaka sättningar. De horisontella sprickor i ytnära lägen med finkorniga sediment som man fann i Forsmark var därför en fråga som utreddes noga inför val av grundläggningsnivå.

Inför grundläggningen sprängde man bort det ytliga berget ned till grundläggningsnivån. Reaktorinneslutningen och reaktorbyggnadens bärande väggar är grundlagda på nivån –8 m ö h. Specifikt är reaktorinneslutningen grundlagd längs två diken i berget som sprängts ned till grundläggningsnivån. Vad gäller turbinfundamenten finns protokoll och ritningar som visar att injektering genomfördes i berg cirka 6 m under fundamentens grundläggning.

De sättningmätningar som utfördes under uppförandet av F1 visade att sättningarna var 2–10 mm år 1975, det vill säga tre år efter byggstart. Dessa sättningar var högre än de som förväntats. Sättningarna antogs bero på inbördes förskjutningar mellan olika bergskivor, som i sin tur antogs bero dels på de pålagda byggnadslasterna, dels på sprängningsarbetena. Borrhålsundersökningar genomfördes under F1 varefter berget under reaktorinneslutningens och reaktorbyggnadens grundläggning injekterades ned till nivån –20 m ö h, det vill säga 12 m under grundläggningsnivån. Som nämnts ovan injekterades även berget under turbinfundamenten. Denna injektering genomfördes dock innan de ovannämnda sättningarna hade noterats och var därför sannolikt planerad redan tidigare.

Bedömning av sprickornas bergmekaniska egenskaper och sättningarnas storlek

De horisontella sprickornas normalstyvhet är en viktig faktor som styr deras ihoptryckning vid en viss sänkning av vattentrycket i sprickor. I syfte att skatta normalstyvheten hos öppna och sedimentfyllda sprickor i anslutning till F1, har det gjorts fördjupade studier av data dels från så kallade belastningsförsök som utfördes inför byggnationen av F1, dels data från litteraturen. Belastningsförsöken i Forsmark omfattade mätningar på plats av bergets deformationsegenskaper (inklusive både bergmassa och sprickor) och provtryckning på intakta bergprover i laboratorium. På så sätt kan en skattning göras av den övre respektive undre gränsen för sprickornas normalstyvhet på olika nivåer i berget under F1.

Den övergripande bedömningen är att valet av grundläggningsnivåer (under sedimentfyllda sprickor) innebär att grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen inte kan ge upphov till några signifikanta sättningar vid kärnkraftverket. Det bör heller inte kunna ske någon signifikant ihoptryckning av horisontella sprickor ned till nivån –20 m ö h under reaktorinneslutningen och reaktorbyggnaden vid F1. Detta motiveras av den injektering som utfördes under dessa byggnadsdelar. Med andra ord bedöms en ihoptryckning endast kunna uppstå i sprickor under nivån –20 m ö h. Under turbinfundamenten bedöms en ihoptryckning av sprickor dock kunna uppstå mellan nivåerna –10 till –20 m ö h, på grund av att injektering under fundamenten endast utförts ned till cirka 6 m under deras grundläggningsnivå.

De fördjupade studierna i /Bono et al. 2010/ visar att sprickornas normalstyvhet är hög, vilket ytterligare bidrar till att risken för sättningar vid kärnkraftverket bedöms som mycket liten. I syfte att illustrera detta används skattade intervall för sprickornas normalstyvhet och prognostiserad maximal sänkning av grundvattnets tryckhöjder på olika nivåer (det senare baserat på /Gustafsson et al. 2009/) för att beräkna den maximala sättning som i ett värsta fall kan uppstå till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. Beräkningarna görs för olika kombinationer avseende sprickornas normalstyvhet, antal och nivå. På grund av tätningen under reaktorinneslutningen och reaktorbyggnaden vid uppförandet av F1, antas vid beräkningarna att sprickor under dessa byggnadsdelar endast kan förekomma under nivån –20 m ö h.

Med avseende på reaktorinneslutningen och reaktorbyggnaden F1 ger beräkningarna av det värsta av de beaktade fallen (med den lägsta normalstyvheten och tre horisontella sprickor) en sättning på maximalt 0,2 mm. Det har då antagits att vertikala rörelser till följd av ihoptryckning av sprickor leder till sättning av samma storlek vid grundläggningsnivån, vilket är ett mycket konservativt antagande. Under turbinfundamenten bedöms ihoptryckning av sprickor i berget även kunna uppstå mellan nivåerna –10 och –20 m ö h. Med avseende på fundamenten ger beräkningarna för det värsta fallet (den lägsta normalstyvheten och åtta horisontella sprickor) en ihoptryckning på upp till ungefär 0,5 mm. Den maximala differenssättningen som bedöms kunna uppstå mellan två turbinfundament är således endast $0,2 \text{ mm} + 0,5 \text{ mm} = 0,7 \text{ mm}$, om man antar att vertikala rörelser till följd av ihoptryckning av sprickor leder till sättning av samma storlek vid grundläggningsnivån.

Sammantaget visar alltså resultaten från sättningsutredningen att grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen endast kan ge upphov till mycket små sättningar av befintliga anläggningar vid Forsmarks kärnkraftverk.

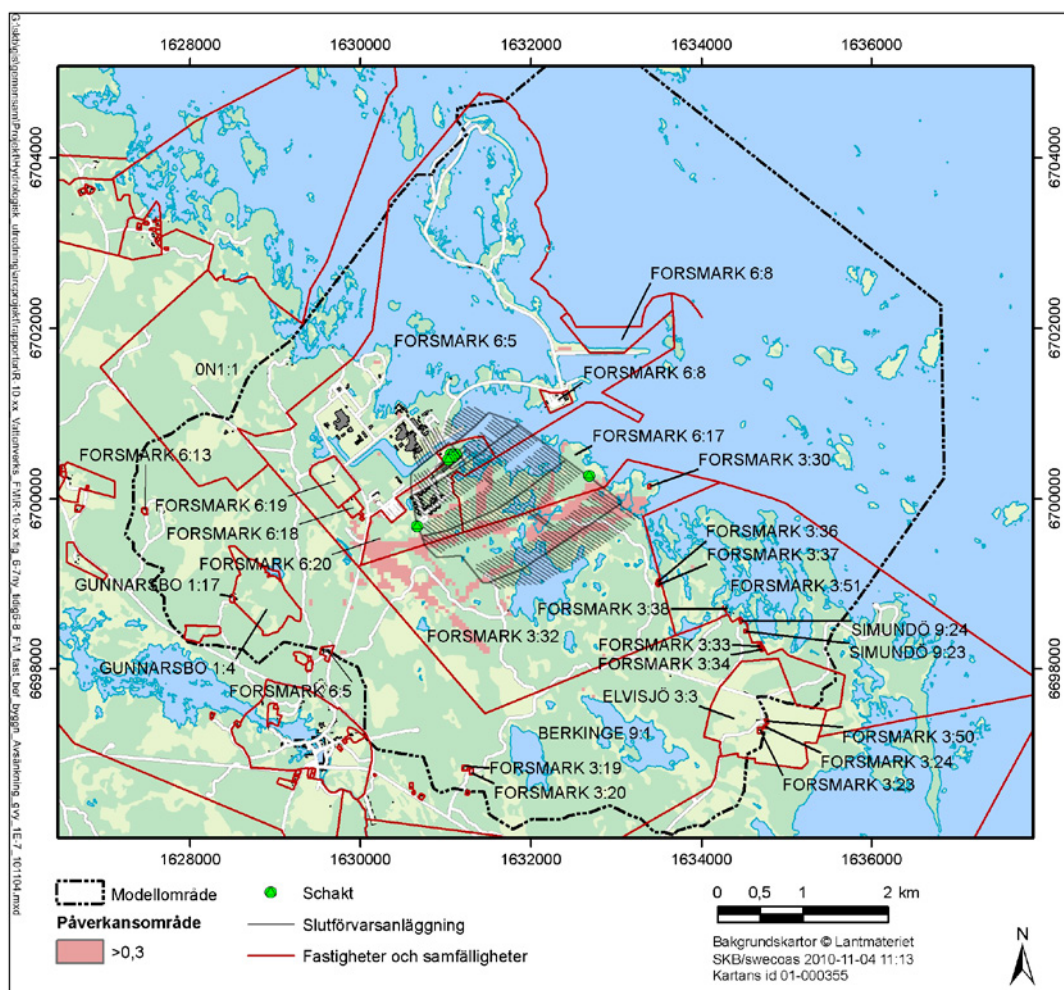
6.4.2 Övriga byggnader och infrastruktur

Inom det prognostiserade påverkansområdet för sänkningen av grundvattnets tryckhöjder i berg på nivån -50 m ö h finns det byggnader på följande fastigheter (se figur 6-7):

- Fastigheten Forsmark 3:32 vid sjön Bolundsfjärdens västra strand. Fastigheten har köpts av SKB.
- Fastigheterna Forsmark 3:36, Forsmark 3:37, Forsmark 3:38, Forsmark 3:51 och Simundö 9:24 (två byggnader), belägna öster om Bolundsfjärden.
- Fastigheterna Forsmark 3:33 och 3:34 är också belägna öster om Bolundsfjärden, i kanten av det prognostiserade påverkansområdet.

Ingen av dessa byggnader är belägen inom påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Vidare är byggnaderna belägna i områden som enligt jordartskartan /Hedenström och Sohlenius 2008/ består av morän på berg, vilket innebär att byggnaderna inte bedöms ha grundvattenberoende grundläggning. Baserat på resultaten av MIKE SHE-modelleringen och informationen i jordartskartan är därför slutsatsen att det inte bör kunna uppstå några sättningar.

En kort sträcka (200 m) av vägen mellan riksväg 76 och Forsmarks kärnkraftverk är belägen inom det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Denna vägsträcka är enligt jordartskartan /Hedenström och Sohlenius 2008/ grundlagd på morän på berg och bör därför inte ha grundvattenberoende grundläggning. Någon sättning av vägen bedöms därför inte uppstå.



Figur 6-7. Översiktskarta som visar fastigheter och befintliga byggnader i förhållande till påverkansområdet för den MIKE SHE-beräknade avsänkningen av grundvattenytan (sänkingsgräns 0,1 m). Kartan visar även den planerade slutförvarsanläggningens undermarksdel.

7 Förebyggande, begränsande och kompensatoriska åtgärder

I detta kapitel beskrivs åtgärder för att förebygga, begränsa och kompensera grundvattenbortledningens effekter och konsekvenser. Detaljundersökningar och projektering med anledning av de angivna förslagen är ännu inte genomförda. Detta innebär att kapitlet ska betraktas som en beskrivning av principlösningar. En plan för kontroller och åtgärder kommer att tas fram i samråd med tillsynsmyndigheten innan vattenverksamheten kommer till stånd.

7.1 Förebyggande åtgärder

Injektering av förvarets undermarksdel är den viktigaste förebyggande åtgärden med avseende på grundvattenbortledningen. Sådana åtgärder beskrivs i avsnitt 2.3.

7.2 Begränsande åtgärder – vattentillförsel till kalkgölar och rikkärr

Grundvattenbortledningen bedöms ge upphov till konsekvenser för ett antal våtmarksobjekt om inga åtgärder vidtas. Vidare bedöms konsekvenserna utan åtgärder bli mycket stora för de rödlistade arterna gölgroda och gulyxne, som är skyddade enligt artskyddsförordningen. Förutom tillstånd för vattenverksamhet enligt 11 kapitlet i miljöbalken krävs därför även dispens enligt artskyddsförordningen. I detta avsnitt behandlas vattentillförsel till kalkgölar och rikkärr som metod för att bevara deras naturvärden och begränsa konsekvenserna för de arter som finns i kalkgölar och rikkärr, inklusive gölgroda och gulyxne.

Några aspekter behöver belysas för att kunna bedöma den tekniska och ekologiska genomförbarheten för denna typ av åtgärd. Dessa aspekter är vattenbehov och vattentillgång (mängd och kvalitet) samt vattenöverföring och vattentillförsel. Åtgärden kommer endast att genomföras om det finns en risk för bestående negativa ekologiska konsekvenser i vissa utvalda våtmarker med höga naturvärden. SKB planerar att föreslå konkreta och mätbara kriterier för när åtgärden ska genomföras, kopplat till en beskrivning av metodik för bland annat hydrogeologisk och ekologisk uppföljning.

7.2.1 Vattenbehov och vattenkvalitet

/Mårtensson et al. 2010/ använde MIKE SHE för att bedöma de vattenmängder som kan komma att behövas för att upprätthålla opåverkade yt- och grundvattennivåer i anslutning till kalkgölar och rikkärr. Detta gjordes genom att modellen beräknar den vattentillförsel som krävs för att upprätthålla opåverkade nivåer enligt beräknade tidsserier. Metoden innebär dock att man i princip kan utgå från vilken tidsserie som helst, till exempel en uppmätt tidserie.

Analysen gjordes för tolv våtmarksobjekt inom det område som undersökts av /Hamrén och Collinder 2010/; objekt 6a, 7, 9, 11c, 14–18, 21c, 22 och 23 (se bilaga 1 samt översiktskartan i figur 4-10). Fem av dessa objekt (7, 14–16 och 18) har naturvärdesklassats som klass 1 (nationellt värde) och de är belägna helt eller delvis inom det prognostiserade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning, eller nära påverkansområdets gräns. I samband med den ekologiska fältinventeringen har den skyddade arten gölgroda observerats i samtliga dessa objekt och den skyddade orkidéarten gulyxne i två av dem (7 och 16). Övriga fyra våtmarksobjekt där dessa arter observerats kommer antingen att fyllas igen vid uppförande av slutförvarsanläggningens driftområde ovan mark, eller är belägna långt bort från påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Detta innebär att dessa fem våtmarksobjekt kan bli föremål för vattentillförsel, med inriktning på skydd av gölgroda och gulyxne.

Tabell 7-1 sammanfattar uppgifter och beräkningsresultat för de fem våtmarksobjekten /Mårtensson et al. 2010/ i termer av deras ytor, den modellberäknade medelavsänkningen av grundvattenytan, samt det modellberäknade vattenbehovet baserat på data för typåret 2006. Avsänkningen av grundvattenytan är beräknad för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. I modellen tillfördes vatten samtidigt till alla de tolv våtmarksobjekt som studerades. Detta kan ge en viss interferens mellan närliggande objekt, det vill säga att vattentillförseln till ett objekt påverkar tillförseln till ett annat. Syftet här är dock endast att bedöma vattentillförseln storleksordning. Eventuella interferenser har därför liten betydelse.

Objekten har olika storlek samt olika avsänkning av grundvattenyta och ytvattennivå. För de flesta objekten är vattenbehovet litet (i medel någon tiondels l/s eller mindre) eftersom de är små med liten avsänkning. Årsmedelvärdet av det totala behovet för de fem objekten i tabell 7-1 är knappt en liter per sekund. Även det maximala vattenbehovet varierar mellan objekten, från 0,3 l/s till 1,6 l/s. Summan av de maximala vattenbehoven för samtliga våtmarksobjekt i tabellen är cirka 5 l/s. Detta utgör dock ett värsta fall eftersom det maximala vattenbehovet under året inte infaller samtidigt för alla objekt.

Figur 7-1 ger exempel på MIKE SHE-beräknade tidsserier på vattentillförseln till våtmarksobjekten 7, 14 och 15. Figuren visar att vattenbehovet varierar under året, med små behov under sommaren och stora behov under våren och hösten. Motsvarande tidsserier för övriga studerade våtmarksobjekt visar också att vattentillförsel till våtmarker bör ske via ett styr- och reglersystem. Med nivåstyrd tillförsel till varje enskild våtmark är det i princip möjligt att efterlikna de naturliga nivåvariationerna under året, baserat på till exempel mätserier och/eller modellberäkningar.

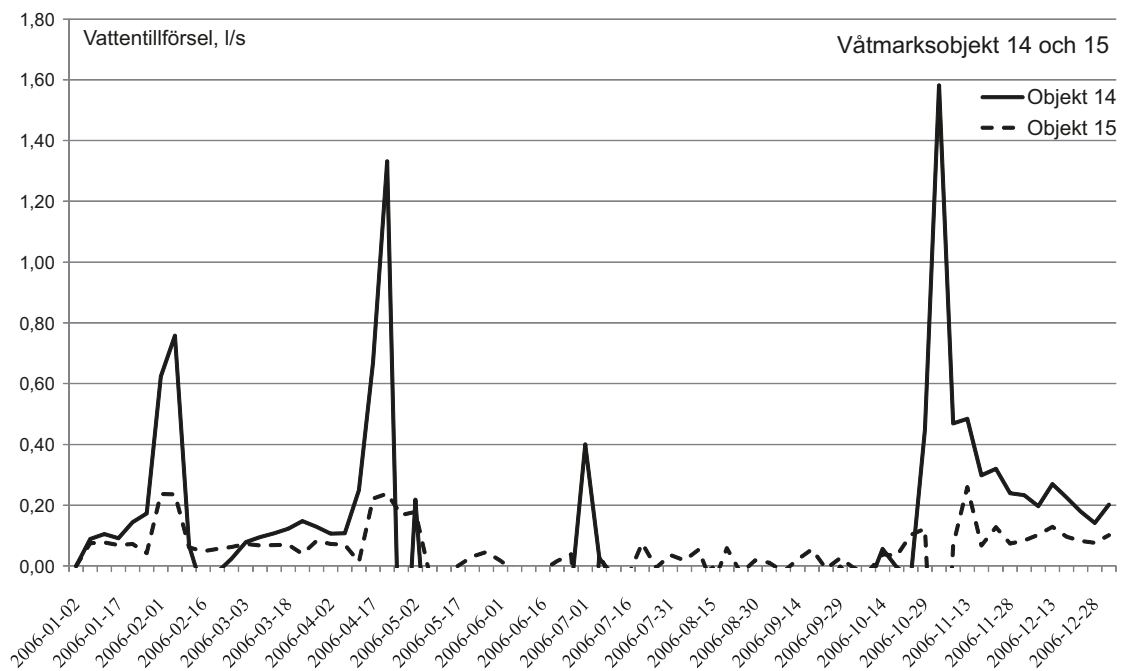
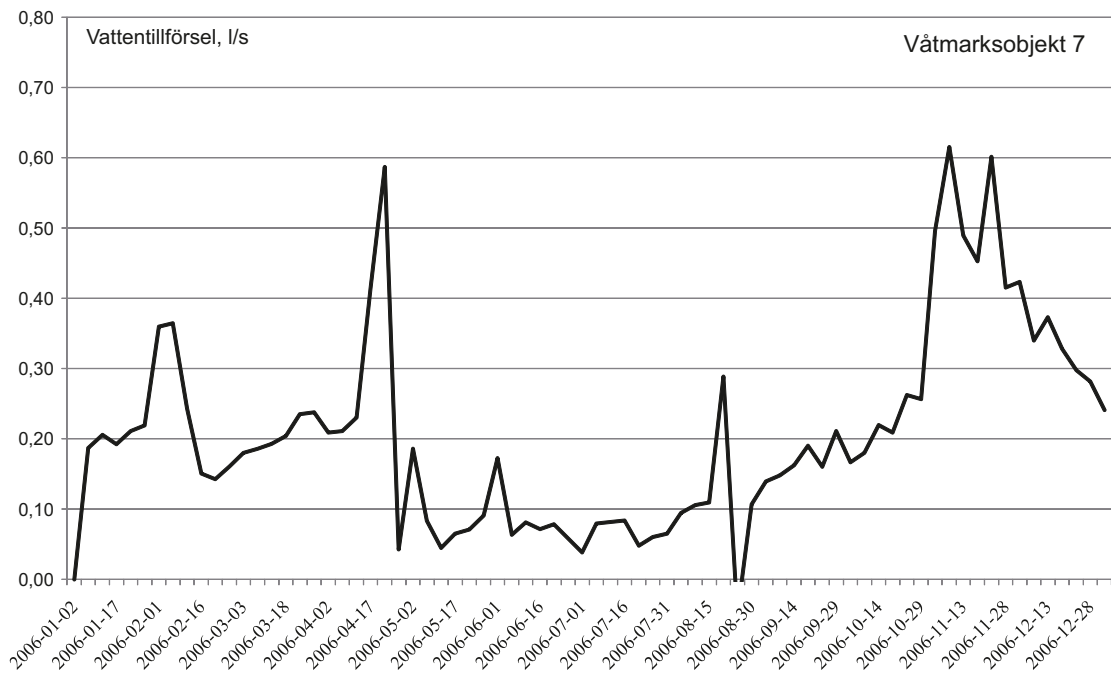
En känslighetsanalys i /Mårtensson et al. 2010/ visar att mer eller mindre vatten kan behövas jämfört med tabell 7-1, om vattengenomsläppligheten i jordlagren under våtmarkerna är högre eller lägre än vad som antagits. Analysen visar på en osäkerhetsmarginal som är i storleksordningen 30–40 %. Även inbegripet denna osäkerhetsmarginal visar modellberäkningarna att vattenbehoven är praktiskt hanterbara, även om vatten skulle behövas tillföras samtidigt till flera våtmarker. Ett vattenbehov på upp till 10 l/s bör kunna tillgodogöras med rimliga insatser.

Det är viktigt att det vatten som tillförs inte innehåller några föroreningar och att det även i övrigt har en kemisk sammansättning som liknar den i våtmarkerna. Exempel på kemiska parametrar som kan ha betydelse för djur och växter i våtmarkerna är det tillförda vattnets salthalt, pH, alkalinitet och dess innehåll av näringsämnen (kväve och fosfor), löst organiskt kol (DOC), kalcium, järn och mangan. För att karaktärisera det vatten som finns i våtmarkerna har under år 2008 ett program påbörjats med regelbunden provtagning och kemisk analys av ytvatten från fyra våtmarksobjekt med höga naturvärden (14, 16, 18 och 49). För att få en så bred bild som möjligt av våtmarkernas vattenkemiska karaktär omfattar analyserna ett stort antal parametrar, inklusive de som nämns ovan /Qvarfordt et al. 2010/.

En jämförelse mellan hittills erhållna resultat och vattenkemiska data från sjöar och bäckar i Forsmark /Tröjbom et al. 2007/ visar att våtmarkernas vattenkemiska karaktär i stora drag liknar de hos sjöarna och bäckarna. Ytvatten i våtmarkerna kan därmed sägas ha en karaktär som är typisk för området. Det är dock vissa kemiska karaktärsdrag hos våtmarkerna som kan vara viktiga att beakta. Av dessa kan nämnas högt pH (7,5–8), låg kloridhalt (10–20 mg/l) och hög kalciumhalt (40–70 mg/l). En slutsats är därför att kloridhalten i det tillförda vattnet bör vara lägre än 20 mg/l, vilket är en viktig faktor att beakta då man söker lämpliga vattenkällor i ett kustnära område som Forsmark.

Tabell 7-1. Areauppgifter samt modellberäknad avsänkning och vattenbehov för fem våtmarksobjekt.

Objekt-ID (figur 6-1)	Ungefärlig yta (m ²)	Medelavsänkning av grundvattenytan (m)	Medelavsänkning av ytvattennivån (m)	Vattenbehov, år 2006 (l/s)	
				Medel	Max.
7	8 000	Cirka 0,7	0,05	0,2	0,6
14	14 000	< 0,1	0,01	0,2	1,6
15	5 000	< 0,1	0,01	0,06	0,3
16	5 000	< 0,1	< 0,001	0,05	0,8
18	11 000	< 0,1	0,03	0,2	1,6
Summa				0,7	4,9



Figur 7-1. MIKE SHE-beräknade tidsserier på den vattentillförsel (l/s) som behövs för att upprätthålla grund- och ytvattennivån inom våtmarksobjekten 7 (övre bilden), 14 och 15 (nedre bilden).

7.2.2 Vattentillgång och vattenkvalitet

För att försörja systemet med vatten behövs en vattenkälla, med tillräcklig tillgång och godtagbar vattenkvalitet. Utgående från det bedömda vattenbehovet görs nedan en bedömning av lämpligheten med olika alternativa vattenkällor.

- **Vatten från sjön Bruksdammen:** Sjön Bruksdammen vid Forsmarks by används för råvattenförsörjning till FKA:s vattenverk. Ett system för vattentillförsel till våtmarker skulle kunna försörjas via intagsledningen. I dagsläget är FKA:s uttag (måndag till fredag, inget uttag under helger) normalt 13–14 l/s, och den maximala pumpkapaciteten med befintliga pumpar är 35 l/s (Per Bons, FKA, pers. komm. 2008). Råvattnet behandlas genom filtrering och luftning innan

det överförs via ledning till FKA:s vattenverk för vidare behandling. Vattentillgång och råvattenkvalitet är goda. Vattenbehovet för våtmarkerna ryms inom FKA:s befintliga vattendom och sannolikt även inom tillgänglig pump- och ledningskapacitet. Avståndet från vattenverket är dock långt för flertalet av de våtmarker som kan bli aktuella. Sammantaget bedöms ändå råvatten från sjön Bruksdammen vara lämplig som primär vattenkälla. För att minska risken för driftproblem i form av igensättningar bör, om möjligt, vatten användas som genomgått kemisk fällning i vattenverket, om den kemiska syreförbrukningen (COD) i råvattnet är hög.

- **Grundvatten från befintliga eller nya borrhål:** I Forsmarksområdet är det generellt goda möjligheter att erhålla grundvatten i tillräcklig mängd från borrhål i berg. Om grundvatten från borrhål används som vattenkälla behöver troligen luftning ske för att avskilja järn och mangan. Baserat på tidigare undersökningar av möjligheterna att använda grundvatten från borrhål i berg för FKA:s vattenförsörjning, är dock bedömningen att det finns en risk för saltvattenpåverkan vid stora och/eller långvariga grundvattenuttag från borrhål. En jämförelse med vattenkemiska data från SKB:s borrhål i jord och berg /Tröjbom et al. 2007/ visar att grundvattnets salthalt i regel är högre än salthalten i de provtagna våtmarkerna redan på relativt måttliga djup. Med tanke på den generellt höga salthalten och att grundvattenuttag är en hydraulisk störning, bedöms grundvatten från en jord- eller bergbrunn inte vara lämpligast som primär vattenkälla.
- **Ytvatten från en lokal sjö:** Uttag av sjövattnet är ett alternativ som skulle kunna ge en stabil vattenförsörjning. Bolundsfjärden, som är den största sjön i området, bör ge goda möjligheter att erhålla tillräckligt med vatten. Sjön är också centralt belägen i förhållande till de våtmarker som kan bli aktuella. Vattenkemiska data från Bolundsfjärden /Tröjbom et al. 2007/ visar dock att salthalten i sjön i regel är högre än salthalten i de provtagna våtmarkerna. Sjön kan periodvis innehålla bräckt vatten på grund av saltvatteninträngning från havet vid hög havsnivå. Bolundsfjärden bedöms därför inte vara lämpligast som primär vattenkälla.
- **Ytvatten från en lokal bäck:** Kemiska analyser av bäckvattnet /Tröjbom et al. 2007/ visar att salthalten i bäckarna med vissa undantag är något högre än salthalten i de provtagna våtmarkerna. En tillräckligt låg salthalt har dock uppmätts dels i bäcken mellan sjöarna Gunnarsboträsket och Labboträsket, dels i bäcken mellan sjöarna Eckarfjärden och Bolundsfjärden, uppströms biflödet från sjön Gällsboträsket (se figur 4-1 i avsnitt 4.1). Enligt fleråriga vattenföringsmätningar /Johansson 2008/ är medelvattenföringen i dessa bäckar i storleksordningen 10–30 l/s. Enligt mätserierna förekommer det dock relativt långa perioder med låg eller ingen vattenföring, framförallt under sensommar och tidig höst. Detta innebär att bäckarna skulle behöva kompletteras med någon annan vattenkälla under dessa delar på året. Av denna anledning bedöms ytvatten från någon av dessa bäckar inte vara lämpligast som primär vattenkälla.
- **Vatten från slutförvarsanläggningens undermarksdel:** Rent principiellt kan det vatten som pumpas upp från slutförvarsanläggningen nyttjas som vattenkälla. Detta vatten kommer dock att utgöra en blandning mellan grundvatten som läcker in till förvaret och bruksvatten från borrhåls- och sprängningsarbeten. Vattnet kommer därför att innehålla bland annat nitrat- och ammoniumkväve från sprängmedelsanvändning /Ridderstolpe och Stråe 2010/. Kvävehalten i dränaget från rampen kan förväntas avta efter uppförandeskedet. Det skulle även vara möjligt att ta vatten från ett vattenförsörjningshål som borrar från rampen in i berget. Salthalten i grundvattnet kan dock vara hög på grund av närheten till havet och kylvattenkanalen. Ett sådant borrhål bedöms vara möjligt att använda som primär vattenkälla, om vattnet inte visar sig vara för salt.

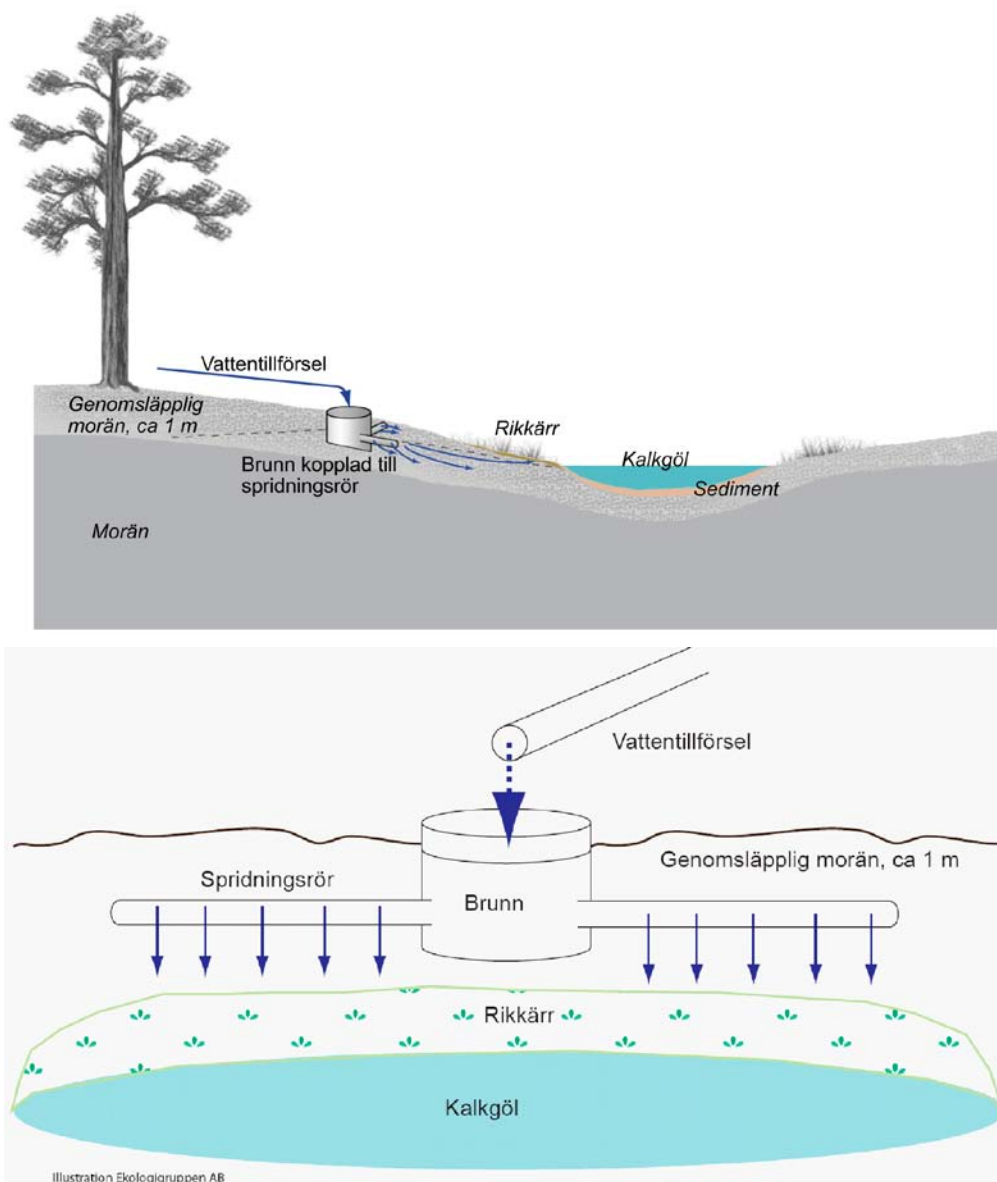
Sammantaget bör det finnas goda möjligheter att med en eller en kombination av olika vattenkällor försörja våtmarker i Forsmarksområdet med vatten av rätt mängd och kvalitet. Att använda vatten från sjön Bruksdammen förefaller vara det mest lämpliga alternativet, med hänsyn till dess jämna och tillförlitliga vattentillgång och vattenkvalitet. Vatten från ett vattenförsörjningshål som borrar in i berget från slutförvarsanläggningens ramp kan också vara ett alternativ. Vilken vattenkälla som är lämpligast behöver dock utredas närmare innan slutligt val kan göras.

7.2.3 Överföring och tillförsel till kalkgölar och rikkärr

För överföring av vatten från en eller flera vattenkällor till kalkgölar och rikkärr behövs ett system med pump, huvudledning och distributionsledningar /SKBdoc 1227089/. Ledningar kan förläggas på markytan eller grävas ner. Ledningarna måste vara eluppvärmda om de ska kunna användas även vintertid. Detta bedöms dock preliminärt inte vara nödvändigt ur ekologisk synpunkt. Som nämnts tidigare behövs sannolikt ett styr- och reglersystem för vattenöverföring och/eller -tillförsel. Detaljprojektering kommer att genomföras för att klargöra detaljerna i de tekniska lösningarna.

Tillförseln kan vid behov uppdelas på våtmarkernas göl- respektive rikkärrsdel. Tillförsel till en göl kan ske direkt med slang. För att så långt som möjligt återskapa ett ”naturligt” yt- och grundvatten, med motsvarande vattenkemiska karaktär som det vatten som finns i våtmarkerna, bör dock vattnet tillåtas passera genom marken innan det når våtmarken. Exempelvis kan då vattnet tillföras via infiltrationsbrunnar, eller via en brunn som är kopplad till hålförsedda spridningsledningar (typ dräneringsrör) som läggs ner i anlagda perkolationsmagasin (”stenkistor”), se principskisserna i figur 7-2. De senare kan liknas vid ledningsgravar fyllda med singel eller makadam, och som ofta anläggs för omhändertagande av dagvatten.

Vid en detaljprojektering behöver man beakta faktorer som markfrost, kringfyllnad samt möjligheter till spolning av ledningar och rör. Vattnet tillförs brunnen och sprids via spridningsrören inom den övre delen av moränen, lämpligen i en sluttning ner mot våtmarken på ett avstånd av 10–15 m. Den övre metern av moränen i Forsmark har generellt en högre vattengenomsläpplighet jämfört med moränens djupare delar /Johansson 2008/. Detta innebär att det tillförda vattnet sannolikt kommer att flöda mot rikkärret och gölen i den övre delen av moränen. På grund av det stora kalkinnehållet i moränen kommer kalkning sannolikt inte att behövas. Det är viktigt att få rätt lutning på spridningsrören, så att inte vatten tillförs marken enbart i enstaka punkter, till exempel i någon av spridningsrörens ändrar.



Figur 7-2. Principskisser av vattentillförsel till rikkärr och kalkgöl. Som komplement kan vid behov vattentillförsel till göldelen ske med slang (visas inte i bilderna).

7.2.4 Genomförbarhet, konsekvenser efter åtgärder och uppföljning

Sammantaget bedöms det som tekniskt och ekologiskt genomförbart att bevara naturvärden och arter i kalkgölar och rikkärr genom den beskrivna metoden för vattentillförsel. Detta innebär att grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen inte ska medföra några ekologiska konsekvenser för de kalkgölar och rikkärr till vilka vattentillförseln sker. Hur åtgärderna konkret ska genomföras för de enskilda våtmarksobjekten behöver dock utredas närmare inför ett eventuellt genomförande. Genomförandet är förknippat med ingrepp i naturen i form av ledningsdragningar och övriga installationer, vilket gör att den estetiska utformningen är viktig.

En detaljerad projektering av tillförselanläggningarna kommer sannolikt att kräva vissa kompletterande fältundersökningar, till exempel sondering eller bormning vid möjliga lägen för perkolationsmagasin eller infiltrationsbrunnar. Vidare planerar SKB att genomföra en pilotstudie vid en våtmark i Forsmarksområdet, i syfte att utvärdera och dra lärdomar kring hur en vattentillförselanläggning fungerar i praktiken. En sådan pilotstudie kommer att genomföras i god tid innan grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen påbörjas.

Åtgärder av denna typ kommer endast att genomföras om uppföljningen av förhållandena i våtmarkerna visar att det finns risk för bestående negativa ekologiska konsekvenser och om dessa förändringar beror på grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. Det behöver därför tas fram konkreta och mätbara kriterier för när åtgärden ska genomföras. Detta görs lämpligen i samband med en plan för kontroller och åtgärder som tas fram i samråd med tillsynsmyndigheten. Generellt innefattar detta en långsiktig uppföljning av grund- och ytvattennivåer, kombinerat med återkommande ekologiska inventeringar. Första kvartalet år 2009 installerades pegel- och grundvattenrör med automatiskt registrerande nivåmätningssutrustning i bland annat våtmarksobjekten 7, 14, 16, 18 och 23 /Werner et al. 2009/. Dessa installationer möjliggör en långsiktig uppföljning av grund- och ytvattennivåerna i dessa våtmarksobjekt. Om åtgärden med vattentillförsel genomförs kommer tillförselanläggningarna att behöva trimmas in och vid behov justeras, för att säkerställa anläggningarnas funktion och få önskad styrning av tillflöden och nivåer. Detta innebär att uppföljning behövs även efter det att åtgärden satts in.

Förutom dessa begränsande åtgärder som är inriktade på kalkgölar, rikkärr och tillhörande arter, bedöms inga begränsade åtgärder vara nödvändiga.

7.3 Naturvårdsinriktad skötsel

SKB kommer att genomföra naturvårdsinriktad skötsel av skogar och våtmarker på de fastigheter i Forsmark som SKB äger. Vad gäller skogarna är ambitionen att skötseln ska motsvara Sveaskogs intentioner för en ekopark i Forsmark. Exempel på skötselåtgärder som kan bli aktuella är gallring och igenläggning av diken. För våtmarker är tänkbara skötselåtgärder röjning och slåtter, främst vad gäller våtmarksobjekt med nationellt eller regionalt naturvärde (värdeklass 1 eller 2). En naturvårdsinriktad skötsel kan delvis motverka konsekvenserna av grundvattenbortledningen, bland annat genom att förbättra förhållandena för flora och fauna i skogar och våtmarker.

7.4 Kompensatoriska åtgärder

7.4.1 Naturvärden

Bedömningen är att inga kompensatoriska åtgärder behövs med avseende på grundvattenbortledningens konsekvenser för naturvärden. Två av de gölar där gölgröda observerats (våtmarksobjekten 12 och 13a) kommer att fyllas igen vid uppförande av slutförvarsanläggningens driftområde ovan mark, vilket kräver dispens enligt artskyddsförordningen. Som del av en separat dispensansökan kommer det därför att föreslås att ett antal nya gölar anläggs som kompensation för de förlorade livsmiljöerna för gölgröda (se /Werner et al. 2010/).

7.4.2 Enskilda brunnar

Om grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen leder till problem med vattenförsörjningen från någon enskild brunn kommer SKB att vidta åtgärder.

8 Sammanfattande konsekvensbeskrivning

I detta kapitel ges en sammanfattning i punktform av de huvudsakliga slutsatserna från konsekvensbeskrivningen i kapitel 6.

- **Våtmarksobjekt:**

Utan åtgärder bedöms de ekologiska konsekvenserna bli mycket stora för två våtmarksobjekt med nationellt värde (klass 1) och stora för 15 stycken våtmarksobjekt med nationellt eller regionalt värde. Med åtgärder i form av vattentillförsel bedöms konsekvenserna bli mycket stora för ett våtmarksobjekt med nationellt värde och konsekvenserna bedöms bli stora för tolv objekt. SKB kommer att bedriva naturvårdsinriktad skötsel av våtmarker och skogar på de fastigheter som SKB äger i Forsmark. Åtgärder i form av röjning och slåtter kommer att bidra till att hålla våtmarker med höga naturvärden öppna, vilket motverkar eventuellt torrare förhållanden till följd av grundvattenbortledningen.

- **Skogsobjekt:**

De ekologiska konsekvenserna bedöms inte bli mycket stora eller stora för något skogsobjekt. Det bedöms således inte bli någon tydlig påverkan på de naturvärden som utgör värdegrunden för skogsområdena. Konsekvenserna bedöms bli märkbara för elva skogsobjekt och små eller obetydliga för 17 stycken objekt. För skogsobjekten planeras ingen vattentillförsel. Naturvårdsinriktad skötsel av skogen innebär att skogens naturvärden i Forsmark totalt sett ökar med tiden, även om andelen fuktiga till blöta skogspartier skulle minska till följd av grundvattenbortledningen.

- **Rödlistade och/eller skyddade arter:**

Om inga åtgärder vidtas, bedöms grundvattenbortledningen medföra mycket stora eller stora konsekvenser för de rödlistade våtmarksarterna gölgroda, orkidén gulyxne, molluskarten kalkkärrgrynsnäcka och kärlväxtarten loppstarr. Konsekvenserna bedöms bli märkbara för arten käppkrokmossa. Gölgroda, gulyxne, käppkrokmossa är skyddade enligt artskyddsförordningen. Med åtgärder i form av vattentillförsel bedöms inga konsekvenser uppstå för dessa tre arter och konsekvenserna bedöms bli små för arten kalkkärrgrynsnäcka. Även med vidtagna åtgärder bedöms dock konsekvenserna bli stora för arten loppstarr. Grundvattenbortledningen bedöms medföra märkbara konsekvenser för rödlistade svamparter i ört-kalkbarrskogarna.

Med avseende på övriga skyddade arter som förekommer i Forsmark, bedöms konsekvenserna utan åtgärder bli märkbara för våtmarksarterna större vattensalamander och brudsporre. Med vattentillförsel bedöms inga konsekvenser uppstå för dessa arter. Konsekvenserna bedöms bli små för elva skyddade våtmarksarter, bland annat åkergroda, snok och ängsnycklar. För övriga skyddade våtmarksarter i Forsmark bedöms obetydliga eller inga konsekvenser uppstå till följd av grundvattenbortledningen. Vad gäller skyddade skogsarter bedöms konsekvenserna bli små för ett antal orkidéarter.

- **Utpekade värdefulla och skyddade områden:**

Grundvattenbortledningen bedöms medföra påtaglig skada för det riksintresseområde för naturvärden som heter Forsmark-Kallrigafjärden, även med åtgärder i form av vattentillförsel och naturvårdsinriktad skötsel. Vad gäller Natura 2000-området Kallriga är bedömningen att de arter som ska skyddas inte kommer att utsättas för en störning som på ett betydande sätt kan försvåra bevarandet av utpekade arter.

- **Mark- och vattenkemiska förhållanden:**

Små ytor och volymer torv- och gyttjejordar inom påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning innebär att grundvattenbortledningen endast bedöms ge upphov till små och lokala effekter på de mark- och vattenkemiska förhållandena.

- **Jord- och skogsbruk:**

Aktivt jordbruk bedrivs vid Storskäret, cirka två km öster om försvarsområdets östra gräns. Enligt genomförda modellberäkningar kommer ingen avsänkning av grundvattenytan att uppstå inom detta område. Grundvattenbortledningen bedöms därför inte medföra några konsekvenser för jordbruket i Forsmark.

Grundvattenbortledningen bedöms ge upphov till en minskning av skogens bonitet (dess virkesproducerande förmåga) på maximalt 25 % inom påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Påverkansområdet omfattar huvudsakligen skogsområden som i dag ägs av SKB och är litet i förhållande till de totala skogsarealerna i Forsmark.

- **Kommunal och enskild vattenförsörjning:**

Bortledande av grundvatten från förvaret kommer inte att påverka den kommunala vattenförsörjningen i Östhammars kommun. Grundvattenbortledningen kan i ett värsta fall ge en viss försämring av brunnskapaciteten för tre enskilda bergbrunnar, varav en inte har kunnat lokaliseras.

- **Infrastruktur och byggnader:**

Enligt en sättningsutredning kan grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen endast ge upphov till mycket små sättningar av befintliga anläggningar vid Forsmarks kärnkraftverk. Bedömningen är att sättningar inte kommer att uppstå för övriga byggnader eller för några vägar i Forsmark.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. Referenser till SKB:s opublicerade dokument finns samlade i slutet av referenslistan. Opublishade dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se

Adill A, Karås P, Ljunghager F, Mo K, Didrikas T, Sevastik A, 2006. Biologisk recipientkontroll vid Forsmarks kärnkraftverk. Årsrapport för 2006. Fiskeriverkets Kustlaboratorium, Öregrund.

Anderson M P, Woessner W W, 1992. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. London: Academic Press.

Axelsson C-L, Follin S, 2000. Grundvattensänkning och dess effekter vid byggnation och drift av ett djupförvar. SKB R-00-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bono N, Fredriksson A, Maersk Hansen L, 2010. Sättningsanalys Forsmark kärnkraftsverk – Aggregat I. SKB P-10-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bosson E, Sassner M, Gustafsson L-G, 2008. Numerical modelling of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bosson E, Sassner M, Sabel U, Gustafsson L-G, 2010. Modelling of present and future hydrology and solute transport at Forsmark. SR-Site Biosphere. SKB R-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Brantberger M, Janson T, 2009. Underground design Forsmark, Layout D2. Grouting. SKB R-08-114, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Brunberg A, Blomqvist P, 1998. Vatten i Uppsala län 1997: beskrivning, utvärdering, åtgärdsförslag. Rapport 8/1998, Upplandsstiftelsen.

Brydsten L, 2004. A mathematical model for lake ontogeny in terms of filling with sediments and macrophyte vegetation. SKB TR-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Brydsten L, 2006. A model for landscape development in terms of shoreline displacement, sediment dynamics, lake formation, and lake choke-up processes. SKB TR-06-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Brydsten L, Engqvist A, Näslund J-O, Lindborg T, 2009. Förväntade extremvattennivåer för havsytan vid Forsmark och Laxemar-Simpevarp fram till år 2100. SKB R-09-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Cesano D, Olofsson B, Bagtzoglou C, 2000. Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels – a statistical study of the Bolmen tunnel in southern Sweden. Tunnelling and Underground Space Technology, 15, pp 153–165.

DHI Software, 2008. MIKE SHE user manual. Volume 2: reference guide. DHI Water, Environment & Health, Hørsholm, Denmark.

Ekman M, 1996. A consistent map of the postglacial uplift of Fennoscandia. Terra Nova, 8, pp 158–165.

Emmelin A, Brantberger M, Eriksson M, Gustafson G, Stille H, 2007. Rock grouting. Current competence and development for the final repository. SKB R-07-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ericsson L O, Hultberg H, 2003. Effekter av grundvattensänkning och vattenuttag på grundvattenbildning och vattenkvalitetsutveckling i kristallin berggrund: syntes av resultat från fältförsök i Äspö och Gårdsjön under perioden 1997–2002. Publ B 512, Geologiska institutionen, Chalmers Tekniska Högskola.

Florgård C, Linnér H, Olsson M, Olsson S, Persson G, Wiklander G, 2000. Grundvattensänkning på Hallandsås: effekter på natur, jordbruk och skogsbruk. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet. (Samhälls- och landskapsplanering 11).

Follin S, 2008. Bedrock hydrogeology Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Follin S, Hartley L, Jackson P, Roberts D, Marsic N, 2008.** Hydrogeological conceptual model development and numerical modelling using CONNECTFLOW, Forsmark modelling stage 2.3. SKB R-08-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Franklin I, 2005.** Jämförelse av beräknad och verklig grundvattensänkning vid vägportar. Examensarbete UPTEC W 05 033, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- Gokall-Norman K, Ludvigson J-E, 2007.** Forsmark site investigation. Hydraulic interference test in borehole HFM14. SKB P-06-196, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gokall-Norman K, Ludvigson J-E, 2008a.** Forsmark site investigation. Large-scale interference test with borehole HFM14 used as pumping borehole, 2007. SKB P-07-228, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gokall-Norman K, Ludvigson J-E, 2008b.** Forsmark site investigation. Hydraulic interference test with borehole HFM33 used as pumping borehole, November of 2007. SKB P-07-229, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gustafson G, 2009.** Hydrogeologi för bergbyggare. Stockholm: Formas.
- Gustafsson L-G, Sundlöf B, 2002.** Alternativa åtgärder mot grundvatten i avloppssystem: att genomföra och förutsäga effekterna med stöd av datormodellering. VA-Forsk rapport nr 5, Svenskt Vatten AB.
- Gustafsson L-G, Gustafsson A-M, Aneljung M, Sabel U, 2009.** Effects on surface hydrology and near-surface hydrogeology of an open repository in Forsmark. Results of modelling with MIKE SHE. SKB R-08-121, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hamrén U, Collinder P, 2010.** Vattenverksamhet i Forsmark. Ekologisk fältinventering och naturvärdesklassificering samt beskrivning av skogsproduktionsmark. SKB R-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hamrén U, Collinder P, Allmér J, 2010.** Bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen i Forsmark – beskrivning av konsekvenser för naturvärden och skogsproduktion. SKB R-10-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hartley L, Jackson P, Joyce S, Roberts D, Shevelan J, Swift B, Gylling B, Marsic N, Hermanson J, Öhman J, 2007.** Hydrogeological pre-modelling exercises. Assessment of impact of the Äspö Hard Rock Laboratory. Sensitivities of palaeo-hydrogeology. Development of a local near-surface Hydro-DFN for KLX09B-F. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-07-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedenström A, Sohlenius G, 2008.** Description of regolith at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedenström A, Sohlenius G, Strömgren M, Brydsten M, Nyman H, 2008.** Depth and stratigraphy of regolith at Forsmark. Site descriptive modeling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hultberg H, Ericsson L O, Hultengren S, Mossmark S, 2005.** Effekter av grundvattensänkning och vattenuttag på grundvattenbildning och vattenkvalitetsutveckling i kristallin berggrund: slutrapport av fas 1 från fältförsök i Äspö och Gårdsjön under perioden 1997–2005. Rapport 2005:17, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers Tekniska Högskola.
- IPCC, 2007.** Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Johansson P-O, 2008.** Description of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kellner E, 2003.** Wetlands – different types, their properties and functions. SKB TR-04-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Knutsson G, Morfeldt C-O, 1993.** Grundvatten: teori & tillämpning. Stockholm: Svensk Byggtjänst.
- Kristensen K J, Jensen S E, 1975.** A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. Nordic Hydrology, 6, pp 170–188.

- Lindborg T (ed), 2008.** Surface system Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Loreth T, 2005.** Quantification of one spring fish migration in a small coastal stream in the Forsmark area, Sweden. Scripta Limnologica Upsaliensia 2005, B:7.
- Ludvigson J-E, 2002.** Brunnsinventering i Forsmark. SKB R-02-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Länsstyrelsen Uppsala län, 2002.** Bevarandeplan för Natura 2000-område Kallriga SE0210220 (regeringsgodkänd 1997 med revidering maj 2002). Länsstyrelsen Uppsala län.
- Löfgren A (ed), 2008.** The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM Site. SKB R-08-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson E, Gustafsson L-G, 2010.** Hydrological and hydrogeological effects of an open repository in Forsmark. Final MIKE SHE flow modelling results for the Environmental Impact Assessment. SKB R-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson E, Gustafsson L-G, Gustafsson A-M, Aneljung M, Sabel U, 2010.** Hydrologiska och hydrogeologiska effekter på våtmarker och skogsområden av slutförvarsanläggningen i Forsmark. Resultat från modellering med MIKE SHE. SKB R-10-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Naturvårdsverket, 2008.** Vattenverksamheter: handbok för tillämpningen av 11 kapitlet i miljöbalken. Stockholm: Naturvårdsverket. (Handbok 2008:5).
- Nilsson A-C, Borgiel M, 2005.** Forsmark site investigation. Sampling and analyses of near surface groundwater. Results from sampling of shallow soil monitoring wells, BAT pipes, a natural spring and private wells, May 2003–April 2005. SKB P-05-171, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nordén S, Söderbäck B, Andersson E, 2008.** The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-Site. SKB R-08-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Odén M, 2009.** Site investigation SFR. Hydrogeological modelling at SFR using DarcyTools. Site description SFR version 0.0. SKB P-08-94, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olofsson B, 1994.** Flow of groundwater from soil to crystalline rock. Applied Hydrogeology, 2, pp 71–83.
- Painter S, Sun A, 2005.** Representation of an open repository in groundwater flow models. SKB R-05-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pfeffer W T, Harper J T, O’Neel S, 2008.** Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise. Science, 321, pp 1340–1343.
- Påsse T, 1997.** A mathematical model of past, present and future shore level displacement in Fennoscandia. SKB TR 97-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Qvarfordt S, Borgiel M, Berg C, 2010.** Monitoring Forsmark. Hydrochemical investigations in four calciferous lakes in the Forsmark area. Results from complementary investigations in the Forsmark area, 2008–2009. SKB P-10-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rahmstorf S, 2007.** A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. Science, 315, pp 368–370.
- Ridderstolpe P, Stråe D, 2010.** Vattenhantering vid ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark – läge Söderviken. SKB P-10-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sidenvall J, Birgersson L, 1998.** Påverkan på växtligheten av sänkt grundvattenyta vid ett djupförvar. SKB R-98-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2007.** Final repository facility. Underground design premises/D2. SKB R-07-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008a.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008b.** Geovetenskapligt undersökningsprogram för utbyggnad av SFR. SKB R-08-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008c.** Plan 2008. Kostnader från och med år 2010 för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Underlag för avgifter och säkerheter åren 2010 och 2011. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- SKB, 2008d.** Confidence assessment. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009.** Underground design Forsmark. Layout D2. SKB R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010.** Slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle. Anläggningsbeskrivning layout D – Forsmark. SKB R-09-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sohlenius G, Hedenström A, 2009.** Platsundersökning Forsmark. Stratigrafiska undersökningar i våtmarksobjekt. SKB P-09-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, 2004.** DarcyTools, version 2.1. Verification and validation. SKB R-04-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, Ferry M, 2004.** DarcyTools, version 2.1. User's guide. SKB R-04-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, Follin S, 2010.** Groundwater flow modelling of the excavation and operation phases – SR-Site Forsmark. SKB R-09-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, Kuylenstierna H-O, Ferry M, 2004.** DarcyTools, version 2.1. Concepts, methods, equations and demo simulations. SKB R-04-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Söderbäck B (ed), 2008.** Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas. Site descriptive modelling, SDM-Site. SKB R-08-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tröjbom M, Söderbäck B, Johansson P-O, 2007.** Hydrochemistry of surface water and shallow groundwater. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-07-55, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tunnelkommissionen, 1998.** Miljö i grund och botten: erfarenheter från Hallandsåsen. Slutrapport från Tunnelkommissionen. Stockholm: Fritzes. (Statens offentliga utredningar 1998:137).
- Werner K, Lundholm L, Johansson P-O, 2009.** Platsundersökning Forsmark. Installation av grundvattenrör och pegelrör i våtmarker och sjön Tjämpussen. SKB P-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werner K, Hamrén U, Collinder P, Ridderstolpe P, 2010.** Vattenverksamhet i Forsmark (del II). Slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle: Vattenverksamheter ovan mark. SKB R-10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wijnbladh E, Aquilonius K, Floderus S, 2008.** The marine ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-site. SKB R-08-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Östhammars kommun, 2003a.** Kommunal översiktsplan för Östhammars kommun. Del 1 – Kommunövergripande förutsättningar och mål.
- Östhammars kommun, 2003b.** Kommunal översiktsplan för Östhammars kommun. Del 2 – Regler och vägledningar.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1227089 ver 1.0	Överföring av vatten till våtmarker i Forsmark – bedömning av vattentillgång, utförande och kostnader	Tyréns, 2009
1247710 ver 1.0	Konsekvenser för skogsproduktion av långtidsförvar av utbränt kärnbränsle vid Forsmark och Laxemar orsakat av varaktig sänkning av grundvattennivån	SKB, 2010
1247715 ver 1.0	Långvarig grundvattenavsänkning ovan en slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle i Forsmark: Effekter på markegenskaper och markprocesser	SKB, 2010

Förteckning över våtmarksobjekt

Tabell B1-1. Identifierade och naturvärdesklassade våtmarksobjekt inom det område som undersökts av /Hamrén och Collinder 2010/.

Objekt-ID (figur 4-10)	Objektsbeskrivning	Naturvärdeklass	Läge, ev. namn & övriga noteringar
1	Medelrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
2	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
3	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
6a	Medelrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
6b	Medelrikkärr	Kommunalt värde (klass 3)	
6c	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
7	Rikkärr och kalkgöl	Nationellt värde (klass 1)	
8a	Sjö	Kommunalt värde (klass 3)	Sjön Tjärpussen
8b	Medelrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
9	Medelrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
11	Vassdominerat kärr	Lokalt värde (klass 4)	
11a	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
11b	Strandäng	Lokalt värde (klass 4)	
11c	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
11d	Vassdominerat kärr	Lokalt värde (klass 4)	
11e	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
12	Liten sjö/göl	Nationellt värde (klass 1)	Inom driftområdet; kommer att fyllas igen
13a	Liten sjö/göl	Nationellt värde (klass 1)	Inom driftområdet; kommer att fyllas igen
13b	Liten sjö/göl	Regionalt värde (klass 2)	Inom driftområdet; kommer att fyllas igen
14	Extremrikkärr och kalkgöl	Nationellt värde (klass 1)	Norra Labbofjärden
15	Medelrikkärr och kalkgöl	Nationellt värde (klass 1)	Norra Labbokärret
16	Extremrikkärr och kalkgöl	Nationellt värde (klass 1)	Västra Labbokärret
17	Intermediärt rikkärr och kalkgöl	Regionalt värde (klass 2)	
18	Rikkärr och kalkgöl	Nationellt värde (klass 1)	Kungsträsket
19	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
21	Vassområde med liten sjö/göl	Lokalt värde (klass 4)	Kring sjön Puttans norra strand
21c	Kalkfuktäng	Regionalt värde (klass 2)	
22	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
23	Extremrikkärr och göl	Nationellt värde (klass 1)	
34	Vassdominerat rikkärr	Lokalt värde (klass 4)	
36	Vassdominerat kärr	Lokalt värde (klass 4)	Inom driftområdet; kommer att fyllas igen
37	Intermediärt kärr	Lokalt värde (klass 4)	
38	Vassområde	Lokalt värde (klass 4)	Kring sjön Gällsboträsket
39	Våtmarker och sjö	Kommunalt värde (klass 3)	Vid sjön Labboträsket
45	Kalkfuktäng	Kommunalt värde (klass 3)	
46a	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	Vid sjön Fräkengropen
46b	Intermediärkärr	Kommunalt värde (klass 3)	Vid sjön Fräkengropen
47	Göl	Lokalt värde (klass 4)	
48	Medelrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	Vid sjön Djupsundsdelarna
48a	Medelrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	Vid sjön Djupsundsdelarna
49	Extremrikkärr	Nationellt värde (klass 1)	Vid sjön Vambörsfjärden
65	Intermediärt kärr och göl	Kommunalt värde (klass 3)	
66	Medelrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	Vid sjön Bolundsfjärden
67	Kärr och göl	Kommunalt värde (klass 3)	Vid sjön Djupsundsdelarna
68	Intermediärkärr och göl	Kommunalt värde (klass 3)	Vid sjön Djupsundsdelarna

Tabell B1-1. Forts.

Objekt-ID (figur 4-10)	Objektsbeskrivning	Naturvärdeklass	Läge, ev. namn & övriga noteringar
69	Gölar med omgivande vassar	Lokalt värde (klass 4)	
69a	Medelrikkärr	Kommunalt värde (klass 3)	
70	Skogsbevuxet extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
71	Extremrikkärr	Nationellt värde (klass 1)	Vid sjön Gällsboträsket
72	Strandäng	Lokalt värde (klass 4)	Vid kusten
73	Strandäng	Lokalt värde (klass 4)	Vid kusten
74	Kalkfuktäng	Kommunalt värde (klass 3)	Vid sjön Bolundsfjärden
75	Kalkfuktäng	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Bolundsfjärden
76	Mosaikartade vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Norra Bassängen
77	Mosaikartade vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Norra Bassängen
78	Mosaikartade vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Bolundsfjärden
79	Mosaikartade vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Bolundsfjärden
80	Medelrikkärr	Kommunalt värde (klass 3)	Vid sjön Djupsundsdelarna
81	Intermediärkärr	Lokalt värde (klass 4)	
81a	Kalkfuktäng	Kommunalt värde (klass 3)	
82	Intermediärkärr	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Bolundsfjärden
83	Intermediärkärr	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Bolundsfjärden
84	Vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Vambörsfjärden
85	Intermediärkärr	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Vambörsfjärden
86	Vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Graven
87	Medelrikkärr/strandäng	Kommunalt värde (klass 3)	Vid sjön Bolundsfjärden
88	Mosaikartade vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Bolundsfjärden
89	Mosaikartade vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Bolundsfjärden
90	Kalkfuktäng	Kommunalt värde (klass 3)	Vid sjön Bolundsfjärden
91	Vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Bolundsfjärden
92	Vassar	Lokalt värde (klass 4)	Vid sjön Bolundsfjärden
93	Medelrikkärr	Lokalt värde (klass 4)	
100	Strandäng	Regionalt värde (klass 2)	
102	Strandäng	Regionalt värde (klass 2)	
122	Två starrkärr	Regionalt värde (klass 2)	Vid Dundersborg
125	Havsstrandäng	Regionalt värde (klass 2)	Vid sjön Lillfjärden
126	Intermediärkärr	Kommunalt värde (klass 3)	
127	Extremrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	
128	Medelrikkärr	Regionalt värde (klass 2)	

Förteckning över skogsobjekt

Tabell B2-1. Identifierade och naturvärdesklassade skogsobjekt inom det område som undersökts av /Hamrén och Collinder 2010/.

Objekt-ID (figur 4-11)	Objektsbeskrivning	Naturvärdesklass
4	Sumpskog	Lokalt värde (klass 4); ingår i område med naturvärde enligt Länsstyrelsen
5	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3)
6e	Hällmarkstallskog	Regionalt värde (klass 2)
9a	Hällmarkstallskog	Regionalt värde (klass 2)
10	Dikad sumpskog	Lokalt värde (klass 4)
10a	Sumpskog	Lokalt värde (klass 4)
24	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3); objekt med naturvärde enligt Skogsstyrelsen
25	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3)
26a	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
26b	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3)
26c	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3)
26d	Kalkbarrskog	Lokalt värde (klass 4)
27	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
28a	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
28b	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3)
28c	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2)
28d	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2)
29a	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3); objekt med naturvärde enligt Skogsstyrelsen
29b	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2)
30	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
31a	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3)
31b	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3)
32a	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
32b	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3)
50	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
51	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
52	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
53	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3); objekt med naturvärde enligt Skogsstyrelsen
54	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3); objekt med naturvärde enligt Skogsstyrelsen
55	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
56	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3) Inom driftområdet; kommer att tas bort
57	Sumpskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
58	Sumpskog	Kommunalt värde (klass 3)
59	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
60	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); nyckelbiotop enligt Skogsstyrelsen
61	Hällmarkstallskog	Lokalt värde (klass 4) Inom driftområdet; kommer att tas bort
62	Hällmarkstallskog	Lokalt värde (klass 4) Inom driftområdet; kommer att tas bort
63	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3); objekt med naturvärde enligt Skogsstyrelsen
64	Kalkbarrskog	Kommunalt värde (klass 3); objekt med naturvärde enligt Skogsstyrelsen

Tabell B2-1. Forts.

Objekt-ID (figur 4-11)	Objektsbeskrivning	Naturvärdesklass
101	Sumpskog	Kommunalt värde (klass 3)
111	Sumpskog	Kommunalt värde (klass 3); ingår i område med naturvärde enligt Länsstyrelsen
112	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2); ingår i område med naturvärde enligt Länsstyrelsen
120	Hällmarkstallskog	Regionalt värde (klass 2)
121	Örtrik barrskog	Nationellt värde (klass 1)
123	Blåbärsgranskog	Regionalt värde (klass 2)
124	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2)
129	Kalkbarrskog	Regionalt värde (klass 2)
130	Alsumpskog	Regionalt värde (klass 2)
131	Alsumpskog	Kommunalt värde (klass 3)

Förteckning över enskilda brunnar

Tabell B3-1. Enskilda jord- och bergbrunnar som identifierats inom ett avstånd på 3 km från slutförvarsanläggningen. J = jordbrunn, B = bergbrunn, l/h = liter per timme. Informationen är hämtad från /Ludvigson 2002/, SGU:s brunnarkiv (© Sveriges geologiska undersökning (SGU)), protokoll från brunnborrare och uppgifter från fastighetsägare, samt en kompletterande brunnsinventering som genomfördes i december 2009. För vissa brunnar har bedömningar gjorts av vattnets lämplighet som dricksvatten ur mikrobiologiskt/kemiskt hänseende (till exempel OT/TA) /Ludvigson 2002/; T = tjänligt, TA = tjänligt med anmärkning, OT = otjänligt. Notera att Vattenfalls och FKA:s vattenprospekteringshål inte används och därför betraktas som borrhål.

Fastighetsbeteckning	SKB ID	SGU brunnarkiv ID	Brunnstyp	Noteringar	Brunnsdjup (m u my)	Bedömd brunnskapacitet
Forsmark 3:32	PFM000026	128400043 (äldre ID 128057)	B	Borrhål, Vattenfall AB (Bh 1), används inte, inte lokaliserad	75 (varav 6 m i jord)	Cirka 300 l/h
Forsmark 3:32	PFM000027	128400044 (äldre ID 128058)	B	Borrhål, Vattenfall AB (Bh 2), används inte, inte lokaliserad	~ 21–22 (varav 5 m i jord)	6 000 l/h (SGU:s brunnarkiv), 2 200–3 600 l/h /Ludvigson 2002/
Berkinge 9:1	PFM000028	128400045 (äldre ID 128059)	B	Borrhål, Vattenfall AB (Bh 3), används inte, inte lokaliserad	~ 80–81 (varav 4 m i jord)	100 l/h
Forsmark 3:32	PFM000029	128400046 (äldre ID 128060)	B	Borrhål, Vattenfall AB (Bh 4), används inte, inte lokaliserad	33 (varav 4 m i jord)	5 000 l/h (SGU:s brunnarkiv), 5 400–6 800 l/h /Ludvigson 2002/
Berkinge 9:1	PFM000030	128400047 (äldre ID 128061)	B	Borrhål, Vattenfall AB (Bh 5), används inte, inte lokaliserad	24 (varav 6 m i jord)	2 200–3 200 l/h /Ludvigson 2002/
Berkinge 9:1	PFM000032	Saknas	B	Borrhål, Vattenfall AB (Bh 7), används inte	Uppgift saknas	Torrt
Forsmark 3:32	PFM000033	Saknas	B	Borrhål, Vattenfall AB (Bh 8), används inte	17 (varav 1 m i jord)	2 200–3 600 l/h /Ludvigson 2002/
Elvisjö 3:3	PFM000001	Saknas	B	T/TA, god vattentillgång, dock järnhaltigt, försörjer även fastigheterna Forsmark 3:23, Forsmark 3:24 och Forsmark 3:50 (fastigheten Elvisjö 3:3 försörjs även med vatten från ett av SKB:s hammarborrhål)	45 (uppgift om jorddjup saknas)	Uppgift saknas
Forsmark 3:13	Saknas	902056852	B	Energibrunn vid församlingshuset i Forsmarks by	120 (varav 2 m i jord)	400 l/h (SGU:s brunnarkiv)
Forsmark 3:19	PFM000002	Saknas	B	T/TA, god vattentillgång, dock järnhaltigt	45 (uppgift om jorddjup saknas)	Uppgift saknas
Forsmark 3:20	PFM000003	Saknas	J	T/TA, järnhaltigt vatten, kompletterad (ersatt) av bergborrad brunn på samma fastighet)	4,9	Uppgift saknas
Forsmark 3:20	Saknas	Saknas	B	Borrades 2008 som komplettering (ersättning) för brunnen PFM000003	30	4 000 l/h (uppgift från fastighetsägaren)
Forsmark 3:26	PFM000004	Saknas	J	OT/TA, gemensam brunn med fastigheten Forsmark 3:27, används för bevattning, matlagning och tvätt	3,6	Uppgift saknas
Forsmark 3:28	PFM000005	Saknas	J	TA/TA, brunnen används inte längre, ersatt av ny brunn på samma fastighet	3,2	Uppgift saknas
Forsmark 3:28	Saknas	Saknas	Uppgift saknas	Borrades 2002 som ersättning för brunnen PFM000005	Uppgift saknas	Uppgift saknas

Tabell B3-1. Forts.

Fastighets-beteckning	SKB ID	SGU brunn-sarkiv ID	Brunnstyp	Noteringar	Brunnsdjup (m u my)	Bedömd brunnskapacitet
Forsmark 3:29	PFM000006	Saknas	J	OT/TA, brunnen används för närvarande inte	2,5	Uppgift saknas
Forsmark 3:32	PFM000007	Saknas	J	OT/TA, vattnet bräckt och odrickbart, brunnen används inte längre	3,7	Uppgift saknas
Forsmark 3:33	PFM000008	Saknas	J	TA/TA	1,5	Uppgift saknas
Forsmark 3:34	PFM000009	128400291 (äldre ID 128305)	B	T/TA, järnhaltigt och salt vatten, brunnen används för bevattning, matlagning och tvätt	70 (varav 8 m i jord)	135 l/h (SGU:s brunn-sarkiv)
Forsmark 3:38	PFM000010	Saknas	B	OT/TA, järnhaltigt och salt vatten, lukt av metan, odrickbart, brunnen används inte längre (ersatt av brunnen PFM006382)	6 (uppgift om jorddjup saknas)	
Forsmark 3:38	Saknas	128400239 (äldre ID 128253)	B	Brunnen nedlagd	~ 60–62 (varav 3 m i jord)	2 800 l/h (SGU:s brunn-sarkiv)
Forsmark 3:42	Saknas	128400240 (äldre ID 128254)	B		7 (varav 3 m i jord)	8 000 l/h (SGU:s brunn-sarkiv)
Forsmark 3:51	PFM000038	128400355 (äldre ID 128369)	B	F.d. militär brunn, borttagen	46 (varav 5,5 m i jord)	1 200 l/h (SGU:s brunn-sarkiv)
Forsmark 3:51	PFM006382	Saknas	B	Försörjer fastigheten Forsmark 3:38	16 (varav 3,8 m i jord)	3 000 l/h (protokoll från brunnborrare)
Forsmark 6:5	PFM000031	128400048 (äldre ID 128062)	B	Borrhål, Vattenfall AB (Bh 6), används inte	21 (varav 6 m i jord)	18 000–22 000 l/h /Ludvigson 2002/
Forsmark 6:5	PFM000034	Saknas	B	Vattenprosp. FKA (BH1), används inte	8,7 (varav 1,5 m i jord)	Uppgift saknas
Forsmark 6:5	PFM000035	Saknas	B	Borrhål, FKA (BH1A), används inte	45 (varav 1,5 m i jord)	Provpumpad med 2 520 l/h /Ludvigson 2002/
Forsmark 6:5	PFM000036	Saknas	B	Vattenprosp. FKA (BH2), används inte	31 (varav 5 m i jord)	Provpumpad med 2 550 l/h /Ludvigson 2002/
Forsmark 6:5	PFM000037	Saknas	B	Borrhål, FKA (BH3), används inte	53 (varav 1,5 m i jord)	Uppgift saknas
Forsmark 6:5	PFM000155	Saknas	Uppgift saknas	Brunnen används inte och har inte kunnat lokaliseras	Uppgift saknas	Uppgift saknas
Forsmark 6:5	Saknas	901031492	B	Inte lokaliserad	61 (varav 1,5 m i jord)	7 200 l/h (SGU:s brunn-sarkiv)
Ön 1:1	Saknas	Saknas	Uppgift saknas	Lokaliserad i samband med brunninventeringen i dec. 2009	2,60	Uppgift saknas

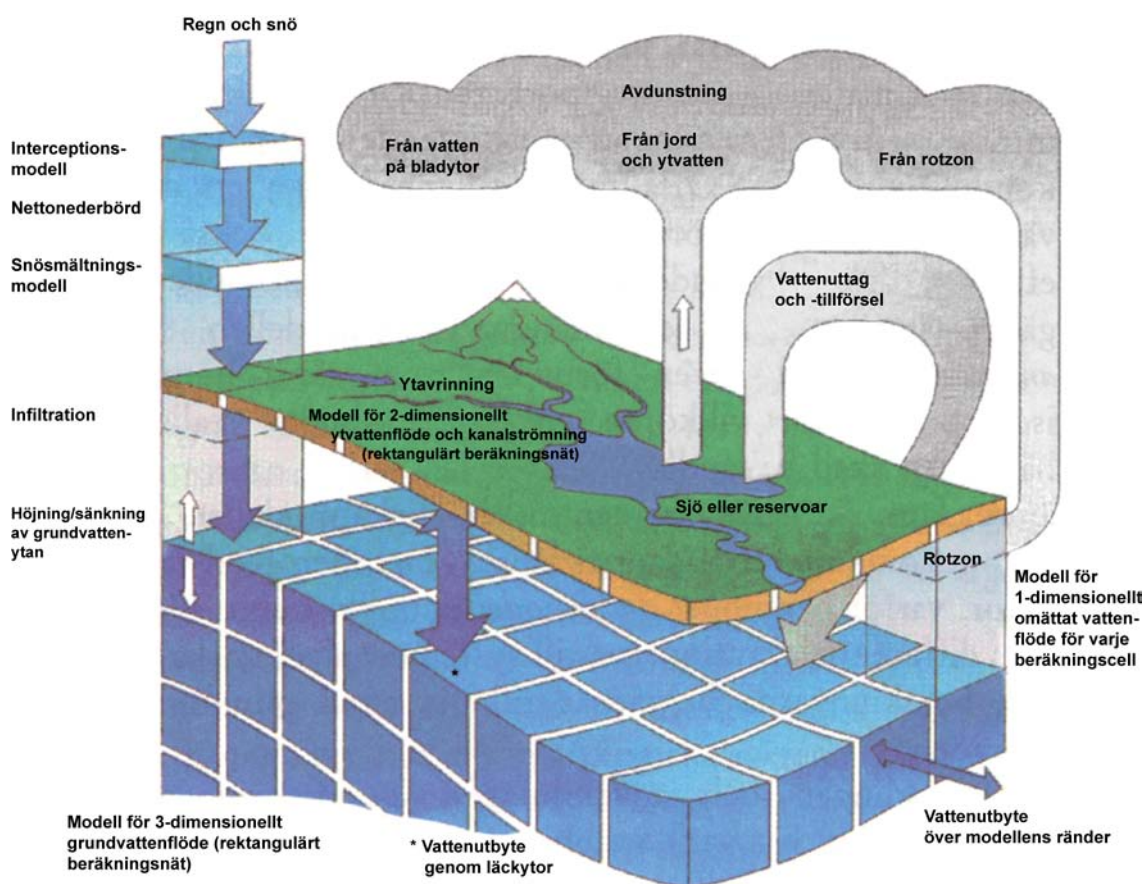
Tabell B3-2. Enskilda jord- och bergbrunnar inom eller vid gränsen för det MIKE SHE-beräknade påverkansområdet /Mårtensson och Gustafsson 2010/ för sänkningen av grundvattnets tryckhöjder på nivån –50 m ö h. Det finns inga enskilda brunnar inom det modellberäknade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. J = jordbrunn, B = bergbrunn. För ytterligare information om brunnarna, se tabell B3-1.

Fastighets-beteckning	SKB ID	SGU brunn-sarkiv ID	Brunnstyp	Påverkansområde för sänkning av tryckhöjder i berg, –50 m ö h
Forsmark 3:33	PFM000008	Saknas	J	Vid påverkansområdets gräns
Forsmark 3:34	PFM000009	128400291 (äldre ID 128305)	B	Vid påverkansområdets gräns
Forsmark 3:51	PFM006382	Saknas	B	Inom påverkansområdet
Forsmark 6:5	Saknas	901031492	B	Inom påverkansområdet
Ön 1:1	Saknas	Saknas	Uppgift saknas	Inom påverkansområdet

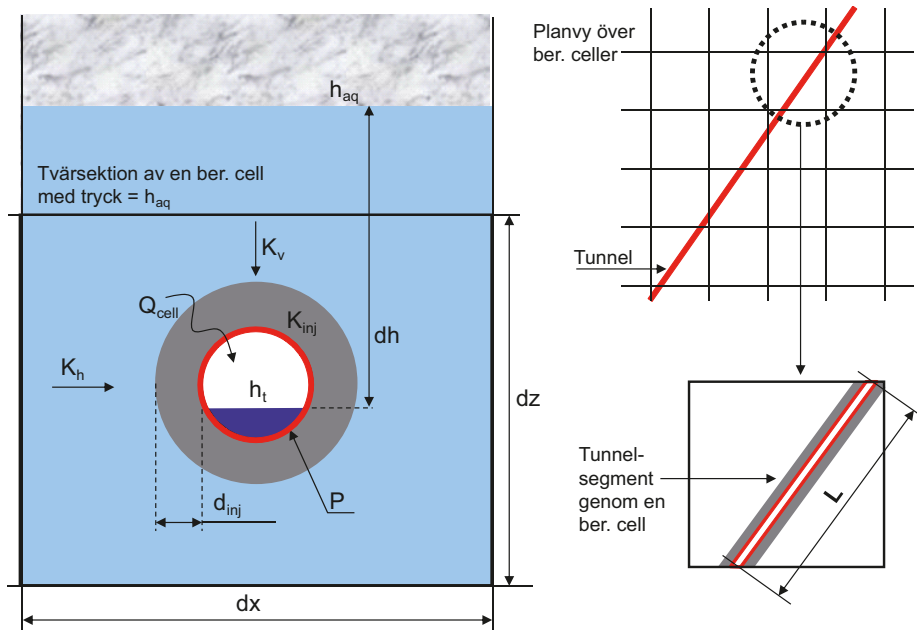
Beskrivning av MIKE SHE

I den aktuella tillämpningen är modelleringsverktyget MIKE SHE en kombination av två modelleringsverktyg, MIKE SHE och MOUSE. MIKE SHE (se figur B4-1) beskriver de huvudsakliga vattenflödena inom den hydrologiska cykeln på land, det vill säga nederbörd (regn eller snö), infiltration genom markytan, interception (vatten som ”fastnar” på träd och andra växter), evapotranspiration (avdunstning och växternas vattenkonsumtion), samt vattenflöden i den omättade zonen, den mättade (grundvatten) zonen och på markytan. I modelleringen har MIKE SHE i sin tur sammankopplats med en kanalflödesmodell, MIKE 11. MIKE 11-modellen beskriver nivåer och flöden i bäckar och interaktionen mellan ytvatten och de vattenflöden som hanteras av MIKE SHE, inklusive vatten på och under markytan. MIKE SHE kan alltså beskriva både ytprocesser (exempelvis vattenutbyte mellan mark och atmosfär), grundvattenflöde, hydrologiska objekt (såsom sjöar och bäckar) samt interaktionen mellan dessa.

Rampen, tunnlar och övriga utrymmen under mark beskrivs med hjälp av modelleringsverktyget MOUSE. MOUSE är ett modelleringsverktyg för ”urban hydrologi”, som ursprungligen är framtaget för att beräkna rörströmning. MOUSE-verktyget har vidareutvecklats för att kunna representera förvaret och koppla ihop MOUSE med MIKE SHE, se figur B4-2. På så sätt kan den kopplande modellen (MIKE SHE och MOUSE) beskriva både förvaret och dess interaktion med omgivande jord och berg. Ramp, berggrum och tunnlar representeras i MOUSE av ett stort antal rörsektioner, som i likhet med schakten förutsätts vara tomma på vatten. Liksom i modelleringsverktyget DarcyTools (bilaga 5) har en villkorsstyrd rutin implementerats i MIKE SHE. Villkoret innebär att en injekterad zon endast ansätts i modellen i de delar där den injekterade zonen vattengenomsläpplighet är lägre än vattengenomsläppligheten i omgivande jord eller berg.



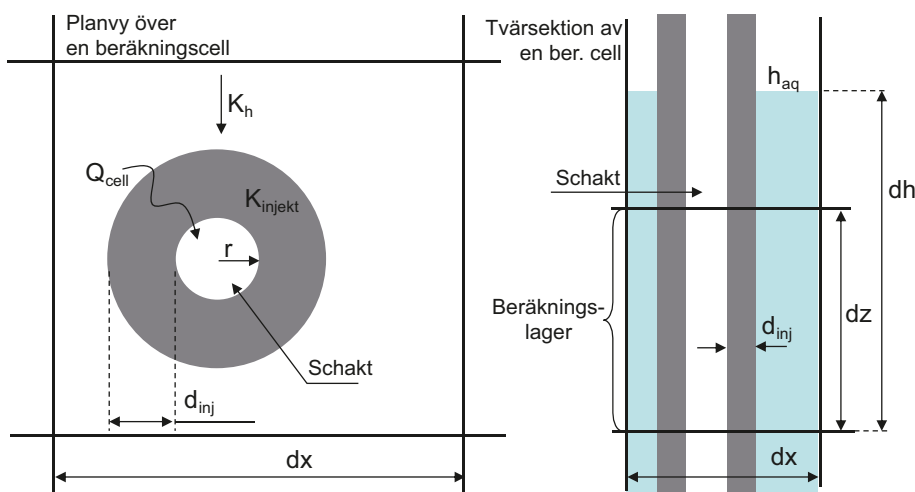
Figur B4-1. Illustration av de vattenflödesprocesser som kan beskrivas med modelleringsverktyget MIKE SHE /Gustafsson et al. 2009/.



Figur B4-2. Illustration av kopplingen mellan MIKE SHE och MOUSE /Mårtensson och Gustafsson 2010/.

I MIKE SHE beskrivs slutförvarsanläggningens vertikala schakt (figur B4-3) genom att ansätta atmosfärstryck i de MIKE SHE-celler som representerar schakten. Atmosfärstryck innebär att schakten i modellen förutsätts vara tomma på vatten. Den injekterade zonen kring schakten representeras i form av en konduktans i varje beräkningslager i MIKE SHE. Denna konduktans beror i sin tur på så kallade läckagefaktorer, som styrs av vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen, tjockleken på denna zon, samt vattengenomsläppligheten i närmast omgivande jord eller berg. För ytterligare detaljer, se /Gustafsson et al. 2009, Mårtensson och Gustafsson 2010/.

MIKE SHE-modellen för Forsmarksområdet /Mårtensson och Gustafsson 2010/ baseras på de konceptuella beskrivningar och den MIKE SHE-modell för Forsmark som presenteras i /Bosson et al. 2008, Follin 2008, Johansson 2008/. Den aktuella MIKE SHE-modellen inkluderar hela förvaret och även berget under detta ner till nivån $-1\ 200\ \text{m}\ \text{ö}\ \text{h}$. Detta kan jämföras med $-600\ \text{m}\ \text{ö}\ \text{h}$ i den MIKE SHE-modell som utarbetades inom ramen för platsbeskrivningen /Bosson et al. 2008/. Jämfört med modellen i platsbeskrivningen, har den aktuella MIKE SHE-modellen även en högre rumslig upplösning i vertikalled inom de delar av modellvolymen som beskriver berget.



Figur B4-3. Beskrivning av vertikala schakt i MOUSE SHE /Mårtensson och Gustafsson 2010/.

/Gustafsson et al. 2009, Svensson och Follin 2010/ jämförde MIKE SHE- respektive DarcyTools-beräknade inläckage med kända analytiska lösningar för idealiserade fall, med och utan en injekterad zon. Dessa jämförelser gjordes för att kontrollera att respektive modells tunnelrutin beräknar inläckaget korrekt. Testerna med DarcyTools-modellen (bilaga 5) visar generellt på god överensstämmelse med de analytiska lösningarna, med avvikelser på högst någon eller några procent /Svensson och Follin 2010/. För MIKE SHE-modellen var avvikelsen större (modellen underskattar inläckaget jämfört med de analytiska lösningarna), vilket motiverar den utveckling som gjorts av rutinen för kopplingen mellan MIKE SHE och MOUSE /Mårtensson och Gustafsson 2010/.

Den MIKE SHE-modellering som presenteras i /Mårtensson och Gustafsson 2010/ föregicks av de modellstudier som rapporteras i /Gustafsson et al. 2009, Mårtensson et al. 2010/. De senare modellstudierna var genomförda vid tiden för den preliminära versionen av föreliggande rapport och samråd om vattenverksamhet i Forsmark. /Mårtensson och Gustafsson 2010/ genomförde vissa uppdateringar jämfört med /Gustafsson et al. 2009/. Bland annat utökades MIKE SHE-modellens modellområde och djup, och modellen för bergets hydrogeologiska egenskaper ersattes med den modell som används inom SKB:s studier kring långsiktig säkerhet (SR-Site). Därutöver genomfördes viss vidareutveckling av kopplingen mellan MIKE SHE och ”tunnelrutinen” MOUSE, och anläggningen SFR implementerades i MOUSE. Det gjordes även vissa justeringar i modellen, till exempel av diametrarna för ett par av slutförvarsanläggningens schakt.

Generellt visar de förändringar som gjordes av /Mårtensson och Gustafsson 2010/ endast på små skillnader jämfört med motsvarande resultat i /Gustafsson et al. 2009, Mårtensson et al. 2010/. De MIKE SHE-resultat som används i denna rapport är huvudsakligen hämtade från /Mårtensson och Gustafsson 2010/. När så anges har redovisningen kompletterats med resultat från /Gustafsson et al. 2009, Mårtensson et al. 2010/.

MIKE SHE-modellens modellområde (se figur 5-1) omfattar en yta på ungefär 56 km², varav 31 km² utgörs av landområden och resten hav. Modellen har en rumslig upplösning i horisontalplanet på 40 gånger 40 m. Randvillkoren, som styr interaktionen mellan modellvolymen och dess omgivningar, innebär att det inte kan ske något in- eller utflöde genom modellens botten eller genom modellens ytterkanter på land. Som visas i figur 5-1 omfattar modellområdet även en bit av havet. I denna del ansätts i modellen en tidsvarierande grundvattennivå i jord. Dessa tidsvariationer motsvarar uppmätta havsnivåvariationer /Johansson 2008/.

Huvuddelen av de MIKE SHE-beräkningar som beskrivs i denna rapport baseras på lokalt uppmätta meteorologiska data och havsnivådata från åren 2005–2006 /Johansson 2008/. Året 2005 har då använts som en ”inkörningsperiod”, medan de redovisade beräkningsresultaten avser det efterföljande året 2006. Om inget annat nämns i rapporten används således 2006 som ett typår i MIKE SHE-beräkningarna. År 2006 var ett relativt normalt (men något torrt) år i Forsmark ur meteorologisk synpunkt, med en ackumulerad nederbörd på 539 mm /Gustafsson et al. 2009/. Detta kan jämföras med ett bedömt långtidsmedelvärde på 559 mm för referensnormalperioden 1961–1990 /Johansson 2008/.

Figur 5-1 i rapporten visar den utformning av slutförvarsanläggningen som använts i MOUSE SHE-modellen (Forsmark Layout D2, version 1.0, april 2008). MIKE SHE-beräkningarna utgår från en förvarsutformning med ett ”maximalt utnyttjande av platsen”, vilket inkluderar en reserv på hela 27 % för potentiellt bortfall av kapselpositioner. Detta innebär konkret att den förvarsutformning som använts i MIKE SHE innehåller fler deponeringstunnlar i slutförvarsanläggningens nordvästra och södra del, jämfört med den utformning som visas i figur 2-3 i avsnitt 2-1. Utformningen i figur 2-3 inkluderar en reserv på 13 % för potentiellt bortfall av kapselpositioner.

Beskrivning av DarcyTools

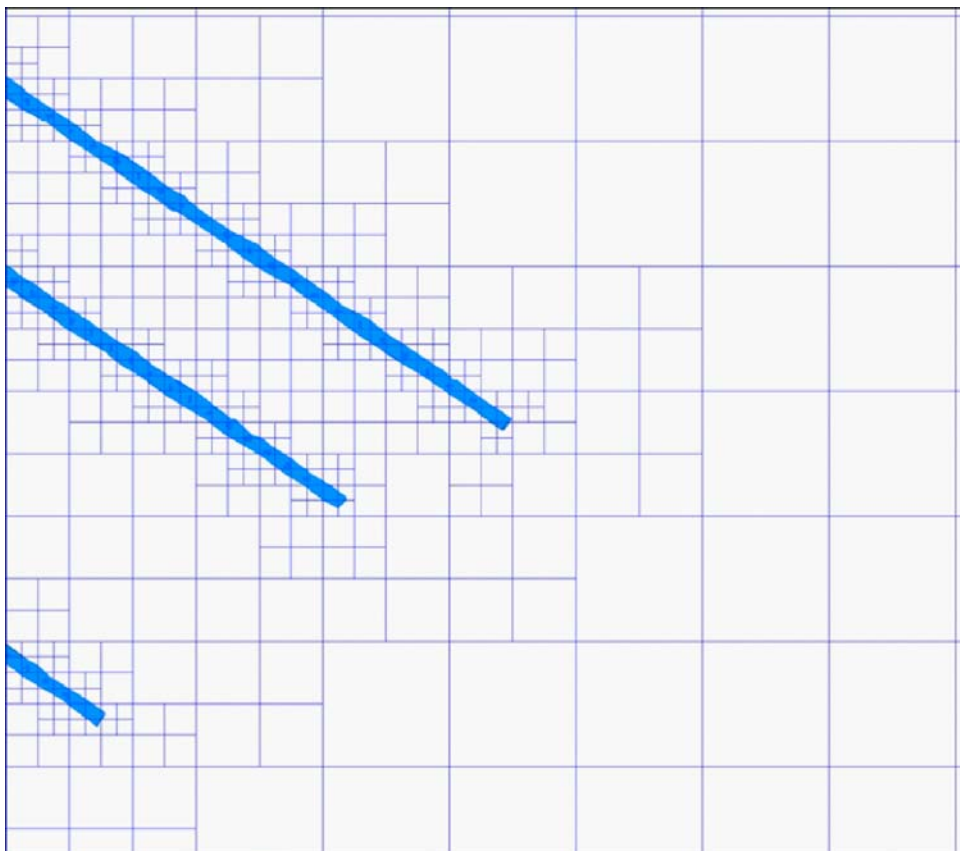
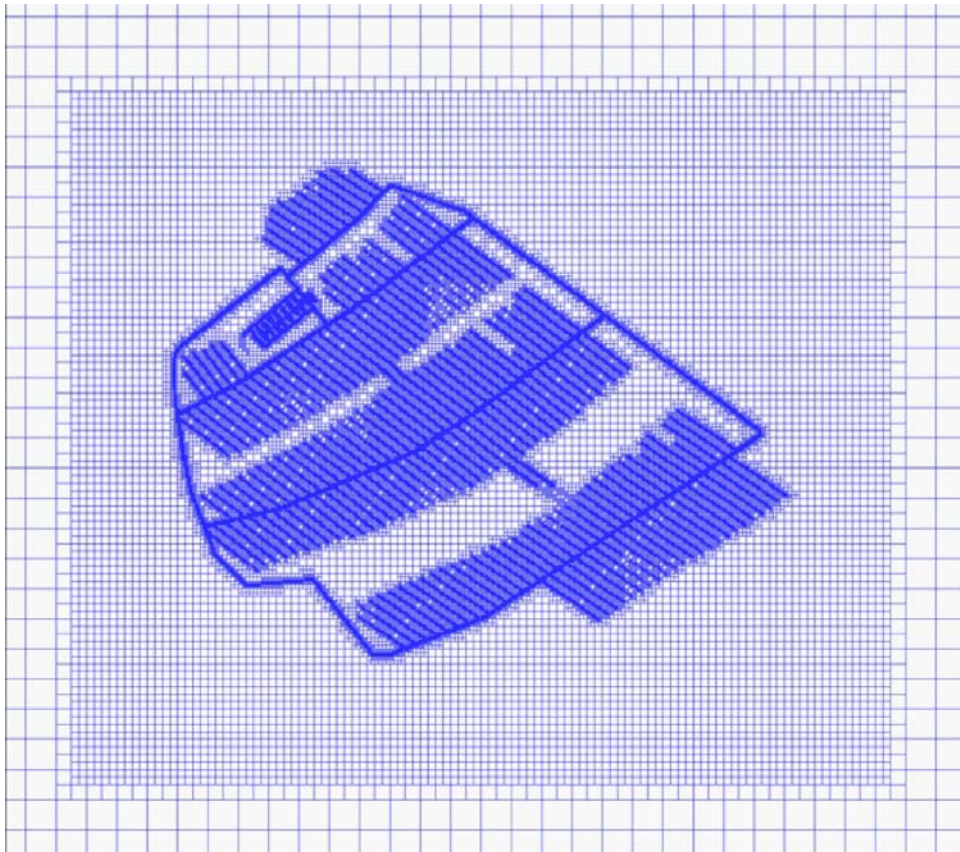
DarcyTools /Svensson 2004, Svensson och Ferry 2004, Svensson et al. 2004, Svensson och Follin 2010/ är ett modelleringsverktyg som är utvecklat för att analysera grundvattenflöde och ämnestransport i porösa media och sprickigt berg. Verktöget har i flera studier tillämpats för att studera olika frågor i samband med geologisk förvaring av använt kärnbränsle. DarcyTools består av ett antal programmoduler för hantering av indata, ansättande av hydrogeologiska egenskaper baserat på sprickdata, flödes- och transportberäkningar samt resultatpresentation. DarcyTools kan ha ett ostrukturerat beräkningsnät, det vill säga att modellens rumsliga upplösning kan varieras på valfritt sätt inom olika delar av modellvolymen.

Figur B5-1 visar en del av det beräkningsnät som använts vid modelleringen avseende grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen i Forsmark. Beräkningsnätets horisontella upplösning är 4 m kring förvarets undermarksdel och 128 m inom övriga delar av modellområdet. Enligt figuren innebär ett ostrukturerat beräkningsnät att DarcyTools-modellen kan hantera beräkningsceller med hög rumslig upplösning som är nästlade med celler med lägre upplösning. I DarcyTools finns vidare en modul (FRAME) som kan representera processer som sker på rumsliga skalor som är mindre än modellens beräkningsceller, exempelvis saltdiffusion mellan zoner med rörligt och icke-rörligt grundvatten.

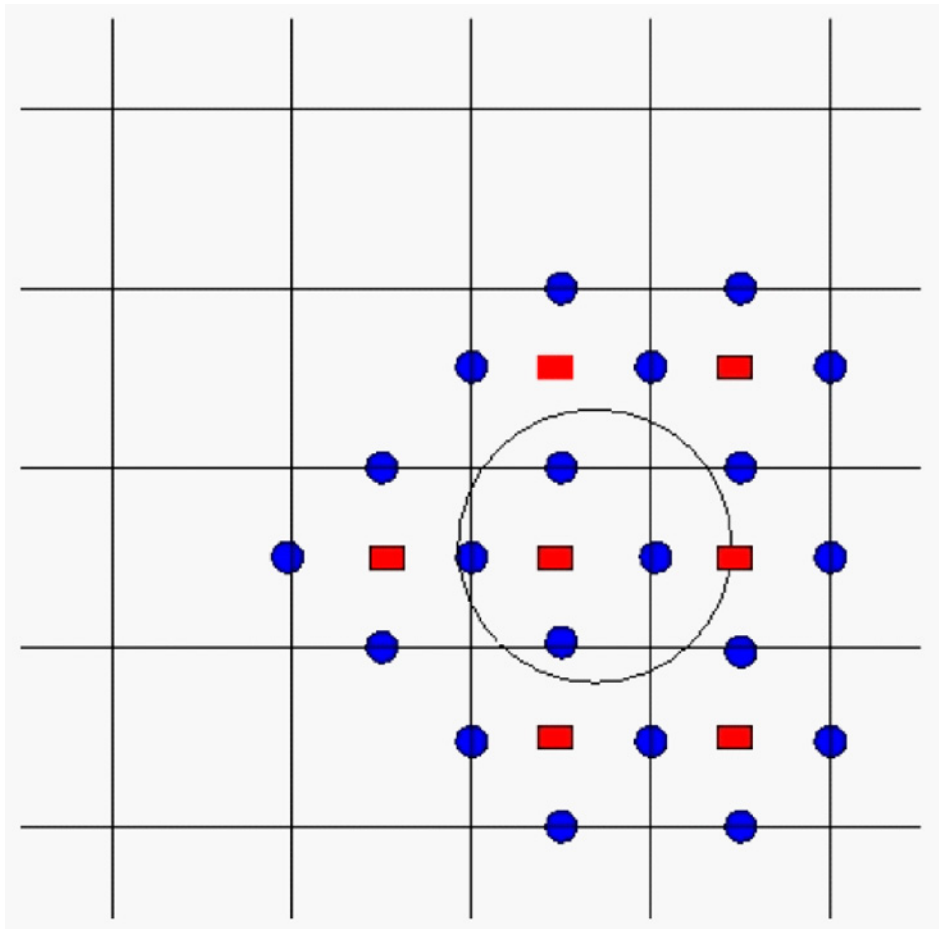
I modellen används data på geometri och hydrogeologiska egenskaper för ett nätverk av sprickor i berget som underlag för att ansätta hydrogeologiska egenskaper i modellens beräkningsceller. Vid ansättande av egenskaper vid korsningarna mellan olika sprickor görs ett grundläggande antagande. Detta antagande innebär att varje enskild sprickas bidrag till egenskaperna i en viss beräkningscell viktas proportionellt mot sprickans bidrag till sprickkorsningens totala volym. Bidragen från alla de sprickor som korsar beräkningscellen adderas och summan delas därefter med beräkningscellens volym. Vad gäller modelleringen med DarcyTools av ett öppet förvar i Forsmark inom SR-Site /Svensson och Follin 2010/ har en förenklad beskrivning av de hydrogeologiska egenskaperna i de översta 20 m av modelldomänen tillämpats. Inom detta djupintervall används i DarcyTools-modellen en djupberoende horisontell hydraulisk konduktivitet (K_h) som från markytan och neråt avtar från $5 \cdot 10^{-3}$ till $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Inom de övre 20 m av modelldomänen antas vidare en konstant vertikal hydraulisk konduktivitet på $K_v = 10^{-6}$ m/s.

Olika beräkningsrutiner har implementerats i DarcyTools för att hantera viktiga processer i samband med bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen. Ett exempel är en rutin för att hantera grundvattenytans nivå. Denna rutin reducerar den horisontella hydrauliska konduktiviteten ovanför grundvattenytan (där trycket är lika med atmosfärstrycket) i syfte att förhindra horisontella grundvattenflöden ovanför grundvattenytan. Vidare har en tunnelrutin implementerats för att beräkna inläckaget av grundvatten till förvaret. Principerna bakom rutinen visas i figur B5-2. Rutinen ansätter atmosfärstryck i de beräkningsceller som är i kontakt med förvarets undermarksdel. Den injekterade zonen representeras genom att ansätta en villkorsstyrd vattengenomsläpplighet i "väggarna" på dessa beräkningsceller. På motsvarande sätt som i MIKE SHE (se bilaga 4) innebär villkoret att en injekterad zon endast ansätts där den injekterade zonen vattengenomsläpplighet är lägre än vattengenomsläppligheten i omgivande jord eller berg.

För att kvantifiera vattenmättnad av återfyllnad och buffert efter det att grundvattenbortledningen upphört, antas i DarcyTools att mättnadsprocessen kan beskrivas som ett grundvattenflöde. Vattenmättnadsprocessen antas huvudsakligen vara styrd av tryckgradienter och hydraulisk konduktivitet, hur stor andel av återfyllnad och buffert som vid en viss tidpunkt är vattenmättad samt mättnadsfrontens läge. Den nuvarande versionen av DarcyTools (V3.4) kan i likhet med MIKE SHE hantera transienta (tidsvarierande) randvillkor, men DarcyTools kan däremot inte hantera ytavrinning. DarcyTools kan dock ta hänsyn till densitets- och temperatureffekter, det vill säga att grundvattnet har olika densitet och temperatur i olika delar av modellvolymen. Detta innebär att DarcyTools kan användas för att simulera till exempel saltvattenuppträngning och permafrost, vilket alltså inte är möjligt med MIKE SHE (bilaga 4).



Figur B5-1. Illustration av DarcyTools-modellens ostrukturerade beräkningsnät kring slutförvarsanläggningen i Forsmark. Den övre bilden visar ett horisontellt 2D-snitt över hela förvaret på nivån -465 m ö h. Den nedre bilden visar en detaljbild vid den östra delen av förvaret /Svensson och Follin 2010/.



Figur B5-2. Illustration av principerna för tunnelrutinen i DarcyTools. Den tunna linjen representerar tvärsnittsperimetern för en länshålld tunnel. De röda rektanglarna och de blåa cirkelarna representerar centrumpunkterna respektive "väggarna" för de beräkningsceller som är i kontakt med tunneln. Inläckaget av grundvatten till tunneln kvantifieras genom att ansätta atmosfärstryck i de röda rektanglarna och den injekterade zonens vattengenomsläpplighet i cellväggarna /Svensson och Follin 2010/.

Konceptuell och numerisk modellering av grundvattenbortledningens effekter i Forsmark – diskussion kring osäkerheter och tilltro

B6.1 Allmänt

Denna bilaga innehåller en diskussion kring de konceptuella och numeriska modeller som ligger till grund för bedömningarna av grundvattenbortledningens effekter i Forsmark. Specifikt behandlar bilagan osäkerheter i modellerna och tilltron till de prognoser som presenteras i rapporten. Diskussionen är uppdelad på tre olika typer av osäkerheter som brukar vara aktuella i dessa sammanhang; konceptuell osäkerhet, parameterosäkerhet och modellosäkerhet /Anderson och Woessner 1992/. Osäkerheterna diskuteras i den angivna ordningen, eftersom den återspeglar arbetsordningen för uppbyggnaden av prognosmodellerna och osäkerheternas relativa betydelse för prognosresultaten.

I rapporten beskrivs generella respektive platsspecifika konceptuella modeller av grundvattenbortledningens effekter i avsnitten 3.2 respektive 4.2, och den stödjande och illustrerande numeriska modelleringen beskrivs i avsnitten 5.2–5.3. I dessa avsnitt identifieras fyra faktorer som bedöms vara särskilt viktiga för omfattningen och karaktären på grundvattenbortledningens effekter i Forsmark, med beröring på de konceptuella och/eller numeriska modellerna. Diskussionen i de följande avsnitten kretsar därför kring dessa specifika faktorer, utifrån de olika perspektiven konceptuell osäkerhet, parameterosäkerhet och modellosäkerhet:

- Den ytliga bergakviferen, med ett nätverk bestående av flacka sprickzoner (bankningsplan) med hög hydraulisk konduktivitet (1), samt brantstående sprickzoner med hög hydraulisk konduktivitet (2).
- Den hydrauliska kontakten mellan ytnära berg och ovanförliggande jordlager (3), främst i anslutning till sprickzoner med hög vertikal hydraulisk konduktivitet.
- Den hydrauliska kontakten mellan grundvatten och ytvatten (4), inklusive förekomst av och hydrogeologiska egenskaper för botten sediment i hav, sjöar och våtmarker.

Andra faktorer som är viktiga i sammanhanget är de meteorologiska förhållandena och deras framtida utveckling, samt vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen kring slutförvarsanläggningens undermarksdel. Dessa faktorer inverkan på grundvattenbortledningens effekter har studerats ingående i samband med den numeriska modelleringen (se kapitel 5). Eftersom dessa aspekter kan ses som en form av parameterosäkerhet, inkluderar avsnitt B6.3 i denna bilaga även en kort diskussion kring meteorologi och injektering.

B6.2 Osäkerheter och tilltro rörande den konceptuella beskrivningen

B6.2.1 Den ytliga bergakviferen

Enligt den konceptuella beskrivningen av grundvattenbortledningens effekter på grundvattennivåer i berg och jord i Forsmark, medför den höga horisontella hydrauliska konduktiviteten (vattengenomsläppligheten) i bankningsplanen att dessa sprider ut trycksänkningen i den ytliga bergakviferen inom relativt stora områden kring förvaret. Denna trycksänkning kommuniceras vertikalt via sprickzoner med hög vertikal hydraulisk konduktivitet, vilket ger en avsänkning av grundvattenytan främst inom de områden där sådana zoner har kontakt med jordlagren.

Baserat på platsundersökningen i Forsmark bedöms tilltron vara hög vad gäller den övergripande konceptuella modellen för högtransmissiva (stora värden på hydraulisk konduktivitet gånger bredd) bankningsplan i de övre delarna av berget /Follin 2008, SKB 2008d/. Vidare är det hög tilltro vad gäller lägena för de hydrauliska strukturer i berget som i MIKE SHE-modelleringen ger upphov till en ”stråkformad” avsänkning av grundvattenytan. Denna höga tilltro baseras på det omfattande dataunderlaget, överensstämmelsen vad gäller tolkningar och konceptuella modeller mellan olika discipliner (till exempel geologi och hydrogeologi) och att inga betydande justeringar av den konceptuella modellen har setts som nödvändiga i takt med att data successivt tillkommit under platsundersökningen. Enligt /SKB 2008d/ finns det viss osäkerhet rörande de hydrogeologiska

egenskaperna i den allra översta delen av berget. Denna osäkerhet har bland annat hanterats genom omfattande modellkalibrering (se avsnitt B6.3 i denna bilaga).

Det generellt bästa verktyget för att prognostisera effekter på grundvattennivåer i berg och jord vid grundvattenbortledning från en planerad undermarksanläggning är observerade effekter från kända störningar av det hydrogeologiska systemet. Främst gäller detta så kallade interferenstester som genomförs i så motsvarande skala som möjligt som den blivande undermarksanläggningen /Gustafson 2009/. Inom ramen för platsundersökningen i Forsmark har effekter på grundvattennivåer (grundvattnets tryckhöjder) i den ytliga bergakviferen undersökts genom storskaliga interferenstester, där grundvatten under en längre tid pumpats från hammarborrhål i berg. Specifikt genomfördes pumpning från hammarborrhålet HFM14 i två omgångar; under tre veckor 2006 respektive tre månader 2007 /Gokall-Norman och Ludvigson 2007, 2008a/. Uttaget från hammarborrhålet uppgick till 350 l/min (cirka 6 l/s), vilket gav en mätbar respons på grundvattnets tryckhöjder i berg upp till ungefär 2 km från hammarborrhålet HFM14 (se figur 4-3 i avsnitt 4.2.1). Vid en motsvarande undersökning med pumpning från hammarborrhålet HFM33 (beläget under havet vid SFR) erhöles mätbar respons i berget inom landområden upp till drygt 2 km från HFM33 /Gokall-Norman och Ludvigson 2008b/. Sammanfattningsvis ger de genomförda interferenstesterna stöd för en konceptuell modell som innebär att den höga horisontella hydrauliska konduktiviteten i bankningsplanen sprider ut trycksänkningen i den ytliga bergakviferen inom relativt stora områden.

Även om detta inte var ett huvudsyfte med undersökningarna, gjordes vissa observationer som kan användas som stöd vad gäller lägen och hydrogeologiska egenskaper för strukturer med hög vertikal vattengenomsläpplighet. I samband med interferenstesterna noterades en viss hydraulisk respons i grundvattenrör installerade i jord (morän) inom 500–1 000 m från det pumpade hammarborrhålet HFM14 /Gokall-Norman och Ludvigson 2007/. Samtliga grundvattenrör där en sådan respons kunde noteras är belägna i områden med zoner med hög vertikal vattengenomsläpplighet.

B6.2.2 Den hydrogeologiska kontakten mellan jord och berg

Den hydrogeologiska kontakten mellan jord och berg är en viktig faktor för omfattningen på avsänkningen av grundvattenytan vid en sänkning av grundvattnets tryckhöjder i den övre delen av berget. Även i områden med jordlager med hög vattengenomsläpplighet (sand, grus eller sandig-grusig morän) kan tunna lager med till exempel lera, silt eller packad bottenmorän innebära att avsänkningen blir begränsad eller uteblir, trots betydande sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg /Cesano et al. 2000, Olofsson 1994/. Vad gäller Forsmark har detaljerade modeller tagits fram för jordarternas fördelning, jordlagrens stratigrafi (jordlagerföljd) och hydrogeologiska egenskaper, baserat på omfattande fältundersökningar.

Tilltron bedöms vara hög vad gäller kunskapen om jordarternas fördelning, jordlagrens stratigrafi och moränens hydrogeologiska egenskaper i Forsmark /SKB 2008d/. Moränen i Forsmark domineras av sandig-grusig morän med relativt hög vattengenomsläpplighet. Den konceptuella modellen inkluderar vidare ett lager med hög vattengenomsläpplighet i övergången mellan jord och berg. Den konceptuella modellen innebär således en generell hög hydrogeologisk kontakt mellan jord och berg i Forsmark. Den konceptuella modellen inkluderar förekomst av kompakt, lerig bottenmorän med lägre vattengenomsläpplighet i vissa begränsade områden. Kunskapen om de hydrogeologiska egenskaperna för denna typ av morän och i vilka områden den förekommer är väl underbyggd från platsundersökningen.

Det kan alltså konstateras att den konceptuella modellen generellt innebär att den hydrogeologiska kontakten mellan jord och berg i Forsmark inte förhindrar en avsänkning av grundvattenytan vid en sänkning av grundvattnets tryckhöjd i berg. Lokala förhållanden kan innebära att den hydrogeologiska kontakten är mer begränsad än vad som antagits, exempelvis förekomst av kompakt, lerig bottenmorän i områden där moränen antagits vara sandig-grusig. Detta innebär att avsänkningen av grundvattenytan lokalt kan bli mindre än vad som prognostiserats.

B6.2.3 Bottensediment i hav, sjöar och våtmarker

På motsvarande sätt som diskuteras i avsnitt B6.2.2 i denna bilaga innebär täta bottensediment under hav, sjöar och våtmarker en begränsning av den hydrogeologiska kontakten, i detta fall mellan grundvatten

i moränen och ytvatten. Täta bottensediment under en hel sjö eller våtmark innebär en begränsad eller utebliven sänkning av ytvattennivån, trots en sänkning av grundvattnets tryckhöjd i moränen.

Det finns generellt god kunskap rörande förekomst av bottensediment i hav, sjöar och våtmarker i Forsmark /Hedenström och Sohlenius 2008/. Enligt den konceptuella modellen förekommer täta bottensediment under vissa områden i havet, under vissa delar av sjöarna och under vissa våtmarker. Vad gäller undersökningar i fält baseras kunskapen på undersökningar av vissa sjöar och våtmarker i enskilda punkter, vilket innebär att det inte finns detaljerad och heltäckande kunskap om samtliga sjöar och våtmarker i området. För att skaffa mer detaljerad kunskap har riktade undersökningar gjorts av ett antal våtmarker med höga naturvärden /Sohlenius och Hedenström 2009/.

Den konceptuella modellen innebär således en hydrogeologisk kontakt mellan ytvattnet och underliggande morän i Forsmark som varierar lokalt. Vissa riktade hydrogeologiska undersökningar har gjorts avseende bottensedimentens kontinuitet och egenskaper i sjöar och våtmarker /Johansson 2008/. Dessa undersökningar ger stöd för den geologiska tolkningen, exempelvis att täta sediment förekommer under delar av Bolundsfjärden men inte under hela sjön.

Den konceptuella modellen innebär således att förekomst av bottensediment endast i vissa områden ger en begränsning av den hydrogeologiska kontakten mellan ytvatten och underliggande morän. Lokala förhållanden kan innebära att den hydrogeologiska kontakten är större eller mindre än vad som antagits, exempelvis förekomst av täta bottensediment i områden där sådan inte antas förekomma. Givet att den konceptuella modellen innebär att ingen sjö eller våtmark antas vara helt underlagrad av täta bottensediment, bedöms avsaknad av sådana sediment i områden där de antas förekomma vara en osäkerhetsfaktor av mindre betydelse.

B6.3 Parametersäkerhet

B6.3.1 Modellkalibrering avseende hydrogeologiska egenskaper

Den numeriska modelleringen (avsnitt B6.4 i denna bilaga) utgår från parametervärden som baseras på fältundersökningar av de hydrogeologiska egenskaperna för jordlagren och berget i Forsmark. Med detta som utgångspunkt har modellkalibrering varit en integrerad del av varje steg i utvecklingen av den MIKE SHE-modell som använts för att prognostisera grundvattenbortledningens effekter /Bosson et al. 2008, Gustafsson et al. 2009, Mårtensson och Gustafsson 2010/. Specifikt har modellkalibrering gjorts mot naturliga (ostörda) förhållanden avseende grundvattennivåer i ett stort antal hammarborrhål i berg och grundvattenrör i jord, sjönivåer samt ytvattenflöden vid avrinningsstationer. Metodiken har även inkluderat jämförelser mellan modellberäknade och uppmätta grundvattennivåer i berget i samband med kända hydrauliska störningar (se avsnitt B6.3.2 i denna bilaga).

Vid modellkalibreringen justeras parametervärden för att uppnå god passning mellan modellberäknade och uppmätta nivåer och flöden. Det bör observeras att modellkalibreringen genomförts för transienta förhållanden, det vill säga passning har gjorts av tidsserier på nivåer och flöden och inte medelvärden. Generellt har resultaten från modellkalibreringen gett god passning mellan modellberäknade och uppmätta tidsserier. Dessa resultat har erhållits utan omfattande förändringar av de parametervärden som initialt ansatts för jordlagren, den hydrauliska kontakten mellan yttnära berg och ovanförliggande jordlager samt den hydrauliska kontakten mellan grundvatten och ytvatten. Det förekommer mät-punkter med sämre passning mot uppmätta grundvattennivåer, vilket dock är att betrakta som normalt vid modellering av grund- och ytvattenflöden i svensk moränterräng.

Gemensamt för den kalibrering som gjorts under de olika modelleringsstegen är att de initialt ansatta hydrogeologiska egenskaperna i berget har justerats i MIKE SHE. De egenskaper som ansatts initialt baseras på kalibrering av en annan numerisk modell (ConnectFlow) som används för modellering av grundvattenflöde i berg /Follin et al. 2008/. Dessa justeringar inkluderar bankningsplanen och sprickzonerna med hög vertikal hydraulisk konduktivitet. Syftena med justeringarna är att med en och samma uppsättning parametrar få så god passning som möjligt mot uppmätta tidsserier på grundvattennivåer i berget, hydrauliska gradienter mellan jord och berg (som generellt är små), samt tidsserier som erhållits i samband med kända hydrauliska störningar (se avsnitt B6.3.2 i denna bilaga). Man kan notera att de genomförda justeringarna gav förbättrad passning med avseende på alla de tre typerna av tidsserier.

B6.3.2 Jämförelser med kända hydrauliska störningar

Som en del av kalibreringen av MIKE SHE-modellen nyttjades även data från kända hydrauliska störningar i form av bortledande av grundvatten. Specifikt beaktade /Bosson et al. 2008, Mårtensson och Gustafsson 2010/ den tre veckor långa provpumpningen som gjordes i hammarborrhålet HFM14 (se avsnitt B6.2.1 i denna bilaga). Uttaget från borrhålet lades in i modellen och jämförelser gjordes mellan modellberäknad och uppmätt sänkning av grundvattnets tryckhöjder i omkringliggande hammarborrhål i berg. Dessa jämförelser gjordes för olika parameterkombinationer avseende de hydrogeologiska egenskaperna i berget. På så sätt kunde man även bedöma vilken parameterkombination som gav bäst överensstämmelse mellan modellberäknade och verkliga (observerade) effekter på grundvattennivåer i berg vid bortledande av grundvatten från berget i Forsmark. Som nämnts tidigare kunde man dra motsvarande slutsatser vad gäller de hydrogeologiska egenskaperna i berget, baserat på ostörda grundvattennivåer och hydrauliska gradienter. Det bör noteras att även ”ostörda” förhållanden som modellen kalibrerats mot inkluderar pågående hydrauliska störningar. Dessa omfattar dels grundvattenbortledningen från undermarksanläggningen SFR, dels kärnkraftverkets system för grundvattendränning (se avsnitten 4.6.1 och 5.7.3).

B6.3.3 Känslighetsanalyser

I samband med modellprognoserna av grundvattenbortledningens effekter har omfattande känslighetsanalyser genomförts. Vid dessa analyser har inverkan på modellresultaten av att förändra olika komponenter i modellen (parametervärden och randvillkor) undersökts systematiskt. Att använda sådan metodik i samband med undermarksprojekt rekommenderades bland annat av den så kallade Tunnelkommissionen för Hallandsåsprojektet /Tunnelkommissionen 1998/. De genomförda känslighetsanalyserna presenteras närmare i avsnitt 5.7.1. Här diskuteras kort de huvudsakliga slutsatserna som gäller de fyra faktorer som identifierats som viktiga för omfattningen och karaktären på effekterna av grundvattenbortledning i Forsmark.

- **Den ytliga bergakviferen:** I en serie olika känslighetsfall studerade /Gustafsson et al. 2009, Mårtensson och Gustafsson 2010/ inverkan av de hydrogeologiska egenskaperna i de övre delarna (200 m respektive 20 m) av berget, inklusive egenskaperna i bankningsplan och zoner med hög vertikal vattengenomsläpplighet. Resultaten indikerar att dessa egenskaper har relativt stor betydelse för det modellberäknade inläckaget av grundvatten och storleken på påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Egenskaperna i berget är dock välundersökta och har även varit en integrerad del av modellkalibreringen (se avsnitt B6.3.1 i denna bilaga). Detta innebär att det finns ett gott underlag för att bedöma vilka parameterkombinationer som är rimliga och ger en god överensstämmelse med uppmätta nivå- och flödesdata för ostörda (naturliga) förhållanden.
- **Övergången mellan berg och jord:** I ett känslighetsfall ökade respektive minskade /Gustafsson et al. 2009/ den hydrauliska konduktiviteten i övergången mellan berg och jord. Ökningen respektive minskningen var en faktor 10 respektive till 1/20 relativt värdena i referensfallet. Inverkan av dessa känslighetsfall på det modellberäknade inläckaget av grundvatten och påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning var små. Detta indikerar att de hydrogeologiska egenskaperna i övergången mellan berg och jord inte är en kritisk faktor för de övergripande effekterna av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. Dessa egenskaper kan dock vara viktiga lokalt, vilket diskuteras närmare i avsnitt B6.2.2 i denna bilaga.
- **Bottensediment i hav, sjöar och våtmarker:** I ett känslighetsfall togs bottensedimenten i havet, sjöarna och våtmarkerna bort från modellen och ersattes med morän /Gustafsson et al. 2009/. Inverkan av detta känslighetsfall på det modellberäknade inläckaget av grundvatten och påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning var liten. Detta indikerar att bottensedimentens mäktighet och hydrogeologiska egenskaper inte är kritiska faktorer för de övergripande effekterna av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. Dessa egenskaper kan dock vara viktiga lokalt, vilket diskuteras närmare i avsnitt B6.2.3 i denna bilaga. Bottensedimentens begränsade övergripande inverkan kan förklaras av att sedimenten i referensfallet generellt är relativt tunna (i synnerhet i sjöarna och våtmarkerna) och har relativt hög vattengenomsläpplighet ($3 \cdot 10^{-7}$ m/s för sediment bestående av torv och gytta och $1,5 \cdot 10^{-8}$ m/s för lersediment).

Som nämnts tidigare är de meteorologiska förhållandena samt vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen förknippade med en form av parametersäkerhet, vars inverkan har studerats ingående med MIKE SHE-modellen. De meteorologiska förhållandena och injekteringens egenskaper är dock att

betrakta som givna ingångsdata till modellen. Dessa faktorer har heller inte varit del av utvecklingen och kalibreringen av MIKE SHE-modellen på det sätt som gäller för de övriga aspekter som diskuteras i denna bilaga.

I MIKE SHE-modelleringen har ett år (2006) valts ut som ”typår” som inkluderar typiska säsongsvariationer. Inverkan av mer extrema meteorologiska förhållanden har studerats genom att genomföra modellberäkningar för våtår och torrår med lång återkomsttid. Den vattengenomsläpplighet som efter genomförd injektering erhålls i den injekterade zonen är en fråga som berör projekteringen och uppförandet av förvaret. Frågan har i detta sammanhang hanterats genom att prognostisera grundvattenbortledningens hydrogeologiska och hydrologiska effekter för olika täthetsfall. Undersökningarna visar att de meteorologiska förhållandena och den injekterade zonens vattengenomsläpplighet kan ha lika stor eller större betydelse för grundvattenbortledningens effekter än många av de andra parameterosäkerheter som diskuteras ovan.

B6.4 Osäkerhet och tilltro rörande de numeriska flödesmodellerna MIKE SHE och MOUSE

MIKE SHE är en distribuerad och fysikaliskt baserad modell som kan hantera rumsligt varierande hydrogeologiska egenskaper och där processer beskrivs genom numeriska lösningar på differentialekvationer. En modell innehåller alltid en förenklad beskrivning av verkligheten, bland annat vad gäller beskrivning av rumsliga variationer och processer i en diskretiserad modellvolym. I detta avsnitt diskuteras modellosäkerheter, det vill säga tilltro och osäkerheter kopplade till de numeriska flödesmodellerna MIKE SHE och MOUSE.

B6.4.1 Numeriska metoder och diskretisering

Beräkningsmodeller för grundvattenströmning (”grundvattenmodeller”) kan grovt delas in i två olika typer vad gäller beskrivningen av grundvattenströmningen. Så kallade DFN-modeller (DFN står för discrete fracture (eller feature) network, på svenska diskret spricknätverk) har främst utvecklats för att beskriva grundvattenströmning i sprickigt berg. I sådana modeller antas grundvattnet endast strömma i vissa begränsade delar av modellvolymen, exempelvis i sprickzoner i berget. En DFN-modell kräver således god kunskap rörande spricksystemens lägen, riktningar, storlek och hydrogeologiska egenskaper. CPM-modeller (CPM står för continuum porous medium, på svenska kontinuummodell) har främst utvecklats för att beskriva grundvattenströmning i porösa geologiska material, det vill säga jordlager och porösa bergarter såsom kalksten och sandsten.

MIKE SHE är en kontinuummodell i vilken grundvattnet kan strömma i tre dimensioner. Antagandet om ett tredimensionellt kontinuum innebär att strukturer i berget och jordlagren som är mindre än modellens diskreta delvolym (beräkningscellerna) måste beskrivas på ett förenklat sätt. I modellen erhåller varje beräkningscell hydrogeologiska egenskaper som motsvarar medelvärdet inom den delvolym som den representerar. Med andra ord förenklas lokala (det vill säga, mindre än beräkningscellens storlek) rumsliga variationer inom cellen till ett medelvärde. Om beräkningscellerna görs små blir beräkningstiden lång. Detta innebär att man i praktiken måste göra en avvägning mellan representation av rumsliga variationer och beräkningstidens längd.

Ett sätt att praktiskt hantera avvägningen är att vid medelvärdesbildningen ta hänsyn till de hydrogeologiska egenskapernas inverkan på grundvattenströmningen i horisontell respektive vertikal riktning. Horisontellt görs medelvärdesbildningen proportionell mot strukturernas mäktighet och omvänt proportionell mot mäktigheten i vertikal riktning. Detta innebär att högkonduktiva strukturer får stor inverkan på medelvärdet i horisontell riktning och lågkonduktiva strukturer i vertikal riktning. Medelvärdesbildningen kan medföra att den geografiska utsträckningen av det modellberäknade påverkansområdet överskattas av modellen, medan modellen kan ge en underskattning av avsänkningen av grundvattenytan i vissa punkter eller delområden. Det är därför viktigt att göra jämförelser mellan modellberäknade och uppmätta effekter vid kända hydrauliska störningar, vilket i det aktuella fallet har genomförts med goda resultat (se avsnitt B6.3.2 i denna bilaga).

För att ytterligare bedöma inverkan av de förenklingar som är förknippade med en kontinuummodell har /Mårtensson och Gustafsson 2010/ gjort jämförelser mellan beräkningsresultat från MIKE SHE och från DarcyTools, där den senare är en ”diskret spricknätverksmodell” där en DFN överförs till en CPM.

Vid jämförelsen användes samma hydrogeologiska egenskaper i de övre delarna av berget och samma randvillkor i MIKE SHE som i DarcyTools. Med avseende på grundvattenytans avsänkning visar jämförelserna på vissa likheter mellan de två modellerna. Dock ger i detta fall MIKE SHE-modellen ett större påverkansområde som bland annat omfattar områden som inte blir avsänkta i DarcyTools.

B6.4.2 Beräkningsrutiner

En form av modellosäkerhet är hur väl de använda beräkningsrutinerna (algoritmerna) representerar verkliga processer. I MIKE SHE beskrivs de flesta processerna med kända och vedertagna differential-ekvationer, exempelvis Saint Venants ekvationer för ytvattenströmning, Richards ekvation för vattenströmning i den omättade zonen och Darcys lag för grundvattenströmning. I MIKE SHE löses ekvationerna iterativt genom så kallade finita differensmetoder /DHI Software 2008/ tills felet i lösningen underskrider angivna villkor. Vid ansättande av villkor måste en avvägning göras mellan beräkningsnoggrannhet och beräkningstid. Kvantifieringen av vissa processer (exempelvis avdunstning /Kristensen och Jensen 1975/) baseras på empiriska beräkningsrutiner. Dessa baseras på praktiska erfarenheter, vilket innebär att förutsättningarna för processbeskrivningen kan avvika från de förhållanden för vilka rutinerna är framtagna. I samband med grundvattenmodellering brukar dock beräkningsrutinerna inte medföra att några stora fel införs i resultaten, och eventuella brister i processbeskrivningen kan i regel upptäckas och åtgärdas i samband med modellkalibreringen (se avsnitt B6.3 i denna bilaga).

En viktig del av modellen är ”tunnelrutinen”, det vill säga den modellrutin som används för att beräkna inläckaget av grundvatten till slutförvarsanläggningens undermarksdel (se bilaga 4). Det är av naturliga skäl inte möjligt att på förhand jämföra modellberäknade och uppmätta inläckage. Jämförelser har däremot gjorts med en känd, pågående hydraulisk störning i form av grundvattenbortledningen från SFR (se avsnitt B6.3.2 i denna bilaga). Vad gäller SFR justerades dock vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen kring SFR så att det modellberäknade inläckaget av grundvatten motsvarar det uppmätta inläckaget. Detta ger således ingen kvittens på att tunnelrutinen i sig är korrekt.

Ett annat sätt att kontrollera tunnelrutinen är att göra jämförelser med en känd analytisk lösning /Mårtensson och Gustafsson 2010/. Jämförelser för olika beräkningsfall med avseende på bergets och den injekterade zonens hydrauliska konduktivitet visar att avvikelserna mellan tunnelrutinen och den analytiska lösningen generellt är någon procent eller mindre. Vidare har en jämförelse gjorts med resultat från DarcyTools-modellens beräknade inläckage. Denna jämförelse visar på stora likheter mellan de två modellerna för de beräkningsfall där direkta jämförelser är möjliga. DarcyTools ger ett något större inläckage än MIKE SHE vid högre vattengenomsläpplighet i den injekterade zonen ($K_{inj} = 10^{-7}$ m/s) och tvärtom vid en lägre vattengenomsläpplighet ($K_{inj} = 10^{-9}$ m/s). Skillnaderna mellan modellerna är dock relativt små (10–20 %) även för dessa tätningsfall.

B6.4.3 Randvillkor och modellområdets storlek

Den tredje och sista typen av modellosäkerhet som diskuteras i denna bilaga berör randvillkor och modellområdets storlek. I Forsmark har modellområdets (modellvolymens) utsträckning utgått dels från det område som undersökts, dels ytvattendelare (som antas sammanfalla med grundvattendelare med avseende på grundvatten i jordlagren). Som beskrivs i bilaga 4 innebär de i modellen ansatta randvillkoren att det inte kan ske något in- eller utflöde genom modellens botten eller genom modellens ytterkanter på land. I den del av modellen som omfattar havet ansätts en tidsvarierande grundvattennivå i jord. En sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berget vid modellens ytterkanter på land innebär att modellen kan ge en underskattning av inläckaget till förvaret och påverkansområdets storlek. I detta fall ger dock modellen samtidigt en överskattning av sänkningens storlek. En sänkning vid modellområdets gräns i havet kan omvänt ge en överskattning av inläckaget till förvaret, med motsatt inverkan vad gäller påverkansområdet och sänkningens storlek.

För Forsmark visar beräkningsresultaten att sänkningens tryckhöjder på förvarsnivå när modellområdets gräns i nordväst (längs en sträcka på cirka 2,5 km), i sydost (cirka 3 km) och i söder (cirka 6 km). Längs de sydöstra och södra delarna av modellområdets gräns är dock sänkningens tryckhöjder i berget liten. Detta innebär att en utökning av modellområdet i dessa

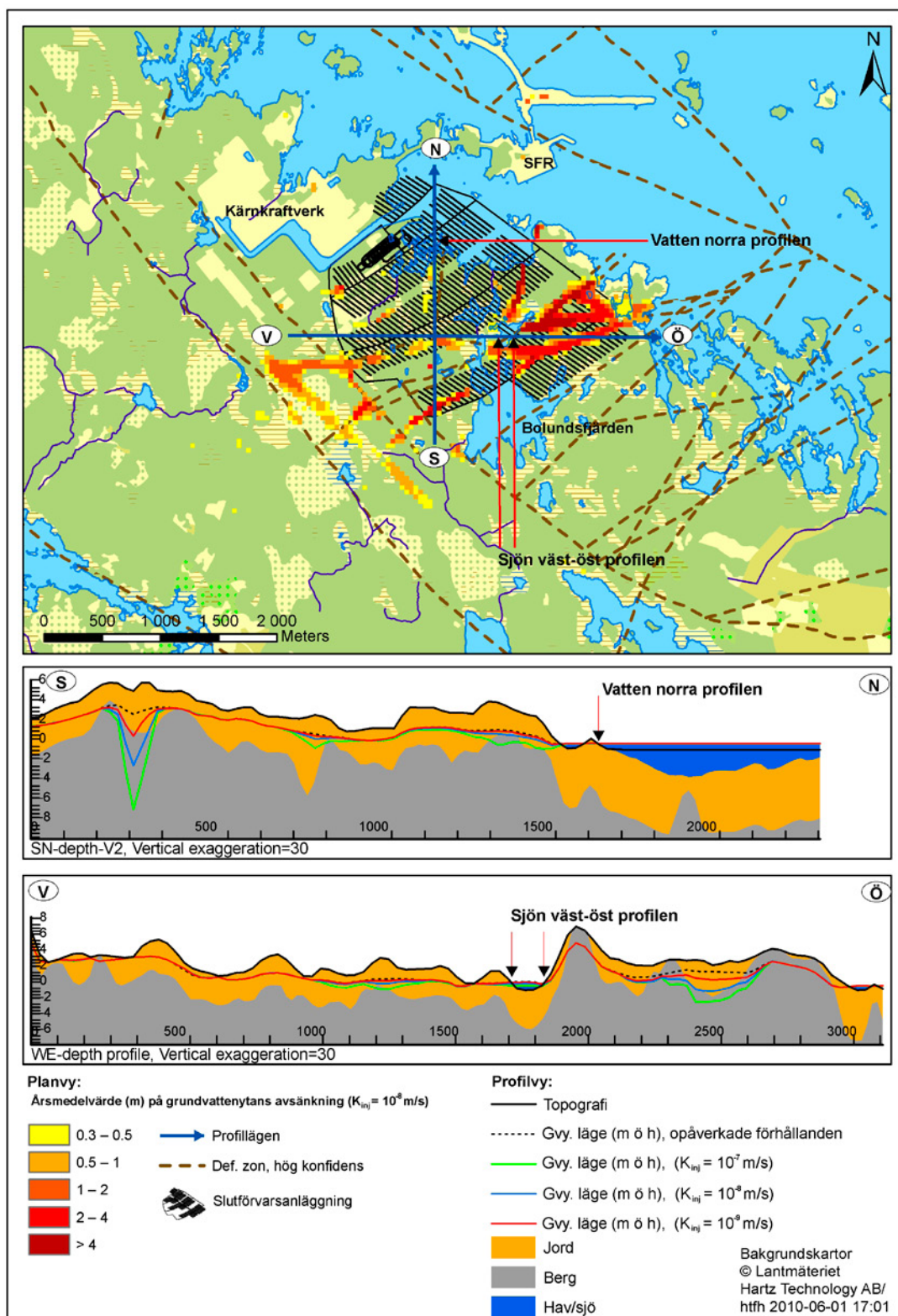
riktningar inte bör ge upphov till avsänkning av grundvattenytan i ytterligare områden där det förekommer sprickzoner med hög vertikal vattengenomsläpplighet. Sådana zoner har inte identifierats utanför den nordvästra delen av modellområdet /Follin 2008/.

B6.5 Jämförelser mellan modellprognoser och verkliga utfall

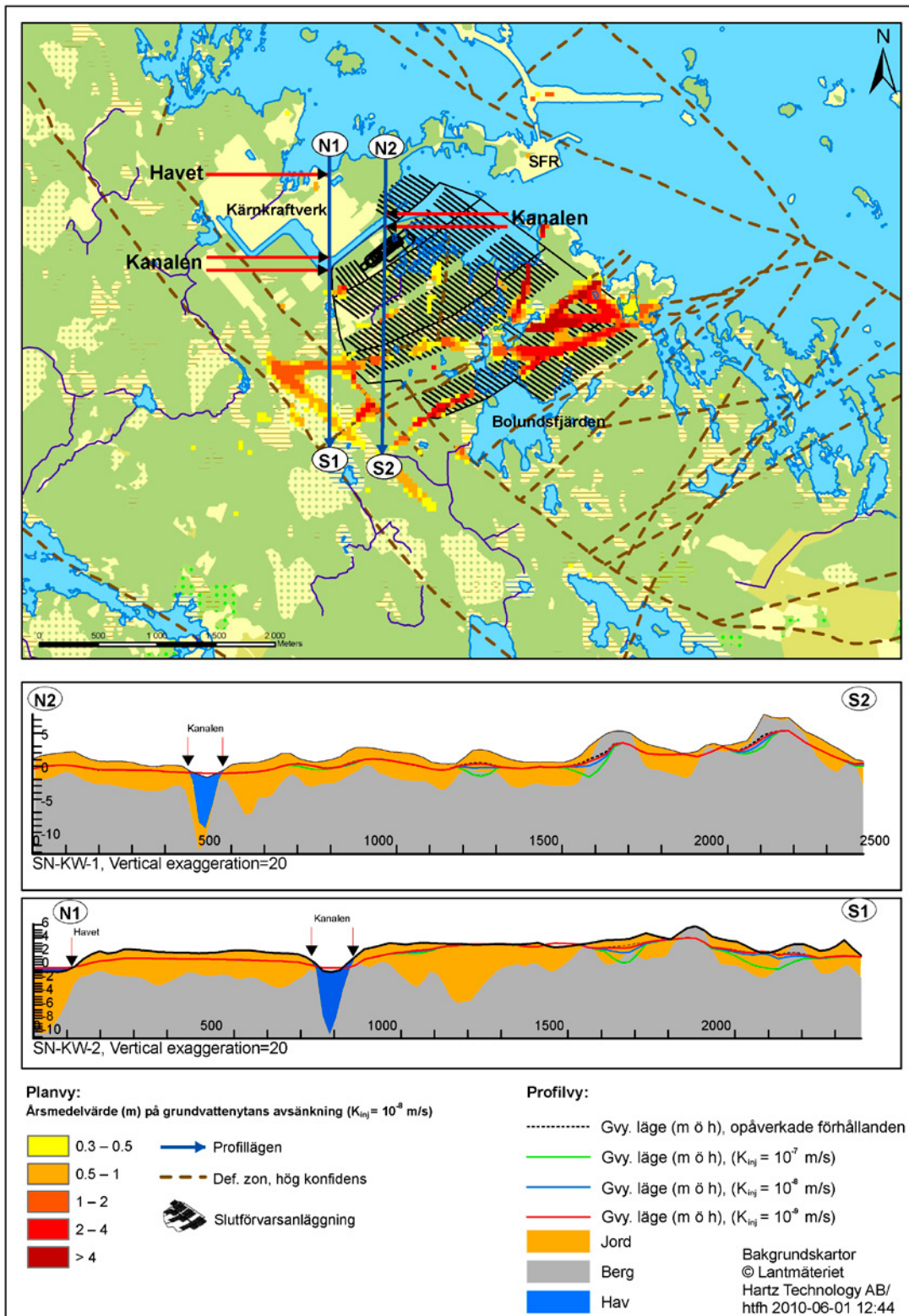
En komponent i tilltron till modellprognoserna av grundvattenbortledningens effekter är jämförelser mellan prognoser och verkliga utfall vid andra, liknande undermarksprojekt. För att sådana jämförelser ska kunna göras behövs underlag i form av prognoser och grundvattennivåmätningar. Det har ofta inte gjorts några detaljerade prognoser av hydrogeologiska och hydrologiska effekter i samband med undermarksprojekt. Som även framgår av avsnitten 5.2.3 och 5.3.3 har tidigare genomgångar /Axelsson och Follin 2000/ vidare visat att det ofta finns inläckagedata men inga grundvattennivådata att tillgå från undermarksanläggningar. En litteraturinventering indikerar att med vissa undantag /Franklin 2005, Gustafsson och Sundlöf 2002/ görs i samband med undermarksprojekt normalt inga jämförelser mellan prognoser och verkliga utfall.

En anledning till bristen på grundvattennivådata kan vara att villkor i tillstånd för grundvattenbortledning i regel sätts i termer av bortledd grundvattenmängd. Vidare finns det många andra frågor som är kopplade till själva grundvattenbortledningen, exempelvis pumpdimensionering och villkor avseende utsläpp av bortlett grundvatten. De grundvattennivåmätningar som görs är i regel kopplade till specifika byggnader och andra typer av grundvattenberoende objekt, vilket inte medger en heltäckande uppföljning av grundvattenbortledningens effekter på grundvattennivåer i anläggningens omgivning.

MIKE SHE-beräknade tvärprofiler över grundvattenytans nivå



Figur B7-1. Nord-sydlig respektive öst-västlig tvärprofil (de blåa linjerna i kartan) som visar MIKE SHE-beräknade nivåer för grundvattenytan för tre tätningsfall /Mårtensson och Gustafsson 2010/.



Figur B7-2. Två nord-sydliga tvärprofiler (de blå linjerna i kartan) som visar MIKE SHE-beräknade nivåer för grundvattenytan för tre tätningsfall /Mårtensson och Gustafsson 2010/.

Ordlista

Anisotrop: De fysikaliska egenskaperna är olika i olika riktningar.

Akvatiskt ekosystem: Ekosystem i vatten.

Artesisk: Grundvatten vars tryckhöjd är högre än markytan.

Bankningsplan: Sprickytor i berget som följer bergets överyta och delar in berget i block.

Bonitet: Ett skogsområdes virkesproducerande förmåga.

Deformationszon: En generell term som betecknar en deformerad (omformad) struktur i berget.

Evapotranspiration: Summan av vattnets evaporation (avdunstning) från mark/ytvatten, interception och transpiration. Interception betecknar nederbörd som fångas upp av växtlighet och andra föremål och inte rinner ner i marken, och transpiration är växternas vattenkonsumtion.

Habitat: En miljö där en viss växt- eller djurart kan leva.

Hydraulisk konduktivitet: Mått på jordens eller bergets förmåga att släppa igenom vatten. Hydraulisk konduktivitet brukar betecknas K och anges i enheten meter per sekund (m/s).

Impediment: Mark som är olämplig för jord- eller skogsbruk, till exempel kärr och berghällar.

Injektering: Metod för tätning kring en undermarksanläggning.

Inströmningsområde: Område där grundvattenflödet har en nedåtriktad komponent.

Interferenstest: Metod för att i fält skatta jordens och/eller bergets hydrogeologiska egenskaper, till exempel hydraulisk konduktivitet och magasinskoefficient (se förklaringar av dessa ord).

Kalkoligotrof: Kalkrik och näringsfattig.

Länshållning: Bortledning av vatten från en hållighet i marken utan avlopp, till exempel ett schakt eller ett berggrum.

Magasinskoefficient: Den vattenvolym som avges eller magasineras per enhetsarea vid en viss ändring av grundvattnets tryckhöjd. Specifik magasinskoefficient är den vattenvolym som avges eller magasineras per enhetsvolym vid en viss ändring av tryckhöjden.

Porositet: Den sammanlagda volymen porer (hålrum) per volymenhet jord eller berg.

Sprickzon: En spröd deformationszon (se förklaring ovan), det vill säga deformation i form av förkastningar och sprickor i berget.

Stratigrafi: Jordlagerföljd.

Sättning: Ihoptryckning av marken på grund av ökad belastning.

Terrest ekosystem: Ekosystem på land.

Transmissivitet: Hydraulisk konduktivitet (se förklaring ovan) gånger det vattenförande lagrets mäktighet. Transmissivitet brukar betecknas T och anges i enheten kvadratmeter per sekund (m²/s).

Utströmningsområde: Område där grundvattenflödet har en uppåtriktad komponent.