



EFFEKTER PÅ GRUND- OCH VATTENFÖRHÅLLANDEN VID GRUNDVATTENBORTLEDNING FRÅN BERGANLÄGGNINGAR

STEG I - FÖRSTUDIE

Kent Werner

Joachim Onkenhout

Åsa Löv

Vänster omslagsbild:

Utrustning för mätning av inläckage av grundvatten i en berganläggning.

Höger omslagsbild:

Grundvattenrör installerade i jord vid en planerad berganläggning.

**EFFEKTER PÅ GRUND- OCH YTVATTENFÖRHÅLLANDEN
VID GRUNDVATTENBORTLEDNING FRÅN
BERGANLÄGGNINGAR**

STEG I – FÖRSTUDIE

**Effects on hydrogeological and hydrological conditions due
to groundwater diversion from rock facilities**

Step I – Pre study

Kent Werner, Emp Tec
Joachim Onkenhout, Sweco Environment
Åsa Löv, Sweco Environment

Förord

Berganläggningars påverkan på omgivningens grund- och ytvattenförhållanden är en fråga som bergbyggnadsbranschen och andra hanterar dagligen. Bortledning av grundvatten från tunnlar och bergrum är en tillståndspliktig verksamhet enligt kapitel 11 i miljöbalken. Anläggande och drift av undermarksanläggningar leder till omgivningspåverkan och tillstånd är i regel kopplade till villkor för inläckage av grundvatten till anläggningen och i vissa fall även tillåtna avsänkningar i området. Kunskap om hur hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden prognostiseras och mäts i och kring våra undermarksanläggningar är därför viktig, vilket framförallt är uppenbart för anläggningar i urban och annan känslig miljö.

Tätning av tunnlar och bergrum och hantering av vatten har sedan BeFo:s bildande på 1970-talet varit en central fråga och stora forskningsinsatser har gjorts och görs inom detta område. Trots att frågor kring vatten och påverkan på vattenförhållandena idag är en så pass viktig fråga, så saknas det en samlad redovisning av svenska erfarenheter om effekter på grund- och ytvattenförhållanden till följd av bortledning av grundvatten från undermarksanläggningar.

Denna rapport är en förstudie med en inventering och sammanställning av information från berganläggningar, med inriktning på prognoser och utfall vad gäller påverkan på grund- och ytvattenförhållanden till följd av grundvattenbortledning. Ett stort antal tunnlar och bergrum har identifierats och beskrivits, bland annat utifrån vilken typ av hydrogeologisk och geologisk information som finns tillgänglig. Syftet med denna förstudie är att tjäna som underlag till eventuellt fortsatt arbete, där en samlad redovisning av effekter och prognosers tillämpbarhet redovisas.

Projektet har finansierats av BeFo och utförts av Kent Werner från EmpTec samt Joachim Onkenhout och Åsa Löv från SWECO Environment. Referensgruppen som följt arbetet och bidragit med stöd bestod av Ola Landin (Trafikverket), Lars O. Ericsson (Chalmers tekniska högskola), Kent Hansson (Geosigma) samt Mikael Hellsten (BeFo 2011) och Per Tengborg (BeFo 2012). Synpunkter på rapporten har även lämnats av Ulf Sundqvist (COWI).

Stockholm december 2012

Per Tengborg

Sammanfattning

Det saknas i dagsläget en samlad redovisning av svenska erfarenheter rörande effekter på grund- och ytvattenförhållanden till följd av grundvattenbortledning från berganläggningar. Det har heller inte genomförts någon utvärdering av olika prognosmetoders tillämpbarhet. Sådana sammanställningar skulle vara till gagn för beställare, konsulter och entreprenörer vid planering, projektering, uppförande och drift av berganläggningar.

Denna rapport presenterar en förstudie som finansierats av BeFo (Stiftelsen Bergteknisk Forskning). Förstudien syftar till att identifiera, samla in och sammanställa data och information från svenska berganläggningar, med fokus på prognoser och utfall vad gäller effekter på grund- och ytvattenförhållanden till följd av grundvattenbortledning. Målet med förstudien är i första hand att belysa tillgången på data och information och därmed möjligheterna att gå vidare med fortsatta studier för ett urval berganläggningar.

En lista med ett stort antal berganläggningar har tagits fram inom ramen för förstudien. Dessa omfattar väg- och järnvägstunnlar, oljelager i bergrum, mellan- och slutförvar för avfall, gruvor (dagbrott eller under mark), forskningsanläggningar, tunnlar för överföring av el, tele eller vatten samt kyl- och varmvattenlager. Insamlingen och sammanställningen visar att det för många berganläggningar saknas mätdata och/eller prognoser. För vissa berganläggningar har det visat sig vara svårt att få fram de data och den information som finns. Bland de undersökta berganläggningarna finns det dock ett antal från vilka det går att få tillgång till mätdata och i vissa fall har det även gjorts prognoser för jämförande studier.

Baserat på förstudien rekommenderas fortsatta studier för att ta fram en samlad redovisning av effekter och prognosmetoders tillämpbarhet, i första hand inriktade på väg- och järnvägstunnlar samt bergrum som tidigare använts för beredskapslagring av olja. Fortsatta studier bör även innefatta anläggningar för mellan- och slutförvaring av radioaktivt avfall.

Nyckelord: Berganläggning, grundvattenbortledning, grundvatten, ytvatten, hydrogeologi, hydrologi.

Summary

At present, there is no collected account of Swedish experiences regarding the effects on ground- and surface water conditions due to groundwater diversion from rock facilities. Moreover, there is yet no evaluation of the applicability of different prediction methods. Such accounts would benefit clients, consultants and entrepreneurs during planning, design, construction and operation of rock facilities.

This report presents a pre study funded by BeFo (the Swedish Rock Engineering Research Foundation). The objectives of the pre study are to identify, collect and compile data and information from Swedish rock facilities, focusing on predictions and outcomes in terms of effects on ground- and surface water conditions due to groundwater diversion. The primary aim of the pre study is to shed light on the access to data and information, and thereby the possibilities for continued studies for a selection of rock facilities.

A list with a large number of rock facilities has been produced as part of the pre study. These comprise road and railway tunnels, oil storages in rock caverns, intermediate- and final repositories for waste, mines (open pits or under ground), research facilities, tunnels for transmission of electricity, telephone traffic or water, and cold- and hot-water storage facilities. The collection and compilation show that there are no measurement data and/or predictions for many rock facilities. For some rock facilities, it turned out to be difficult to get access to existing data and information. However, there are rock facilities among those investigated that offer access to measurement data, and in some cases also predictions as a basis for comparative studies.

Based on the pre study, continued studies are recommended in order to produce a collected account of effects and the applicability of prediction methods, primarily focused on road or railway tunnels as well as rock caverns that previously were used as stockpiles for oil. Furthermore, continued studies should also include facilities for intermediate or final storage of radioactive waste.

Keywords: Rock facility, groundwater diversion, groundwater, surface water, hydrogeology, hydrology.

Innehåll

Förord	i
Sammanfattning	iii
Summary	iv
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund och syften	1
1.1.1 Bakgrund	1
1.1.2 Syften	2
1.2 Avgränsningar	3
1.3 Definitioner och begrepp	4
1.4 Genomförande	6
2 Grundvattenbortledning från berganläggningar	9
2.1 Hydrogeologiska och hydrologiska effekter	9
2.2 Förundersökningar, prognoser och mätprogram	10
3 Resultat från insamling av data och information	13
3.1 Inledning	13
3.2 Mätprogram inför och under uppförande, drift eller avveckling	13
3.3 Prognoser inför och under uppförande, drift eller avveckling	18
4 Förslag på fortsatta studier	21
Referenser	23
Bilaga 1 – Bruttolista med berganläggningar	45
Bilaga 2 – Sammanställning av data och information för berganläggningar	53
1 Väg- och järnvägstunnlar	55
1.1 Förbifart Stockholm	55
1.2 Södra länken	56
1.3 Norra Länken	57
1.4 Norrortsleden: Törnskogstunneln och Löttingetunneln	59
1.5 Citytunneln i Malmö	61
1.6 Citybanan i Stockholm	62
1.7 Hallandsås	64
1.8 Lunnertunneln, Norge	67
1.9 Lundbytunneln	68
1.10 Götatunneln	69
1.11 Grindtunneln	71
1.12 Trollhättetunneln	72
1.13 Nygårdstunneln	73
1.14 Tröingebergstunneln	75

1.15 Skreatunneln	75
1.16 Skultorpstunneln	77
1.17 Ådalsbanan	79
1.18 Erfarenheter från andra väg- och järnvägstunnlar i Sverige	80
1.19 Erfarenheter från andra väg- och järnvägstunnlar i Norge	81
2 Oljelager i berggrum.....	83
2.1 Avveckling av beredskapslager för olja	83
2.2 Oljeberggrum i Gävle	114
2.3 Bergrumsanläggningen vid Syrhåla	115
3 Mellan- och slutförvaring av avfall	117
3.1 Mellanlager för använt kärnbränsle (Clab).....	117
3.2 Slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark	118
3.3 Slutförvar för använt kärnbränsle på ön Olkiluoto i Finland	120
3.4 Slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall (SFR)	122
3.5 Djupförvar för farligt avfall från Rönskärs smältverk	123
4 Gruvor.....	127
4.1 Garpenberg	127
4.2 Rönnbäcken	128
4.3 Erfarenheter från andra gruvor	129
5 Forskningsanläggningar	133
5.1 Äspö Hard Rock Laboratory	133
5.2 Forskning kring grundvattenkemiska förändringar vid grundvattenbortledning: Gårdsjön och Äspö	134
6 Tunnlar för överföring av el, tele eller vatten.....	135
6.1 Bolmentunneln	135
6.2 Skanstull-Solberga	136
6.3 Käppalaförbundet	137
6.4 Frösundatunneln	137
6.5 Hjorthagentunneln	139
6.6 Juktans pumpkraftverk	140
6.7 Kymmentunneln	142
6.8 Rödbotunneln	143
6.9 Lerumstunneln	144
6.10 Kistatunneln	145
6.11 Päijännetunneln	146
6.12 Ormentunneln	147
7 Kyl- och varmvattenlager	149
7.1 Hornsberg kylvattenlager	149
7.2 Avesta försöksanläggning	150
Bilaga 3 – Kontakter med verksamhetsutövare, konsulter och tillsynsmyndigheter ...	153

1 Introduktion

1.1 Bakgrund och syften

1.1.1 Bakgrund

Ett stort antal berganläggningar såsom tunnlar, bergrum och gruvor är uppförda i Sverige och fler är planerade eller under uppförande. Grundvattenbortledning från berganläggningar medför lokala störningar av hydrogeologiska-hydrologiska systemet. Systematiska sammanställningar och utvärderingar av prognos- och mätdata med avseende på sådana störningar skulle ge viktiga bidrag till förståelsen av viktiga hydrogeologiska och hydrologiska processer kring berganläggningar från vilka grundvatten leds bort. Trots detta så saknas det samlade redovisningar av erfarenheter rörande konstaterade hydrogeologiska och hydrologiska effekter (förändringar av grundvattennivåer samt förändringar av ytvattennivåer och -flöden) till följd av grundvattenbortledning från befintliga anläggningar. Vidare saknas samlade redovisningar rörande prognosverkan (hur väl prognoser stämmer med verkligheten), begränsningar och tillämpbarhet för olika metoder som används för att förutsäga sådana effekter innan en berganläggning uppförs. Ofta läggs stora ekonomiska resurser på undersökning och utredning inför samråd och miljöprövning av berganläggningar. Erfarenhetssammanställningar av nämnda slag skulle därför kunna utgöra ett viktigt stöd, skapa större trygghet rörande prognoser och bidra till att spara tid och pengar för bergbyggeribranschen i samband med planering, projektering och utförande av framtida berganläggningar.

Bortledande av grundvatten utgör tillståndspliktig vattenverksamhet enligt kapitel 11 i miljöbalken (SFS 1998:808). Tillstånd är i regel förenade med villkor. En stor del av kostnaderna för uppförandet av berganläggningar är knuten till tätningsåtgärder för att minska inläckaget av grundvatten och därmed omgivningspåverkan. Design av tätningen görs med utgångspunkt från prognoser för inläckaget. Även för denna designprocess kan en samlad redovisning av konstaterade effekter i omgivningarna och prognosmetoders tillämpbarhet vara ett planerings- och projekteringsstöd och bidra till att sänka kostnaderna genom att välja ”rätt” prognosmetod i ett tidigt skede.

Det har tidigare gjorts vissa avgränsade erfarenhetssammanställningar, bland annat av uppmätta inläckage av grundvatten och uppmätta grundvattennivåsänkningar i berg vid svenska gruvor i samband med planeringen av ett slutförvar för använt kärnbränsle på stort djup i berg. Avsaknaden av mer samlade redovisningar, som även inkluderar andra typer av berganläggningar, kan bero på att tillståndsvillkor med krav på mätningar ofta är angivna i termer av maximalt inläckage av grundvatten per anläggningsdel och/eller maximalt inläckage till en berganläggning i sin helhet. Inläckaget är förhållandevis enkelt och billigt att mäta om inga större noggrannhetskrav ställs, och inläckaget är även en viktig faktor för dimensionering av pumpar och andra installationer. Villkor och/eller krav på uppföljning av grund- och ytvattenförhållanden i samband med grundvattenbortledning är normalt kopplade till delområden (naturobjekt och liknande)

eller specifika skyddsobjekt, såsom enskilda byggnader. Detta innebär att en mer heltäckande utvärdering av omgivningspåverkan ofta inte görs i det enskilda fallet. Mätningar görs dock i regel även inom ramen för verksamhetsutövarens egenkontroll enligt de generella bestämmelserna i miljöbalken (Naturvårdsverket 2001). En hypotes är dock att det från befintliga berganläggningar finns mycket mätdata att inhämta och sammanställa vad gäller inläckage av grundvatten (eller åtminstone bortledd vattenmängd), men avsevärt mer begränsat med mätdata rörande hydrogeologisk och hydrologisk omgivningspåverkan till följd av grundvattenbortledningen.

I samband med samråd och i tillståndsansökan måste verksamhetsutövaren redovisa ett MKB-dokument (en miljökonsekvensbeskrivning) med någon form av prognos av grundvattenbortledningens effekter på grund- och ytvattenförhållandena kring anläggningen. MKB-dokumentet ska även innehålla en beskrivning av konsekvenser för allmänna och enskilda intressen. Det finns ett brett spektrum av metoder för att prognostisera effekterna, från relativt enkla bedömningar baserat på vattenbalanser, analytiska lösningar och liknande, till avancerade numeriska modelleringsverktyg. Vilken eller vilka metoder som används i det enskilda fallet styrs idealt av faktorer som exempelvis anläggningstyp samt hydrogeologiska förhållanden; så är dock inte alltid fallet.

Oavsett metod så handlar det i regel om prognoser för en ännu inte uppförd anläggning, vilket kan ställa stora krav på verksamhetsutövaren vad gäller prognosernas trovärdighet och rimlighet. Ett problem är att vad som blir känt hos beslutsfattare och allmänhet är de relativt få berganläggningar där effekterna blivit omfattande och/eller där de prognoser som genomförs under planeringsskedet visar på mindre effekter än det verkliga utfallet under anläggningens utförande eller drift. Det finns därför behov av att lyfta fram goda exempel och att i större utsträckning förena teori och praktik vad gäller grundvattenbortledning från berganläggningar (Lundman 2010).

Sammantaget finns det således stor potential att minska kostnaderna och samtidigt stärka prognosernas trovärdighet i enskilda bergbyggnadsprojekt om det finns tillgång till en samlad branschredovisning av konstaterade, verkliga effekter vid berganläggningar samt en redovisning av erfarenheter vad gäller olika prognosmetoder. Sådan information är angelägen och ofta efterfrågad i samband med bergbyggnadsprojekt.

1.1.2 Syften

Denna rapport redovisar resultaten av en förstudie som syftar till att ge en översyn av tillgången på prognos- och mätdata och belysa hur sådana data skulle kunna användas för fortsatta studier, genom att

- identifiera befintliga eller planerade berganläggningar av olika typer i Sverige, för vilka relevant information och data potentiellt kan göras tillgängliga för vidare studier och
- i möjligaste mån samla in och sammanställa data och information rörande effekter på grund- och ytvattenförhållanden i samband med grundvattenbortledning från ett

urval av dessa berganläggningar, i syfte att presentera och dra slutsatser rörande data- och informationstillgången genom några konkreta exempel.

Ovanstående aktiviteter syftar i sin tur till att belysa följande frågeställningar som identifierades inför förstudien:

- I vilken mån förekommer hydrogeologiska och/eller hydrologiska mätprogram vid olika typer av berganläggningar, vad har de för syften och hur är de utformade?
- I vilken mån har prognoser av grundvattenbortledningens hydrogeologiska och/eller hydrologiska effekter i omgivningarna genomförts, vad har de för syften och hur är de genomförda?
- I vilken omfattning kan data och information göras tillgängliga, vilka slutsatser rörande konstaterad eller prognostiserad omgivningspåverkan kan dras inom ramen för förstudien och vilka slutsatser kommer man sannolikt att kunna dra genom vidare studier?

I en eventuell fortsättning efter förstudien kan, baserat på resultaten från denna, insamlad och kompletterande data och information för ett lämpligt urval berganläggningar användas för att utvärdera och jämföra mätdata och prognosresultat. Målsättningen med en sådan fortsättning skulle vara att i möjligaste mån söka förklara dels konstaterade effekter, dels skillnader mellan prognoser och utfall, utifrån faktorer som lokala hydrogeologiska förhållanden, typ av berganläggning samt omfattningen på genomförda tätningsåtgärder (injektering). Resultatet skulle då kunna användas som referens och stöd vid planering, projektering och utförande av framtida berganläggningar, dels vad gäller ”typiska” effekter vid grundvattenbortledning, dels olika prognosmetoders för- och nackdelar och tillämpbarhet/begränsningar.

1.2 Avgränsningar

Förstudien är avgränsad till hydrogeologiska och hydrologiska effekter av grundvattenbortledning från berganläggningar, det vill säga effekter på grundvattennivåer samt ytvattennivåer och -flöden i anläggningens omgivning till följd av grundvattenbortledningen. Förstudien behandlar således inte miljöfarlig verksamhet (9 kapitlet i miljöbalken) vid uppförande eller drift av berganläggningar, såsom buller eller damning. Inläckaget av grundvatten (Hansson et al. 2010) ingår som en viktig parameter vid tolkning av hydrogeologiska och hydrologiska data från berganläggningar, men inläckaget i sig är inte i fokus i detta projekt. Behandling och utsläpp av länshållningsvatten (NFF 2009) är en annan typ av effekt av grundvattenbortledning som inte behandlas i projektet. Vidare ingår inte sekundära effekter av grundvattenbortledning på fysikaliska (mekaniska), kemiska och biologiska förhållanden i mark och vatten (se till exempel Broms et al. (1976), Mossmark et al. (2008b), Mossmark (2010), Persson et al. (2008)).

I projektets frågeställningar ingår inte konsekvenser av grundvattenbortledning, till exempel påverkan på ekologiska förhållanden eller påverkan på jord- och skogsbruk (skördetillväxt respektive skogsbonitet). I rapporten ingår dock implicit konsekvenser

för enskild vattenförsörjning från brunnar, i den meningen att många mätprogram för berganläggningar inkluderar grundvattennivåmätning i enskilda brunnar.

Bruttolistan på berganläggningar som tagits fram inom förstudien (se bilaga 1) är avgränsad till berganläggningar i Sverige. I vissa fall har dock berganläggningar i Norge och Finland tagits med, det vill säga berganläggningar som är uppförda i sådana typer av berg som även finns i Sverige. Det ska påpekas att listan inte på något sätt gör anspråk på att vara komplett. Det finns ett mycket stort antal berganläggningar i landet och många är eller har varit hemliga. De berganläggningar som tagits med i bruttolistan är sådana som är mer eller mindre kända och för vilka bedömningen initieellt varit att relevant data och information potentiellt kan göras tillgängliga.

På motsvarande sätt redogör inte förstudien för data och information för alla de berganläggningar som identifierats. De som sammanfattas i rapporten syftar endast till att utgöra typiska exempel och är anläggningar för vilka data och information, med begränsade insatser, har kunnat samlas in inom ramen för förstudien. Bland de berganläggningar som är med på bruttolistan men som inte beskrivs närmare i rapporten finns det dels sådana för vilka data och information sannolikt skulle kunna göras tillgängliga, dels finns det berganläggningar som beskrivs i rapporten för vilka ytterligare data och information skulle kunna införskaffas inom ramen för fortsatta studier. Av praktiska skäl har det varit nödvändigt att göra vissa urval, eftersom inhämtning och sammanställning av ytterligare data och information skulle kräva alltför omfattande insatser, i form av databas- och arkivsökning samt databearbetning, för att kunna rymmas inom ramen för förstudien.

Berganläggningarna omfattar även sådana med infiltration, även om de bedöms vara svårare att använda för fortsatta studier eftersom infiltration försvårar tolkning av data. Med avseende på vattenledningstunnlar omfattar data- och informationsinsamlingen i första hand uppförandeskedet och perioden innan de trycksatts. Anledningen till avgränsningen är att trycksatta vattenledningstunnlar kan ge utläckage till det omgivande grundvattenmagasinet, vilket inte är av primärt intresse i denna förstudie.

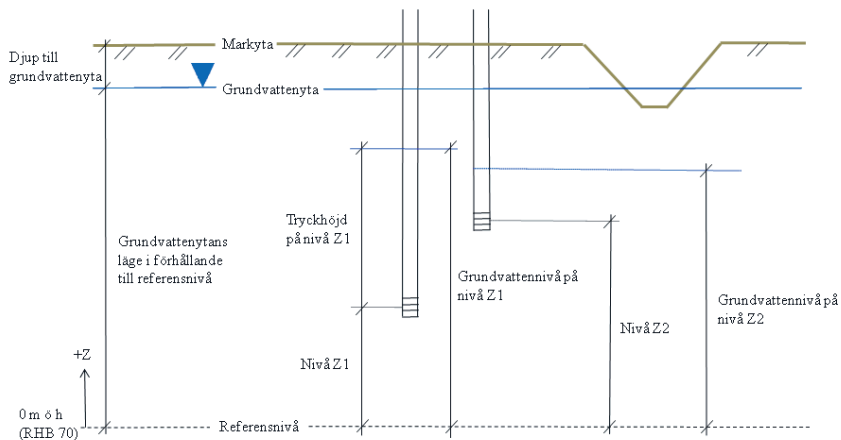
1.3 Definitioner och begrepp

Med *berganläggning* menas här en tillskapad hålighet i berget, till exempel en tunnel eller ett bergrum. I begreppet ingår även (berg)schakt, det vill säga schakt tillskapade från bergets överyta ner till en tunnel, ett bergrum eller annan hålighet i berget. Av specifikt intresse i detta sammanhang är berganläggningar (eller delar av sådana anläggningar) som är belägna under grundvattenytan. Begreppet *grundvattenbortledning* avser således länshållningen av berganläggningar, det vill säga bortledning (genom pumpning eller liknande) av inläckande grundvatten.

I rapporten används frekvent begreppen *grundvattennivå*, *grundvattenyta* och *grundvattentryck*. I samband med hydrogeologiska förhållanden kring berganläggningar, som i vissa fall är belägna på stora djup, är det viktigt att skilja på dessa begrepp. 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 (figur 1-1). Denna nivå representerar dels rörspetsens höjd över ett referensplan (nivån Z1 i figur

1-1), dels grundvattnets så kallade tryckhöjd vid spetsen. En grundvattennivå (eller tryckhöjd) avser därför alltid den punkt där mätningen görs. I figur 1-1 är grundvattennivån på nivån Z1 i det vänstra röret högre än grundvattennivån på nivån Z2 i det högra. Rören har sina nedre rörspetsar på olika nivåer, samtidigt som grundvattnets tryckhöjd vid rörspetsarna är olika.

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 passerar gränsen mellan den mättade och den omättade zonen. Avsänkning av grundvattenytan inverkar på ytnära vattensystem, som till exempel växter och djur finns i och är beroende av. Sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berget är dock viktigt för till exempel bergborrade brunnar, eftersom en sänkning av tryckhöjden kan försämra brunnens kapacitet.



Figur 1-1. Illustration av begreppen grundvattennivå, tryckhöjd och grundvattenyta. Grundvattennivåer (eller tryckhöjder) finns överallt under grundvattenytan. Grundvattenytan är en distinkt yta. (Illustration of the concepts ground water level, pressure height and groundwater table).

I rapporten förekommer begreppen *påverkansområde* och *påverkansavstånd*, som här har samma innebörd som begreppen *influensområde* /-avstånd som också brukar användas i dessa sammanhang. Påverkansområdet avser det område inom vilket grundvattnets tryckhöjder på en viss nivå sänks, eller där grundvattenytan avsänks till följd av grundvattenbortledning. Det ska observeras att definitionen av vad som utgör påverkansområdets gräns i princip är helt godtycklig, bland annat vad gäller avsänkningen vid dess gräns. Vidare påverkas möjligheterna att använda grundvattennivåmätningar för avgränsning av påverkansområdet av mätpunkternas lägen, tillgången på referensdata samt storleken på opåverkade hydrauliska gradienter i området. Vad gäller modellprognoser kan definitionen av påverkansområdets gräns

styras av nödvändiga antaganden och andra begränsningar i prognosmetoden, till exempel att påverkansområdet baseras på ett antagande om stationärt (tidsberoende) grundvattenflöde.

1.4 Genomförande

Förstudien finansierades av BeFo och genomfördes av Kent Werner (EmpTec) och Joachim Onkenhout (SWECO Environment AB). Från SWECO har även Åsa Löv, Andrea Ahlman samt Alexander Giron (examensarbetare) deltagit och bidragit till insamling av data och information samt rapportskrivande. Förstudiens referensgrupp bestod av Mikael Hellsten och Per Tengborg (BeFo), Ola Landin (Trafikverket), Lars O. Ericsson (Chalmers tekniska högskola) och Kent Hansson (Geosigma AB). Synpunkter på ett utkast av förstudierapporten har även lämnats av Ulf Sundqvist (COWI). Som nämnts tidigare omfattar den bruttolista på berganläggningar som togs fram inom förstudien sådana som är mer eller mindre kända och för vilka bedömningen initieellt varit att relevant data och information potentiellt kan göras tillgängliga. Den initiella bruttolistan på berganläggningar baserades således på kunskap hos förstudiens deltagare och den har successivt utökats i takt med data- och informationsinsamlingen under förstudiens gång. Insamling av data och information för ett urval representativa berganläggningar genomfördes genom litteraturstudier, kontakter med innehavare av berganläggningar, handläggare för vattenverksamheter på länsstyrelser samt konsulter som arbetar med hydrogeologiska och hydrologiska frågeställningar i undermarksprojekt. Följande data och information eftersöktes:

- Grundläggande information om berganläggningen; typ av berganläggning, geografiskt läge, uppförandeperiod, nuvarande status, hydrogeologisk miljö (topografi, bergarter, jordlager), dimensioner (längd, diameter), genomförd bergförstärkning, injekteringsåtgärder och andra åtgärder (till exempel infiltration).
- Konceptuell/kvantitativ modellering avseende inläckage av grundvatten och tillhörande trycksänkning i berg, avsänkning av grundvattenytan och/eller hydrologiska effekter.
- Inläckagemätningar, grundvattennivåmätningar och/eller mätningar av ytvattennivåer/-flöden inför, under och/eller efter uppförandet av berganläggningen.
- Resultat från vattenkemisk provtagning inför, under och/eller efter uppförandet av berganläggningen.

Det insamlade materialet för olika berganläggningar är av olika typ, omfattning och abstraktionsgrad. Exempel på material som erhållits är datafiler, konsultrapporter, miljörapporter, tillsynsrapporter, tillståndsansökningar/miljökonsekvensbeskrivningar, domstols- och andra myndighetsbeslut samt vetenskapliga artiklar och rapporter, inklusive tidigare genomförda tolkningar och sammanställningar. I många fall har det efterfrågade materialet inte erhållits, antingen av sekretesskäl (till exempel för berganläggningar som är hemliga eller är föremål för pågående överprövning) eller på grund av tidsbrist hos den part som innehar arkiverat material. För vissa äldre

berganläggningar saknas antingen dokumentation helt, eller det skulle kräva mycket omfattande och tidsödande arkivsökning för att återfinna dokumentationen.

2 Grundvattenbortledning från berganläggningar

2.1 Hydrogeologiska och hydrologiska effekter

Länshållning av en berganläggning förlagd under grundvattenytan ger upphov till en hydraulisk gradient mot anläggningen och inläckage av grundvatten. Den relativa betydelsen av olika hydrogeologiska och hydrologiska faktorer för (1) inläckagets storlek och dess fördelning i tid och rum samt (2) effekter på grundvattennivåer i jord och berg och tillhörande påverkansområden beskrivs i Axelsson och Follin (2000), Cesano (2001), Cesano and Olofsson (1997), Cesano et al. (2000, 2003), Masset and Loew (2010), Olofsson (1991a, b, c, 1994, 2001), Olofsson et al. 2001)). I dessa studier pekas följande faktorer ut som styrande dels för inläckaget, dels för tillhörande effekter på grundvattennivåer i jord och berg:

- Berganläggningens dimensioner och djup under opåverkad grundvattenyta.
- Geometrier och hydrogeologiska egenskaper för grundvattenförande sprickor och sprickzoner i berget, samt den mellanliggande bergmassans hydrogeologiska egenskaper.
- Hydrogeologiska egenskaper i kontakten mellan jord och berg.
- Markytans topografi, jordlagrens mäktighet och hydrogeologiska egenskaper samt förekomsten av ytvattenmagasin i ytsystemet.

De ovannämnda undersökningarna indikerar komplexa samband, eftersom många av faktorerna är direkt eller omvänt korrelerade. De har även olika relativ inverkan, dels för små respektive stora inläckage och tillhörande effekter på grundvattnets tryckhöjd i berg respektive grundvattenytans läge, dels i olika typer av hydrogeologiska miljöer.

Vid många berganläggningar används injektering, betonginklädning och/eller vattentillförsel som åtgärder för att minska inläckaget av grundvatten respektive dess effekter i anläggningens omgivning (Agerstrand och Gustafson 1980, Möller 2010, Olofsson och Palmgren 1994, Tolppanen och Syrjänen 2003, Nordisk Vegteknisk Forbund 2008). Erfarenheter från äldre berganläggningar visar vidare att inläckaget kan minska med tiden. Orsakerna till detta fenomen är ännu inte klarlagda, men kan till exempel bero på processer som kemisk utfällning, flerfasflöde och/eller spänningsomvandling (Bäckblom 2002, Statens Vegvesen 2002a). Dessa tekniska åtgärder och långsiktiga processer komplicerar tolkningen av data från hydrogeologiska och hydrologiska mätprogram, eftersom de innebär att parametrar som inläckage och grundvattennivå påverkas av ytterligare faktorer än de som omnämns ovan.

2.2 Förundersökningar, prognoser och mätprogram

Inför uppförande (eller avveckling) av en berganläggning genomförs i regel geologiska, geofysiska och hydrogeologiska förundersökningar. Förundersökningarna genomförs som underlag dels för projektering av anläggningen, dels för den miljökonsekvensbeskrivning som enligt miljöbalken ska medfölja ansökan för tillståndspliktig (och om så krävs, även anmälningspliktig) vattenverksamhet. Det ska dock påpekas att miljölagstiftningen förändrats med tiden, vilket innebär att miljökraven (liksom kraven på dokumentation och uppföljning) var annorlunda jämfört med i dag för många äldre berganläggningar. Kunskapen om berganläggningars potentiella miljöpåverkan har också utökats i takt med att olika berganläggningar uppförts.

Dagens krav på verksamhetsutövarens egenkontroll samt tillstånd som är förenade med villkor innebär att inläckaget, och i vissa fall även grundvattenbortledningens effekter i berganläggningens omgivningar, följs upp genom olika typer av mätningar. Sådana mätningar påbörjas ofta inom ramen för förundersökningarna, eftersom kunskap om de hydrogeologiska och hydrologiska förhållandena på den plats där berganläggningen ska uppföras är en väsentlig del av både projektering och miljökonsekvensbeskrivning. Under uppförande och drift är i regel Länsstyrelsen tillsynsmyndighet för de vattenverksamheter som är förknippade med anläggningen (Strömberg 2000). Det finns i dagsläget inget generellt krav på regelbunden miljörapportering för vattenverksamheter. Länsstyrelsernas egna erfarenheter visar att myndighetstillsynen över vattenverksamhet är mer eller mindre händelsestyrd (Länsstyrelserna 2007). Sammantaget innebär detta att data och information om ”väl fungerande” berganläggningar i drift finns hos verksamhetsutövarna, men inte hos länsstyrelserna.

Förundersökningarna, de undersökningar som görs under uppförandet och data från mätprogram under en berganläggnings olika skeden är alla viktiga underlag för att analysera omgivningspåverkan och vilka som är de styrande faktorerna. Tidsvarierande hydrometeorologiska förhållanden medför att hydrogeologiska och hydrologiska system kan uppvisa stora och ofta oregelbundna naturliga tidsvariationer. Vidare är grundvattenbortledningen i sig transient under uppförandeskedet, eftersom utbyggnaden av en berganläggning och tillhörande tekniska åtgärder (till exempel injektering) är en successiv process under detta skede. Anagnostou (1995) visar att ett antagande om stationära förhållanden leder till under- eller överskattning av både inläckaget och storleken på trycksänkningen i berget kring en bergtunnel, beroende på kvoten mellan tunnelns drivningshastighet och bergets hydrauliska konduktivitet. Denna slutsats kan vara en delförklaring till observationen att trycksänkning i berget på ett visst avstånd från en tunnel kan uppstå även lång tid efter tunnelfronten passerat (Olofsson 1991).

Ovanstående faktorer innebär att det är en utmanande uppgift att utgående från mätdata identifiera och kvantifiera effekter av grundvattenbortledning från en berganläggning (Attanayke and Waterman 2006, Olofsson 1991, Prinos et al. 2002). Ett minimikrav för en lyckad utvärdering bör vara att det finns tillgång till mätdata från tiden innan anläggningen uppfördes (Franklin 2005, Osanius 2007). Statistiska metoder som nyttjar samtidiga mätdata från referensområden, både inför och under uppförande och drift, har utvecklats och testats för olika berganläggningsprojekt, till exempel Bolmentunneln,

Hallandsås, Ormentunneln och Norra Länken (Cesano och Olofsson 1997, Lundmark 2001, Lundmark och Olofsson 2002, Olofsson 1991).

Det finns många olika metoder och verktyg som kan användas för att prognostisera inläckage till en berganläggning och dess effekter på grundvattennivåer i jord och berg (Cesano 2001, Olofsson 1991). Dessa metoder spänner över ett brett spektrum, från konceptuella modeller och vattenbalansberäkning till numeriska modeller för grundvattenflöde i två eller tre dimensioner.

Det har tagits fram analytiska lösningar eller semi-analytiska modeller för att beräkna inläckaget till schakt, tunnlar och bergrum, till exempel ”dränekvationer” (Kohler et al. 2001, Olsson 1976) som dock endast är tillämpbara om berganläggningen är ytligt förlagd. Ett grundläggande antagande i många av dessa lösningar och modeller är att grundvattenytans läge inte förändras till följd av inläckaget (El Tani 2003, Goodman et al. 1965, Hwang and Lu 2007, Kolymbas och Wagner 2007, Lei 1999, 2000, Park et al. 2008). Detta antagande kan leda till en överskattning av inläckaget (Hernqvist et al. 2008). Moon and Fernandez (2010) och Perrochet (2005) presenterar approximativa analytiska lösningar för inläckaget som även tar hänsyn till avsänkningen av grundvattenytan.

Det finns även analytiska metoder som enkom tagits fram för att beräkna trycksänkningen kring en berganläggning, avsänkningen av grundvattenytan och/eller påverkansområdets storlek (Alberts och Gustafson 1986, Huisman 1972, Gustavsson et al. 1970, Gustafson 2009, Olsson 1979). Även dessa metoder baseras på olika antaganden, men de kan ge viss vägledning åtminstone i de inledande skedena av ett berganläggningsprojekt. Bland övriga metoder kan nämnas ”riskvariabelmetoden” (Olofsson 2001), som innebär att markområden kring en berganläggning klassificeras med avseende på sårbarhet för trycksänkningar i berget kring en berganläggning. Klassificeringen genomförs baserat på statistisk analys av mätdata från uppförandet av anläggningen.

Som nämnts ovan kan prognoser även utföras med hjälp av numeriska modeller för grundvattenflöde i två eller tre dimensioner. Det finns olika typer av modeller (till exempel finita-differensmodeller och finita-elementmodeller) och många olika modelleringsverktyg. Exempel på i dagsläget aktuella modelleringsverktyg som använts för att prognostisera hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden kring berganläggningar i Sverige är MODFLOW (McDonald and Harbaugh 1988), MIKE SHE (DHI Software 2008), DarcyTools (Svensson et al. 2010), CONNECTFLOW (SERCO 2011) och TRANSMEF-3 (Molinero et al. 2002).

3 Resultat från insamling av data och information

3.1 Inledning

Den sammanställda bruttolistan på berganläggningar återges i bilaga 1. Listan omfattar 160 anläggningar. Dessa är fördelade på 120 väg- och järnvägstunnlar, ett antal oljelager i bergtrum (anges som en typ av anläggning i listan), fem anläggningar för mellan- och slutförvaring av avfall (varav en i dagsläget används som forskningsanläggning), tretton gruvor (dagbrott eller under mark, varav en tidigare även använts som forskningsanläggning), två forskningsanläggningar, 17 tunnlar för överföring av el, tele eller vatten samt två kyl- och varmvattenlager. Detta kapitel ger en sammanfattande beskrivning av resultaten av data- och informationsinsamlingen för ett urval av dessa berganläggningar, rörande hydrogeologiska och hydrologiska effekter till följd av grundvattenbortledning. Som nämnts tidigare är syftet att ge en översyn på tillgången på prognos- och mätdata och belysa hur sådana data och information skulle kunna nyttjas inom ramen för fortsatta studier.

Bilaga 2 ger närmare beskrivningar av de utvalda berganläggningarna, vilka därmed tjänar som konkreta exempel på data- och informationstillgången. För varje berganläggning ges i bilaga 2 en övergripande beskrivning av anläggningen samt områdets hydrogeologiska, hydrologiska och topografiska förhållanden. Vidare ges en sammanfattning av (i förekommande fall) genomförda prognoser, hydrogeologiska och/eller hydrologiska mätprogram, eventuella jämförelser mellan prognoser och mätdata, samt en bedömning av potentialen att nyttja data och information från berganläggningen som underlag för fortsatta studier.

Avsnitt 3.2 sammanfattar i vilken mån hydrogeologiska och/eller hydrologiska mätprogram förekommer vid olika typer av berganläggningar, vad mätprogrammen har för syften och hur är de utformade. Vidare ges en sammanfattning av påvisade effekter samt en bedömning av i vilken omfattning som data och information kan göras tillgängliga för att dra slutsatser rörande konstaterad omgivningspåverkan inom ramen för fortsatta studier.

Avsnitt 3.3 sammanfattar i vilken mån prognoser av grundvattenbortledningens hydrogeologiska och/eller hydrologiska effekter i omgivningarna har genomförts, vad prognoserna har för syften och hur de är genomförda.

3.2 Mätprogram inför och under uppförande, drift eller avveckling

Väg- och järnvägstunnlar

Det finns ett stort antal väg- och järnvägstunnlar i Sverige. Data- och informationsinsamlingen omfattar 19 berganläggningar i Sverige samt även erfarenheter från uppförande och drift av väg- och järnvägstunnlar i Norge. Några av

berganläggningarna består av flera tunnlar eller tunnelavsnitt. Anläggningsurvalet har främst baserats på tillgång till data- och rapportmaterial samt kontaktpersoner och handläggare på myndigheter eller involverade konsulter. Botniabanan, som innehåller sammanlagt 16 bergtunnlar, har bidragit med viktiga erfarenheter som är sammanställda i slutrapporteringen från det projektet.

Av de 19 berganläggningar i Sverige som beaktats inom förstudien så är en planerad (Förbifart Stockholm) och ett antal av dem är under uppförande (Hallandsås, Norra länken samt Citybanan). För de som är under uppförande finns det omfattande erfarenheter rörande grundvattenbortledningens hydrogeologiska och hydrologiska effekter, liksom utförlig material om tillståndsprocesser och kontroll.

Väg- och järnvägstunnlar omfattas av tekniska råd och krav som är framtagna specifikt för dessa typer av berganläggningar (Trafikverket 2011a, b), och de har vissa typiska karaktärsdrag som är annorlunda jämfört med många andra typer av berganläggningar. Det är även vissa typiska skillnader mellan väg- respektive järnvägstunnlar; vägtunnlar har typiskt större tvärsnitt och kan även ha kraftigare lutningar. Väg- och järnvägstunnlar är i regel relativt stora, med tunneltvärsnitt på upp till ca 130 m² för flerfiliga vägtunnlar, ofta med parallella tunnelrör och lång utsträckning. Väg- och järnvägstunnlar som uppförts under de senaste 15–20 åren är i regel tätade med berginjektering, dels för att uppnå krav som uppställs i tillståndet, dels ur ett tekniskt perspektiv i syfte att minimera fukt- och dropproblematik för tekniska installationer och fordon.

De väg- och järnvägstunnlar som valts ut för förstudien är i huvudsak belägna i Västra Götalands län och Stockholms län. Dessutom är Skåne län och Hallands län representerade med Citytunneln respektive Hallandsåstunneln. Erfarenheter har även samlats in gällande Ådalsbanan och Botniabanan i Västernorrlands län. Urvalet av väg- och järnvägstunnlar representerar olika klimatförhållanden. Urvalet omfattar inte någon berganläggning som är belägen över högsta kustlinjen och anläggningarna i urvalet har relativt likartade hydrogeologiska förhållanden. Alla utom två av berganläggningarna i urvalet är förlagda i kristallin berggrund. Undantagen utgörs av Citytunneln i Malmö (kalkstensberggrund) samt Hallandsåstunneln. Den senare anläggningen uppförs till stor del i berg som utgörs av kristallin gnejs, dock med inslag av kraftigt omvandlat urberg.

De mätprogram som finns för väg- och järnvägstunnlar är i regel utformade utifrån externa krav och behov. För tunnlar som under senare år uppförts i eller nära bebyggelse har det i regel ställs högre krav på mätprogram för uppföljning av hydrogeologisk och hydrologisk omgivningspåverkan, jämfört med sådana berganläggningar som uppförts i glesbygd eller naturmiljö.

Mätprogrammen för väg- och järnvägstunnlar omfattar främst mätning av grundvattennivåer i jord. Mätprogrammets utformning och omfattning styrs av de potentiella skadeobjekt som identifierats kring berganläggningen, villkor i tillstånd samt krav från tillsynsmyndigheter. Vanligen mäts inläckage av grundvatten till tunnlar och schakt, grundvattennivåer i jord, sättningar i mark och byggnader, samt i förekommande fall grundvattennivåer i jord- och bergbrunnar kring berganläggningen. Hydrologiska mätningar samt grundvattenkemiska mätningar förekommer dock sällan.

Data- och informationsinsamlingen avseende väg- och järnvägstunnlar visar generellt inte på några omfattande hydrogeologiska eller hydrologiska effekter till följd av grundvattenbortledningen. En alternativ slutsats kan vara att det utifrån mätprogrammen inte går att observera de verkliga effekterna i berganläggningarnas omgivning. Den omgivningspåverkan som kunnat konstateras är vanligen i områden med dåligt och svårinjekterat berg, såsom större sprickzoner i vilka grundvattensänkning i vissa fall kan noteras på relativt stora avstånd från berganläggningen. Ett annat riskområde är vertikala schakt från markytan ner i berg; vid vissa väg- och järnvägstunnlar har stora inläckage uppstått i övergångszonen mellan jord och berg. Med avseende på grundvatten i jord har grundvattensänkning främst observerats i områden med små grundvattenmagasin med liten grundvattenbildning.

Erfarenheterna från förstudien är att mätdata kan vara svårtillgängliga. En stor mängd data och annan information är endast tillgängliga hos konsulter eller andra privata företag, och det är vare sig enkelt eller givet att mätdata kan göras tillgängliga för fortsatta studier. Det är tekniskt sett enklare att få åtkomst till mätdata från nyare berganläggningar, eftersom mätdata från sådana anläggningar lagras i digitala databaser. Mätdata från sådana databaser är även förknippade med lägre grad av osäkerhet, eftersom det under senare år mer fokus på rutiner för granskning och kvalitetssäkring av data.

Vid val av väg- och järnvägstunnlar för fortsatta studier är en viktig faktor under vilken period berganläggningarna uppförts. För tunnlar som uppförts under senare år har tillståndsprocessen genomförts enligt modern mark- och miljölagstiftning. Det kan också konstateras att det finns ett tydligt samband mellan berganläggningens ålder och tillgången på data och information; kraven på redovisning och arkivering är större i dag jämfört med tidigare. Det finns dock exempel på äldre tunnlar med pågående mätprogram och som av denna anledning är lämpliga kandidater för fortsatta studier.

Baserat på data- och informationsinsamlingen är lämpliga kandidater för fortsatta studier Botniabanan, Ådalsbanan, Citybanan, Norra länken, Norrortsleden, Södra länken, Skultorpstunneln, Götatunneln, Lundbytunneln, Trollhättetunneln, Tröingebergstunneln, Hallandsåstunneln samt Lunnertunneln i Norge. Även Skreatunneln och Nygårdstunneln kan vara lämpliga kandidater, givet att mer data och information kan inhämtas än vad som gjorts inom ramen för förstudien.

Oljelager i berg

Data- och informationsinsamlingen omfattar 15 berganläggningar. I Sverige finns det över 140 berganläggningar för lagring av petroleumprodukter. Vid cirka 80 av dessa sker lagringen i oinklädda berggrum. I de övriga sker lagringen i stålcisterner i berg. SGU (Sveriges geologiska undersökning) ansvarar för avvecklingen av 31 berganläggningar som tidigare nyttjats för den statliga beredskapslagringen av petroleumprodukter.

Inför och under avvecklingen av sådana berggrum genomförs relativt omfattande hydrogeologiska mätprogram, primärt som underlag för att följa upp eventuell spridning

av petroleumprodukter i berg och system för avledning av vatten under avvecklingen, till exempel system för hydraulisk avledning.

Inom ramen för förstudien har för respektive beredskapslager tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i borrhål i berg används som underlag för en enkel, grov analys av påverkansavståndet från anläggningen till följd av avvecklingen och tillhörande vattennivåförändring i bergrummen. Genom denna analys har avståndet kunnat bestämmas till borrhål i olika riktningar från anläggningen där den uppmätta grundvattennivån uppvisar respons respektive ingen respons på avvecklingen. En försiktig slutsats baserat på den genomförda dataanalysen är att påverkansavståndet i berg kring de studerade berganläggningarna troligen är mindre än 150 m i de flesta fall.

Bedömningen är att de mätningar och prognoser som görs i samband med avvecklingen av beredskapslager för olja gör dessa berganläggningar till lämpliga kandidater för fortsatta studier.

Mellan- och slutförvaring av avfall

Data- och informationsinsamlingen omfattar fem anläggningar, varav en är belägen i Finland. Vid de berganläggningar som syftar till slutförvaring av radioaktivt avfall genomförs eller kommer det att genomföras långsiktig insamling och utvärdering av hydrogeologiska och hydrologiska data under uppförande- och driftskedena. Den långsiktiga insamlingen och bearbetningen av data motiveras av behovet av kontinuerlig uppdatering av platsbeskrivande modeller för att uppfylla de krav som ställs med tanke på anläggningarnas säkerhet efter deras förslutning. Av denna anledning bör eventuella fortsatta studier innefatta litteraturstudier samt kontakter med verksamhetsutövarna (SKB i Sverige och Posiva i Finland) för dessa berganläggningar.

Gruvor

Data- och informationsinsamlingen omfattar nio gruvor. Resultaten från förstudien visar att det vid många gruvor i Sverige i dagsläget inte genomförs någon systematisk uppföljning av grundvattenbortledningens hydrogeologiska och hydrologiska effekter i gruvans omgivning. Primära miljöfrågor i samband med gruvdrift brukar vara hantering av uppumpat gruvvatten, buller, luftburen spridning av tungmetaller och liknande.

Vid vissa gruvor har grundvattennivåmätningar genomförts på aktuell brytningsnivå inom ramen för begränsade kampanjer, i syfte att ta fram projekteringsunderlag inför en utökning av gruvan. Med dagens lagstiftning har grundvattenbortledning och dess effekter i omgivningarna fått ökad uppmärksamhet hos vissa gruvbolag under senare år. Dessa frågor kan därför aktualiseras antingen vid omprövning av gruvverksamheten eller i samband med öppnandet av en ny gruva. Även om hydrogeologiska och hydrologiska mätprogram påbörjas vid en äldre gruva, begränsar bristen på mätdata för perioden innan gruvdriften påbörjades möjligheterna till utvärdering av gruvdriftens effekter i omgivningarna möjligheterna. Gruvor bedöms därför inte primärt vara aktuella som kandidater vid eventuella fortsatta studier.

Forskningsanläggningar

Data- och informationsinsamlingen omfattar tre forskningsanläggningar, en vid Gårdsjön och två på Äspö. För dessa anläggningar sker utvärdering av hydrogeologiska, hydrologiska och andra mätdata inom ramen för projekten vid respektive anläggning. Av denna anledning bör eventuella fortsatta studier innefatta litteraturstudier avseende relevanta resultat från dessa forskningsanläggningar.

Tunnlar för överföring av el, tele och vatten

Data- och informationsinsamlingen omfattar tolv berganläggningar. Dessa typer av berganläggningar är i regel förlagda i städer, med förekomst av andra grundvattenpåverkande anläggningar och verksamheter. Många av dessa berganläggningar är vidare uppförda under 1950- och 1960-talen. Med dåtidens lagstiftning behövdes inga tillstånd för grundvattenbortledningen från tunnarna. Flertalet av de beaktade berganläggningarna av denna typ är således inte lämpliga kandidater för fortsatta studier.

Det finns dock några viktiga undantag från vad som sägs ovan. Bolmentunneln, Juktans pumpkraftverk, Rödbotunneln, Päijännetunneln samt Ormentunneln är exempel på berganläggningar som varit föremål för relativt omfattande forskning kring sådana frågor som även är aktuella i förstudien. En litteraturstudie som genomförts inom ramen för förstudien visar att fortsatta studier bör inkludera djupare studier av de datautvärderingar som genomförts inom ramen för tidigare forskningsprojekt. Detta görs lämpligen genom direkta kontakter med de forskare som varit engagerade i anläggningarna och de verksamhetsutövare som ansvarar för dem.

Kyl- och varmvattenlager

Data- och informationsinsamlingen omfattar två berganläggningar, varav en (Avesta) är en tidigare försöksanläggning och en berganläggning är i drift (Hornsberg). För berganläggningen i Hornsberg finns det omfattande data och information, inklusive grundvattennivåmätningar inför, under och efter uppförandet av anläggningen. Om anläggningen ska användas inom ramen för fortsatta studier behöver dock återkomsten till mätdata kontrolleras med verksamhetsutövarna. En komplicerande faktor är att området innehåller flera andra, äldre berganläggningar med delvis bristfällig dokumentation. Mätprogrammet vid Avesta försöksanläggning omfattade inte borrhål på större avstånd från berganläggningen, vilket innebär att den inte är lämplig kandidat för fortsatta studier.

Sammanfattning avseende mätprogram vid berganläggningar

Erfarenheterna från data- och informationsinsamlingen visar att det i många fall är mycket begränsad tillgänglighet på nödvändiga data och information för att kunna genomföra den aktuella typen av erfarenhetssammanställning. Detta beror på att de data och den information som behövs antingen inte existerar, är otillgängliga i arkiv och databaser eller inte lämnas ut av juridiska eller andra skäl.

Resultaten visar vidare att den största andelen av de befintliga mätprogrammen och tillhörande datautvärderingar styrs av strikt juridiska eller tekniska krav; få mätprogram

har tydliga frågeställningar samt genomförs och utvärderas av geovetenskapliga skäl eller av ”goodwill”. Ofta genomförs intensiva mätprogram under uppförandet av en berganläggning, men av ekonomiska skäl minskas mätprogrammets omfattning eller läggs ned helt under driftskedet. Detta medför att många mätprogram i praktiken har begränsat geovetenskapligt värde, vilket i sin tur innebär att utpekandet av lämpliga kandidater som baseras på förstudiens resultat är en viktig utgångspunkt för eventuella fortsatta studier.

Tidigare erfarenheter och resultaten från förstudien visar vidare att de hydrogeologiska och hydrologiska effekterna i omgivningarna till en berganläggning kan uppvisa stora, lokala variationer. Dessa styrs dels av strukturgeologiska och andra egenskaper i berget, dels kontakten mellan grundvatten i jord och berg samt grundvattenbildningen till jord. Data- och informationsinsamlingen visar att mätprogram ofta endast innefattar mätpunkter i berganläggningarnas omedelbara närhet. Detta beror på att nyttjande av mätdata för avgränsning av påverkansavstånd, eller andra geovetenskapliga frågor, åtminstone inte tidigare varit mätprogrammets syfte.

De stora tidsmässiga variationerna i grundvattennivåer i jord samt ytvattennivåer, som är typiska för svenska hydrometeorologiska förhållanden, innebär att det i regel är en svår uppgift att påvisa effekter av grundvattenbortledning från berganläggningar; uppgiften ställer ofta krav på referensdata. En annan försvarande faktor är skyddsåtgärder, till exempel konstjord grundvattenbildning (infiltration) som görs för att minska påverkansområdets utbredning. Sammantaget innebär ovannämnda faktorer att avgränsning av påverkansområden baserat på mätdata i många fall är svårt, och här finns det ett behov av metodutveckling för hur detta ska genomföras. Grundvattennivåer i berg uppvisar i många fall mindre nivåvariationer, vilket underlättar utvärderingen av mätdata.

3.3 Prognoser inför och under uppförande, drift eller avveckling

Under senare år har tillståndsprocessen förändrats beroende på förändringar i både lagstiftning och praxis. Praxis kan även variera mellan olika delar av landet, vilket innebär att det finns regionala skillnader i hur prognoser genomförs inför uppförandet av berganläggningar. Vidare kan det i vissa fall vara så att prognoser genomförs i flera omgångar. Detta gäller främst tunnlar med långa projekterings- och uppförandeskedan, till exempel Hallandsåstunneln, Norra länken och Citybanan i Stockholm.

Förutom lagkrav så kan verksamhetsutövarens yrkanden och förslag på villkor i tillståndsansökan styra de utredningar och prognoser som görs inför uppförandet. Den aktuella lagstiftningen är inriktats på att skydda enskilda intressen (vanligen knutna till fastigheter) och allmänna intressen såsom naturvärden. Både enskilda och allmänna intressen är således knutna till specifika geografiska lägen, vilket innebär att prognoser alltid görs för att avgränsa påverkansområdet. Det ska dock observeras att definitionen av påverkansområdet kan variera och inte alltid tydligt framgår (se avsnitt 1.3).

Inom ramen för förstudien har ett antal översiktliga jämförelser gjorts mellan prognoser och utfall vad gäller inläckage av grundvatten till väg- och järnvägstunnlar. Specifikt

har sådana jämförelser kunnat göras genom att nyttja mätdata från mätprogram för tolv berganläggningar. Vidare har prognoser gjorts i omgångar för Hallandsås samt Norra Länken. I samtliga jämförelser är det uppmätta inläckaget lägre, eller till och med mycket lägre, än vad som prognostiserats. För Botnibanans 16 tunnlar har det uppmätta inläckaget blivit högre än vad som prognostiserats för sex tunnlar. Fyra av prognoserna stämde väl med det verkliga utfallet, medan det finns ett par tunnlar för vilka uppmätt inläckage var lägre än vad som prognostiserats.

Det kan alltså konstateras att det ofta är stora skillnader mellan inläckageprognoser och verkliga utfall, och detsamma gäller prognoser för påverkansområdets utbredning. Det ska dock observeras att inläckageprognoser med tillhörande påverkansområde och dess sakägarkrets ofta brukar tas till med marginal. Med undantag för enstaka fall, där prognoser av inläckage och påverkansavstånd varit avsevärt mindre än verkliga utfall (i den mån påverkansavståndet har kunnat beläggas genom mätningar), visar data- och informationsinsamlingen att skillnader mellan prognoser och utfall inte upplevts som något större problem. Det kan dock vara så att mer precisa prognoser av påverkansområdets utsträckning är önskvärda i fall då man önskar en mer realistisk avgränsning av sakägarkretsen. I 11 kap. §7 miljöbalken framgår också att en verksamhetsutövare inte ska ”göra anspråk” på mer påverkan än nödvändigt, vilket är ett annat incitament för att eftersträva prognoser med högre precision och/eller tydligare redovisningar av prognosernas osäkerhetsmarginaler.

Inför uppförandet av vissa väg- och järnvägstunnlar har prognoser genomförts med både analytiska och numeriska modeller. För berganläggningen Norra Länken beräknades inledningsvis inläckaget med analytiska metoder och i ett senare skede med en numerisk flödesmodell. Erfarenheterna visar att den analytiska beräkningsmetoden gav ett inläckage som var lägre än det verkliga inläckaget, medan den numeriska flödesmodellen gav ett högre inläckage än det verkliga. En annan erfarenhet är från Lunnertunneln i Norge, där en analytisk beräkningsmetod dock gav ett högre inläckage än vad som erhöles som resultat från en numerisk flödesmodell.

Resultaten från data- och informationsinsamlingen visar att prognoser kan göras för olika syften. Dels görs prognoser inför uppförande och drift, dels uppdateringar/verifieringar av tidigare framtagna plats- och anläggningsspecifika modeller. Det senare gäller främst berganläggningar som syftar till slutförvaring av radioaktivt avfall, men har även genomförts inom ramen för vissa andra forskningsprojekt (till exempel Juktans pumpkraftverk). Den genomförda data- och informationsinsamlingen visar dock att prognoser ofta görs utan någon form av kalibrering mot naturliga förhållanden samt verifiering mot störda förhållanden, såsom provpumpningar.

De jämförelser mellan prognoser och utfall som varit möjliga att genomföra inom ramen för förstudien indikerar på stora variationer i prognosverkan mellan olika berganläggningar och prognosmetoder. Det kan på detta stadium endast spekuleras om orsakerna, till exempel skillnader i hur flödesprocesser och tillhörande parametrar representeras. Ur ett hydrauliskt perspektiv representerar den aktuella typen av prognoser ett svårmodellerat problem, med vattenflöden i den omättade zonen, i den

mättade zonen i jord och berg, samt dess interaktion med berganläggningen och en eventuell injekterad zon kring anläggningen. Varje prognosmetod baseras på specifika antaganden och förenklingar, som i vissa fall inte är kända hos de som genomför och/eller använder prognosresultaten. Data- och informationsinsamlingen visar att prognoser sällan baseras på konceptuella modeller och att det i många fall är oklart vilken del av det hydrogeologiska systemet som prognoserna avser. Det kan således konstateras att prognoser av hydrogeologiska och hydrologiska effekter till följd av grundvattenbortledning från berganläggningar är förknippade med ett antal öppna forskningsfrågor som behöver studeras närmare.

Kopplat till detta finns det behov att utreda diverse tillhörande frågeställningar. Ett specifikt exempel är vilken metodik som ska tillämpas i fall där grundvattenbortledning från olika, närliggande berganläggningar influerar med varandra. En annan, mer generell frågeställning som behöver belysas närmare är förundersökningsbehov och prognosverkan för olika prognosmetoder, kontra behov i tillståndsansökningar för bortledning av grundvatten. Det saknas vanligen utvärderingar och uppföljningar av hur de prognoser som legat till grund för tillståndsansökan stämmer med verkligheten. Behovet av dessa samt hur de skulle kunna genomföras bör belysas av branschens aktörer samt tillstånds- och tillsynsmyndigheter.

4 Förslag på fortsatta studier

Eventuella fortsatta studier föreslås innehålla följande moment:

- **Klassificering av berganläggningar och analys av mätdata:** I detta moment klassificeras ett urval berganläggningar utifrån hydrogeologisk typmiljö (se nedan) och mätdata analyseras på ett mer omfattande sätt än vad som varit möjligt i förstudien. Till stöd för analysen kan bland annat data från samtidiga mätningar i SGU:s grundvattennät nyttjas. Syftet är att ta fram ett underlag som i möjligaste mån kan användas för klassificering av ”typiska” effekter vid bortledning av grundvatten från berganläggningar belägna i områden med olika hydrogeologiska typförhållanden.
- **Jämförelser mellan prognoser och utfall:** I detta moment jämförs prognoser och mätdata för ett urval berganläggningar för vilka prognosresultat och mätdata är tillgängliga. Vid behov kan vissa kompletterande beräkningar göras, baserat på information och data från förundersökningar. Syftet är att utvärdera olika prognosmetoders för- och nackdelar och tillämpbarhet, samt att beskriva ”nivåer” för prognoser och tillhörande databehov för olika typer av berganläggningar och hydrogeologiska typområden.

Begreppet hydrogeologisk typmiljö (även betecknat typområde eller hydrogeologisk miljö) har använts i Sverige bland annat som utgångspunkt för att klassificera ett visst områdes sårbarhet för grundvattenförorening (Winnerstam 2005). Eklund (2002) studerade hur grundvattenkemisk sammansättning skiljde sig åt mellan ett antal hydrogeologiska typmiljöer. Klassificeringen baseras på faktorer som berggrund, jordarter, stratigrafi, hydrologiska förhållanden samt läge i förhållande till högsta kustlinjen. För varje hydrogeologisk typmiljö definieras uppsättning parametervärden med avseende på till exempel grundvattenbildning, djup till grundvattenytan och hydraulisk konduktivitet.

Hittills definierade hydrogeologiska typmiljöer har således tagits fram för andra syften än vad som är aktuellt här. Det finns därför behov av anpassade definitioner av hydrogeologiska typmiljöer, för att kunna klassificera områden med avseende på inläckage till berganläggningar och hydrogeologisk och hydrologisk omgivningspåverkan.

Baserat på resultaten från denna förstudie föreslås fortsatta studier omfatta prognoser och verkliga utfall främst vad gäller påverkansområden för trycksänkning i berg kring berganläggningar. I möjligaste mån bör fortsatta studier även beakta grundvattenavsänkning i jord samt effekter av grundvattenbortledning på ytvattennivåer och -flöden. Förstudien har dock visat dels att tillgången på mätdata ofta är begränsad vad gäller grundvatten i jord samt ytvattennivåer och -flöden, dels är trycksänkning i

berg (med undantag för schakt, dagbrott och liknande) en grundläggande förutsättning för att grundvattenbortledning från en berganläggning ska ge upphov till hydrogeologiska och hydrologiska effekter i ytsystemet.

Fortsatta studier bör i första hand inriktas på ett urval väg- och järnvägstunnlar (inklusive tunnlar i Norge) samt bergrum för beredskapslagring av olja. Denna inriktning motiveras av generellt god tillgång på data och information för dessa typer av berganläggningar. För ett stort antal av de identifierade anläggningarna har sannolikt prognoser genomförts inför uppförandet, vilket som ett resultat av förstudien har kunnat bekräftas genom data- och informationsinsamlingen. Vidare bör fortsatta studier inriktas på berganläggningar utan infiltration, eftersom infiltration försvårar tolkning av data.

I de fortsatta studierna föreslås även ingå litteraturstudier samt kontakter rörande SKB:s och Posivas program för slutförvaring av radioaktivt avfall. För dessa typer av berganläggningar genomförs eller kommer det att genomföras långsiktig insamling och utvärdering av hydrogeologiska och hydrologiska data under uppförande- och driftskedena. Den långsiktiga insamlingen och bearbetningen av data motiveras av behovet av kontinuerlig uppdatering av platsbeskrivande modeller för att uppfylla de krav som ställs med tanke på anläggningarnas säkerhet efter deras förslutning.

Referenser

- Agerstrand, T., Gustafson, G., 1980:** Norra Botkyrka – infiltration för att motverka grundvattensänkning. BFR Rapport R24:1980, Byggforskningsrådet.
- Ahlberg, P., Lundgren, T., 1977:** Grundvattensänkning till följd av tunnelsprängning. Rapport 1, Statens Geotekniska Institut, Linköping.
- Ahokas, H., Herva, S., 1993:** Summary of hydrological observations in Olkiluoto area, Eurajoki. Work Report PATU-92-35, TVO (in Finnish, English Abstract).
- Ahokas, H., Klockars, J., Lahdenperä, A., 2005:** Results of monitoring at Olkiluoto in 2003–2004 – Hydrology. Working Report 2005-28, Posiva Oy.
- Ahokas, H., Tammisto, E., Lehtimäki, T., 2008:** Baseline head in Olkiluoto. Working Report 2008-69, Posiva Oy.
- Alberts, C., Gustafson, G., 1986:** Undermarksbyggande i svagt berg. 4 – Vattenproblem och tättningsåtgärder. BeFo, Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Allan, Å., 2009:** Berggrundsundersökningar på Rönnskär avseende djupt bergförvar. Hifab AB.
- Almén, K.-E., Stenberg, L., 2005:** Äspö Hard Rock Laboratory. Characterisation methods and instruments. Experiences from the construction phase. SKB TR-05-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Anagnostou, G., 1995:** The influence of tunnel excavation on the hydraulic head. Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 19, pp. 725–746.
- Anderberg, J., 2005:** Strategi för avveckling av bergrumsanläggningar. Dnr 9073-1177/2001, Sveriges geologiska undersökning.
- Aqualog, 2010a:** Järnvägstunnel Trollhättan-Öxnared. PM – Kontrollprogram för grundvatten.
- Aqualog, 2010b:** PM – Kontroll grundvattennivå/inläckage: Trollhättan-Öxnared 2010.
- Aqualog, 2010c:** PM – Kontroll grundvatten. Västkustbanan Torebo-Heberg.
- Arenius, M., Hansen, J., Juhola, P., Karttunen, P., Koskinen, K., Lehtinen, A., Lyytinen, T., Mattila, J., Partamies, S., Pitkänen, P., Raivio, P., Sievänen, U., Vuorinen, U., Vuorio, M., 2008:** R20 summary report: The groundwater inflow management in ONKALO – the future strategy. Working Report 2008-44, Posiva Oy.
- Attanayake, P. M., Waterman, M. K., 2006:** Identifying environmental impacts of underground construction. Hydrogeology J. 14, pp. 1160–1170.

Axelsson, C.-L., Carlstedt, A., Johnson, J., Karlqvist, L., Lintu, Y., Olsson, T., Särnblad, L., 1985: Hydrogeological investigations at the storage cavern for heated water at Avesta. Hydrogeology in the Service of Man, Mémoires of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists, Cambridge, pp. 104–116.

Axelsson, C.-L., 1987: Generic modelling of the SKB rock laboratory. SKB PR-25-97-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Axelsson, C.-L., 1997a: Data for calibration and validation of numerical models at SFR Nuclear Waste Repository. SKB SKB R-98-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Axelsson, C.-L., 1997b: Slutförvar av kvicksilver – geohydrologiska förhållanden och volymer vid gruvor i Sverige. Naturvårdsverket Rapport 4774, Stockholm.

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

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

Axelsson, C.-L., Olsson, T., 1979: Grundvattenpåverkan vid tunneldrivning. Parameterbestämning med numerisk modell. Hydrogeologi vid SGU. Exempel på verksamhet inom grundvattnesektorn. SGU Rapporter och Meddelanden nr 14, Uppsala, pp. 55–62.

Banverket, 2000a: En fortsättning på projekt Hallandsås? Regeringsrapport, 13 november 2000.

Banverket, 2000b: Projekt Utredning Hallandsås. Färdigställande av järnvägstunnelarna på ett miljömässigt korrekt sätt. Banverket Södra Banregionen.

Banverket, 2001: Ansökan om tillfälligt tillstånd för bortledning av grundvatten och utsläppande av avloppsvatten under byggskedet. Bilaga 6 – Miljökonsekvensbeskrivning. Banverket Södra Banregionen.

Banverket, 2001b: Ansökan om tillfälligt tillstånd för bortledning av grundvatten och utsläppande av avloppsvatten under byggskedet. Bilaga 1 – Översiktskarta med influensområde. Banverket Södra Banregionen.

Banverket 2002: Miljökonsekvensbeskrivning. Västkustbanan, delen Torebo–Heberg. Tillståndsansökan Tröingeberg–försörjning östra. Banverket, Västra Banregionen.

Banverket, 2007a: Miljökonsekvensbeskrivning. Järnvägsplan, Citybanan i Stockholm. Diariern F07-1809/SA20.

Banverket, 2007b: Planbeskrivning, fastställelsehandling. Järnvägsplan, Citybanan i Stockholm. Diariern F07-1809/SA20.

Banverket, 2009a: Bruksanvisning för Nygårdstunneln, Bdl 635, sträckan Torbacken–Älekärr (Hede).

Banverket, 2009b: Kontrollprogram Yttre miljö, Torbacken–Hede, Slutrapport.

Banverket, 2010a: Anmälan om slutgiltiga nivåer för tunnelinläckage. Banverket, Mellersta Banregionen.

Banverket, 2010b: Kontrollprogram Yttre Miljö. Torbacken-Hede. Slutrapport. Diariernr 06-129/SA60.

Barkels, D., Parra, A. S., 2010: Analys över inläckage av grundvatten till Förbifart Stockholm för delatunnel under Lovö. Examensarbete LWR-KAND-EX-2010:06, Kungliga Tekniska Högskolan.

Bendiksen, E., 2001: Rv. 35 Grualia–Slettmoen, tunell gjennom Tveitmarktoppen og Rinilhaug (Lunner, Oppland). Botaniske verdier og lekkasjerisiko. NINA Oppdragsmedling 706, Norsk institutt for naturforskning.

Bengtsson, M.-L., Gustafson, G., 1996: Bedömning av grundvatten utgående från grundvattenmiljöer: pilotstudie i Västsverige. Rapport B 426, Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola.

Bergab, 2001: Frösundatunneln, Solna stad. PM Geohydrologi. Grundvattenförutsättningar och påverkan från tunneln.

Bergab, 2004: Frösundatunneln. Grundvattennivåer, månadsrapport november 2004. Rapport till Solna stad.

Bergab, 2005: Citybanan i Stockholm – Tillfartstunnel vid Söder Mälarstrand. Tillståndsansökan för vattenverksamhet. Tekniskt PM grundvatten. Dok. nr. P3-0507-02.

Bergab, 2007a: Kraftledningstunnel Skanstull-Solberga. Kontrollprogram.

Bergab, 2007b: Kyllager Hornsberg. Kontrollprogram geoteknik och geohydrologi. Rapport till Fortum Värme AB samägt med Stockholms stad.

Bergab, 2009a: Kraftledningstunnel Skanstull-Solberga, månadsrapport oktober–november 2009.

Bergab, 2009b: Hjorthagentunneln. Slutrapport avseende kontroll av vattenverksamheten under byggskedet. Rapport till Stockholms stad, Exploateringskontoret.

Bergab, 2009c: Kyllager Hornsberg. Slutrapport avseende kontroll av vattenverksamheten under byggskedet. Rapport till Fortum Värme AB samägt med Stockholms stad.

Bergab, 2009d: Kylvattenlager Hornsberg. Förslag till kontrollprogram för vattenverksamhet – driftskedet. Rapport till Fortum Värme AB samägt med Stockholms stad.

Bergab, 2010: Kyllager Hornsberg. Årsrapport t o m september 2010. Rapport till Fortum Värme AB samägt med Stockholms stad.

Bjørkenes, M. S., Tuttle, K. J., 2010: Karakteristiske grunnvannsfenomener i berggrunn og løsmasser i forbindelse med tunneldrivning, basert på over en decade med digitale data-tidsserier av grunnvannsnivå. Bergmekanikkdagen, Oslo, 26 nov. 2010, pp. 25.1–25.21.

Björzell, D., Enström, J., 2008: Utredning av ekonomiska och tekniska förutsättningar för värmelagring i Gävles berggrum. Examensarbete i Energisystem 30 p, Inst. för teknik och byggd miljö, Högskolan i Gävle.

Blodgett, S., Kuipers, J. R., 2002: Underground Hard-Rock Mining: Subsidence and hydrologic environmental impacts. Technical Report, Center for Science in Public Participation, Bozeman, MT, USA.

Bosson, E., Gustafsson, L.-G., Sassner, M., 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., 2009: Numerical modelling of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-72, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Botniabanan, 2008: PM – Bedömning av lagefterlevnad. Botniabanan AB.

Botniabanan, 2010: Recipient- och grundvattenkontroll i projekt Botniabanan. Botniabanan AB.

Brettum, P., Løvik, J., 2005: Sluttrapport for vannkvalitetsovervåking i Puttjernene, Østmarka. Resultater for 2004 og sammenstilling av resultatene for perioden 1998–2004. NIVA-rapport OR-4955.

Brink Bylund J., 2009: Karakterisering av grundvatten på Rönnskär – avseende djupt bergförvar. Hifab AB.

Broms, B. B., Fredriksson, A., Carlsson, L., 1976: Land subsidence in Sweden due to water-leakage into deep-lying tunnels and its effects on pile supported structures. Publ. 121, International Association of Hydrological Sciences. Proc. Anaheim Symp., December 1976, pp. 375–387.

Bäckblom, G., 2002: Experience on grouting to limit inflow to tunnels. Research and development and case studies from Sweden. Working Report 2002-18, Posiva Oy.

Carlsson, A., Christiansson, R., 2007: Construction experiences from underground works at Forsmark. Compilation Report. SKB R-07-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Carlsson, A., Olsson, T., 1978: Vatteninläckning till berganläggningar – förväntningsmodell av influensområde. Byggmästaren 1978 (11), pp. 14–16.

Cesano, D., Bagtzoglou, A., Olofsson, A., 2003: Quantifying fractured rock hydraulic heterogeneity and groundwater inflow prediction in underground excavations: the heterogeneity index. *Tunnelling and Underground Space Technology* 18, pp. 19–34.

Cesano, D, Olofsson, B., 1997: Impact on groundwater level when tunnelling in urban areas. *Groundwater in the urban environment: Problems, processes and management.* Chilton et al. (eds)., Balkema, Rotterdam, pp. 219–224.

Cesano, D., Olofsson, B., Bagtzoglou, A. 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(2), pp. 153–165.

Cesano, D., 2001: Water leakage into underground construction in fractured rocks – Geological and hydrogeological information as a basis for prediction. PhD thesis, Royal Inst. of Technology.

Citytunneln, 2002: Ansökan – tillstånd enligt miljöbalken. Citytunnelprojektet.

Citytunnelprojektet, 2002:. Evaluation of georelated matters, EVA Group C, Geohydrology. Update and re-calibration of numerical geohydrological model for Malmö Citytunnel. DHI Water and Environment.

Citytunnelprojektet, 2003: Grundvattenmodellering av station Triangeln. DHI Water & Environment.

Cuisiat F, Skurtveit E, 2003. Miljø og samfunnstjenlige tunneler. Prediction of leakage into Lunner tunnel based on discrete fracture flow models. NGI Report 20001042-2, Norwegian Geotechnical Institute.

Damgaard, P., 2006: Station Triangelns hydrogeologiska egenskaper. Analys och jämförelse av förundersökningar och verkligt utfall. Examensarbete 2007:19, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers tekniska högskola.

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

Dolk, E., 2011: Lokaliseringens betydelse vid deponering av avfall på stort djup. Ett exempel med slutförvar för kvicksilverhaltigt avfall. Examensarbete LTU-EX-2011-33380554, Luleå Tekniska Universitet.

Ejdelling, G., 1999: Geomiljön i berg, Vänersborg. Dnr 47-97-302, Statens oljelager.

Ekberg, J., 2010: Skrea backe – erfarenhetsåterföring och uppföljning av infrastrukturprojekt. Examensarbete 2010:104, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers tekniska högskola.

Eklund, H. S., 2002: Hydrogeologiska typmiljöer – verktyg för bedömning av grundvattenkvalitet, identifiering av grundvattenförekomster samt underlag för riskhantering längs vägar. Publ. A101, Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola.

- Ellison, T., 2010:** Bolmentunneln – underhåll av en mycket lång bergtunnel. Samhällsbyggaren 4(2010), pp. 7–11.
- El Tani, M., 2003:** Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. Tunneling and Underground Space Technology 18, pp. 49–55.
- Eriksson, A., 1972:** Grundvatteninläckning i bergtunnlar. GRYAB-tunnlarna. Opublicerade anteckningar, AIB, Avd. för geologi och geoteknik.
- Eriksson, K., 1982:** Clab. Byggnadsgeologisk uppföljning av transporttunnlar och bergrum – slutrapport. SKB PPM 95-3450-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson, N., Lindeström, L., 2011:** Garpenbergsgruvan. Miljökonsekvensbeskrivning gällande produktionsökning till 3 Mton.
- Florgård, C., Linnér, H., Olson, M., Olsson, S., Persson, G., Wiklander, G., 2000:** Grundvattensänkning på Hallandsås. Effekter på natur, jordbruk och skogsbruk. Samhälls- och landskapsplanering 11, Inst. För landskapsplanering Ultuna, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Flygfältsbyrån, 1995:** RV 48 - Delen Borgunda–Skövde, Tunnel under pansarövningsfältet. Vägverket, Region Väst.
- Flygfältsbyrån, 1998:** Komplettering till - Vattenbyggnadstekniks utredning, underlag för vattendomsprövning.
- Follin, S., 2008:** Bedrock hydrogeology Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Franklin, I., 2005:** Jämförelse av beräknad och verklig grundvattensänkning vid vägportar. Examensarbete UPTEC W 05 033, Inst. för Geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- Geo Logic, 2004a:** Ådalsbanan: Härnösand–Veda. Redovisning av grundvattenmodellering Bjäsholmstunneln.
- Geo Logic, 2004b:** Ådalsbanan: Härnösand–Veda. Redovisning av grundvattenmodellering Murbergstunneln.
- Geo Logic, 2004c:** Ådalsbanan: Härnösand–Veda. Redovisning av grundvattenmodellering Kroksbergstunneln.
- GEO-SLOPE, 2009:** Seepage modeling with SEEP/W 2007 – an engineering methodology (4th ed.). GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Canada.
- GHAB, 2012:** Miljörapport år 2011. Bergrum för upplag av muddermassor i Syråla. Göteborgs Hamn AB.
- Giron A., 2012:** Effekter på grund- och ytvattenförhållanden kring svenska oljelager i bergrum. Examensarbete, Uppsala universitet (pågående).

- Gnirk, P. (ed.), 1993:** Stripa Project Overview Report. Vol. II: Natural barriers. OECD/NEA International Stripa Project 1980-1992.
- Goodman, R., Moye, D., Schalkwyk, A., Javandel, I., 1965:** Ground water inflows during tunnel driving. Eng. Geol. 2, pp. 36–56.
- Graffner, O., 2007:** Miljöuppföljning bergtunnelprojekt. Banverket Expertstöd, HMSQ, Rapport 2007:2.
- Granath, Å., Ludvig, B., 1996:** Geomiljöundersökning av bergrum, etapp II, Motala – Områdesbeskrivning och hydrogeologi. Statens oljelager.
- Gryaab, 2011:** Miljörapport Syrhåla 2011. Gryaab.
- Gryaab, 2012:** Gryaabs verksamhet 2011. Gryaab.
- Gustafson, G., 2009:** Hydrogeologi för bergbyggare. Formas.
- Gustafson, G., Liedholm, M., Rhén, I., Stanfors, R., Wikberg, P., 1991:** Äspö Hard Rock Laboratory. Predictions prior to excavation and the process of their validation. SKB TR-91-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gustavsson, Y., Sund, B., Lindh, A., 1970:** Grundvattensänkning vid tunneldrivning. Byggmästaren, 49(6), pp. 23–26.
- Haapanen, R. (ed.), 2005:** Results of monitoring at Olkiluoto in 2004 – Environment. Working Report 2005-31, Posiva Oy.
- Haapanen, R. (ed.), 2006:** Results of monitoring at Olkiluoto in 2005 – Environment. Working Report 2006-68, Posiva Oy.
- Haapanen, R. (ed.), 2007:** Results of monitoring at Olkiluoto in 2006 – Environment. Working Report 2007-52, Posiva Oy.
- Haapanen, R. (ed.), 2008:** Results of monitoring at Olkiluoto in 2007 – Environment. Working Report 2008-25, Posiva Oy.
- Haapanen, A. (ed.), 2009:** Results of monitoring at Olkiluoto in 2008 – Environment. Working Report 2009-45, Posiva Oy.
- Haapanen, A. (ed.), 2010:** Results of monitoring at Olkiluoto in 2009 – Environment. Working Report 2010-45, Posiva Oy.
- Haapanen, A. (ed.), 2011:** Results of monitoring at Olkiluoto in 2010 – Environment. Working Report 2011-45, Posiva Oy.
- Hansson, K., Svensson, T., Möller, A., Larch, P., Åhlen, B., 2010:** Mätning av inläckande vatten till bergtunnlar. BeFo Rapport 104, Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- 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.

Hernqvist, L., Fransson Å, Vidstrand P, 2008: Numerical modelling of grout spread and leakage into a tunnel in hard rock – a case study. Proc. World Tunnel Congress 2008, Agra, India, Sep. 19–25, 1988, pp. 482–491.

Holmstrand, O., 2009: Banverket – Projekt Hallandsås. Ekologiskt kontrollprogram i 10 år, 1999–2008. Rapport till Banverket.

Holmøy K, Nilsen B, 2004. Site investigation results versus tunnelling conditions – a study with emphasis on water leakage based on Norwegian cases. Proc. 30th ITA World Tunnel Congress, Singapore May 2004, Vol. 2, pp. 1327–1335.

Huisman, L., 1972: Ground Water Recovery. MacMillan, London.

Hultberg, H., Ericsson, L.-O., Hultengren, S., Mossmark, F., 2005: Effekter av grundvattensänkning och vattenuttag på grundvattenbildning och vattenkvalitetsutveckling i kristallin berggrund. Slutrapport från fas 1 från fältförsök i Äspö och Gårdsjön under perioden 1997–2005. Rapport 2005:17, Inst. för Bygg- och miljöteknik, Chalmers Tekniska Högskola.

Hwang, J.-H., Lu, C.-C., 2007: A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow. Tunnelling and Underground Space Technology 22, pp. 39–46.

Hänninen, T., 1996: Summary of hydrological observations at Olkiluoto area, Eurajoki in 1993–1996. Work Report PATU-96-64, TVO (in Finnish, English Abstract).

Högsta domstolen, 2010: Beslut i mål Ö 1094-08, Hjorthagens kraftledningstunnel.

IGE, 2010: Miljökonsekvensbeskrivning för bearbetningskoncession Rönnebäcken. IGE Nordic AB.

Jansson, P.E., 1998: Simulating model for soil water and heat conditions. Description of the Soil model. Avdelningsmeddelande 98:2, Inst. för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.

J&W, 1993: Södra länken – Hydrogeologisk utredning.

Karlsrud, K., Erikstad, L., Snilsberg, L., 2003: Miljø- og samfunntjenlige tunneler. Undersøkelser og krav til innlekasje for å ivareta ytre miljø. Publ. 103, Vegdirektoratet, Teknologidivisionen, Statens Vegvesen, Norge.

Karvonen, T., 2011: Olkiluoto surface and near-surface hydrological modelling in 2010. Working Report 2011-50, Posiva Oy.

Kemakta Konsult AB, AB Jacobson & Wildmark, 1997: Geomiljön i berg etapp 2. Miljörisksbedömning och förslag till efterbehandlingsåtgärder. Anläggningen i Sala. Dnr 39-96-0222, Statens oljelager.

Klockars, J., Tammisto, E., Ahokas, H., 2007: Results of monitoring at Olkiluoto in 2006 – Hydrology. Working Report 2007-50, Posiva Oy.

Knutsson, G., Morfeld, C.-O., 2002: Grundvatten – teori & tillämpning. Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Kohler, A., Abbaspour, K. C., Fritsch, M., Schulin, R., 2001: Functional relationship to describe drains with entrance resistance. J. of Irrigation and Drainage Engineering, 127(6), pp. 355–362.

Kolybas D, Wagner P, 2007. Groundwater ingress to tunnels – The exact analytical solution. Tunnelling and Underground Space Technology 22, 23–27.

Käppalaförbundet, 2010: Käppala – Miljörapport 2010.

Landin, O., 2002: SGU ANL. 3791 – Jönköping. Miljökonsekvensbeskrivning. Dnr 9049-0168/2001, Statens oljelager.

Larsson, I., Flexer, A., Rosén, B., 1977: Effects on ground water caused by excavation of rock store caverns. Eng. Geol. 11, pp. 279–294.

Lehtimäki, T., 2001: Summary of hydrological observations at Olkiluoto area, Eurajoki, in 1996–2001. Working Report 2001-31, Posiva Oy (in Finnish, English Abstract).

Lei, S., 1999: An analytical solution for steady flow into a tunnel. Ground Water 37(1), pp. 23–26.

Lei, S., 2000: Steady flow into a tunnel with a constant pressure head. Ground Water 38(5), pp. 643–644.

Liedholm, M., 1999: Boliden Mineral – Petiknäs. Kontrollprogram för yttre miljö: Grundvattennivåer. VBB VIAK, Göteborg.

Lindström, L., Allan, Å., Eriksson, K., Lithner, C., Åström, C., 2010: Miljökonsekvensbeskrivning för deponering i underjordsförvar av Rönnskärsverkens farliga avfall. Svensk MKB AB och Hifab AB.

Lindstrand, O., Palmgren, S., 1998. Geomiljön i berg, etapp 3 Bålsta. Dnr 44-97-301, Statens oljelager.

Lipponen, A., 2002: Detection of potential pathways for contaminants into the Päijänne tunnel in Finland. NGU Bull. 439, pp. 27–32.

- Lipponen, A., 2006:** Topographical, structural and geophysical characterization of fracture zones: implications for groundwater flow and vulnerability. Boreal Environment Research Monograph 25, Finnish Environment Institute.
- LKAB, 2011a:** Miljörapport Gruvberget 2011. LKAB Yttre Miljö.
- LKAB, 2011b:** Miljörapport Masugnsbyn 2011. LKAB Yttre Miljö.
- Lundgren, T., 2010:** Slutdeponering av Rönnskärsverkens farliga processavfall i ett djupförvar i berg. Teknisk Beskrivning av Rönnskärsalternativet. Hifab AB.
- Lundman, P., 2010:** Kartläggning av undermarksprojekt i Sverige. Rapport från intervjuer med beställare och projektörer. Teknisk rapport, Avd för Geoteknologi, Luleå Tekniska Universitet.
- Lundmark, A., 2001:** Analys av grundvattennivåer vid undermarksbyggande i urban miljö. AMOV-EX-2001-32, Examensarbete, Inst. för Mark- och vattenresurser, Kungliga Tekniska Högskolan.
- Lundmark, A., Olofsson, B., 2002:** Analysis of groundwater levels in urban areas. XXII Nordic Hydrological Conference, Røros, Norway, Aug. 4–7, 2002, pp. 849–858.
- Länsstyrelserna, 2007:** Tillsynsmetoder för vattenverksamheter – en exempelsamling. Miljösamverkan Sverige.
- Löfman, J., Keto, V., Mészáros, F., 2007:** FEFTRA – Verification. VTT Research Notes 2385. Edita Prima Oy.
- Löfman, J., Mészáros, F., 2004:** Simulation of hydraulic disturbances caused by the underground rock characterisation facility in Olkiluoto, Finland. Proc. Fennoscandian 3rd Regional Workshop on Hardrock Hydrogeology, June 7–9, 2004, Helsinki, Finland, pp. 91–96.
- Löfman, J., Mészáros, F., 2005:** Simulation of hydraulic disturbances caused by the underground rock characterisation facility in Olkiluoto. Report 2005-08, Posiva Oy.
- Löfman, J., Mészáros, F., Keto, V., Pitkänen, P., Ahokas, H., 2009:** Modelling of groundwater flow and solute transport in Olkiluoto – Update 2008. Working Report 2009-78, Posiva Oy.
- Malmö stad, 2008:** Miljöredovisning för Malmö stad 2008. Malmö stad.
- Masset, O., Loew, S., 2010:** Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland. Hydrogeol. J 18, 863–891.
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., 1988:** A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1.

- Miljödomstolen, 2004:** Dom i mål nr M 274-02. Miljödomstolen, Vänersborgs tingsrätt.
- Molinero, J., Samper, J., Juanes, R., 2002:** Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks. *Eng. Geol.* 64, 369–386.
- Moon, J., Fernandez, G., 2010:** Effect of excavation-induced groundwater level drawdown on tunnel inflow in a jointed rock mass. *Eng. Geol.* 110, pp. 33–42.
- Mossmark, F., Hultberg, H., Ericsson, L.-O., 2008a:** Effekter av återhämtning av en flerårig grundvattensänkning i kristallin berggrund. Slutrapport av fas 2 från fältstudier vid Gårdsjön av grundvattenbildning och vattenkvalitetsutveckling. Rapport till IVL, Institutet för vatten- och luftvårdsforskning.
- Mossmark, F., Norin, M., Dahlström, L.-O., Ericsson, L.-O., 2008b:** Vattenkemins påverkan på undermarksanläggningar. En litteraturstudie. SveBeFo rapport K29, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning.
- Mossmark, F., 2010:** Groundwater chemistry affected by underground construction activities. Lic. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of GeoEngineering, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Mårtensson, E., Gustafsson, L.-G., Bosson, E., 2009:** Effects on surface hydrology and near-surface hydrogeology of an open repository in Laxemar. Results of modelling with MIKE SHE. SKB R-09-36, 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.
- Möller, A., 2010:** Jämförelse av tätningskoncept för ytnära bergtunnlar. Examensarbete 01/10, Avd. för jord- och bergmekanik, Kungl. tekniska högskolan.
- Naturvårdsverket, 2001:** Egenkontroll – en fortlöpande process. Handbok 2001:3, Naturvårdsverket.
- Naturvårdsverket, 2003:** Avveckling av oljelager i oinklädda berggrum. Branchfakta, utgåva 2. Naturvårdsverket, Stockholm.
- NCC, 2012:** <http://www.ncc.se/sv/Infrastruktur/Referensprojekt/Forbifart-Skultorp-vag-26-i-Skaraborg1/> (åtkomst 2012-06-21).
- NFF, 2009:** Behandling og utslipp av driftsvann fra tunnelanlegg. Teknisk rapport 09, Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk.
- Niini, H., 1968a:** Studies for the Päijänne–Helsinki water-supply tunnel (in Finnish). *Papers of the Engineering-Geol. Soc. Finland*, 2(20).

Niini, H., 1968b: Geological investigations for the Päijänne tunnel (in Finnish). Papers of the Engineering-Geological Society of Finland, 2(29).

Niini, H., 2004: Water supply of the Helsinki metropolitan area along an unlined hardrock tunnel. Proc. Fennoscandian 3rd Regional Workshop on Hardrock Hydrogeology, June 7–9, 2004, Helsinki, Finland, pp. 97–98.

Nordisk Vegteknisk Forbund, 2008: Kledninger i tunnler. Rapport 06/2008, Nordisk Vegteknisk Forbund.

Olofsson, B., 1991a: Impact on groundwater conditions by tunnelling in hard crystalline rocks. Royal Inst. of Technology, TRITA-KUT/91:1063. PhD thesis, Stockholm.

Olofsson, B., 1991b: Effects on groundwater by tunnelling in hard crystalline rocks – analysis of groundwater level data from the Bolmen tunnel, S Sweden, 1969–1987. Research report TRITA-KUT 1062, Department of Land and Water Resources, Royal Inst. of Technology.

Olofsson, B., 1991c: Groundwater conditions when tunnelling in hard crystalline rocks. A study of water flow and water chemistry at Stavershult, the Bolmen tunnel, southern Sweden. Stiftelsen Bergteknisk Forskning BeFo 160:4/91, Stockholm.

Olofsson B., 1994. Flow of groundwater from soil to crystalline rock. Applied Hydrogeology, 2, pp 71–83.

Olofsson, B., 2001: Prognostisering av grundvattenpåverkan i jord vid byggande i berg – exempel från Hallandsås. Föredrag vid Bergmekanikdag i Stockholm 14 mars 2001, Stiftelsen Bergteknisk Forskning och Svenska Bergmekanikgruppen.

Olofsson, B., Bjarnason, B., Gustafson, G., Leijon, B., Stanfors, R., Wallman, S., 1988: The Bolmen Tunnel Research Project. Final Report. Stiftelsen Bergteknisk Forskning BeFo 160:2/88, Stockholm.

Olofsson, B., Jacks, G., Knutsson, G., Thunvik, R., 2001: Grundvatten i hårt berg – en analys av kunskapsläget. KASAM (Statens råd för kärnavfallsfrågor), SOU 2001:35.

Olofsson, B., Palmgren, S., 1994: Djupinfiltration för grundvattennivåkontroll. SveBeFo Rapport 13.

Olsson, A., 1998: Länsstyrelsens tillsyn över tunnelprojektet vid Hallandsåsen. Examensarbete. Juridiska fakulteten, Lunds Universitet.

Olsson, S., 2000: Grundvattensänkning till följd av järnvägstunnel genom Hallandsås – miljökonsekvenser relaterade till förändrad kväveomsättning i mark. Examensarbete i markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet.

Olsson, T., 1976: Beräkningsmetoder för grundvattendränering. Grundförbättring, 27(1), 53–56.

Olsson, T., 1979: Hydraulic properties and groundwater balance in a soil-rock aquifer system in the Juktan area, northern Sweden. Doctoral Dissertation at the Department of Quaternary Geology, University of Uppsala, *Striae*, vol 12, 72 pp, Uppsala.

Ormann, L., 2006: Grundvattenpåverkan kring järnvägstunnlar i berg. Examensarbete UPTEC W 06 018, Inst. för Geovetenskaper, Uppsala Universitet.

Osanius, M., 2007: Upprättande av numerisk grundvattenmodell över Sundsvalls oljehamn. Examensarbete UPTEC W 06 023, Uppsala universitet.

Painter, S., Sun, A., 2005: Representation of an open repository in groundwater flow models. SKB R-05-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Palmqvist, K., Stanfors, R., 1987: The Kymmen power station. TBM tunnel. Hydrogeological mapping and analysis. SKB TR-87-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Palmstrøm, A., Nilsen, B., Pedersen, K. B., Grundt, L., 2003: Miljø- og samfunntjenlige tunneler. Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg. Publ. 104, Vegdirektoratet, Teknologiavdelningen, Statens Vegvesen, Norge.

Park, K.-H., Owatsiriwong A., Lee, J.-G., 2008: Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: A revisit. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, 206–209.

Perrochet, P., 2005: A simple solution to tunnel or well discharge under constant drawdown. *Hydrogeology J.* 13, pp. 886–888.

Persson, J., Sällfors, G., Gustafson, G., 2008: Sättningskänsliga jordar ställer höga krav på geoteknisk och hydrogeologisk kompetens och samverkan. *Bygg & Teknik* 1/08, pp. 21–24.

Pokki E., 1979: Pohjave sikysymys päijanne-tunnelissa (Effect of the construction of the Päijänne tunnel on groundwater). In Finnish. *Papers of the Engineering-Geological Society of Finland*, 13(7), pp. 1–11.

Posiva, 2003a: Programme of monitoring at Olkiluoto during construction and operation of ONKALO. Posiva 2003-05, Posiva Oy.

Posiva, 2003b: Baseline conditions at Olkiluoto. Posiva 2003-02, Posiva Oy.

Posiva, 2008: MKB 08. Utbyggnad av slutförvaringsanläggningen för använt kärnbränsle. Posiva Oy.

Posiva, 2009: Olkiluoto site description 2008. Posiva 2009-01, Posiva Oy.

Prinos, S. T., Lietz, A. C., Irvin, R. B., 2002: Design of a real-time ground-water level monitoring network and portrayal of hydrologic data in Southern Florida. *Water-Resources Investigations Report 01-4275*, U.S. Geological Survey, Tallahassee, Florida.

Ragvald, J., 2012: Ett gruvschakts påverkan på grundvattnets nivå och strömning i det omgivande berget. Examensarbete UPTEC W 12 010, Uppsala universitet.

Rhén, I., Ejdeling, G., Magnusson, J., 1998: Clab etapp 2. Grundvattenmodellering. SKB Clab etapp 2 PR 98-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rhén, I., Forsmark, T., Hartley, L., Joyce, S., Roberts, D., Gylling, B., Marsic, N., 2008: Bedrock hydrogeology. Model testing and synthesis. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-91, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rhén, I., Gustafson, G., Stanfors, R., Wikberg, P., 1997: Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995. SKB TR-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rhén, I., Hartley, L., 2009: Bedrock hydrogeology Laxemar. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-92, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Riekkola, R., Sievänen, U., Vieno, T., 2003: Controlling of disturbances due to groundwater inflow into ONKALO and the deep repository. Working Report 2003-46, Posiva Oy.

Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J., Pers, C., 2006: Grundvattenbildning i svenska typjordar – översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell. Report Series A No. 66, Inst för Geovetenskaper, Uppsala Universitet.

Runesson, K., Tängfors, H., Wiberg, N.-E., 1978: GEOFEM-G. Computer program for groundwater seepage including confined aquifer analysis. User's manual. Chalmers Tekniska Högskola.

Rønning, J. S., 2003: Miljø- og samfunntjenlige tunneler. Delprosjekt A, Forundersøkelser – Slutrapport. Publ. 102, Vegdirektoratet, Teknologiavdelningen, Statens Vegvesen, Norge.

Rämä, T., 2011: Numerical modelling of the hydrogeological effects of ONKALO in 2009. Working Report 2011-30, Posiva Oy.

Sandstedt, H., von Brömssen, M., 2001: SGU. ANL. 146 Kristinehamn. Miljöriskbedömning – naturlig återvinning. Dnr 9055-720/98, Statens oljelager.

Sandstedt, H., von Brömssen, M., 2003: Översiktlig teknisk beskrivning. SGU-anläggning 141/165, Lärbro. Dnr 9065-0645/2004, Statens oljelager.

SERCO, 2011: CONNECTFLOW Technical Summary – Release 10.3. Serco Technical & Assurance Services, Didcot, Oxfordshire, UK.

SGI, 2012: Remissyttrande – Ansökan från Boliden Mineral AB om tillstånd till verksamheten vid Rönnskärsverken och om tillstånd att under Rönnskärsverken anlägga och driva ett djupt bergförvar för permanent lagring av farligt avfall, inklusive kvicksilveravfall. Dnr 5.0-1111-0719, Statens geotekniska institut, Linköping.

Sidenvall, J., Birgersson, L., 1998: Påverkan på växtligheten av sänkt grundvattenyta vid ett djupförvar. SKB R-98-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sievänen, U., Tasapuro, V., Ahokas, H., Hellä, P., Vaittinen, T., Nummela, J., Tammisto, E., 2006: Updated hydrogeological statistics in ONKALO area and revised estimation of leakage water inflow into ONKALO tunnels. Working Report 2006-29, Posiva Oy.

SKB, 2007: Forsmark site investigation. Programme for long-term observations of geosphere and biosphere after completed site investigations. SKB R-07-34, 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: SKB bygger ut SFR – Slutförvaret för radioaktivt driftavfall. Broschyr.

SKB, 2008c: Geovetenskapligt undersökningsprogram för utbyggnad av SFR. SKB R-08-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009a: Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-09-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009b: Site engineering report Forsmark. Guidelines for underground design. Step D2. SKB R-08-83, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009c: Site engineering report Laxemar. Guidelines for underground design. Step D2. SKB R-08-88, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SL, 2011: PM - Sammanfattning av grundvattensituationen under Södra länkens driftskede.

Solna stad 2004: Frösundatunneln. Grundvattennivåer, månadsrapport november 2004.

Soveri, J., 1971: Predicting the influence of rock excavation on ground water conditions along the projected tunnel route Pajjanne–Helsinki, southern Finland. Int. Symp. On Groundwater in Crystalline Rocks, Cagliari, Oct. 25–26, 1971, pp. 167–171.

Spross, J., 2011: Observationsmetodens tillämpning på inläckande grundvatten i bergtunnlar. Fallstudie: Norra länken i Stockholm. Examensarbete 11/08, Avd. för jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan.

Stanfors, R., 1987: The Bolmen tunnel project. Evaluation of geophysical site investigation methods. SKB TR-87-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Stanfors, R., Rhén, I., Larsson, H., 1995: Utbyggnad av lagringskapacitet. Berggrundsundersökningar 1995. SKB Inkapsling Projektrapport 95-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Statens Vegvesen, 2001: Konsekvenser av tunnellekkasjer for det ytre miljø. Statusrapport 2001. Rapport 14 (intern rapport 2276), Teknologivdelingen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2002a: Naturlig tetting av tunneller. Rapport 13 (intern rapport 2274), Teknologivdelingen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2002b: Oppsummering av utførte undersøkelser og prognose for innlekkasje ved Grualiatunnelen. Rapport 15 (intern rapport 2284), Teknologivdelingen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2003: Vanninfiltrasjon – erfaringer og anbefalinger. Rapport 30 (intern rapport 2324), Teknologivdelingen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2004a: Miljø- og samfunntjenlige tunneler. Berginjeksjon i praksis. Publ. 104, Vegdirektoratet, Teknologivdelningen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2004b: Miljø- og samfunntjenlige tunneler – Sluttrapport. Publ. 105, Vegdirektoratet, Teknologivdelningen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2004c: Injeksjon – Erfaringer fra Lunnertunnelen. Rapport 23 (intern rapport 2313), Teknologivdelingen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2004d: Injeksjon – Erfaringer fra Hagantunnelen. Rapport 31 (intern rapport 2325), Teknologivdelingen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2004e: Befaring av eksisterende tunneler med lekkasjer. Vurdering av betydning for naturmiljø. Rapport 40, Teknologivdelingen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2004f: Sammenheng mellom grunnvannssenkning og tunnellekkasjer. Rapport 41 (intern rapport 2354), Teknologivdelingen, Statens Vegvesen, Norge.

Statens Vegvesen, 2005: Injeksjon – Erfaringer fra Jong-Askertunnelene. Rapport 2424, Teknologivdelingen, Statens Vegvesen, Norge.

Stockholms Tingsrätt, 1993a: VA 48/93, 1993, Akt Bil. 53.

Stockholms Tingsrätt, 1993b: VA 48/93, 1993, Akt Bil 46.

Stockholms Tingsrätt, 1993c: VA 48/93, 1993, Akt Bil. 48.

Stokes, J., Thunvik, R., 1978: Investigations of groundwater flow in rock around repositories for nuclear waste. KBS Teknisk rapport 47, Kärnbränslesäkerhet.

Strömberg, R., 2000: Tillsyn över vattenverksamheter. Genomgång av vissa rättsfrågor. Rapport 5126, Naturvårdsverket.

Sund, B., Roosaar, H., Bergman, G., 1977: Vatteninläckning i bergtunnlar – dess verkan och influensområde. BFR Rapport R36:1977, Stockholm.

Svedberg, B., von Brömssen, M., 2000: ANL. 153 Gånghäster – miljöriskbedömning. Naturlig återinringning. Dnr 9054-1084/99, Statens oljelager.

Svedberg, B., von Brömssen, M., 2001: ANL. 157 Asphyttan – miljöriskbedömning. Naturlig återinringning. Dnr 9050-1085/99, Statens oljelager.

Svensson, U., 1997a: A regional analysis of groundwater flow and salinity distribution in the Äspö area. SKB TR-97-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Svensson, U., 1997b: A site scale analysis of groundwater flow and salinity distribution in the Äspö area. SKB TR-97-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Svensson, U., Follin, S., 2010: Groundwater flow modelling of the excavation and operational phases – Forsmark. SKB R-09-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Svensson, U., Kuylenstierna, H.-O., 2010: DarcyTools version 3.4 – Concepts, methods and equations. SKB R-07-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Svensson, U., Rhén, I., 2010: Groundwater flow modelling of the excavation and operational phases – Laxemar. SKB R-09-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Svensson, U., Vidstrand P., Neretnieks, I., Wallin, B., 2008: Towards a new generation of flow and transport models for the Äspö Hard Rock Laboratory. Main results from the project Äspömodels 2005. SKB R-08-74, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Söderblom & Palm, 1998: Miljökonsekvensbeskrivning, bilaga 10. Bilaga till ansökan till vattendom. Bygghandling, väg E6, Håby–Rabbalshede, del 7. Objekt nr. 42 61 54, tunnel vid Grind.

Tammisto, E., Klockars, J., Ahokas, H., 2006: Results of monitoring at Olkiluoto in 2005 – Hydrology. Working Report 2006-54, Posiva Oy.

Thunvik, R., 1978: Caclulation of groundwater flow to rockstore caverns. PhD thesis, Dept. of land improvement and drainage, KTH.

Tolppanen, P., Syrjänen, P., 2003: Hard rock tunnel grouting practice in Finland, Sweden, and Norway – literature study. MTR Publ. 1, Finnish Tunnelling Association.

Trafikverket, 2009: Lundbytunneln – Sammanfattande rapport för Lundbytunneln 1997–2008.

Trafikverket, 2010a: Projekt Hallandsås i korthet. Broschyr.

Trafikverket 2010b: E45 Götaleden – Årsrapport för 2009 enligt kontrollprogram för uppföljning av miljöfrågor under driftskedet.

Trafikverket, 2010c: Anmälan om slutgiltiga nivåer för tunnelinläckage. Länsstyrelsen i Västernorrlands län. Ärendenr TRV 2010/38933.

Trafikverket, 2011a: TRVR Tunnel 11. Trafikverkets tekniska råd Tunnel. TRV Publ. 2011:088, Trafikverket.

Trafikverket, 2011b: TRVK Tunnel 11. Trafikverkets tekniska krav Tunnel. TRV Publ. 2011:087, Trafikverket.

Trafikverket, 2011c: E4 Förbifart Stockholm. PM Hydrogeologi. Tillståndsansökan Miljöbalken. Systemhandling. Rapport utarbetad av Konsortiet Förbifart Stockholm för Trafikverket.

Trafikverket, 2011d: Ekologisk årsrapport/Miljö. Grundvattennivåer i jord och berg. Trafikverket Projekt Hallandsås.

Trafikverket, 2011e: Prövotidsutredning – Väg E45 Götatunneln, Göteborgs Stad, Västra Götalands län.

Tunnelkommissionen, 1998a: Kring Hallandsås. Delrapport från Tunnelkommissionen, SOU 1998:60.

Tunnelkommissionen, 1998b: Miljö i grund och botten – erfarenheter från Hallandsåsen. Slutrapport från Tunnelkommissionen, SOU 1998:137.

Tyréns, 2011a. Prövotidsutredning, väg E45 Götatunneln. Bilaga 1 –grundvattennivåer i undre magasinet och berget.

Tyréns, 2011b. Prövotidsutredning, väg E45 Götatunneln. Bilaga 2 – grundvattennivåer i övre magasinet och berget.

Tyréns, 2011c: Prövotidsutredning, väg E45 Götatunneln. Bilaga 3 – inläckage och infiltration.

Vaittinen, T., Ahokas, H., Klockars, J., Nummela, J., Penttinen, T., Tammisto, E., Karvonen, T., 2008: Results of monitoring at Olkiluoto in 2007 – Hydrology. Working Report 2008-23, Posiva Oy.

Vaittinen, T., Ahokas, H., Klockars, J., Nummela, J., Penttinen, T., Tammisto, E., Karvonen, T., 2009: Results of monitoring at Olkiluoto in 2008 – Hydrology. Working Report 2009-43, Posiva Oy.

Vaittinen, T., Ahokas, H., Klockars, J., Nummela, J., Pentti, E., Penttinen, T., Karvonen, T., 2010: Results of monitoring at Olkiluoto in 2009 – Hydrology. Working Report 2010-43, Posiva Oy.

Vaittinen, T., Ahokas, H., Klockars, J., Nummela, J., Pentti, E., Penttinen, T., Pöllänen, J., Karvonen, T., Lindgren, S., 2011: Results of monitoring at Olkiluoto in 2010 – Hydrology. Working Report 2011-43, Posiva Oy.

VBB VIAK, 1992: Miljökonsekvensbeskrivning, Väg E6.21 Lundbytunneln. Nyanläggning av Bräckevägen i tunnel.

VBB VIAK, 1998: ANL. 156 – Skattkärr. Avveckling – miljökonsekvensbeskrivning. Dnr 51-97-0318, Statens oljelager.

VBB VIAK, 2000: ANL. 162 – Kälarna. Avveckling – översiktlig teknisk beskrivning. Dnr 9035-721/98, Statens oljelager.

Vieno, T., Lehtikoinen, J., Löfman, J., Nordman, H., Mészáros, F., 2003: Assessment of disturbances caused by construction and operation of ONKALO. Report 2003-06, Posiva Oy.

Vistam C, 1996. Geomiljön i berg etapp 2. Murjek ANL 164. Dnr 37-96-0215, Statens oljelager.

Voipio, S., Tammisto, E., Lehtimäki, T., Ahokas, H., 2004: Summary of long-term hydrological monitoring at the Olkiluoto Site. Working Report 2003-42, Posiva Oy.

Vägverket, 1997a: Väg 45, Götatunnel. Teknisk beskrivning till vattendomsansökan – Hydrogeologiska förhållanden.

Vägverket, 1997b: Väg 45, Götatunneln – Ett projekt i Göteborgsöverenskommelsen. Teknisk beskrivning till vattendomsansökan – Hydrogeologiska förhållanden.

Vägverket, 1997c: Väg 45, Götatunneln, Vattendomsansökan, Bilaga G.

Vägverket, 1998a: Tunnel O1588 vid Grind S Rabbelshede – Rapport över förundersökning för tunnel i berg.

Vägverket, 1998b: Väg E6 Uddervalla – Svinesund, Delen Håby-Rabbalshede, Bygghandling, del 7. Tunnel O1588 vid Grind S Rabbelshede. Grundvattenförhållanden.

Vägverket, 2000: Väg 45, Götatunneln. Kontrollprogram till vattendomsansökan. Grundvattentrycknivåer, flöden, vattenkemi, inläckage och byggnads-/anläggningsnivåer.

Vägverket, 2006: Drift och underhåll av Södra länken.

Vägverket, 2009: Prövotidsutredning avseende bortledning av grundvatten, mm från Törnskogstunneln (fd Tunbergstunneln), Sollentuna kommun, Stockholms län.

Vänersborgs Tingsrätt, 1994: Domslut, mål nr VA 29/93:5.

Vänersborgs Tingsrätt, 1998: Domslut, diarienummer 97:217.

Vänersborgs Tingsrätt, 2004: Domslut, mål nr M 321-02.

Wall, H., Andersson, J., 1999: Skattning av en akvifers hydrauliska egenskaper med stokastisk FEM – med exempel från Malmöområdet. Examensarbete ISRN LUTVDG/TVTG--99/5069--SE (1-74), Avdelningen för byggnadsmekanik, Lunds tekniska högskola.

Werner, K., 2004: Stockholm Vatten AB. Kista Science City VA-lösning. Underlag för MKB. Teknisk rapport hydrogeologi. Uppdragsnummer 1145510 600, SWECO VIAK AB.

Werner, K., 2010: Vattenverksamhet i Laxemar-Simpevarp. Clab/inkapslingsanläggning (Clink) – bortledning av grundvatten, uttag av kylvatten från havet samt anläggande av dagvattendamm. SKB R-10-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Werner, K., Hamrén U., Collinder, P., 2010: Vattenverksamhet i Forsmark (del I). Bortledning av grundvatten från slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle. SKB R-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Winnerstam, B., 2005: Ämnestransport med grundvatten i hydrogeologiska typmiljöer. Examensarbete UPTEC W05 012, Uppsala universitet.

Wladis, D., 2008: Utvärdering av hydrauliska tester i bergborrade brunnar, Rönnskär. Mark och Miljö.

Wladis, D., 2011a: Hydrogeologiska förhållanden vid Rönnskär – sammanfattning av utförda undersökningar. Mark och Miljö.

Wladis, D., 2011b: Vattenförlustmätningar i kärnborrhål, Rönnskärsverken – utvärdering och analys. Mark och Miljö.

WSP, 2004a: Slutrapport, E6 Håby–Rabbalshede. Miljöuppföljning.

WSP, 2004b: Kraftledningstunnel mellan Skanstull och Solberga, Stockholms stad. Tillhör tillståndsansökan för vattenverksamhet.

WSP, 2005: Citybanan i Stockholm. Tillståndsansökan för vattenverksamhet. PM Hydrogeologi –arbetstunnel Torsgatan. Dok. nr. P3-0313.

WSP, 2007: Prognos grundvattenbortledning tunnel. Ådalsbanan, Bollstabruk–N Nyland.

WSP, 2010: Ansökan om tillstånd enligt miljöbalken. Miljökonsekvensbeskrivning, Projekt Hallandsås. Rapport utarbetad för Trafikverket.

Opublicerade dokument

Axelsson, C.-L., Ekstav, A., Hansen, L., 1994a: Avsänkning runt gruvor. Projekt Rapport PR 44-94-026, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Axelsson, C.-L., Hansen, L., Olsson, T., 1994b: Förstudie Storuman. Juktans pumpkraftverk – Sammanställning av geologisk och hydrogeologisk information. SKB Djupförvar, PR-44-94-007, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Jönsson S., 2010: SFR – Registrering av grundvattentryck under 2010. Geosigma AB.

Landin O, okänt år: Omgivningspåverkan från bergtunnel, Törnskogstunneln. Projektuppgift i kursen Hydrogeologi för bergbyggare, Chalmers tekniska högskola.

Larsson, H., 1994: Grundvatteninflöde till några befintliga undermarksanläggningar och gruvor. SKB Djupförvar AR-94-006, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bilaga 1 – Bruttolista med berganläggningar

Berganläggning	Typ	Kommun	Län
Aitik	Gruva (dagbrott)	Gällivare	Norrbottn
Alvikstunneln (Tvärbanan)	Spårvägstunnel	Stockholm	Stockholm
Arlanda-Expresstunneln (Arlandabanan)	Järnvägstunnel	Märsta	Stockholm
Arlandatunneln (Arlandabanan)	Järnvägstunnel	Märsta	Stockholm
Avesta försöksanläggning	Varmvattenlager	Avesta	Dalarna
Bergträsktunneln (Stambanan genom övre Norrland)	Järnvägstunnel	Älvsbyn	Norrbottn
Bjässholmtunneln (Ådalsbanan)	Järnvägstunnel	Härnösand	Västernorrland
Björnböletunneln (Botniabanan)	Järnvägstunnel	Örnsköldsvik	Västernorrland
Blekholmtunneln	Vägtunnel	Stockholm	Stockholm
Bolmentunneln	Överföringstunnel	Ljungby, Klippan	Skåne
Boxvikstunneln	Vägtunnel	Orust	Västra Götaland
Båghustunneln (Mäljarbanan)	Järnvägstunnel	Jakobsberg	Stockholm
Chalmerstunneln	Spårvägstunnel	Göteborg	Västra Götaland
Citybanan	Järnvägstunnel	Stockholm	Stockholm
Citytunneln	Järnvägstunnel	Malmö	Skåne
Clab	Avfallsförvar	Oskarshamn	Kalmar
Dannemoragruvan	Gruva (under mark)	Östhammar	Uppsala
Djupförvar för farligt avfall	Avfallsförvar	Skellefteå	Västerbotten
Eugeniatunneln	Vägtunnel	Stockholm, Solna	Stockholm
Fem st. spårvägstunnlar mot Bergsjön	Spårvägstunnel	Göteborg	Västra Götaland
Finnbergstunneln	Vägtunnel	Nacka	Stockholm
Finnsjön	Gruva (under mark)	Tierp	Uppsala

Berganläggning	Typ	Kommun	Län
Fredhällstunneln	Vägtunnel	Stockholm	Stockholm
Frodeåsen (Norge)	Vägtunnel		
Frölundatunneln	Spårvägstunnel	Göteborg	Västra Götaland
Frösundatunneln	Överföringstunnel	Solna, Stockholm	Stockholm
Förfart Stockholm	Vägtunnel	Stockholm, Ekerö	Stockholm
Garpenberg	Gruva (under mark)	Ludvika	Dalarna
Gliatunneln (Grödingebanan)	Järnvägstunnel	Södertälje	Stockholm
Glumslövstunneln (Väst kustbanan)	Järnvägstunnel	Landskrona	Skåne
Glödbergstunneln (Stambanan genom övre Norrland)	Järnvägstunnel	Nordmaling	Västernorrland
Gnistängstunneln	Vägtunnel	Göteborg	Västra Götaland
Graversforstunnarna	Järnvägstunnel	Norrköping	Östergötland
Grindtunneln	Vägtunnel	Tanum	Jämtland
Gruvberget-Svappavaara	Gruva (dagbrott)	Kiruna	Norrbottnen
Grängesberg	Gruva (under mark)	Ludvika	Dalarna
Gårdatunneln (Väst kustbanan)	Järnvägstunnel	Göteborg	Västra Götaland
Gårdbergstunneln (Ådalsbanan)	Järnvägstunnel	Härnösand	Västernorrland
Gårdsjön	Forskningsanläggning	Stenungsund	Västra Götaland
Gårdstenstunneln	Vägtunnel	Göteborg	Västra Götaland
Götalandsbanan (Göteborg-Borås)	Järnvägstunnel	Göteborg-Borås	Västra Götaland
Götatunneln	Vägtunnel	Göteborg	Västra Götaland
Hallandsåstunneln	Järnvägstunnel	Båstad	Halland
Hallbergstunneln (Ådalsbanan)	Järnvägstunnel	Kramfors	Västernorrland
Hammarbytunneln (Södra länken)	Vägtunnel	Stockholm	Stockholm
Hammarkulletunneln	Spårvägstunnel	Göteborg	Västra Götaland
Helsingborgstunneln (Väst kustbanan)	Järnvägstunnel	Helsingborg	Skåne

Berganläggning	Typ	Kommun	Län
Henriksdalstunneln	Vägtunnel (ombyggnad)	Stockholm, Nacka	Stockholm
HH-tunneln	Järnvägstunnel	Helsingborg-Helsingör	Skåne
Himmelstalund (Ostkustbanan)	Järnvägstunnel	Norrköping	Östergötland
Himmerfjärdstunnarna	Överföringstunnel	Botkyrka, Södertälje, Stockholm	Stockholm
Hinseledstunneln	Vägtunnel	Karlshamn	Blekinge
Hjorthagentunneln	Överföringstunnel	Stockholm	Stockholm
Hjältatunneln (Botniabanan)	Järnvägstunnel	Örnsköldsvik	Västernorrland
Hornsberg kylvattenlager	Kylvattenlager	Stockholm	Stockholm
Hundra Knutars Backe	Vägtunnel (överdäckning)	Stockholm	Stockholm
Häggvikstunneln	Vägtunnel	Sollentuna	Stockholm
Hällåsentunneln norra (Ostkustbanan)	Järnvägstunnel	Söderhamn	Gävleborg
Hällåsentunneln södra (Ostkustbanan)	Järnvägstunnel	Söderhamn	Gävleborg
Jerikotunneln	Vägtunnel	Lerum, Partille	Västra Götaland
Juktans pumpkraftverk	Överföringstunnel	Sorsele	Västerbotten
Järva dagvattentunnel	Överföringstunnel	Stockholm	Stockholm
Kalldalstunneln (Botniabanan)	Järnvägstunnel	Örnsköldsvik	Västernorrland
Karlbergstunneln	Vägtunnel	Stockholm	Stockholm
Karlslundtunneln (Grödingebanan)	Järnvägstunnel	Botkyrka	Stockholm
Kattlebergstunneln	Järnvägstunnel	Ale	Västra Götaland
Kirunavaara	Gruva (under mark)	Kiruna	Norrbotten
Kistatunneln	Överföringstunnel	Stockholm	Stockholm
Klaratunneln	Vägtunnel	Stockholm	Stockholm
Kombinationstunnlar i Botkyrka	Överföringstunnel	Botkyrka	Stockholm
Kristineberg	Gruva (under mark)	Lycksele	Västerbotten

Berganläggning	Typ	Kommun	Län
Kroksbergstunneln (Ådalsbanan)	Järnvägstunnel	Härnösand	Västernorrland
Kymmentunneln	Överföringstunnel	Sunne	Värmland
Käppalattunneln	Överföringstunnel	Stockholm med förorter	Stockholm
Kärratunneln	Vägtunnel	Uddevalla	Västra Götaland
Ladubergstunneln (Stambanan genom övre Norrland)	Järnvägstunnel	Älvsbyn	Norrbottnen
Lerumstunneln	Överföringstunnel	Göteborg med förorter	Västra Götaland
Lidatunneln (Grödingebanan)	Järnvägstunnel	Botkyrka	Stockholm
Lindötunneln	Vägtunnel	Ekerö	Stockholm
Lundbytunneln	Vägtunnel	Göteborg	Västra Götaland
Lunnertunneln (Norge)	Vägtunnel		
Läggestatunnel 2 (Svealandsbanan)	Järnvägstunnel	Strängnäs	Stockholm
Lötentunneln	Vägtunnel	Uppsala	Uppsala
Löttingetunneln	Vägtunnel	Täby	Stockholm
Malmberget	Gruva (under mark)	Malmberget	Norrbottnen
Malmsjö tunneln (Grödingebanan)	Järnvägstunnel	Botkyrka	Stockholm
Margretebergstunneln	Järnvägstunnel	Halmstad	Halland
Marieholmstunneln	Vägtunnel	Göteborg	Västra Götaland
Masugnsbyn	Gruva (dagbrott)	Kiruna	Norrbottnen
Murbergstunneln (Ådalsbanan)	Järnvägstunnel	Härnösand	Västernorrland
Muskötunneln	Vägtunnel	Nynäshamn	Stockholm
N. Brobytunneln	Vägtunnel	Enköping	Uppsala
Nackatunneln	Vägtunnel	Nacka	Stockholm
Namntalltunneln (Botniabanan)	Järnvägstunnel	Sollefteå, Örnsköldsvik	Västernorrland
Norra Länken	Vägtunnel	Stockholm	Stockholm

Berganläggning	Typ	Kommun	Län
Norra tunneln/Tågaborgstunneln	Järnvägstunnel	Helsingborg	Skåne
Norralatunneln (Ostkustbanan)	Järnvägstunnel	Söderhamn	Gävleborg
Nuolijatunneln (Malmbanan)	Järnvägstunnel	Kiruna	Norrbotten
Nygårdstunneln (Norge-Vänerbanan)	Järnvägstunnel	Lilla Edet	Västra Götaland
Oaxentunneln	Vägtunnel (urspr. järnvägstunnel)	Södertälje	Stockholm
Oljelager i bergum	Bergum		
Olkilouto (Finland)	Forskningsanläggning/avfallsförvar		
Ormentunneln	Överföringstunnel	Stockholm	Stockholm
Pengabergettunneln (Blekinge Kustbana)	Järnvägstunnel	Karlshamn	Blekinge
Päijännetunneln (Finland)	Överföringstunnel		
Rudbeckstunneln	Vägtunnel	Örebro	Örebro
Ryatunneln	Överföringstunnel	Göteborg	Västra Götaland
Rödbotunneln	Överföringstunnel	Göteborg	Västra Götaland
Rönnbäcken	Gruva (dagbrott)	Storuman	Västerbotten
Saltsjötunneln	Överföringstunnel	Solna, Stockholm	Stockholm
SFR	Avfallsförvar	Östhammar	Uppsala
Sicklatunneln	Vägtunnel	Nacka	Stockholm
Skanstull-Solberga	Överföringstunnel	Stockholm	Stockholm
Skreatunneln (Skrea Backe)	Järnvägstunnel	Falkenberg	Halland
Skultorpstunneln	Vägtunnel	Skövde	Västra Götaland
Slutförvar av använt kärnbränsle	Avfallsförvar		Uppsala
Snarbergstunneln (Ådalsbanan)	Järnvägstunnel	Kramfors	Västernorrland
Stadsbergstunneln	Vägtunnel	Ragunda	Jämtland
Stadsgårdstunneln (Saltsjöbanan)	Järnvägstunnel	Stockholm	Stockholm

Berganläggning	Typ	Kommun	Län
Stenugnsötunneln	Vägtunnel	Stenungsund	Västra Götaland
Storängsbergstunneln	Järnvägstunnel	Norrköping	Östergötland
Strannebergstunneln (Botniabanen)	Järnvägstunnel	Örnsköldsvik	Västernorrland
Stripa	Gruva (under mark)/forskningsanläggning		Örebro
Strängnästunneln (Svealandsbanan)	Järnvägstunnel	Strängnäs	Södermanland
Stuvstatunneln	Vägtunnel	Huddinge	Stockholm
Sundbyberg (Mäljarbanan)	Järnvägstunnel (ev. överdäckning)	Sundbyberg	Stockholm
Svartvikstunneln	Järnvägstunnel	Upplands Bro	Stockholm
Söderledstunneln	Vägtunnel	Stockholm	Stockholm
Södersjukhusetstunneln (godstrafik)	Järnvägstunnel	Stockholm	Stockholm
Södertunneln	Järnvägstunnel	Helsingborg	Skåne
Södra stations tunnel (Västra Stambanan)	Järnvägstunnel	Stockholm	Stockholm
Södra tunneln (Västra Stambanan)	Järnvägstunnel	Stockholm	Stockholm
Sörvikstunneln	Vägtunnel	Uddevalla	Västra Götaland
Tingstadstunneln	Vägtunnel	Göteborg	Västra Götaland
Tomtebodastunneln	Vägtunnel	Stockholm	Stockholm
Tornehamnstunneln	Järnvägstunnel	Kiruna	Norrbotten
Tranebergstunneln (två tunnar)	Spårvägstunnel	Stockholm-Solna	Stockholm
Trollhättetunneln (Norge-Vänerbanan)	Järnvägstunnel	Trollhättan	Västra Götaland
Tröingebergstunneln (Väst kustbanan)	Järnvägstunnel	Falkenberg	Halland
Tullingeskogstunneln (Grödingebanan)	Järnvägstunnel	Tullinge	Stockholm
Tunnel genom Varberg (Väst kustbanan)	Järnvägstunnel	Varberg	Halland

Berganläggning	Typ	Kommun	Län
Tunnelbanan i Stockholm	Spårvägstunnel	Stockholm med förorter	Stockholm
Törnskogstunneln	Vägtunnel	Sollentuna	Stockholm
Ullbrotunneln	Vägtunnel	Enköping	Uppsala
Varvsbergstunneln (Botniabanan)	Järnvägstunnel	Örnsköldsvik	Västernorrland
Vindötunneln	Vägtunnel	Orust	Västra Götaland
Västlänken	Järnvägstunnel	Göteborg	Västra Götaland
Zinkgruvan	Gruva (under mark)		Örebro
Åkersbergatunneln	Vägtunnel	Österåker	Stockholm
Älidshemstunneln	Vägtunnel	Umeå	Västerbotten
Äretunneln	Vägtunnel	Äre	Jämtland
Årstadalstunneln (Tvärbanan)	Spårvägstunnel	Stockholm	Stockholm
Årstatunneln (Södra länken)	Vägtunnel	Stockholm	Stockholm
Åsatunneln (Väst kustbanan)	Järnvägstunnel	Kungsbacka	Halland
Åsbergstunneln (Botniabanan)	Järnvägstunnel	Örnsköldsvik	Västernorrland
Åsklostertunneln/Värötunneln	Vägtunnel	Varberg	Halland
Åskottunneln (Botniabanan)	Järnvägstunnel	Kramfors	Västernorrland
Åspö Hard Rock Laboratory	Forskningsanläggning	Oskarshamn	Kalmar
Ödtunnel 4 (Ådalsbanan)	Järnvägstunnel	Kramfors	Västernorrland
Österleden	Vägtunnel	Stockholm, Nacka	Stockholm

Bilaga 2 – Sammanställning av data och information för berganläggningar

1 Väg- och järnvägstunnlar

1.1 Förbifart Stockholm

Beskrivning av berganläggningen

Förbifart Stockholm är ett planerat motorvägsbygge i stockholmsregionen. Större delen av vägprojektet omfattar vägtunnlar. Förbifart Stockholm sträcker sig från Kungens Kurva i Skärholmen till Häggvik i Sollentuna kommun. Enligt nuvarande planer är planerad byggstart 2012–2013. Vägen kommer att tas i drift 8–9 år efter byggstart. Ansökan om tillstånd för vattenverksamhet är inlämnad till Mark- och miljödomstolen.

Berganläggningen i sin helhet omfattar ett komplex med bland annat huvudtunnlar, ramptunnlar, luftutbytesstationer och evakueringstunnlar. Huvudtunnlarna kommer att omfatta två parallella tunnelrör, vardera med en normalsektion på cirka 124 m² och en längd på 18,3 km. Anslutningar till huvudtunnelns två tunnelrör kommer vid fyra av sex trafikplatser att ske via ramptunnlar (vid de två övriga trafikplatserna kommer anslutning enbart att ske i ytläge). Den sammanlagda längden för ramptunnlarna är cirka 14 km och de kommer vardera att ha en tvärsnittsarea på cirka 80 m².

Vägtunnlarna kommer i genomsnitt att vara belägna cirka 50 m under markytan. Det största tunneldjupet under markytan kommer att bli cirka 130 m, vid tunnelpassage under sjön Mälaren.

De genomförda förundersökningarna omfattar bland annat geotekniska och hydrogeologiska fältundersökningar. För områdena längs tunnellinjen har det även funnits tillgång till underlag i form av ett stort antal äldre undersökningar.

Förbifart Stockholms tunnlar kommer att uppföras med konventionell borrhning och sprängning. Selektiv förinjektering kommer att genomföras längs tunnelavsnitt som saknar skadeobjekt. Längs avsnitt med skadeobjekt kommer kontinuerlig förinjektering att genomföras. Infiltration till jord kommer att tillämpas vid behov i syfte att motverka skador på sättningskänsliga byggnader.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berggrunden längs tunnellinjen består genomgående av gnejs och granit. Ur byggsynpunkt bedöms bergets kvalitet till största delen vara god. I lägre belägna områden består jordlagren av leror med mäktigheter från någon meter upp till som mest cirka 15 m. Lerorna underlagras av friktionsjord, vanligen morän. På några ställen förekommer mer vattengenomsläpplig friktionsjord i form av sand och grus.

Förbifart Stockholms huvudtunnel passerar under sjön Mälaren på tre ställen. I övrigt finns det några mindre vattendrag och våtmarker i anslutning till tunnellinjen. Längs denna varierar topografin, från Mälarens bottennivå upp till några tiotals meter höga höjdområden vid Sättra/Kungshatt. I Stockholmsregionen är grundvattenbildningen till morän cirka 220 mm per år och cirka 150 mm per år till finjord (Rodhe et al. 2006).

Sammanfattning av genomförda prognoser

I samband med tillståndsansökan för vattenverksamhet har prognoser avseende inläckage till Förbifart Stockholms berganläggningar genomförts. Vidare har prognoser genomförts av påverkansområdet för trycksänkning i berg och grundvattenavsänkning i jord genom en kombination av numerisk grundvattenmodellering (MODFLOW) och vattenbalansberäkningar (Trafikverket 2011c). För avgränsning av påverkansområdet har kriteriet för avsänkning i jord ansatts till 0,3 m, utgående från påverkade förhållanden. Motsvarande avgränsning för trycksänkning i berg har ansatts till 1 m. Prognoser har utförts dels för uppförandeskedet, dels för driftskedet. Hydrogeologisk och hydrologisk omgivningspåverkan till följd av grundvattenbortledning från Förbifart Stockholms tunnlar har även studerats av Barkels och Parra (2010).

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Mätprogrammet avseende grundvattennivåer i jord har pågått sedan 2007. Mätprogrammet omfattar grundvattenrör inom hela det bedömda påverkansområdet. För närvarande mäts enbart grundvattennivåer i det undre grundvattenmagasinet i friktionsjord. Mätprogrammet kommer att utökas med grundvattennivåmätningar i enskilda brunnar.

Underlag för fortsatta studier

Datamaterialet för Förbifart Stockholm omfattar många mätpunkter, det har hög kvalitet och det redan i dagsläget långa mätserier. Tillgängligheten på data är inte klarlagd. Generellt är det svårt för utomstående part att få tillgång till mätdata som kan komma att användas i tvister och rättegångsprocesser. Projektet är ännu inte påbörjat och kommer inte att färdigställas på minst tio år. I fortsatta studier kan det eventuell finnas möjlighet att utvärdera data från en mindre del av berganläggningen.

1.2 Södra länken

Beskrivning av berganläggningen

Vägtunnelsystemet i Södra Länken i Stockholm invigdes år 2004 och knyter samman motorväg E4/E20 Essingeleden med väg 226 (Huddingevägen), väg 73 (Nynäsvägen) och väg 222 (Värmdöleden). Södra länken har en total längd på sex km, varav 4,5 km går i tunnlar under Stockholms söderförorter (Vägverket 2006). Under uppförandet av berganläggningen användes ett flertal infiltrationsanläggningar för att upprätthålla grundvattennivåer; antalet infiltrationsanläggningar minskade under driftsskedet.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Tunnelsystemet i Södra länken passerar huvudsakligen genom fastmarksområden, med morän på berg, med mellanliggande svackor med fast lera. Vid Nynäsvägen passerar tunnarna genom Stockholmsåsens kärna (Stockholms Tingsrätt 1993a).

Topografin ovan tunnelsystemet präglas av Stockholmsåsen, som dock till stora delar är urgrävd sedan tidigare och därför inte längre framträder som en sammanhängande ås. Lokalt förekommer högre belägna områden, till exempel vid bergplintar vid Hammarbyhöjden (Stockholms Tingsrätt 1993b).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Planeringen och projekteringen av Södra länken utfördes innan införandet av miljöbalken. Detta innebär att planerings- och projekteringskedena inte innefattade några prognoser rörande inläckage av grundvatten till berganläggningen. Eftersom risken för marksättningar sågs som den främsta potentiella konsekvensen av grundvattenbortledningen från Södra länkens tunnelsystem, ansattes lägsta tillåtna grundvattennivåer i lerfyllda områden baserat på markens bedömda sättningssänslighet (J&W 1993).

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Under uppförandet av Södra länken genomfördes grundvattennivåmätningar med varierande mätintervall i 97 stycken grundvattenrör (J&W 1993). Under driftskedet har mätprogrammet reducerats, baserat på utvärdering av de mätningar som genomfördes under uppförandet (Stockholms Tingsrätt 1993c).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Efter färdigställandet av Södra länken har grundvattennivåerna ovan och kring tunnelarna generellt uppvisat motsvarande fluktuationer som innan uppförandet, och några mer omfattande förändringar av grundvattenförhållandena har inte kunnat noteras (SL 2011). Inom vissa delsträckor har dock en utvärdering påvisat sänkta grundvattennivåer under driftskedet jämfört med innan uppförandet, exempelvis där tunneln passerar Hammarbyhöjden.

Underlag för fortsatta studier

Det finns omfattande dataunderlag från det mätprogram som genomfördes under uppförandet av berganläggningen och det reducerade mätprogrammet under driftskedet. Berganläggningen är därför lämplig kandidat för fortsatta studier.

1.3 Norra Länken

Beskrivning av berganläggningen

Norra länken är ett till största delen tunnelförlagt vägsystem som är under uppförande i Stockholm och som ska förbinda Tomtebodan och Värtan. Norra länken kommer att ha en total längd på 13 km, varav 9 km i bergtunnlar och 4 km i betongtunnlar; den längsta tunnelns längd kommer att bli 4 km. Tunnelarna förläggs relativt ytligt, exempelvis förläggs tunneln under Lill-Jansskogen cirka 30 m under markytan. I berganläggningens närhet finns det ett antal befintliga berganläggningar, såsom tunnelbana samt tunnlar för överföring av vatten. De förberedande arbetena påbörjades 2006 och planen är att ta Norra länken i drift 2015.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Endast begränsad dokumentation från utrednings- eller projekteringskedena och som är åtkomlig i digital form har inhämtats. En kortfattad beskrivning har sammanställts med ledning av den så kallade "Byggnadsgeologiska kartan" (framtagen av Stockholms stad) som bas, kompletterat med kontakter med en av de konsulter som engagerats i utredning och projektering (Ulf Sundqvist, COWI, pers. komm. 2012). Norra länkens längd

innebär att den berör flera olika typer av hydrogeologiska miljöer. Geologin längs tunnelinjen karakteriseras av småbruten terräng, med omväxlande höga berglägen och dalgångar, fyllda med friktionsjord och lera. Berganläggningen förläggs nära Brunnsviken, dels norr om Norrtull, dels vid Roslagstull. Norra länken berör även delar av Brunkebergsåsen.

Majoriteten av dalgångarna längs tunnelinjen sammanfaller med identifierade sprick- och krosszoner i nordvästlig och nord-nordvästlig riktning. Norra länken löper till största delen löper i östvästlig riktning, vilket innebär att den tvärs dessa dalgångar. Vid Frescati sammanfaller däremot tunnelinjen med en nord-nordvästlig dalgång med en identifierad sprickzon. Vidare sammanfaller tunnelinjens sydvästliga sträckning väster om Norrtull med en nordost-sydvästlig dalgång med en identifierad sprickzon. Markytans nivå längs Norra länken varierar mellan några meter till några tiotals meter över havet.

Sammanfattning av genomförda prognoser

En inledande prognos genomfördes med en numerisk, tredimensionell flödesmodell. Denna prognos visade på ett inläckage av grundvatten till Norra länken på totalt 250 liter per minut, vilket bedömdes ge upphov till grundvattensänkning upp till 900 m från berganläggningen. En uppföljande prognos, som genomfördes med analytiska lösningar (grundvattenbildning till berg samt vattenbalanser), visade på ett totalt inläckage på 600 liter per minut. I prognoserna gjordes ingen skillnad på uppförande- respektive driftskedet.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Det mätprogram som genomförs under uppförandet omfattar grundvattennivåmätningar i jord och berg, mätning av mängd bortlett grundvatten (inklusive befintliga, närliggande berganläggningar) samt mängd infiltrerat vatten, ytvattennivåer samt sättningmätningar (mark, byggnader och järnvägar). Det uppmätta, totala inläckaget av grundvatten uppgår till i genomsnitt 400 liter per minut. Från mätprogrammet har man vidare kunnat konstatera grundvattenavsänkning i jord på avstånd upp till 100–175 m från berganläggningen. Vidare har man noterat en sänkning av grundvattennivån i en bergborrad brunn, belägen cirka 20 m från Norra länken. I övrigt har ingen grundvattennivåsänkning noterats (Ulf Sundqvist, COWI, pers. komm. 2012)

Jämförelser mellan prognoser och utfall

En jämförelse mellan prognoser och utfall av inläckaget visar att den första inläckageprognosen underskattade inläckaget med ungefär 40 %, medan den uppföljande prognosen överskattade inläckaget med cirka 50 %. Under vissa perioder har det totala inläckaget uppgått till nästan 600 liter per minut, men det totala inläckaget har successivt minskat i takt med att anläggningsdelar injekterats och färdigställt. Motsvarande jämförelse med avseende på grundvattenbortledningens hydrogeologiska effekter visar att mätprogrammet inte kunnat påvisa grundvattenavsänkning i jord eller grundvattensänkning i berg på större avstånd från berganläggningen är vad som erhöles från de numeriska eller analytiska beräkningarna.

Underlag för fortsatta studier

Data från mätprogrammet är tillgängliga hos Trafikverket och utvärderingar av mätdata är sammanställda i rapporter. Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

1.4 Norrortsleden: Törnskogstunneln och Löttingetunneln

Beskrivning av berganläggningen

Norrortsleden (länsväg 265) går mellan E4 vid Häggvik i Sollentuna kommun och motorväg E18 vid Rosenkälla i Täby kommun. Byggnadsarbetena påbörjades under 1990-talet och slutfördes 2008 då vägen öppnades för trafik. Vägen ingår i Yttre Tvärleden och ska förbinda länets södra och norra delar.

Trafikverket har sökt och fått tillstånd till grundvattenbortledning från två vägtunnlar längs Norrortsleden, Törnskogstunneln och Löttingetunneln. Törnskogstunneln har två tunnelrör (två körfält i vardera riktningen), vardera med en längd på 2,1 km, en höjd på 12 m och en bredd på 8 m. Tunnelns lägsta punkt är belägen cirka 50 m under markytan. Löttingetunneln har två tunnelrör (ett körfält i vardera riktningen), vardera med en längd på 1,1 km. Ett stigortsborrat schakt till Käppalattunneln vid Täby kyrkby utgör en mindre grundvattenpåverkande anläggning. Törnskogstunneln har genomförts med förinjektering längs hela sträckan.

Förundersökningarna för Törnskogstunneln omfattade bland annat geofysiska och geotekniska undersökningar. Vidare genomfördes så kallade vattenförlustmätningar i fyra sektionerade kärnbrörlar. Vidare borrades och provpumpades fem bergbrunnar och ytterligare fem observationsbrunnar i berg användes för grundvattennivåmätning.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Norrortsleden är belägen i ett område under högsta kustlinjen och som karaktäriseras av lätt kuperad terräng med berg i dagen eller tunna lager med friktionsjord i höjdområden mellanliggande lerfyllda lågområden. Berggrunden består genomgående av hårda kristallina bergarter, mestadels yngre graniter men även med inslag av gnejser. Diabas-, pegmatit- och amfibolitgångar förekommer. Berget är i regel uppsprucket i dalgångarna. Jordlagren domineras av morän och lera. Inslag av områden med sand och grus förekommer. I dalgångarna har friktionsjorden en mäktighet på upp till 8 m och leran har en mäktighet på 2–3 m. I anslutning till Törnskogstunneln finns sjön Snuggan. Sjöarna Norrviken och Väsjön är belägna knappt 200 m respektive 500 m från tunnellen. Längs Törnskogstunneln har markytan en största nivåvariation på cirka 30 m. I Stockholmsregionen är grundvattenbildningen till morän cirka 220 mm per år och cirka 150 mm per år till finjord (Rodhe et al. 2006).

Sammanfattning av genomförda prognoser

För Törnskogstunneln har påverkansområdet prognostiserats dels med en numerisk grundvattenmodell (MODFLOW), dels med vattenbalansberäkningar som kombinerats med analytiska beräkningar. De bedömningar av inläckaget av grundvatten till tunneln som anges i tillståndsansökan baseras på resultaten från de numeriska beräkningarna. Det prognostiserade inläckaget till tunneln motsvarar cirka 10 % av den potentiella grundvattenbildningen till jord, om denna antogs uppgå till 180 mm per år (reducerat till

häften bebyggda områden) i morän. Enligt genomförda prognoser skulle grundvattensänkningarna ovan och nära tunneln uppgå till maximalt 6 m.

Beräknat inläckage för Törnskogstunneln är totalt 102 liter per minut. Det prognostiserade inläckaget är fördelat på 2 liter per minut eller 6 liter per minut (per 100 m tunnelrör) för respektive täthetsklass. Tillståndet anger ingen inläckagemängd utan föreskriver i vilken omfattning tunneln ska tätas för olika täthetsklasser. Beräkningarna med den numeriska modellen visade på ett avsevärt mycket större påverkansområde än vad som erhöles med en kombination av vattenbalansberäkningar och analytiska beräkningar. I tillståndsansökan har påverkansområdet för Törnskogstunneln bedömts omfatta ett område inom 250–300 m från tunneln.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Mätprogrammet omfattar bland annat inläckagemätningar, grundvattennivåmätningar i grundvattenrör i jord, i enskilda brunnar i jord och berg samt ytvattennivåmätningar. Mätprogrammet omfattar även sättningmätningar. Mätprogrammet har reviderats mellan uppförande- och driftskedena. Enligt en provotidsutredning (Vägverket 2009) har man utifrån mätprogrammet endast kunnat observera grundvattennivåsänkning i ett fåtal mätpunkter. Ingen avsänkning har noterats i grundvattenrör i jord. I ett delområde i en dalgång, 120 m från Törnskogstunneln, noterades omfattande grundvattennivåsänkning i berg (upp till 8 m) under uppförandet av tunneln. Under driftskedet har dock grundvattennivån återhämtats. Större grundvattennivåsänkning har även konstaterats i tre närliggande enskilda brunnar efter tunneln färdigställdes; det är inte klarlagt om denna sänkning är en följd av grundvattenbortledningen från tunneln.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

I provotidsutredningen år 2009 anges ett uppmätt inläckage på 3–4 liter per minut per 100 m under Törnskogstunnelns driftskede. Uppmätt inläckage är ca 30 % lägre än beräknat. Enligt prognoser så förväntades en generell sänkning av grundvattennivåer. Enligt uppföljningen i provotidsutredningen konstaterades endast avsänkning i ett fåtal punkter och generellt kunde inga förändrade grundvattennivåer mätas.

I ett område, knutet till en dalgång, sänktes grundvattennivåer i berg kraftigt under byggtiden men nivåerna har därefter återhämtats. En kvarstående avsänkning på 8 m har uppmätts. En punkt har en pågående avsänkning i berg och uppgick 2009 till 8 m. Mätpunkten bedöms vara i kontakt med diabasgångar. Sammanfattningsvis har ingen påverkan kunnat konstateras vad gäller grundvattennivåer i jord eller på ytvattennivåer. Större avsänkning i enskilda punkter i berg har skett, dock ingen generell avsänkning.

Underlag för fortsatta studier

Datamaterialet för de två tunnarna längs Norrortsleden omfattar många mätpunkter, det har hög kvalitet och det innehåller mätserier som påbörjades något år innan uppförandet av tunnarna. Med avseende på enskilda brunnar är dock mätfrekvensen låg (en gång per år). En provotidsutredning har genomförts, inklusive resultat från mätprogrammet och bedömning av grundvattenbortledningens hydrogeologiska effekter. Datatillgänglighet

och därmed möjligheterna för fortsatta studier av tunnelarna bedöms vara goda. Norrortsleden är därför lämplig kandidat för fortsatta studier.

1.5 Citytunneln i Malmö

Beskrivning av berganläggningen

Citytunneln i Malmö är en järnvägslinje som uppfördes 2005–2010. Tunnelprojektet omfattar totalt 17 km järnväg, varav 6 km uppförts i parallella tunnlar under mark. Vidare har Malmö C byggts ut med en undermarksdel och två nya tågstationer har uppförts, varav en (Triangeln) byggts under mark. Av 6 km tunnel är 4,5 km fullortsborrade och 1,5 km är betongtunnlar. De senare har byggts i öppna schakt som sedan täcks över (så kallad ”cut-and-cover”-teknik). De fullortsborrade parallella tunnelarna har en bergtäckning på 10–20 m, en tunneldiameter på 7,9 m och de förbinds med varandra via tretton tvärtunnlar (Citytunneln 2002).

Inför uppförandet genomfördes ett omfattande förundersökningsprogram, inklusive provtagning av jord- och bergprover, geofysiska mätningar samt drygt 40 propumpningar (Citytunneln 2002, Damgaard 2006). Tunnelprojektet omfattar injektering, vattentät inklädnad i samband med fullortsborring, uttagsbrunnar i syfte att hålla undermarksdelar dränerade under uppförandet samt vattentillförsel via infiltrationsbrunnar under uppförande och drift (Citytunneln 2002). Citytunneln är uppförd under centrala Malmö, med andra grundvattenpåverkande verksamheter främst i form av energibrunnar (Citytunneln 2002).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Citytunneln är uppförd i berg som huvudsakligen utgörs av kalksten, bestående av Köpenhamnskalksten som underlagras av Bryozokalksten. Den övre delen av kalkstenen är påverkad av glaciationsprocesser och är generellt mer uppsprucken än djupare delar av kalkstenen. Jordlagren längs tunnellen består huvudsakligen av lermorän, med en mäktighet på 5–15 m. Ställvis förekommer mellanliggande silt- och sandskikt i lermoränen. Ovan tunnelsträckningen finns det anlagda kanaler och dammar (Suellskanalen och Pildammarna). Det är endast små topografiska variationer längs tunnellen.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet av Citytunneln upprättades numeriska flödesmodeller i modellverktygen MIKE SHE och MODFLOW för olika områden och för olika syften. Dessa inkluderar en regionalmodell, en modell för själva tunnelsträckningen samt olika lokala modeller som användes för att prognostisera infiltrationsbehov under uppförandet (Citytunneln 2002, Citytunnelprojektet 2002, 2003).

Det kan även nämnas att Wall och Andersson (1999) utvecklade en metod för att generera stokastiska fält i finita-elementmodeller och tillämpade denna metod på Citytunnelns då planerade sträckning.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

I tillståndsansökan (Citytunneln 2002) föreslås ett mätprogram med grundvattennivåmätningar samt avläsning av uttags- respektive infiltrationsflöden i brunnar.

I en uppföljning av projektet fram till 2008 som gjorts av Malmö stad (Malmö stad 2008) konstateras att arbetet med Citytunneln har inneburit att grundvattennivån tillfälligt måst sänkas längs delar av tunnelsträckningen, främst vid Malmö C, vid station Triangeln och i Holmaområdet. För att begränsa påverkansområdenas storlek så mycket som möjligt har vatten pumpats tillbaka till grundvattenmagasinen via infiltrationsbrunnar. Tunnlarna har klätts in i samma takt som tunnelborrningen, och man konstaterar från kommunens sida att projektet inte lett till sänkt grundvattennivå. Kommunen konstaterar vidare att inte heller driften av Citytunneln kommer att påverka grundvattennivåerna längs tunneln. Söder om den norra tunnelmynningen kommer dock permanent grundvattensänkning att göras på vissa delar av tunnelsträckningen.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Damgaard (2006) jämförde modellberäknade flöden i uttags- respektive infiltrationsbrunnar (Citytunnelprojektet 2003) med uppmätta flöden under uppförandet av station Triangeln. Enligt studien var de verkliga flödena lägre än de prognostiserade, vilket enligt studien sannolikt beror på skillnader mellan verkliga brunnsutföranden och borrhålsdjup jämfört med vad som antogs i prognoserna.

Underlag för fortsatta studier

Enligt Damgaard (2006) finns samtliga data från projektet samlade i Citytunnelns databas och arkiv. Givet omfattningen på vattentillförselåtgärderna och deras effekter, bedöms Citytunneln i Malmö inte vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

1.6 Citybanan i Stockholm

Beskrivning av berganläggningen

Citybanan är en cirka sex kilometer lång pendeltågstunnel som är under uppförande i Stockholm, med en planerad sträckning mellan Tomtebodan och station Stockholm Södra (Banverket 2007a, b). Berganläggningen omfattar flera parallella tunnelrör, tre tågstationer (varav två är nya) samt sex arbetstunnlar. Citybanan passerar under centrala Stockholm och den byggs därmed i ett område med många befintliga berganläggningar, såsom tunnelbanan samt tunnlar för överföring av el, tele och vatten. Spårtunnlarna kommer att vara belägna upp till 50 m djup under markytan, med en bergtäckning som varierar mellan 40 och 0 m.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berganläggningen uppförs i kristallint berg som i huvudsak består av yngre graniter och gnejser. Berget är av god kvalitet, men det förekommer svaghetszoner (främst i östvästlig riktning) med mer uppsprucket berg längs tunnlar (Banverket 2007a, b). Berget längs de planerade tunnlar överlagras av tunna lager med morän, sand och grus som i sin tur överlagras av finkorniga jordar, främst lera. Öster om de centrala

delarna av berganläggningen finns en större grusås, Brunkebergsåsen. Två större jordfyllda svackor finns vid Stockholms centralstation och station Stockholm Södra.

Citybanan kommer att korsa delar av Mälarens utlopp vid Riddarfjärden. Den kommer att gå i en bergtunnel till Riddarholmen och i en sänktunnel (betongtunnel) mellan Riddarholmen och Söder Mälarstrand. Området där berganläggningen uppförs har hydraulisk kontakt med Karlbergssjön och Riddarfjärden. Markytan i området där berganläggningen uppförs är belägen strax över havsnivå och uppvisar endast små topografiska variationer.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför ansökan om tillstånd för vattenverksamhet har prognoser genomförts avseende inläckage av grundvatten samt påverkansområdes utsträckning i berg och jord (Ulf Sundqvist, COWI, pers. komm. 2012). Prognoserna har utförts med tre olika metoder; analytiska metoder, numeriska metoder och stokastiska beräkningsmetoder.

Baserat på dessa prognoser bedöms påverkansområdet sträcka sig 200–500 m från berganläggningen. Osäkerhetsfaktorer har använts i de inläckageberäkningar som utgör underlag för föreslagna villkor i tillståndsansökan, dels utgående från resultat från den stokastiska modelleringen, dels utifrån erfarenheter och expertbedömningar. Dessa bedömningar baseras på en konceptuell modell av hur känslig berganläggningens omgivning är för grundvattensänkning. Marginalen som beaktar olika typer av osäkerheter utgör ungefär en tredjedel av de inläckage som föreslogs som villkor i tillståndsansökan. De inläckage som anges i ansökan varierar mellan skeden; dels olika byggsleden, dels mellan uppförandeskedet och driftskedet. För huvudtunneln (Södra spårtunneln), ansöktes om ett inläckage på 460 liter per minut (som ett månadsmedelvärde) under uppförandet och 110 l per minut då berganläggningen tagits i drift.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Det pågående mätprogrammet omfattar grundvattennivåmätningar, mätning av inläckage, mätning av infiltrerade vattenmängder samt sättningsmätningar. Mätprogrammet påbörjades 2004. För närvarande omfattar programmet bland annat grundvattennivåmätningar (en gång per vecka eller en gång per månad) i ungefär 300 mätpunkter.

Från mätprogrammet har man kunnat konstatera grundvattensänkning i grundvattenrör i jord på tre platser. Under uppförandet genomförs infiltration på ett flertal platser inom det prognostiserade påverkansområdet, dels utifrån krav i tillståndet för berganläggningen, dels i syfte att säkra att inga skador uppstår på byggnader (Ulf Sundqvist, COWI, pers. komm. 2012).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Utvärdering av data från mätprogrammet visar inte på någon generell grundvattensänkning inom det prognostiserade påverkansområdet (Ulf Sundqvist, COWI, pers. komm. 2012). Tre lokala sänkningar av grundvattennivån har konstaterats, varav en var oförutsedd. Inläckaget av grundvatten är totalt sett mindre än det

beräknade. Prognoser har gjorts för enskilda tunnelsträckor och vissa av dessa prognoser har underskattat det verkliga inläckaget, speciellt i de fall då berget kring tunnarna efter genomförd injektering har högre vattengenomsläpplighet än vad som antagits i beräkningarna. Infiltrationsåtgärder genomförs i syfte att upprätthålla lokala grundvattennivåer, vanligen vid schakter från markytan. Dessa åtgärder tycks ha fungerat enligt plan.

Underlag för fördjupade studier

Det finns en stor mängd information och data tillgänglig för berganläggningen, inklusive utredningar, mätdata och uppföljningar av det pågående tunnelbygget. Uppföljning av effekter av grundvattenbortledningen under driftskedet kommer dock inte att kunna ske förrän om ett antal år. Som nämns ovan genomförs lokala infiltrationsåtgärder på flera ställen längs tunnelsträckningen, vilket kan försvåra utvärdering av mätdata. Citybanan kan trots detta vara lämplig för fortsatta studier, givet den stora mängden information och data för berganläggningen. Tillgången till information och data för fortsatta studier har dock inte kontrollerats inom ramen för förstudien.

1.7 Hallandsås

Beskrivning av berganläggningen

Tunnelprojektet Hallandsås ingår som del i en utbyggnad av Västkustbanan till dubbelspårig järnväg. Projektet innefattar två enkelspåriga tunnlar, vardera med en längd på 8,7 km och ett inbördes avstånd på cirka 500 m. Projektet har genomgått en serie faser, utredningar och juridiska prövningar. Det ursprungliga tillståndet för vattenverksamhet erhöles 1992 och avsåg både uppförandeskedet och driftskedet. Tunneln planerades då vara klar till 1996. Tillståndet från 1991 medgav bortledande av grundvatten upp till 33 liter per sekund. Borringar med tunnelborren ”Hallborr” påbörjades 1993. Efter bara några meters borring fastände borren, varför tunneldrivningen övergick till borring och sprängning.

1994 lämnade Banverket i en ny ansökan om uppförandet av ett mellanpåslag och en arbetstunnel, i syfte att påskynda tunneldrivningen från fyra fronter. Tillståndet för vattenverksamhet som lämnades 1995 medgav bortledande av grundvatten upp till 15 liter per sekund från mellanpåslaget och arbetstunneln under uppförandeskedet, fram till 1999. På grund av omfattande inläckage påbörjades tätning med tätningssmedlet Rhoca Gil under våren och sommaren 1997. Akrylamid (en beståndsdel i Rhoca Gil) upptäcktes i vattendragen Vadbäcken och Stensån som utgjorde recipienter för det grundvatten som leddes bort från mellanpåslaget, vilket innebar att bygget stoppades i oktober 1997.

Efter byggstoppet påbörjades omfattande utredningar, dels av regeringens tunnelkommission (Tunnelkommissionen 1998a, b), dels Banverkets miljögranskningsgrupp MGG (Banverket 2000). Utredningsarbetet resulterade i en uppdaterad miljökonsekvensbeskrivning för uppförandet av tunneln (Banverket 2001a). Förnyat tillstånd för vattenverksamhet erhålls 2003 och detta tillstånd gäller till 2013. Tillståndet medgav bortledande av grundvatten upp till 100 liter per sekund för

huvudtunneln samt 15 liter per sekund från mellanpåslag och arbetstunnel. Bygget återupptogs 2004 och genomförs sedan 2005 med en annan tunnelbormaskin (Åsa). Ett nytt deltillstånd avseende arbetstunneln lämnades 2007.

En förnyad miljökonsekvensbeskrivning för uppförandeskedet togs fram 2010, eftersom tunneln inte bedömdes bli klar till 2013. Det östra tunnelröret stod klart 2010. Ett förlängt tillstånd erhöles i mitten av 2011 och gäller till 2017. Tillståndet medger bortledning av grundvatten upp till 150 liter per sekund (fram till Lyadalen) och 100 liter per sekund (efter passage av Lyadalen). Tillståndet medger även vattenuttag ur brunnar för tillförsel till vattendrag och våtmarker. Återstående tunnelavsnitt ska tätas med vattentät betonginklädning. Vidare ska löpande prognoser avseende inläckage och påverkansområde lämnas den 1 april varje år inför den fortsatta tunneldrivningen. Då tunneln är klar ska den inläckage vara högst 2 liter per sekund per km tunnelsträcka (motsvarande cirka 17 liter per sekund till huvudtunneln). Enligt nuvarande planer ska tunnelarna genom Hallandsås öppnas för trafik år 2015 (Trafikverket 2010a).

Genomförda undersökningar omfattar geologiska, geofysiska och hydrogeologiska förundersökningar inför den ursprungliga byggstarten 1992, samt efterföljande undersökningar från tunnel (Banverket 2000b).

Omfattande injektering har genomförts i samband med tunnelbygget (Bäckblom 2002). De delar av tunneln som byggts sedan 2005 har klätts in med vattentät betonglining (WSP 2010). Åtgärder i form av vattentillförsel till känsliga biotoper har förberetts men genomfördes inte fram till 2008 (Holmstrand 2009). Periodvis har vatten tillförts vattendrag i området.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berget i området utgörs huvudsakligen av gnejs med inslag av amfibolit och diabas. Hallandsås är en så kallad urbergshorst (ett höjdparti som varit utsatt för rörelser i berggrunden) i anslutning till Tornqvistlinjen (Banverket 2000b). Berget är delvis kraftigt uppsprucket.

Jordlagren domineras av siltig-sandig morän med stor variation i mäktighet (2–40 m). Ställvis förekommer partier med sorterad sand och grus. Det finns även omfattande partier med torv i kärr och mossar. I områden med mäktiga jordlager förekommer lermorän ovanpå berget. Många bäckar har sina källor uppe på åsen.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Under tunnelprojektets gång har ett antal olika prognoser genomförts, till stor del baserade på olika förutsättningar (Tunnelkommissionen 1998b). Numerisk flödesmodellering har utförts med modelleringsverktygen MODFLOW och MIKE SHE, kompletterat med analyser enligt den så kallade RiskVariabelmetoden (Olofsson 2001).

På uppdrag av tunnelkommissionen genomförde SGU modellering med MODFLOW (Tunnelkommissionen 1998a). Med ett maximalt inläckage på 33 liter per sekund (det vill säga det ursprungliga tillståndet) förväntades en bestående grundvattenavsänkning på över 10 m inom ett område på cirka 25 km². I direkt anslutning till tunneln kunde

avsänkningen överstiga 20 m. Vid en fullständig tätning av tunnarna skulle grundvattennivåerna återhämta sig inom 2–3 år. I modelleringen utgjorde grundvattenbildningen indata till modellen, medan grundvattenbildningen beräknas i MIKE SHE. SGU påtalar att avsänkningens storlek är mycket känslig för den ansatta grundvattenbildningen.

Oberoende av kommissionens arbete har andra modellberäkningar gjorts 1991 och 1998. Dessa beräkningar gav en betydligt mindre förväntad grundvattenavsänkning. Beräkningarna som gjordes 1991 utgick från förstudiens relativt begränsade dataunderlag. Enligt den ursprungliga ansökan till vattendomstolen (1991) visar modellberäkningarna på en avsänkning som understiger 1 m på större avstånd än 1 km från tunneln, om inläckaget till tunneln begränsas till 3,5 liter per sekund per km.

I miljögranskningsgruppens modellberäkningar 1998 användes MIKE SHE. Modellberäkningarna ansågs väl beskriva det då hittillsvarande tunnelbyggets effekter på grundvattennivåerna kring tunneln. I en parallell modellberäkning med MODFLOW användes en så kallad läckagekoefficient för att beräkna grundvattenbildningen till berggrunden.

Inför den förnyade ansökan för uppförandeskedet 2001 definierades ett ”praktiskt influensområde” upp till drygt 3 km från tunnelinjen (Banverket 2001). Denna bedömning av påverkansområdets maximala utbredning baseras på erfarenheter från det då hittillsvarande bygget av tunnarna.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Mätprogrammet för tunnelbygget reviderades efter byggstoppet 1997 (Holmstrand 2009). Från och med 1999 ingår en stor del av det hydrogeologiska och hydrologiska mätprogrammet i ett ekologiskt kontrollprogram som genomförs på frivillig basis), det vill säga utanför de mätningar som krävs enligt tillståndet. Det ekologiska kontrollprogrammet omfattar bland annat nederbörd, vattenföring i bäckar samt grundvattennivåmätningar i berg och jord. Antalet kontroll- och undersökningspunkter i det ekologiska kontrollprogrammet uppgår sammanlagt till cirka 800, varav cirka 400 punkter avser kontroll av grundvattennivåer i berg (ungefär hälften av mätpunkterna) och jord. Resultaten från undersökningarna enligt det ekologiska kontrollprogrammet sammanställs årligen och redovisas i en separat årsrapport.

De mätningar som görs inom ramen för det villkorade kontrollprogrammet (bortledande av grundvatten och utsläpp av avloppsvatten) sammanställs årligen i en miljörapport. Denna del av mätprogrammet omfattar bland annat grundvattennivåmätningar i 36 mätpunkter vid gränsen för det ”praktiska influensområdet” och 11 mätpunkter utanför denna gräns. Till dessa kommer mätpunkter som är villkorade enligt tillståndet för mellanpåslaget och arbetstunneln. Vidare görs kompletterande grund- och ytvattennivåmätningar inom ramen för verksamhetsutövarens egenkontroll.

Resultaten från de hydrogeologiska och hydrologiska mätningarna indikerar att det faktiska påverkansområdet för trycksänkning i berg respektive avsänkning av grundvattenytan, med något undantag, inte överskridit gränsen för det praktiska

influensområdet efter det att tunnelbygget återupptogs 2005 (Holmstrand 2009, Trafikverket 2011d).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Jämförelser mellan modellering och utfall presenteras i (Banverket 2000b).

Underlag för fortsatta studier

Data från mätprogrammet samlas i projektdatabasen HASP (Holmstrand 2009).

1.8 Lunnertunneln, Norge

Beskrivning av berganläggningen

Lunnertunneln är en vägtunnel mellan orterna Gualia och Brovoll som uppfördes 2001–2002, 40 km norr om Oslo i Norge. Lunnertunneln är 3,8 km lång, den har en tvärsnittsarea på 62 m² och en bergtäckning på 20–230 m (Holmøy and Nilsen 2004).

Omfattande förundersökningar genomfördes inför uppförandet, bland annat geologisk kartering, geofysiska undersökningar samt geologiska och hydrogeologiska undersökningar i kärnborrhål (Cuisiat and Skurtveit, 2003, Holmøy and Nilsen 2004). Dock borrades endast ett kärnborrhål ner till planerat tunneldjup och hydrogeologiska undersökningar gjordes endast i öppna (osektionerade) borrhål.

Den östra delen av tunneln, där berget består av vulkaniska och sedimentära bergarter, har systematiskt förinjekterats under uppförandet (Statens Vegvesen 2004a).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Tunneln är belägen i det så kallade Oslofältet, ett område med omfattande tidigare geologisk aktivitet och med yngre sedimentära och vulkaniska bergarter jämfört med omgivande områden, bland annat hornfels, syenit och rombporfyr. Flera svaghetszoner i berget identifierades i samband med de geofysiska undersökningarna, bland annat skjivningszoner med hög sprickintensitet samt kontaktzoner mellan bergarterna hornfels och syenit. Jordlagren längs tunneln är tunna och domineras av morän (Bendiksen 2001). Tunneln passerar under sjön Langvatnet samt ett antal mindre tjärnar och våtmarker (Bendiksen 2001).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet av tunneln etablerades en numerisk flödesmodell i modellverktyget NAPSAC för ett område på 250 000 m² kring sjön Langvatnet, med höga naturvärden och där förundersökningarna indikerat på svaghetszoner i berget längs kontaktzoner mellan hornfels och syenit (Cuisiat and Skurtveit 2003). I modellen definierades större deformationszoner deterministiskt, medan sprickor i bergmassan representerades stokastiskt. Brist på data vad gäller sprickors längd och hydrogeologiska egenskaper hanterades genom känslighetsanalyser. I modelleringen beaktades inte jordlager eller den omättade zonen.

Enligt modelleringsresultaten sammanfaller områden med trycksänkningar i berget och avsänkning av grundvattenytan med lägena för de deterministiskt ansatta

deformationszonerna. Resultaten visar att injektering längs tunnelns passage av svaghetszonen vid bergartsgränsen (hornfels/syenit) minskar inläckaget längs denna zon. Enligt resultaten erhålls dock samtidigt en ökning av inläckaget vid sidan om den injekterade tunnelsträckan, det vill säga att injekteringen ”flyttar” på inläckaget.

Statens Vegvesen (2002b) presenterar resultat från beräkningar av inläckaget med en analytisk lösning. Cuisiat and Skurtveit (2003) gör även en jämförelse mellan resultaten från den numeriska flödesmodellen med en analytisk lösning för inläckaget till en tunnel under grundvattenytan (El Tani 1999). Jämförelsen visar att en analytisk lösning överskattar inläckaget, bland annat eftersom den inte tar hänsyn till avsänkningen av grundvattenytan. Resultaten från den numeriska flödesmodelleringen indikerar en avsänkning av grundvattenytan på upp till 90 m utan injektering, medan avsänkningen blir upp till 25 m med injektering.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Enligt Holmøy and Nilsen (2004) var de inläckage som uppmättes under uppförandet avsevärt mycket större än vad som prognostiserats. Det är oklart huruvida de hydrogeologiska och hydrologiska förhållandena kring tunneln har följts upp.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Inga jämförelser har genomförts inom ramen för förstudien.

Underlag för fortsatta studier

Med tanke på de höga naturvärdena bör den hydrogeologiska och hydrologiska situationen ha följts upp. Lunnertunneln är därför lämplig kandidat för fortsatta studier.

1.9 Lundbytunneln

Beskrivning av berganläggningen

Lundbytunneln togs i drift 1997 efter tre års byggnation. Tunneln sträcker sig mellan Älvsbron och Tingstadstunneln på Hisingen i Göteborg (Trafikverket 2009). Tunneln har en inre fri bredd på 10,5 m samt förhöjda skyddsremor med en sammanlagd bredd på 1,5 m. Berganläggningen består även av två fläktstationer, tre elstationer och en pumpstation (Vänersborgs Tingsrätt 1994). Berget har injekterats och återinfiltration genomförs i syfte att upprätthålla grundvattennivåerna.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Tunneln är belägen i ett tätbebyggt område, bestående av bergsrygggar med mellanliggande lerfyllda dalgångar i nord-sydlig riktning. Bergsryggarna har endast tunna jordlager. Friktionsjord och torrskorpelera förekommer i anslutning till höjdpartierna. Dalgångarna utfylls av sättningssärliga lerlager av olika mäktighet (Vänersborgs Tingsrätt 1994).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Enligt tillståndet för grundvattenbortledningen bedömdes inför uppförandet av berganläggningen att grundvattenbortledningen skulle uppgå till 5 liter per minut per

100 m tunnelsträckning längs tunnelsektion 0/600–1/1200 m och 2,5 liter per minut per 100 m tunnelsträckning längs tunnelsektion 1/200–2/2700 m (Vänersborgs Tingsrätt 1994). I tillståndet anges att det totala inläckaget ska understiga 135 liter per minut. Vidare anges som villkor att grundvattenytan inte får sänkas av kring berganläggningen i syfte att förhindra marksättningar. Enligt miljökonsekvensbeskrivningen ska bortlett grundvatten återinfiltreras med ett bedömt infiltrationsbehov på 2–10 liter per minut beroende på årstid (VBB VIAK 1992).

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Kring berganläggningen mäts grundvattennivåer inom ramen för ett kontrollprogram som påbörjades 1998, det vill säga ett år efter det att anläggningen togs i drift. Kontrollprogrammet omfattar mätningar i 11 enskilda brunnar och 75 observationsrör. I tillståndet för vattenverksamhet från 1994 anges som villkor att mätningarna ska utföras en gång per månad i två år det att berganläggningen uppförts (Trafikverket 2009).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Enligt kontrollprogrammet har grundvattennivåer i berg kring anläggningen sänkts sedan byggstarten. I ett antal observationsrör, främst sydost om anläggningen, har uppmätta grundvattennivåer tidvis varit under de så kallade larmnivåer (nivåer vid vilka olika åtgärder ska vidtas) som etablerades. Den uppmätta grundvattennivåsänkningen var störst under byggskedet. I samband med ett infiltrationsförsök som genomfördes 2006 erhöles ingen respons i observationsrören sydost om anläggningen, vilket tolkades som att dessa rör inte har hydraulisk förbindelse med de spricksystem som är i kontakt med infiltrationsbrunnen (Trafikverket 2009). Enligt Trafikverket (2010b) har larmnivåerna inte underskridits sedan 2009. Infiltration och mätning av infiltrerad vattenmängd utförs kontinuerligt i en bergborrad brunn. Under driftskedet har infiltrationsflödet i snitt varit 5–6 liter per minut.

Under bygg- och driftskedet har det totala uppmätta inläckaget inte vid något tillfälle överskridit maximalt tillåtet inläckage enligt angivna villkor. I genomsnitt har inläckaget uppgått till i genomsnitt cirka 25 liter per minut. Inläckaget har endast uppvisat små årstidsvariationer. Mellanårsvariationerna har dock varit relativt stora, exempelvis med ett totalt inläckage på i genomsnitt cirka 42 liter per minut under år 2008 (Trafikverket 2009).

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen bedöms inte vara lämplig kandidat för fortsatta studier eftersom infiltration genomförs.

1.10 Götatunneln

Beskrivning av berganläggningen

Götatunneln under centrala Göteborg uppfördes under perioden 2000–2006. Berganläggningen består bland annat av två parallella, 1 km långa bergtunnlar samt två parallella, 600 m långa betongtunnlar. Vidare innehåller anläggningen stödmur- och trågkonstruktioner vid tunnelmynningarna samt två arbetstunnlar. Varje bergtunnel har en bredd på knappt 16 m och en höjd på cirka 7,5 m. Tunnlarna har ett inbördes avstånd

på 10 m och förbinds via tvärtunnlar på inbördes cirka 150 m inbördes avstånd (Vägverket 1997a).

Förundersökningarna inför uppförandet omfattade bland annat borrhning och undersökningar i kärnborrhål, provpumpning i hammarborrhål, samt grundvattennivåmätningar i jord och berg. Bergborrhålens placering styrdes av lägena för tolkade vattenförande sprickor (Vägverket 1997b).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Götatunneln är uppförd i berg som utgörs av grå gnejs med inslag av amfibolit och pegmatit (Vägverket 1997a). Berget innehåller grundvattenförande sprickor. Tunneln löper parallellt med en bergsrygg i nord-nordostlig till syd-sydvästlig riktning. Jordlagren består av fyllnadsmassor och torrskorpelera, som underlagras av lera med låg vattengenomsläpplighet och som i sin tur underlagras av friktionsjord (Trafikverket 2011e). En sänkning av grundvattnets tryckhöjd i det slutna grundvattenmagasinet med friktionsjord till följd av grundvattenbortledningen från berganläggningen kan ge upphov till marksättningar (Trafikverket 2011e). Markytan har endast små nivåvariationer längs tunnelinjen. Den bedömda potentiella grundvattenbildningen till jord varierar mellan 25 och 200 mm per år, beroende på jordlagerförhållanden och markanvändning (Vägverket 1997a).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet av Götatunneln genomfördes prognoser av bland annat inläckage av grundvatten, grundvattensänkning kring tunneln samt behov av konstgjord infiltration (Vägverket 1997b). Prognoser har gjorts med den numeriska flödesmodellen SEEP (GEO-SLOPE 2009).

I syfte att reducera risken för marksättningar till följd av grundvattenbortledningen, föreslogs i miljökonsekvensbeskrivningen ett larmvärde på 1 m sänkning av grundvattnets tryckhöjd. Under uppförandet krävdes lokalt större grundvattennivåsänkning än 1 m i samband med schaktarbeten. Inför sådana schaktarbeten fanns förberedelse för konstgjord infiltration för att motverka marksättningar (Vägverket 1997c).

Enligt de ovannämnda prognoserna skulle grundvattennivåsänkningen i det undre grundvattenmagasinet uppgå till högst 1 m nära Götatunneln efter genomförda injekteringsåtgärder. Influensavståndet från tunneln (definierat som gränsen för detekterbar grundvattennivåförändring) beräknades uppgå till maximalt 120 m från tunneln.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

I samband med tillståndsansökan inlämnades ett förslag till kontrollprogram för vattenverksamheten (Vägverket 2000). I tillståndet anges att slutgiltiga villkor för vattenverksamheten ska fastställas efter en prövotid. Kontrollprogrammet reviderades därför under perioden 2007–2009. Kontrollprogrammet innefattar mätningar av inläckage av grundvatten, konstgjord infiltration, grundvattennivåer i det övre magasinet (fyllnadsmassor och torrskorpelera) och i det undre magasinet (friktionsjord).

Vidare ingår sättningsmätningar samt uppföljning av påverkan från andra vattenanläggningar.

Enligt de mätningar som genomfördes under prövotiden har grundvattenbortledningen från Götatunneln inte gett upphov till någon betydande sänkning av grundvattennivåerna i jordlagren. Det har därför beslutats att reducera antalet mätpunkter (Trafikverket 2011e).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

En utvärdering har genomförts avseende grundvattennivådata från perioden 1993–2010 (Tyréns 2011a, b). Enligt utvärderingen har grundvattenbortledningen från Götatunneln inte gett upphov till någon grundvattennivåsänkning i det undre grundvattenmagasinet, dock har utvärderingen påvisat en avsänkning av grundvattenytan i det övre grundvattenmagasinet; avsänkningen understiger gränsvärden i berganläggningens tillstånd för vattenverksamhet. Det totala inläckaget av grundvatten till berganläggningen har under den aktuella perioden varierat mellan 14–26 liter per minut. Infiltrationsflödet har under perioden 2006–2011 varierat mellan 2 och 8 liter per minut (Tyréns 2001c). Det har inte kunnat påvisas några ökade marksättningar till följd av uppförande och drift av Götatunneln (Trafikverket 2011e).

Underlag för fortsatta studier

Det är god tillgång på data för fortsatta studier. Infiltrationsåtgärderna kan dock försvåra datautvärdering.

1.11 Grindtunneln

Beskrivning av berganläggningen

Grindtunneln längs motorväg E6 i Tanums kommun är en vägtunnel med en längd på cirka 160 m. Tunneln är belägen ungefär 15 m under markytan och innehåller två tunnelrör. Tunneln togs i drift år 2000 (WSP 2004a).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Grindtunneln är uppförd i berg som främst består av massformig rödaktig medel- till grovkornig granit och grå medelkornig gnejsgranit. I bergmassan förekommer pegmatitgångar (Vägverket 1998a). Ur bergbyggnadssynpunkt har berget i området god kvalitet. Sprickor och sprickzoner som påträffades kring tunneln injekterades under uppförandet. Området domineras av berg i dagen eller områden med endast liten jordlagermäktighet. Området väster om tunneln domineras av friktionsjord med en mäktighet på 4–5 m, medan det ovan tunneln förekommer jordfyllda svackor med större jordlagermäktighet (Vägverket 1998b). Grundvattenytan i området uppvisar stora variationer under året (Vägverket 1998a).

Markytans nivå i området ovan och kring tunneln har en amplitud på cirka 30 m (Vägverket 1998a). Beräkningen av den potentiella grundvattenbildningen till jord utgår från att halva området består av berg i dagen och den andra hälften av morän på berg. Vidare antogs att 30 % av nederbörden bidrar till grundvattenbildningen (Vägverket 1998b).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet bedömdes att det totala inläckaget till tunneln under drift skulle bli 11–16 liter per minut, beroende på antaganden om bergets genomsnittliga vattengenomsläpplighet och grundvattenytans läge (Vägverket 1998b). Enligt prognoserna, som genomfördes med analytiska lösningar, fanns behov av injektering i syfte att underskrida det maximalt tillåtna inläckaget på 5 liter per minut per 100 m tunnel (Vägverket 1998b). Inför uppförandet bedömdes att grundvattennivån i berget ovan tunneln och i dess omedelbara närhet skulle sänkas till följd av grundvattenbortledningen under uppförandet.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Kontrollprogrammet för Grindtunneln omfattar bland annat månadsvisa grundvattennivåmätningar i tolv grundvattenrör i jord under perioden 1997–2002, det vill säga innan, under och efter uppförandet (WSP 2004a). Grundvattenrören togs successivt ur drift och då tunneln togs i drift år 2000 innefattade kontrollprogrammet endast grundvattennivåmätningar i tre grundvattenrör. I kontrollprogrammet ingår även mätning av inläckande mängd grundvatten under uppförandet och ett år efter det att tunneln färdigställts. Enligt villkoren i tillståndet ska återkommande vegetationsinventeringar utföras i fem år efter tunneln färdigställts. Baserat på grundvattennivåmätningarna och vegetationsinventeringarna ska en bedömning göras grundvattenbortledningens eventuella konsekvenser för vegetationen ovan och kring tunneln.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Grundvattenytans stora variationer under året har försvårat utvärderingen av grundvattennivåmätningarna (WSP 2004a) och mätningarna har därför upphört.

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen är inte lämplig kandidat för fortsatta studier, bland annat eftersom det endast finns få mätdata för perioderna före respektive efter det att berganläggningen uppfördes.

1.12 Trollhättetunneln

Beskrivning av berganläggningen

Trollhättetunneln uppfördes under perioden 2005–2006. Tunneln är 3,5 km lång och utgör en del av järnvägssträckan Trollhättan-Öxnared. Järnvägssträckan är en utbyggnad av Norgebanan/Vänerbanan och tunneln öppnades för trafik år 2006.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Tunneln sträcker sig genom ett område som domineras av berg i dagen, med ställvis förekomst av postglacial finsand, sandig morän och glacial lera. Berggrunden där tunneln är belägen utgörs av kristallint berg med deformationszoner som korsar sträckningen av tunneln, framförallt i sydvästlig till nordostlig riktning. Markytan ovan tunneln har nivåvariationer på upp till 10 m. Enligt Rodhe (2006) är grundvattenbildningen i morän i detta område mellan 300–375 mm per år.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inget underlagsmaterial rörande genomförda prognoser har inhämtats inom ramen för förstudien.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Inför uppförandet av berganläggningen fastställdes ett kontrollprogram som specificerar mätpunkter och mätintervall med avseende på inläckage till tunneln samt grundvattennivåer i omkringliggande områden (Aqualog 2010a).

Grundvattennivåmätningar har genomförts utmed sträckan Trollhättan-Öxnered sedan 1999. Under uppförandet 2004–2006 genomfördes månatliga grundvattennivåmätningar i ett 40-tal grundvattenrör kring tunneln. Kontrollprogrammet under driftskedet planeras pågå fram till år 2031 och omfattar för närvarande 16 mätpunkter. Dessa utgörs av sex bergborrade dricksvattenbrunnar, en bergvärmebrunn samt nio grundvattenrör och bergborrhål (Aqualog 2010a).

Inläckagemätningarna visar på ett inläckage under driftskedet på cirka 300 liter per minut (Aqualog 2009). Grundvattennivåmätningarna tyder på att grundvattennivåerna i berg kring tunneln har sänkts ett par till några meter sedan uppförandet påbörjades. Sedan år 2004 har dock grundvattennivåerna uppvisat motsvarande fluktuationer som för perioden innan uppförandet. Utvärderingarna visar vidare att grundvattenbortledningen inte gett upphov till några förändringar av grundvattennivåer i jord kring tunneln (Aqualog 2010b).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Inga jämförelser är möjliga att göra i nuläget.

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

1.13 Nygårdstunneln

Beskrivning av berganläggningen

Nygårdstunneln i Lilla Edets kommun i Västra Götalands län är en dubbelspårig järnvägstunnel som uppfördes under perioden 2005–2008 och togs i drift år 2008. Tunneln har en total längd på cirka 3 km, en bredd på cirka 13 m och en höjd på cirka 8 m. Berganläggningen omfattar även en cirka 600 m lång servicetunnel, med en bredd på 5 m och en höjd på drygt 5 m. Berganläggningen omfattar vidare en parallelltunnel med en längd på knappt 2 km (Banverket 2009a). Spårtunneln och parallelltunneln är förbundna med fem tvärtunnlar.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berganläggningen är uppförd i ett område med bergryggar med berg i dagen eller tunna moränlager, med mellanliggande lågområden med 1–2 m mäktiga jordlager (Vänersborgs Tingsrätt 2004). I området finns det även större dalgångar, med förekomst av lerlager med en mäktighet på upp till 20 m och som underlagras av tunna

moränlager. De geologiska och geotekniska förundersökningarna visade på generellt goda förhållanden ur bergbyggnadssynpunkt.

Den högsta punkten ovan tunneln är belägen vid den norra tunnelmynningen, från vilken tunneln sluttar mot den södra tunnelmynningen (Vänersborgs Tingsrätt 2004). Avrinningen i området kan överslagsmässigt beräknas till cirka 450 mm per år. Om cirka 10 % av avrinningen anta bidra till grundvattenbildningen, erhålls en potentiell grundvattenbildning till jord på ungefär 45 mm per år.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet bedömdes att inläckaget av grundvatten till berganläggningen skulle uppgå till 6–20 liter per minut per 100 m tunnel utan injekteringsåtgärder. Med injekteringsåtgärder bedömdes att inläckaget skulle uppgå till 5–9 liter per minut per 100 m tunnel under uppförandet och 2–5 liter per minut per 100 m tunnel under drift (Vänersborgs Tingsrätt 2004).

Inför uppförandet bedömdes vidare att grundvattennivåer i berg kring anläggningen skulle komma att sänkas, från någon meter upp till lokalt 20 m. På ett avstånd av 100 m från tunneln bedömdes att den största sänkningen skulle uppgå till högst några meter. Vid tunnelns norra påslag finns mäktiga lerlager, i vilka grundvattennivåsänkningen bedömdes komma att uppgå till 1–2 m.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Som utgångspunkt för kontrollprogrammet genomfördes en inventering av enskilda brunnar i området kring den planerade berganläggningen inför uppförandet. Inom ramen för kontrollprogrammet genomförs grundvattennivåmätningar och även portrycksmätningar varje månad. Under uppförandet genomfördes tätare mätningar (en eller flera gånger per vecka) i vissa känsliga delområden. Enligt villkor i tillståndet för grundvattenbortledningen ska grundvattennivåmätningar genomföras fyra gånger per år fram till år 2021.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Uppmått inläckage har periodvis, främst i samband med riklig nederbörd, marginellt överskridit det gränsvärde som anges i villkor i tillståndet för grundvattenbortledningen (Banverket 2009b).

De grundvattennivåmätningar som utförts inom ramen för kontrollprogrammet visar att grundvattennivåerna i både enskilda jordbrunnar och enskilda, bergborrade brunnar varierar mellan torr- och våtperioder (Banverket 2009b). Utvärderingar av grundvattennivåmätningarna visar på en sänkning på 2–3,5 m under år 2008, det vill säga det år då berganläggningen togs i drift (Banverket 2009b).

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier, bland annat på grund av god tillgång till mätdata.

1.14 Tröingebergstunneln

Beskrivning av berganläggningen

Tröingebergstunneln är en tvåspårig järnvägstunnel i Falkenbergs kommun. Tunneln har en total längd på cirka 1,2 km och utgör en del av Väst kustbanan. Tunneln färdigställdes 2007 och har trafikerats sedan 2008.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Enligt genomförda förundersökningar är berget i området hög vattengenomsläpplighet. Vid det östra tunnelpåslaget finns tunna lager friktionsjord (sand eller grusig sand) på berg och marken sluttar kraftigt mot söder (Banverket 2002). Jordlagrens mäktighet ökar söderut och uppgår vid det andra tunnelpåslaget till 30–40 m. Vid detta tunnelpåslag är grundvattenytan belägen nära markytan. Djupet till grundvattenytan ökar längs tunnellen och är längs delar av tunneln under tunnelns dränerande nivå. Enligt Rodhe et al. (2006) är grundvattenbildningen till morän i det aktuella området drygt 500 mm per år.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inget underlagsmaterial rörande genomförda prognoser har inhämtats inom ramen för förstudien.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Ett mätprogram omfattande grundvattennivåmätningar grundvattenrör i jord samt i bergborrhål och enskilda bergborrade brunnar påbörjades 1994 respektive 1990. Under driftskedet omfattar mätprogrammet kvartalsvisa grundvattennivåmätningar i ett grundvattenrör i jord, tio borrhål i berg samt tre enskilda brunnar (Aqualog 2010c). Mätprogrammet planeras pågå till 2027. Inläckemätningar har genomförts under uppförandeskedet och fortsätter även under drift. Inläckaget har under perioden 2009–2012 varit mellan 36 och 85 liter per minut, motsvarande 2,7–6,4 liter per minut per 100 m tunnel.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Inga jämförelser har genomförts inom ramen för förstudien.

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

1.15 Skreatunneln

Beskrivning av berganläggningen

Skreatunneln (Skrea Backe) är en järnvägstunnel mellan Torero och Heberg i Falkenbergs kommun i Halland. Tunneln uppfördes under perioden 2005–2008, den har en längd på 575 m och har trafikerats sedan 2008 (Ekberg 2010). På grund av förekomst av stora sprickzoner i berget (se nedan) krävdes omfattande bergförstärkningar vid uppförandet av tunneln. Längs förskärningarna sänktes grundvattennivån till under schaktbotten så skärningarna konstruerades i öppna torrlagda schakt.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Skrea Backe är en drumlin (en långsträckt, flack bergsrygg) som omges av morän och sand och som höjer sig cirka 50 m ovan omgivande mark. Berganläggningen är uppförd i berg som huvudsakligen består av rödgrå, granitisk gnejs. Som nämnts tidigare finns det stora, grundvattenförande zoner i berget, med zombredder i storleksordningen 5–10 m. Den mellanliggande bergmassans hydrauliska konduktivitet är cirka 10^{-8} – 10^{-7} meter per sekund (Ekberg 2010). Jordlagrens mäktighet kan lokalt uppgå till 30–60 m och består där av sand, lera och morän (Ekberg 2010). På den norra sidan om tunneln är jordlagermäktigheten lägre och uppgår till endast 1–3 m. På drumlinen, ovan tunneln, består jordlagren huvudsakligen av morän.

Skrea Backe är en grundvattendelare, med olika geologiska (se ovan) och hydrogeologiska förhållanden i norr respektive söder. Norr om Skrea Backe råder öppna förhållanden, medan det tätande lerlagret i söder medför slutna grundvattenförhållanden i moränen och öppna förhållanden i det sandlager som är beläget ovan lerlagret. Enligt genomförda grundvattennivåmätningar är djupet till grundvattenytan i det övre grundvattenmagasinet 0,2–2 m under markytan, med en årlig variationsamplitud på cirka 1,5 m. I det undre grundvattenmagasinet (moränen under lerlagret) är grundvattnets tryckhöjd belägen cirka 6 m över markytan, med en årlig variationsamplitud på 0,5–2 m (Ekberg 2010).

Markytans nivå varierar cirka 20 m längs tunnelinjen. För den nuvarande så kallade referensnormalperioden 1961–1990 har nettonederbörden beräknats till 456 mm per år (Ekberg 2010). Grundvattenbildningen till det undre grundvattenmagasinet på den södra sidan om tunneln styrs framförallt av den hydrauliska kontakten mellan det övre och det undre grundvattenmagasinet.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Modelleringsverktyget MODFLOW användes för att utvärdera de hydrogeologiska effekterna av grundvattenbortledningen från Skreatunneln (Ekberg 2010). Dräner lades in i modellen för att representera tunneln och befintliga åkerdiken.

Grundvattenbildningen ansattes i modellen till cirka 450 mm per år. Modellen kalibrerades för ostörda förhållanden (utan tunneln) genom att använda uppmätta grundvattennivåer under hösten 1996. Påverkansområdet för grundvattensänkningen definierades utifrån en sänkning på 0,1 m vid påverkansområdets gräns. Vid modellberäkning av påverkansområdets utsträckning för störda förhållanden (med tunneln) användes uppmätta grundvattennivådata på två olika sätt, dels uppmätta medelnivåer, dels korsplottar mot referensrör.

I fallet med medelvärden jämfördes uppmätta grundvattennivåer före byggstart med uppmätta nivåer under byggperioden (2005–2008). Influensområdets utsträckning beräknades och visualiserades genom att interpolera (med metoden kriging) sänkingsvärden i rummet, som underlag för framtagandet av en konturyta. Sådana interpolationer gjordes dels för sommar respektive höst, dels för hela år.

Genom att korsplotta mot referensrör erhålls ett mått på hur väl varje ”mätör” (grundvattenrör med uppmätt grundvattennivåsänkning) samvarierar med respektive

referensrör. Sådan korsplottning ger en tydligare bild av influensområdets årstidsvariationer, och trendlinjer ger möjlighet att studera grundvattennivåsänkningens storlek.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Mätningar vid den då planerade berganläggningen påbörjades 1990 (enskilda brunnar) respektive 1994 (grundvattenrör i jord och bergborrhål). Under driftskedet fortsätter ett kontrollprogram med kvartalsvisa grundvattennivåmätningar i 28 grundvattenrör i jord, i fem bergborrhål samt i tre enskilda brunnar (Aqualog 2010c). Kontrollprogrammet ska fortgå till 2027.

Inläckemätningar har genomförts under uppförandet och kommer att fortsätta även under driftskedet. Inläckaget av grundvatten till berganläggningen har under perioden 2009–2012 varierat mellan 15 och 26 liter per minut, motsvarande 2,6–4,5 liter per minut per 100 m tunnel.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Grundvattenrör i jord belägna nära tunneln uppvisar en tydlig grundvattennivåsänkning efter byggstart, medan grundvattennivån i rör belägna på större avstånd från tunneln enligt genomförda mätningar inte påverkats av tunnelbygget (Ekberg 2010). Enligt mätningar i rör med intagsdelen i moränen under lerlagret är grundvattennivåsänkningen i moränen upp till ungefär 4 m. Sammantaget kan alltså sägas att modellprognoserna stämmer relativt väl med uppmätta grundvattennivåsänkning i jord. En slutsats från modelleringsarbetet är att komplexiteten på den upprättade modellen sannolikt hade kunnat minskas med bibehållen prognosverkan (Ekberg 2010).

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

1.16 Skultorpstunneln

Beskrivning av berganläggningen

Skultorpstunneln i Skövde i Västra Götaland är en 600 m lång vägtunnel. Tunneln är utförd som en betongtunnel med tråg. Tunneln uppfördes under perioden 2003–2005. Tunnelarbetet var komplicerat till följd av svåra grundläggningsförhållanden med höga grundvattentryck och flytbenägna jordarter (NCC 2012). Tunnelns djup varierar mellan 8 och 18 m under markytan (Flygfältsbyrån 1995).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berganläggningen är uppförd i sluttningen öster om Billingen, ett platåberg uppbyggt av kambrosiluriska avlagringar. Berget utgörs av ett diabaslager med en mäktighet på upp till 40 m, underlagrat av cirka 50 m lerskiffer som i sin tur underlagras av alunskiffer. Närmast den underliggande kristallina berggrunden finns ett cirka 35 m mäktigt sandstenslager. Jordarterna ovan tunneln utgörs främst av mäktiga senglaciala avlagringar, innehållande enstaka linser av silt och lera. I området finns det även

våtmarker med organiska jordarter (Flygfältsbyrån 1998). I området kring tunneln finns det även ytvattenförekomster, främst vattendraget Ömsån samt sjöarna Kroksjön och Lövsjön som utgör utströmningsområden för grundvatten.

Förekomsten av finkorniga jordar med låg vattengenomsläpplighet ger upphov till förekomst av undre, slutna grundvattenmagasin i jordlagren, med endast litet grundvattenutbyte med det övre grundvattenmagasinet (Flygfältsbyrån 1998). Den hydrogeologiska situationen i jordlagren innebär vidare att ett flertal av de mindre bäckarna i området kring berganläggningen är belägna under grundvattennivån i det undre grundvattenmagasinet. Detta innebär således att bäckarna utgör inströmningsområden för grundvatten. I området är grundvattenbildningen till morän 300–350 mm per år (Rodhe et al. 2006).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet av tunneln genomfördes tredimensionella modellberäkningar av grundvattenflödena i jordlagren ovan och kring berganläggningen. Modellen kalibrerades dels för stationära (tidsberoende) förhållanden, dels transienta (tidsberoende) flödesförhållanden. I det senare fallet användes data från en provpumpning som genomfördes 1995. Längs modellens gränser användes två olika typer av randvillkor (konstant tryckhöjd respektive nollflöde längs en grundvattendelare i modellens övre lager) och i modellområdet användes dräner för att representera dränerande bäckar. Det understa beräkningslagret i modellen utgörs av jord och berg med mycket låg hydraulisk konduktivitet (Flygfältsbyrån 1998).

Vid den stationära kalibreringen erhöles något högre modellberäknade grundvattennivåer jämfört med uppmätta nivåer. Lokalt erhöles stora skillnader mellan modellberäknade och uppmätta nivåer, vilket bedömdes bero på svårigheten att representera den komplexa hydrogeologiska situationen i modellområdet. Det råder dock vissa frågetecken kring funktionen för vissa grundvattenrör (Flygfältsbyrån 1998).

Den transienta kalibreringen syftade främst till att få bättre förståelse för dels den övre akvifärens hydrogeologiska egenskaper, dels dess hydrauliska kontakt med den undre akvifären. Det var generellt god överensstämmelse mellan modellberäknade grundvattennivåer och de grundvattennivåer som uppmättes i samband med provpumpningen, vilket således indikerade att de ansatta hydrogeologiska egenskaperna är rimliga. Provpumpningen pågick i sammanlagt 74 dygn; enligt modellberäkningarna skulle det övre grundvattenmagasinet torrläggas om pumpningen pågätt mer än 200 dygn (Flygfältsbyrån 1998).

Enligt modellberäkningarna är grundvattenflödet i det undre grundvattenmagasinet 20–25 liter per sekund under ostörda förhållanden utan tunneln (Flygfältsbyrån 1995). Modellberäkningarna visar vidare att ett uttag på 15 liter per sekund skulle vara nödvändigt för att hålla grundvattennivån 0,5 m under schaktbotten (Flygfältsbyrån 1998). I syfte att inte begränsa grundvattenbortledningens inverkan på grundvattenförhållandena kring tunneln, rekommenderar (Flygfältsbyrån 1995) återinfiltration av bortlett grundvatten i en infiltrationsanläggning väster om tunneln.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Enligt villkoren i tillståndet för vattenverksamhet (Vänersborgs Tingsrätt 1998) ska kontrollprogrammet innefatta grundvattennivåmätningar innan, under och upp till fem år efter uppförandet av tunneln. De i villkoren angivna mätintervallen varierar från en gång per vecka upp till en gång varannan månad. Olika mätintervall anges dels mellan ett så kallat inre respektive yttre kontrollområde, dels anges olika intervall för perioden innan, under respektive efter uppförandet av tunneln.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Inga jämförelser har genomförts inom ramen för förstudien.

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

1.17 Ådalsbanan

Beskrivning av berganläggningen

Ådalsbanan är en 130 km lång enkelspårig järnväg mellan Sundsvall och anslutningen till Botniabanan norr om Nyland. Längs sträckan är åtta nya tunnlar uppförda, med an sammanlagd längd på 14 km. Tunnelarna är i huvudsak förlagda i naturmark. De är tätade med förinjektering och vissa fall har även omfattande efterinjekteringar utförts.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Jordlagren där tunnelarna är belägna domineras av tunn morän. Längs sträckan Härnösand–Veda förekommer även organiska jordarter (Geo Logic 2004a, b, c, WSP 2007). Markytan uppvisar förhållandevis stora nivåvariationer (mer än 150 m) längs tunnellen. I området är grundvattenbildningen till morän 350–375 mm per år (Rodhe et al. 2006).

Sammanfattning av genomförda prognoser

För de fem längsta tunnelarna (Murbergstunneln, Kroksbergstunneln och Bjäsholmstunneln längs sträckan Härnösand–Veda, samt Hallbergstunneln och Snarabergstunneln längs sträckan Bollstabruk–N Nyland) har prognoser genomförts med modelleringsverktyget MODFLOW. Prognoserna avser dels inläckage av grundvatten till tunnelarna, dels sänkning av grundvattennivåer i berg.

För sträckan Härnösand–Veda definierades en regionalmodell med homogent berg (det vill säga, utan sprickzoner) och som inkluderar alla de tre tunnelarna på denna sträcka. Beräkningar gjordes dels för oinjekterade tunnlar, dels för injekterade tunnlar. För sträckan Bollstabruk–N Nyland definierades en annan regionalmodell som inkluderar de två tunnelarna på denna sträcka. I modellen definierades dels flera jordlager med olika vattengenomsläpplighet, dels en med djupet avtagande vattengenomsläpplighet i berg.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Mätprogrammet under uppförandet och den inledande driften av tunnelarna har omfattat inläckage av grundvatten samt grundvattennivåmätningar i drygt 400 enskilda brunnar

och ett fåtal grundvattenrör i jord. Detta mätprogram är numera avslutat (Banverket 2010a, Trafikverket 2010c).

Två enskilda brunnar har ersatts på grund av försämrad kapacitet. Vidare har två enskilda brunnar uppvisat förhöjd salthalt; huruvida detta är en konsekvens av tunnelbygget eller inte är för närvarande inte avgjort (Leif Backlund, Faveo Projektledning, pers. komm. 2012).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Jämförelser mellan prognoser och utfall visar att det verkliga inläckaget av grundvatten till Bjässholmstunneln, Snarabergstunneln och Hallbergstunneln blev lägra än vad prognoserna visade. För Murbergstunneln och Krokbergstunneln blev det uppmätta inläckaget något mindre än vad som prognostiserats, trots att prognoserna avsåg oinjekterade tunnlar.

Underlag för fortsatta studier

Dessa berganläggningar kan vara lämpliga kandidater för fortsatta studier. Det ska dock noteras att mätprogrammet för tunnarna längs Ådalsbanan endast omfattar ett fåtal grundvattenrör i jord. Vidare är prognoser genomförda för oinjekterade tunnlar, medan tunnarna under uppförandet tätades genom förinjektering och vissa fall även omfattande efterinjektering.

1.18 Erfarenheter från andra väg- och järnvägstunnlar i Sverige

Botniabanan

Botniabanan är en i huvudsak enkelspårig järnväg längs norrlandskusten, med sträckning mellan Nyland (norr om Kramfors) och Umeå. Botniabanan har en längd på 190 km, varav 25 km går i sammanlagt 16 bergtunnlar. Bergtunnlarna är förlagda i naturmarksområden, med undantag för Åsbergstunneln som passeras genom de södra delarna av Örnsköldsviks tätort. Utredningsmaterial och mätdata finns samlade i en projektdatabas. Det har dock inte varit möjligt att få tillgång till denna databas inom ramen för förstudien. Det är planerat att överföra databasen och dess drift från Botniabanan AB till Trafikverket.

Mätprogrammet inför, under och efter uppförandet av de 16 bergtunnlarna omfattar mätning av grundvattennivåer i grundvattenrör i jord, bergborrhål och enskilda brunnar, samt provtagning och kemisk analys av vatten från enskilda brunnar. Mätprogrammet omfattar sammanlagt 750 grundvattenrör i jord, 23 porttrycksmätare, 307 enskilda vattenförsörjningsbrunnar och 80 enskilda energibrunnar. Inläckage av grundvatten till tunnarna har även mätts under uppförandet och den inledande delen av driftskedet (Botniabanan 2008). En generell slutsats från mätprogrammet är att man under uppförandet kunde notera en grundvattennivåsänkning, som dock avtog efter genomförd injektering och inom loppet av några år. Ett fåtal enskilda brunnar påverkades av grundvattenbortledningen (Botniabanan 2010).

Botniabanan bedöms vara lämplig kandidat för fortsatta studier, främst med avseende på jämförelser mellan prognoser och utfall under uppförande och inledande drift.

Åsatunneln

Åsatunneln, med en längd på cirka 1,9 km, utgör en del av den dubbelspåriga järnvägen längs Västra stambanan. Tunneln har en minsta bergtäckning på 4,5 m och passerar under två känsliga våtmarker. Ett mätprogram avseende inläckage av grundvatten har genomförts 2004–2011. Mätningarna utförs oregelbundet, ibland med något års mellanrum. Ingen ytterligare information om mätprogram har inhämtats inom ramen för förstudien. Enligt villkoren uppgår det högsta tillåtna inläckaget till 3 liter per sekund. Enligt mätdata är det uppmätta inläckaget mindre än 0,3 liter per sekund.

1.19 Erfarenheter från andra väg- och järnvägstunnlar i Norge

Det finns en hel del rapporterade erfarenheter från uppförande och drift av vägtunnlar i Norge. Statens Vegvesen (2002b, 2004a, c, d, 2005) presenterar erfarenheter rörande främst inläckage och injektering i Grualiatunneln, Lunnertunneln, Hagantunneln och Jong-Askertunneln. I Statens Vegvesen (2003) sammanställs erfarenheter rörande infiltrationsanläggningar vid olika vägtunnlar. Brettum och Løvik (2005) och Statens Vegvesen (2004e) presenterar resultat av naturvärdesinventeringar i anslutning till ett antal befintliga vägtunnlar. Bland annat konstateras att i samband med byggandet av tunneln Romeriksporten sänktes vattennivån i sjön Nordre Puttjern med över 5 m.

Statens Vegvesen (2001, 2004b, f) presenterar sammanställningar av data på sänkning av grundvattnets tryckhöjd vid övergången mellan jord och berg för ett antal berganläggningar i Osloområdet, dels som funktion av avståndet från tunneln, dels som funktion av det specifika inläckaget. Bjørkenes och Tuttle (2010) analyserar data från det hydrogeologiska och hydrogeologiska mätprogrammet inför, under och efter uppförandet av väg- och järnvägstunnlar vid Frodeåsen i Tønsberg, Norge. Vägtunneln uppfördes 2004–2007 (längd 1,7 km) och järnvägstunneln 2009–2010 (längd 1,6 km).

Sammanfattningsvis kan konstateras att insamling och bearbetning av data och information från ett urval väg- och järnvägstunnlar i Norge bör ingå i fortsatta studier.

2 Oljelager i bergrum

2.1 Avveckling av beredskapslager för olja

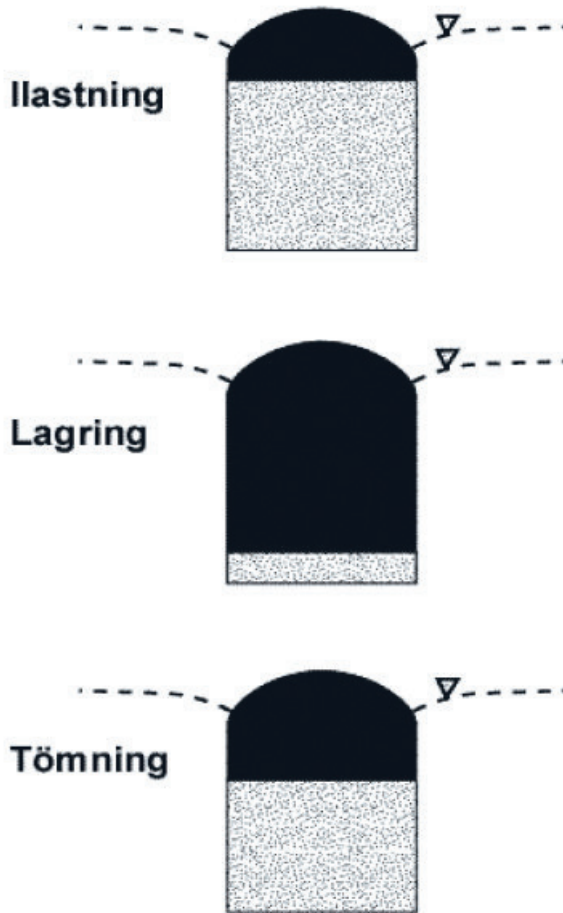
Inledning

I Sverige finns det över 140 berganläggningar för lagring av petroleumprodukter. Vid cirka 80 av dessa sker lagringen i oinklädda bergrum. I de övriga sker lagringen i stålcisterner i berg (Naturvårdsverket 2003). SGU (Sveriges geologiska undersökning) ansvarar för avvecklingen av 31 berganläggningar som tidigare nyttjats för den statliga beredskapslagringen av petroleumprodukter (se figur B2-1). Vid respektive anläggning finns det ett eller flera bergrum. Alla är uppförda i kristallint berg, med undantag för Gotland. Inför uppförandet genomfördes i regel endast begränsade förundersökningar.

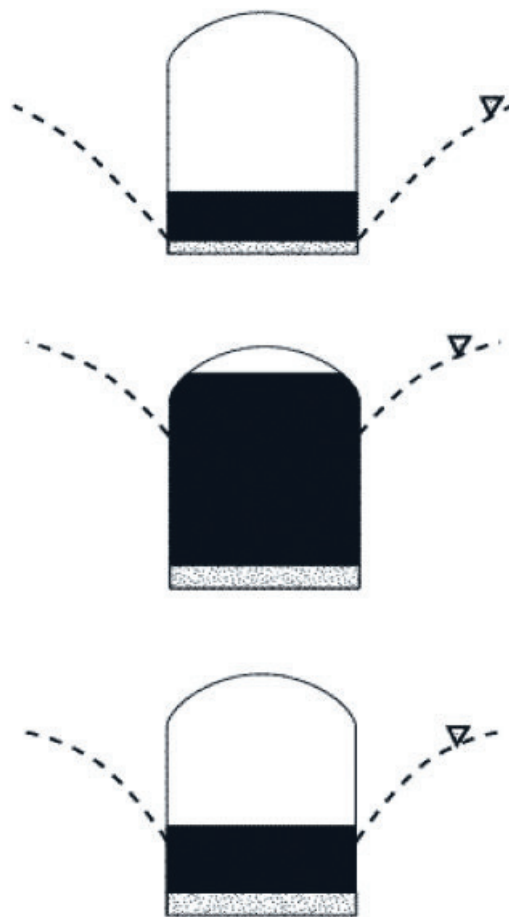


Figur B2-1. Översiktskarta som visar aktuell status (mars 2012) för SGU:s avveckling av oljelager i bergrum. (Overview map showing the current status (March, 2012) of the Swedish Geological Survey's decommissioning of oil storages in rock caverns.)

Bergrummen är förlagda under grundvattenytan. Inuti dessa har oljeprodukt lagrats på flytande eller på fast vattenbädd. I enstaka fall har oljeprodukt lagrats utan vattenbädd. I bergrum med rörlig vattenbädd har dess nivå anpassats så att produktens överyta alltid legat på samma nivå, oavsett hur mycket produkt som för tillfället lagras (se figur B2-2). Vattenbäddens nivå har regleras genom pumpning till eller från närliggande ytvattendrag (Anderberg 2005). I bergrum med fast vattenbädd har dess nivå hållits på en konstant nivå genom bortledning av inläckande grundvatten (figur B2-3). Detta överskottsvatten (läckvattnet) har pumpas till oljeavskiljare och därefter letts till ytvattenrecipient.



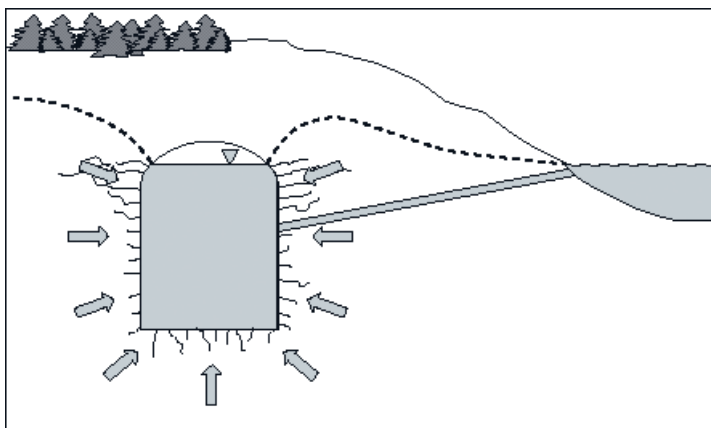
Figur B2-2. Schematisk bild som visar principen för oljeproduktlagring (svart) på rörlig vattenbädd (Naturvårdsverket 2003). (Cartoon showing the principle of oil-product storage (black) on a shifting water cushion.)



Figur B2-3. Schematisk bild som visar principen för oljeproduktlagring på fast vattenbädd (Naturvårdsverket 2003). (Cartoon showing the principle of oil-product storage on a stationary water cushion.)

Genom att bergrummen är förlagda under grundvattenytan har det utbildats en hydraulisk gradient in mot bergrummen under drift. Detta har inneburit att oljeprodukterna hållits kvar i bergrummen då grundvatten, som har högre densitet än oljeprodukterna, strömmar in mot bergrummet. I samband med avveckling av ett bergrumslager pumpas oljeprodukterna ut ur bergrummet (så kallad utlastning). Om grundvattenbortledningen upphör i samband med avvecklingen vattenfylls bergrummet och det sker en tryckåterhämtning i det omkringliggande berget. Detta innebär att den hydrauliska gradienten in mot bergrummet försvinner, vilket i sin tur kan leda till spridning av produktrester till bergrummets omgivning.

Som del av miljösäkringen av en bergumsanläggning måste därför vattennivån i bergrummet hållas avsinkt en viss tid även efter det att anläggningen är avvecklad. Detta kan utföras genom så kallad hydraulisk avledning eller genom pumpning (Naturvårdsverket 2003). Hydraulisk avledning (figur B2-4) innebär att bergrummet via ett speciellt borrhål hydrauliskt ansluts till en närliggande ytvattenrecipient som därigenom styr vattennivån i bergrummet. Om det saknas ytvattenrecipient med lämplig vattennivå inom rimliga avstånd åstadkoms avsinkningen i bergrummet genom aktiv pumpning, som kan ske kontinuerligt eller intermittent. Vid kontinuerlig pumpning hålls vattennivån i bergrummet inom ett visst intervall. Vid (återkommande) intermittent pumpning tillåts bergrummet vattenfyllas, varefter bergrummet töms på vatten.



Figur B2-4. Schematisk bild som visar konceptet med hydraulisk avledning från bergrum (Naturvårdsverket 2003). (Cartoon showing the concept of hydraulic discharge from rock caverns.)

I nedanstående avsnitt redovisas information och data rörande 15 oljelager i bergum. Materialet är insamlat inom ramen för ett examensarbete vid Uppsala universitet (Giron 2012) som genomförts parallellt med förstudien.

Kälarne

Berganläggningen är belägen cirka 5 km väster om Kälarne i Jämtlands län. Den består av ett oinklätt bergum som ligger mellan +267 m.ö.h. (meter över havet) och +283 m.ö.h. (RH00). Markytan i området varierar mellan 300–330 m.ö.h. Anläggningen började användas 1973 och den produkt som lagrades var diesel under hela drifttiden. Den totala lagringskapaciteten var 109 000 m³ men lagrad produktvolym har aldrig nått totalkapacitet. Från uppstart fram till i mitten av 1980-talet lagrades cirka 95 000 m³, därefter lagrades cirka 76 000 m³ fram till 1993 för att sedan minskas ytterligare till 49 000 m³ fram till utlastningen 1995. Lagringsprincipen var fast vattenbädd (VBB VIAK 2000).

Dominerande bergart i området är grå, grovkornig granit som genomslås av ett antal diabasgångar med varierande tjocklek. Diabasgångarna medför sprickor i berget. Området runt berggrummet består främst av berg i dagen och sandig siltig morän. Cirka 500 m söder om anläggningen ligger sjön Övsjön som är recipient för läckvatten från anläggningen (SGU 2000). Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 375 mm (Rodhe et al. 2006).

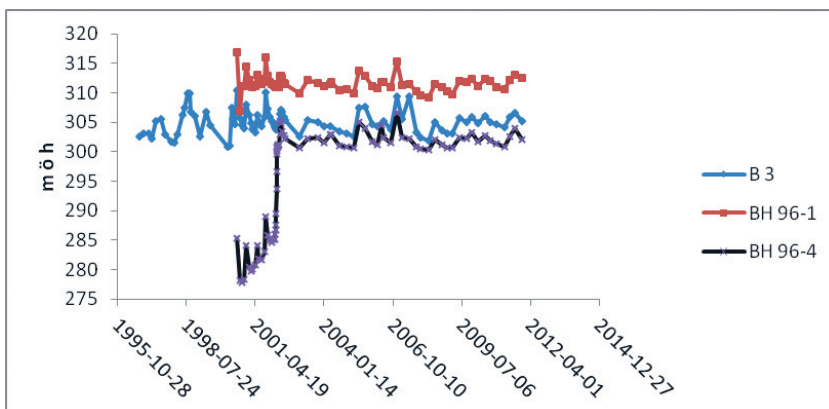
Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i fem grundvattenrör i jord (upp till 100 m från anläggningen) och sex borrhål i berg. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå och läckvattenflöde. Mätdata finns tillgängliga från 1996 och framåt. Tabell B2-1 anger lägena i förhållande till berganläggningen för fem av bergborrhålen.

Tabell B2-1. Borrhållslägen i förhållande till berganläggningen i Kälarne. (Locations of boreholes in relation to the Kälarne rock facility.)

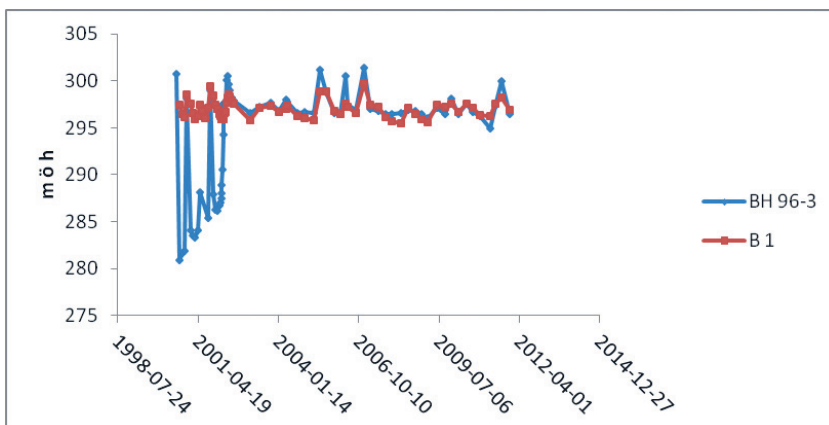
Borrhål	Avstånd (m)	Väderstreck
B 1	50	Syd
B 3	100	Sydväst
BH 96-1	30	Väst
BH 96-3	60	Sydöst
BH 96-4	30	Sydväst

Berganläggningen är belägen i sydvästra delen av en bergssluttning. Ett system för hydraulisk avledning kopplades in år 2002. Figur B2-5 visar att grundvattennivån i borrhål BH 96-4 höjs drastiskt när den hydrauliska avledningen påbörjas, vilket således tyder på att borrhålet är beläget inom påverkansområdet för berganläggningen. Borrhålet BH 96-1 är beläget i en kraftig sluttning och tycks inte vara beläget inom påverkansområdet. Borrhålet B 3 är beläget på större avstånd från berganläggningen jämfört med borrhålet BH 96-4. Grundvattennivån i B 3 följer samma mönster som de andra efter avledningens start år 2002 och bedöms således inte vara beläget inom påverkansområdet.

I figur B2-6 visas tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i de borrhål som är belägna syd och sydöst om och på ungefär samma avstånd från berganläggningen. Borrhålet B 1 är beläget rakt söder om anläggningen och BH 96-3 är beläget söder om anläggningens östra del, närmare bergsryggen än B 1. De kraftiga grundvattennivåsvängningar som är uppmätta i BH 96-3 avmattas efter starten för den hydrauliska avledningen, vilket indikerar att borrhålet är beläget inom påverkansområdet. B 1 uppvisar inte samma nivåvariationsmönster, detta borrhål är dock beläget mellan BH 96-4 och BH 96-3 som båda tycks vara påverkade av den hydrauliska avledningen. Sammanfattningsvis indikerar grundvattennivåmätningarna kring berganläggningen att påverkansavståndet i berg är minst 60 m sydöst om anläggningen och minst 30 m sydväst om anläggningen.



Figur B2-5. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen B 3, BH 96-1 och BH 96-4 vid berganläggningen i Kälarne. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes B 3, BH 96-1 and BH 96-4 at the Kälarne rock facility.)



Figur B2-6. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen B 1 och BH 96-3 vid berganläggningen i Kälarne. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes B 1 and BH 96-3 at the Kälarne rock facility.)

Bålsta

Anläggningen ligger öster om Bålsta i Uppsala län. Anläggningen består av ett oinklätt bergrum som ligger mellan -27 m.ö.h. och -5 m.ö.h., taket ligger 25–63 m under markytan. Anläggningen togs i bruk februari 1976. Diesel har lagrats under hela drifttiden. Lagringskapaciteten var cirka 12 0000 m³ och produktvolymen har varierat från totalkapacitet till 90 000 m³ under drifttiden. Bergrummet tömdes på produkt i

mitten av 1991 för att sedan fyllas upp igen under samma år. Utlastningen skedde mellan 1995 och 1997. Lagringsprincipen var fast vattenbädd.

Bergarten i området är bandad sedimentgnejs med inslag av granit och pegmatit. Området runt bergrummet har branta sluttningar söder och väster om bergrummet och jordarten är lerig morän på sand. Närmast berget finns grus eller morän. Berget är tätt med endast ett fåtal sprickzoner. Ungefär 400 m söder om anläggningen ligger sjön Mälaren som är recipient för läckvatten från anläggningen (Lindstrand och Palmgren 1998). Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 300 mm (Rodhe et al. 2006).

Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i tio mätpunkter. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå. Mätdata finns tillgängliga från 1999 och framåt.

Gällö

Anläggningen är belägen söder om Gällö i Jämtlands län. Anläggningen består av sex oinklädda bergtrum där två har använts för lagring av bensen och fyra för lagring av diesel (Vistam 2002). Anläggningen ligger 30–40 m under markytan som varierar mellan 290–310 m.ö.h. i området. Anläggningen togs i bruk 1969. Lagringskapaciteten var cirka 71 000 m³ men endast cirka 57 000 m³ produkt lagrades som mest fram till utlastningen som skedde mellan 1992–1994. Lagringsprincipen var fast vattenbädd.

Berggrunden i området består av rödgrå till röd, grovt mikroklinporfyrisk granit. Området omkring bergrummet består till mesta del av berg i dagen eller ett tunt moräntäcke. Den övre delen av berget är kraftigt uppsprucken. Cirka 600 m väster om anläggningen ligger sjön Revsundssjön och cirka 500 m öster om anläggningen ligger sjön Tuvtjärnen som är recipient för läckvatten från anläggningen. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 250–300 mm (Rodhe et al. 2006).

Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 16 mätpunkter, upp till drygt 150 m från anläggningen. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå och läckvattenflöde (de senare mätningarna avslutades 2008). Mätdata finns tillgängliga från 1996 och framåt. Tabell B2-2 anger lägena för åtta av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-2. *Borrhållägen i förhållande till berganläggningen i Gällö. (Locations of boreholes in relation to the Gällö rock facility.)*

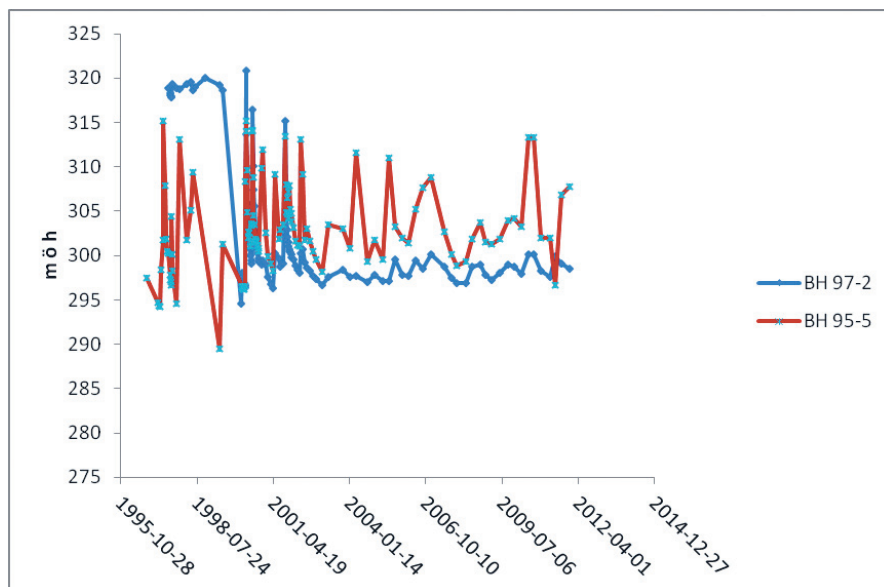
Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
BH 97-2	33	Väst
BH 97-3	33	Syd
BH 97-4	65	Syd
BH 95-4	65	Norr
BH 95-5	115	Väst
BH 95-6	30	Öst
9902	115	Norr

9903	60	Öst
------	----	-----

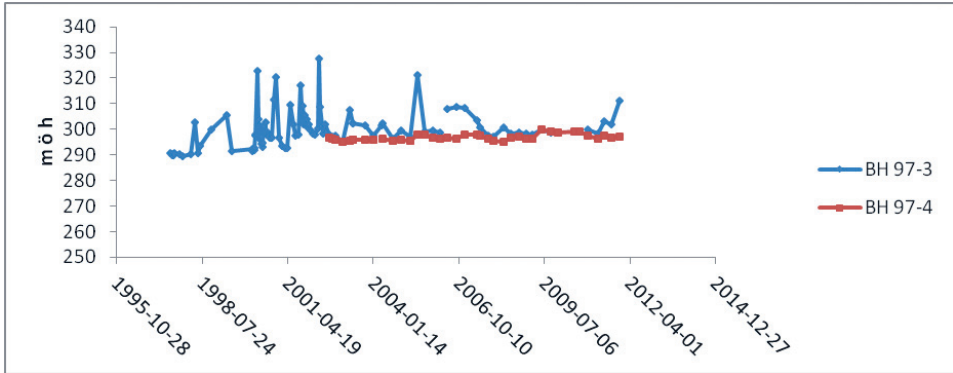
I Gällö har ett system för hydraulisk avledning varit i drift sedan 2001. Figur B2-7 visar att de kraftiga grundvattennivåvariationerna i borrhålet BH 97-2 avmattas efter det att den hydrauliska avledningen påbörjades. Nivåvariationerna i borrhålet BH 95-5 fortsätter även efter år 2001, vilket sammantaget tolkas som att borrhålet BH 97-2 är beläget inom påverkansområdet och BH 95-5 utanför påverkansområdet.

Figur B2-8 visar uppmätta grundvattennivåer i borrhål belägna söder om anläggningen. Borrhålet BH 97-3 är beläget nära anslutning till två av bergrummen, vilket kan vara en förklaring till de kraftiga uppmätta grundvattennivåsvängningarna. Detta borrhål bedöms därför vara beläget inom påverkansområdet. Borrhålet BH 97-4 är beläget på större avstånd från berganläggningen och bedöms utifrån mätdata vara beläget utanför påverkansområdet för den hydrauliska avledningen. Figur B2-9 visar tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i borrhålen belägna norr om berganläggningen. Mätseriens tyder inte på några större nivåskillnader före respektive efter år 2001, varför slutsatsen är att dessa borrhål är belägna utanför påverkansområdet.

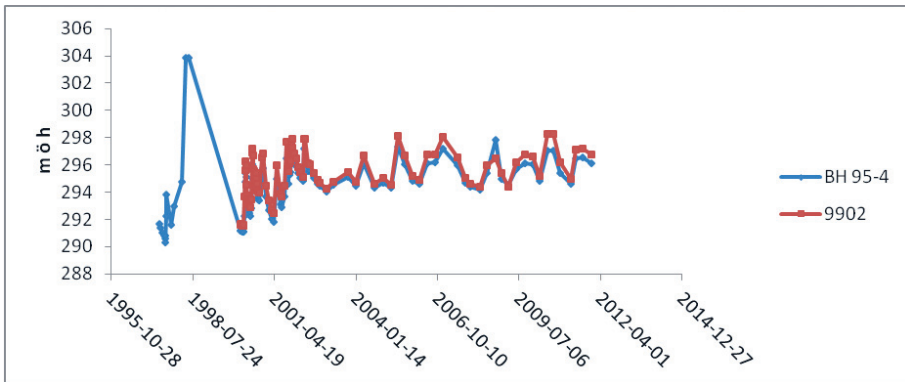
Figur B2-10 visar på en tydlig höjning av grundvattennivån i borrhålen BH 95-6 och 9903 i samband med att den hydrauliska avledningen togs i drift 2001. Detta tolkas som att dessa borrhål är belägna inom påverkansområdet för den hydrauliska avledningen. Den sammantagna bedömningen baserat på mätdata är att påverkansavståndet är 33–115 m väster om anläggningen och 33–65 m söder om anläggningen. Norr om anläggningen är påverkansavståndet mindre än 65 m och öster om anläggningen är påverkansavståndet minst 60 m.



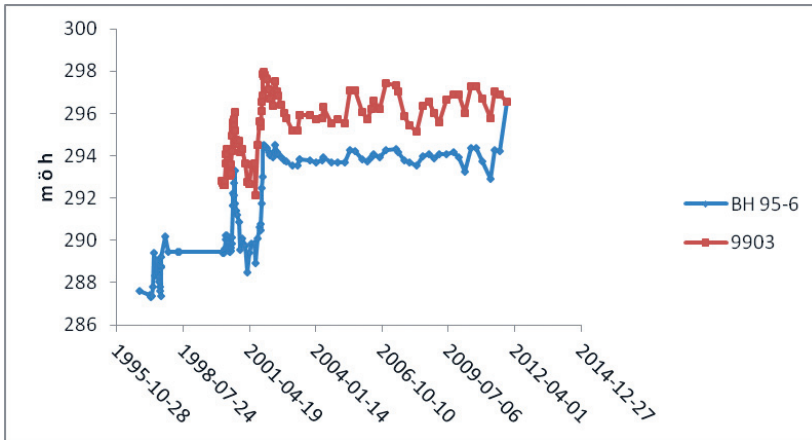
Figur B2-7. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen BH 95-5 och BH 97-2 vid berganläggningen i Gällö. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes BH 95-5 and BH 97-2 at the Gällö rock facility.)



Figur B2-8. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen BH 97-3 och BH 97-4 vid berganläggningen i Gällö. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes BH 97-3 and BH 97-4 at the Gällö rock facility.)



Figur B2-9. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen BH 95-4 och 9902 vid berganläggningen i Gällö. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes BH 95-4 and 9902 at the Gällö rock facility.)



Figur B2-10. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen BH 95-6 och 9903 vid berganläggningen i Gällö. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes BH 95-6 and 9903 at the Gällö rock facility.)

Köping 2

Anläggningen ligger ungefär 3 km sydost om Köping i Västmanlands län.

Anläggningen består av två oinklädda bergrum med en total lagringskapacitet på 126 000 m³. Bergrummen ligger 10–33 m under markytan som i området varierar mellan 10–35 m.ö.h. I anläggningen lagrades diesel under hela drifttiden. Köping 2 togs i bruk 1976 och tömdes i två omgångar under 1994–1995. Lagringsprincipen var fast vattenbädd.

Den dominerande bergarten i området är mycket svagt förskiffrad gnejsgranit, som delvis är grovkornig. Området omkring bergrummen har mycket berg i dagen med morän i sluttningar och även med inslag av postglacial lera. Flera små sprickzoner finns i berget (Arnbom 2002). Norsabäcken som senare mynnar ut i sjön Mälaren är recipient för läckvattnet. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 225 mm (Rodhe et al. 2006).

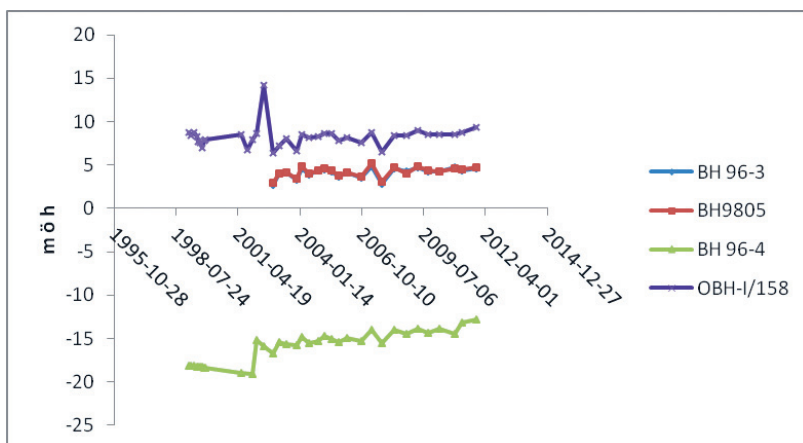
Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 12 mätpunkter, upp till drygt 150 m från anläggningen. Mätningar har avslutats i tre mätpunkter (2003 respektive 2007). Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå. Mätdata finns tillgängliga från 1999 och framåt. Tabell B2-3 anger lägena för fyra av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-3. Borrhållägen i förhållande till berganläggningen Köping 2. (Locations of boreholes in relation to the Köping 2 rock facility.)

Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
-----	-------------	-------------

BH9805	200	Väst
OBH-I/158	45	Norr
BH 96-3	85	Väst
BH 96-4	30	Syd

Uppmätta grundvattennivådata (figur B2-11) tyder på att samtliga borrhål är belägna inom påverkansområdet för den hydrauliska avledningen. Det ska observeras att en att berganläggningen Köping 1 är belägen 400–500 m väst om Köping 2, vilket kan vara en förklaring till det skenbart stora påverkansavståndet väster om Köping 2.



Figur B2-11. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen BH 96-3, BH9805, BH 96-4 och OBH-I/158 vid berganläggningen Köping 2. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes BH 96-3, BH9805, BH 96-4 and OBH-I/158 at the Köping 2 rock facility.)

Jönköping

Anläggningen är belägen cirka 3 km sydväst om Jönköping i Jönköpings län. Anläggningen består av 22 lagringscisterner i plåt som är förlagda i berggrum. Det finns cirka 60 cm tjock betong runt varje cistern. Total lagringskapacitet var cirka 79 000 m³ och flertalet olika produkter har lagrats under driften, bland annat blyad bensin, diesel och flygbränsle. Lagringen startade i mitten av 1960 och anläggningen tömdes i slutet av 1997 (Landin 2002).

Anläggningen ligger i en bergplint cirka 200 m.ö.h och bergarten i området är främst yngre ögonförande granit med inslag av lerskiffer. Flertalet spricksystem finns i berget. Endast mindre bäckar och dammar finns i närheten av anläggningen. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 300 mm (Rodhe et al. 2006). Information om eventuellt mätprogram saknas.

Lärbro

Anläggningen ligger på Kappelhamnsvikens västra strand cirka 11 km norr om Lärbro i Gotlands län. Anläggningen består av 4 bergrum täckta med sprutbetonginklädda glasfibermattor med en lagringskapacitet på totalt cirka 44 600 m³. Anläggningen byggdes i två etapper, den första färdigställdes 1967 och bestod av tre bergrum och tillbyggnaden av det sista bergrummet var klart 1976. Lagringsprincipen var fast vattenbädd och under driften lagrades blyad och oblyad bensin samt diesel. De tre första bergrummen ligger 10,4 m under markytan medan det senast uppförda bergrummet ligger 16,45 m under markytan, som i området varierar mellan 3–16 m.ö.h. Tömningen av de tre första bergrummen skedde under 1997 och det nyare bergrummet tömdes 1999 (Sandstedt och von Brömssen 2003).

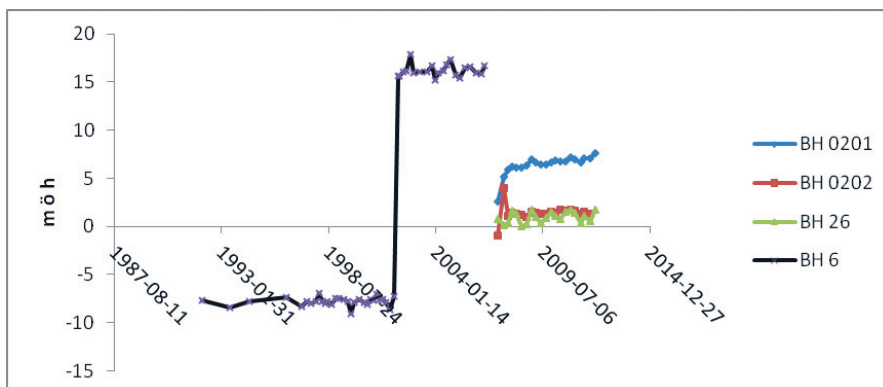
Berggrunden i området består av kalksten och mägersten. I berggrunden förekommer flera svaghetszoner. Anläggningen ligger cirka 100 m från Östersjön. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 300 mm (Rodhe et al. 2006).

Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 25 mätpunkter, upp till drygt 150 m från anläggningen. I samband med avvecklingen föll 17 stycken mätpunkter bort från mätprogrammet. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå, läckvattenflöde och ytvattennivå i havet. Mätdata finns tillgängliga från 1991 och framåt. Tabell B2-4 anger lägena för fyra av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-4. Borrhållägen i förhållande till berganläggningen i Lärbro. (Locations of boreholes in relation to the Lärbro rock facility.)

Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
BH 0201	30	Norr
BH 0202	160	Norr
BH 26	50	Öst
BH 6	60	Öst

Mätprogrammet innefattar endast mätningar i borrhål norr och öster om anläggningen (figur B2-12). Givet anläggningens närhet till Östersjön är det svårt att baserat på tidsserierna bedöma om borrhålen är belägna inom påverkansområdet.



Figur B2-12. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen BH 0201, BH 0202, BH 6 och BH 26 vid berganläggningen i Lärbro. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes BH 0201, BH 0202, BH 6 and BH 26 at the Lärbro rock facility.)

Murjek

Anläggningen är insprängd i Murjekberget, cirka 2 km nordost om Murjek i Norrbottens län. Anläggningen består av ett oinklätt bergrum med en totalvolym på cirka 55 000 m³. Bergrummet togs i bruk 1974 och lagrade diesel till dess att det tömdes i slutet av 1996. Anläggningen har en bergtäckning på cirka 15 m och ligger mellan 233–255 m.ö.h. Lagringsprincipen var fast vattenbädd.

Bergrunden i området består av både gnejser och graniter. Anläggningen överlagras av ett 1–10 m mäktigt moräntäcke. Det finns endast mindre vattendrag i omgivningen (Vistam 1996). Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 300 mm (Rodhe et al. 2006).

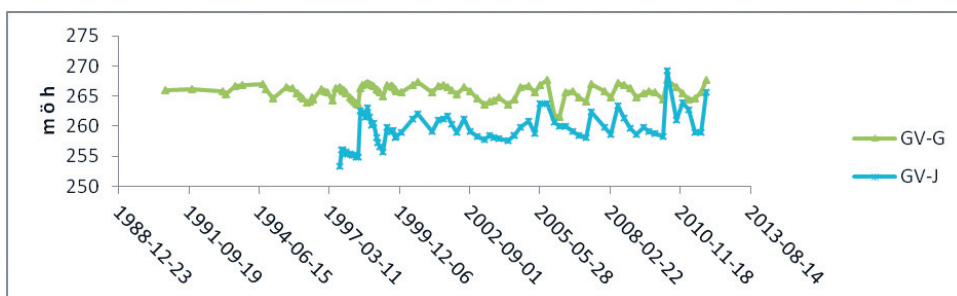
Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 8 mätpunkter, upp till cirka 150 m från anläggningen. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå och läckvattenflöde. Mätdata finns tillgängliga från 1990 och framåt. Tabell B2-5 anger lägena för fem av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-5. Borrhållägen i förhållande till berganläggningen i Murjek. (Locations of boreholes in relation to the Murjek rock facility.)

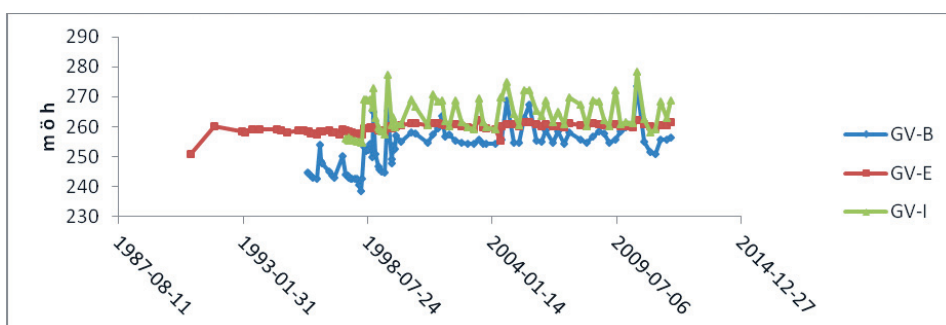
Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
GV-B	2-3	Syd
GV-E	90	Norr
GV-G	130	Väst
GV-I	30	Norr
GV-J	100	Väst

Anläggningen är belägen i nordvästra delen av en bergssluttning. Ett system för hydraulisk avledning kopplades in år 1999. Figur B2-13 visar tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i borrhål väster om anläggningen. I dessa tidsserier framgår ingen tydlig skillnad på uppmätta grundvattennivåer för tiden före respektive efter det att den hydrauliska avledningen inleddes. Av denna anledning är bedömningen att borrhålen är belägna utanför påverkansområdet.

Figur B2-14 visar tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i borrhål belägna norr och söder om berganläggningen. Grundvattennivåerna i borrhålen GV-B och GV-E uppvisar en tydlig respons på den hydrauliska avledningen och de bedöms därför vara belägna inom påverkansområdet. Grundvattennivån i borrhålet GV-E uppvisar däremot ingen tydlig respons på avledning och borrhålet tycks således vara beläget utanför påverkansområdet. Baserat på uppmätta grundvattennivåer är slutsatsen att påverkansavståndet är 30–90 m norr om berganläggningen, mindre än 100 m väst om anläggningen och avsevärt mindre (endast någon meter) söder om anläggningen.



Figur B2-13. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen GV-G och GV-J vid berganläggningen i Murjek. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes GV-G and GV-J at the Murjek rock facility.)



Figur B2-14. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen GV-B, GV-E och GV-I vid berganläggningen i Murjek. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes GV-B, GV-E and GV-I at the Murjek rock facility.)

Motala

Anläggningen ligger cirka 7,5 km norr om Motala i Östergötlands län. Anläggningen består av ett oinklätt bergrum med lagringskapacitet på cirka 48 000 m³. Inlastning skedde 1972 och diesel lagrades till slutet på 1995 då utlastning ägde rum. Bergrummet ligger 25–35 m under markytan, som i det närmaste området varierar mellan 115–123 m.ö.h. Lagringsprincipen var fast vattenbädd (Granath och Ludvig 1996).

Berggrunden består av röd gnejsgranit med granodioritisk sammansättning. Området består till största delen av berg i dagen och berggrunden är relativt sprickfattig. Tre sprickgrupper förekommer. Jordarten i området är morän som i vissa partier kan nå några meters mäktighet. Sjön Salstern är belägen cirka 400 m från anläggningen och är recipient för läckvattnet. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 225 mm (Rodhe et al. 2006).

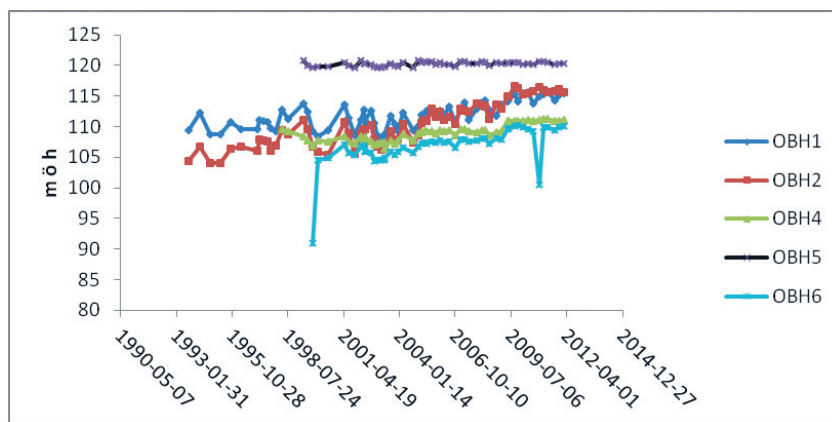
Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 6 mätpunkter, inom 100 m från anläggningen. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå,

läckvattenflöde och ytvattennivå. Mätdata finns tillgängliga från 1993 och framåt. Tabell B2-6 anger lägena för fem av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-6. Borrhållslägen i förhållande till berganläggningen i Motala. (Locations of boreholes in relation to the Motala rock facility.)

Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
OBH1	20	Syd
OBH2	60	Norr
OBH4	20	Syd
OBH5	45	Syd
OBH6	60	Syd

Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (figur B2-15) visar på en tydlig respons återhämtning i alla borrhål utom borrhålet OBH 5. OBH 5 är beläget nära till anläggningens tillfartsramp, medan övriga borrhål är belägna närmare själva bergrummet. Baserat på uppmätta grundvattennivåer är slutsatsen att påverkansavståndet är minst 60 m norr och söder om anläggningen.



Figur B2-15. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen OBH1, OBH2 samt OBH4–6 vid berganläggningen i Motala. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes OBH1, OBH2 and OBH4–6 at the Motala rock facility.)

Sala

Anläggningen ligger cirka 5 km nordost om Broddbo i Västmanlands län. Anläggningen består av 4 oinklädda bergrum med en total lagringsvolym på cirka 127 000 m³. Totalt lagrades högst cirka 100 000 m³ under drifttiden 1980–1996. Lagringsprincipen var rörlig vattenbädd och produkten som lagrades var först MC77 (ett slags flygbränsle) och

därefter bensin. Berggrunden ligger cirka 40 m under markytan som i området varierar mellan 100–120 m.ö.h. (Kemakta Konsult AB och AB Jacobson & Wildmark 1997).

Berggrunden i området består av gnejsgranit som är övertäckt av ett 2–6 m mäktigt moränlager. En stor och ett antal små diabasgångar finns i området och i anslutning till dessa är berget uppsprucket. Sjön Storljusen som ligger ca 200 m öster om anläggningen är recipient för läckvattnet. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 225 mm (Rodhe et al. 2006).

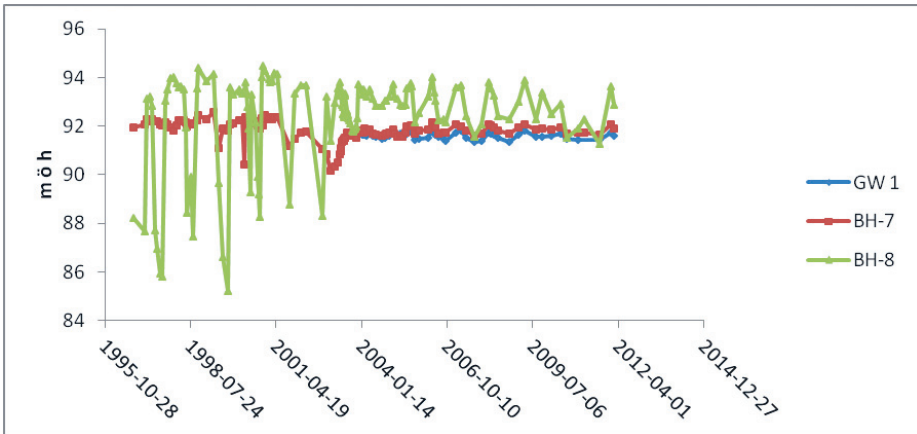
Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 15 mätpunkter, upp till drygt 100 m från anläggningen. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå och läckvattenflöde. Mätdata finns tillgängliga från 1996 och framåt. Mätningar har avslutats i vissa mätpunkter. Tabell B2-7 anger lägena för sju av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-7. *Borrhållägen i förhållande till berganläggningen i Sala. (Locations of boreholes in relation to the Sala rock facility.)*

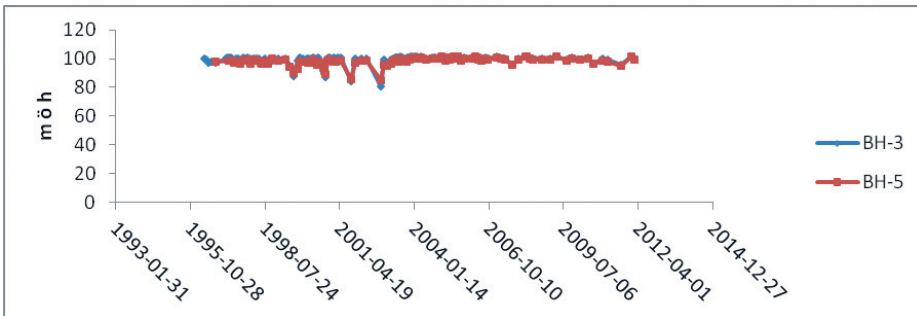
Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
GW 1	100	Nordöst
GW 2	100	Öst
BH-3	15	Syd
BH-5	75	Syd
BH-6	45	Öst
BH-7	20	Nordöst
BH-8	100	Norr

Vid berganläggningen inleddes hydraulisk avledning år 2003. Figur B2-16 visar tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i borrhål belägna norr om anläggningen. Grundvattennivåerna i samtliga dessa borrhål uppvisar en tydlig respons på den hydrauliska avledningen och bedöms därför vara belägna inom påverkansområdet för avledningen. Figur B2-17 visar tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i borrhål belägna söder om anläggningen. Tidsserierna är något svårtolkade, men i båda fallen tycks grundvattennivån stabiliseras efter det att den hydrauliska avledningen inleddes. De bedöms därför vara belägna inom påverkansområdet.

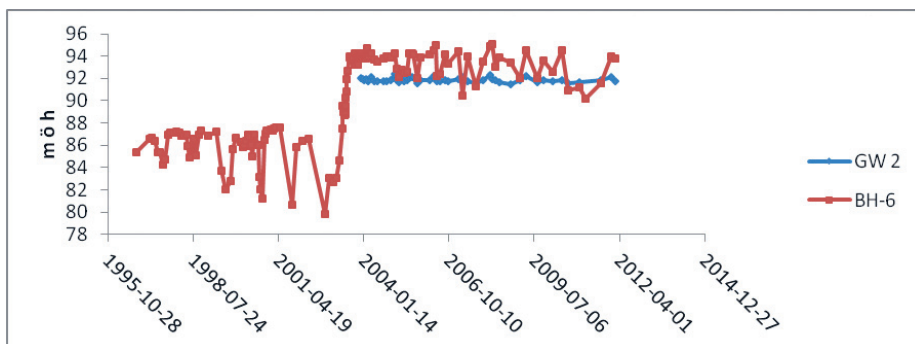
I figur B2-18 framgår tydligt att borrhålet BH-6 är beläget inom påverkansområdet. Mätningarna i borrhålet GW 2 inleds efter det att den hydrauliska avledningen inleddes, vilket innebär att det utifrån tidsserien inte går att avgöra om den är belägen inom påverkansområdet. Baserat på mätdata är bedömningen att påverkansavståndet norr om anläggningen är större än 100 m. Påverkansavståndet söder om anläggningen bedöms vara större än 75 m, medan påverkansavståndet öster om anläggningen bedöms vara minst 45 m.



Figur B2-16. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen GW 1, BH-7 och BH-8 vid berganläggningen i Sala. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes GW-1, BH-7 and BH-8 at the Sala rock facility.)



Figur B2-17. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen BH-3 och BH-5 vid berganläggningen i Sala. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes BH-3 and BH-5 at the Sala rock facility.)



Figur B2-18. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen GW-2 and BH-6 vid berganläggningen i Motala. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes OBH1, OBH2 and OBH4-6 at the Motala rock facility.)

Gånghester

Anläggningen ligger cirka 5 km nordost om Borås i Västra Götalands län. Anläggningen består av två oinklädda bergrum med en total lagringskapacitet på cirka 50 000 m³. Diesel lagrades under hela drifttiden 1976–1996. Lagringen skedde på en fast vattenbädd. Bergrummen ligger 27–33 m under markytan som i området varierar mellan 202–208 m.ö.h. (Svedberg och von Brömssen 2000).

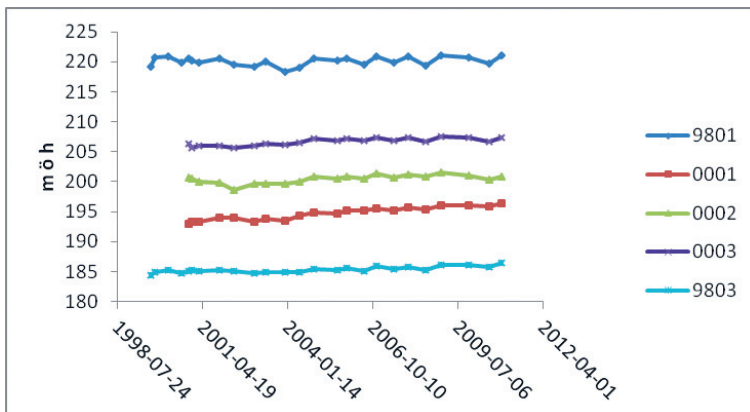
Berggrunden består främst av granitisk migmatitisk gnejs. I området finns morän och torv men också berg i dagen. De översta 3–5 m av berget är uppsprucket med flertalet tydliga sprickzoner. Inga större vattendrag finns i området. Lillån är recipient för läckvattnet. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 450 mm (Rodhe et al. 2006).

Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 8 mätpunkter, inom cirka 50 m från anläggningen. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå och ytvattennivå. Mätdata finns tillgängliga från 1999 och framåt. Tabell B2-8 anger lägena för fem av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-8. Borrhållägen i förhållande till berganläggningen i Gånghäster. (Locations of boreholes in relation to the Gånghäster rock facility.)

Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
9801	20	Väst
0001	40	Väst
0002	55	Öst
0003	35	Syd
9803	20	Norr

Vid anläggningen i Gånghäster sker avvecklingen utan något system för hydraulisk avledning. Anläggningen är belägen i en bergssluttning, vilket kan förklara de relativt stora skillnaderna i grundvattennivå mellan olika borrhål (figur B2-19). I samtliga tidsserier på uppmätta grundvattennivåer kan man notera en långsam nivåhöjning sedan avvecklingen inleddes, vilket således indikerar att samtliga borrhål är belägna inom påverkansområdet.



Figur B2-19. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen 0001–3, 9801 och 9803 vid berganläggningen i Gånghäster. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes 0001–3, 9801 and 9803 at the Gånghäster rock facility.)

Kristinehamn

Anläggningen är belägen cirka 3 km nordväst om Kristinehamn i Värmlands län. Anläggningen består av tre oinklädda bergtrum med en total lagringskapacitet på cirka 37 500 m³. Anläggningen invigdes 1969 och lagrade bensin på en fast vattenbädd fram till utlastningen 1997. Bergtrummen ligger 30–33 m under markytan som i området varierar mellan 55–58 m.ö.h. 310 m ifrån anläggningen ligger ett annat bergtrum som ägs av Statoil.

Berggrunden runt anläggningen består av en grå-röd, medelgrov och gnejsig granit. Stora delar av området utgörs av berg i dagen. Morän är den dominerande jordarten. Berget är relativt tätt, dock med en större sprickgrupp i närheten av anläggningen. 150 m öster om anläggningen ligger Varnumsviken som är recipient för läckvatten (Sandstedt och von Brömssen 2001).

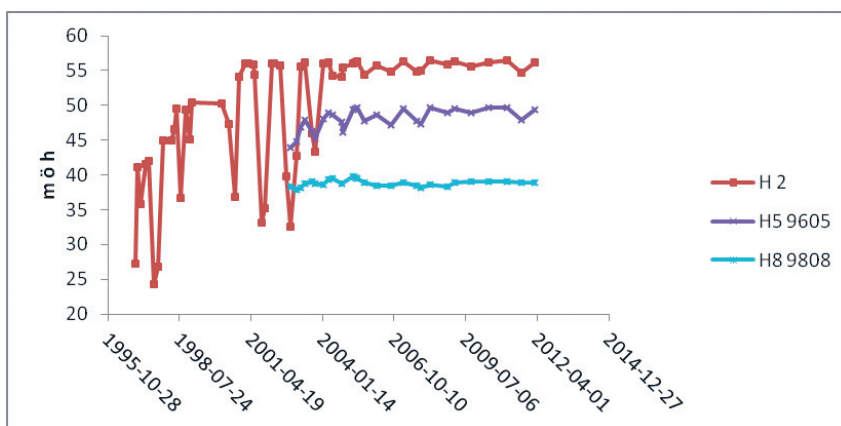
Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 300 mm (Rodhe et al. 2006). Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 8 mätpunkter, inom cirka 50 m från anläggningen. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå. Mätdata finns tillgängliga från 1996 och framåt. Tabell B2-9 anger lägena för sex av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-9. Borrhållslägen i förhållande till berganläggningen i Kristinehamn.
(Locations of boreholes in relation to the Kristinehamn rock facility.)

Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
H1	10	Väst
H2	10	Norr
H4 9604	30	Syd
H5 9605	40	Öst
H6 9806	60	Väst
H8 0908	40	Norr

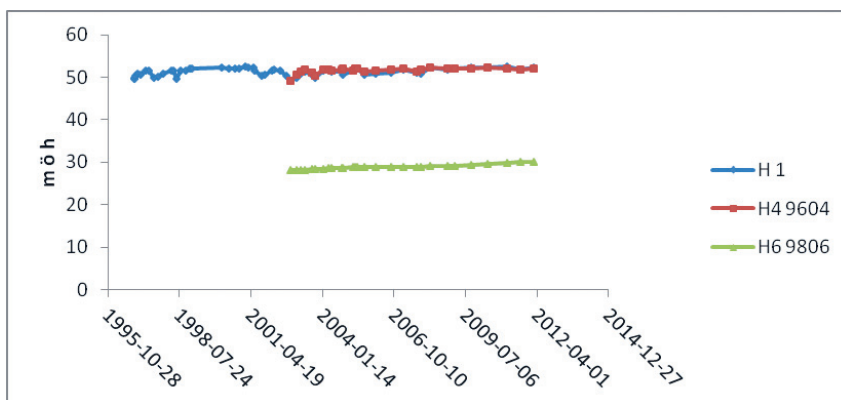
Figur B2-20 visar uppmätta grundvattennivåer i borrhål belägna norr och öster om anläggningen. De inledande kraftiga nivåvariationerna i borrhålet H 2 kan förklaras av att anläggningen tidigare tömdes på vatten genom pumpning. Denna pumpning har numera upphört och anläggningen återfylls på naturlig väg och utan hydraulisk avledning. En svag återhämtning av grundvattennivån kan urskiljas i borrhålen H 2 och H5 9605 och de kan därför bedömas vara belägna inom påverkansområdet. Den uppmätta grundvattennivån i borrhålet H8 9808 uppvisar ingen tydlig respons på avvecklingen bedöms därför vara belägen utanför påverkansområdet.

Figur B2-21 visar tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i borrhål belägna söder och väster om anläggningen. Man kan notera en viss återhämtning i samtliga dessa tidsserier och de kan därför anses vara belägna inom påverkansområdet. Baserat på de uppmätta grundvattennivåerna är bedömningen att påverkansavståndet är minst 10–40 m norr om anläggningen, större än 60 m väster om anläggningen, större än 40 m öster om anläggningen och större än 30 m söder om anläggningen.



Figur B2-20. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen H 2, H5 9605 och H8 9808 vid berganläggningen i Kristinehamn. (Time series of measured

groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes H 2, H5 9605 and H8 9808 at the Kristinehamn rock facility.)



Figur B2-21. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen H 1, H4 9604 och H6 9806 vid berganläggningen i Kristinehamn. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes H 1, H4 9604 and H6 9806 at the Kristinehamn rock facility.)

Blädinge

Anläggningen ligger cirka 6 km söder om Alvesta i Kronobergs län. Anläggningen består av 6 oinklädda bergtrum med en total lagringskapacitet på cirka 73 000 m³. Lagring på rörlig vattenbädd påbörjades 1966 och upphörde 1995. Både bensin och diesel lagrades i bergtrummen fram till i mitten av 1980-talet, då all bensin byttes ut mot diesel. Bergtrummen ligger 33–38 m under markytan som i området varierar mellan 151–155 m.ö.h. (Berggren 1996).

Berggrunden i området består av grå-röd mediumkornig granit. Jordtäcket består av silt ovan morän, med en mäktighet på upp till 6 m. Det finns då sprickzoner i berget kring anläggningen. Sjön Salen är belägen nära anläggningen och är recipient för läckvatten. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 300 mm (Rodhe et al. 2006).

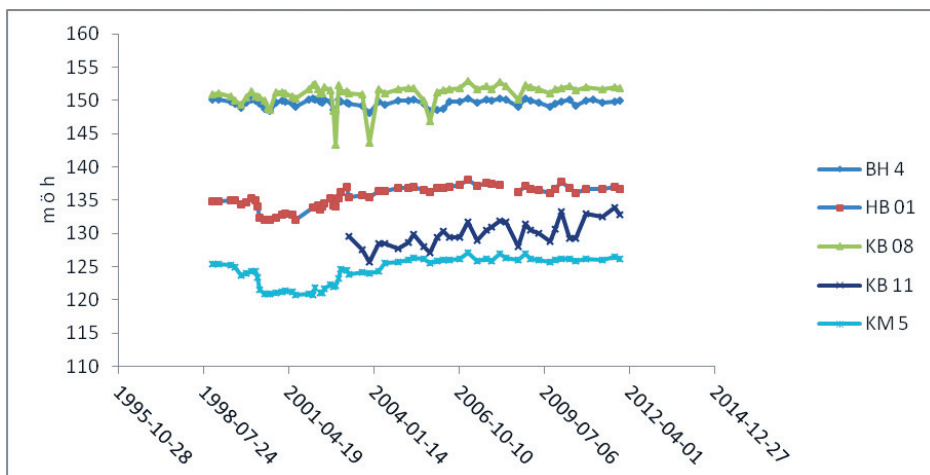
Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 20 mätpunkter, upp till cirka 900 m från anläggningen. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå och läckvattenflöde. Mätdata finns tillgängliga från 1998 och framåt. Tabell B2-10 anger lägena för fem av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-10. *Borrhålslägen i förhållande till berganläggningen i Blädinge. (Locations of boreholes in relation to the Blädinge rock facility.)*

Rör	Avstånd [m]	Vädersträck
BH 4	65	Norr
HB 01	200	Norr
KB 08	30	Väst
KB 11	65	Nordöst
KM 5	130	Väst

De olika berggrummen som tillhör anläggningen i Blädinge är anslutna till varandra men är också spridda över ett större område. Vid anläggningen sker fortfarande avledning av vatten genom intermittent pumpning. Denna intermittenta pumpning ger upphov till kortvariga grundvattennivåvariationer i borrhålen kring anläggningen. Enligt figur B2-22) uppvisar uppmätta grundvattennivåer i borrhålen BH 04, KB 08 och KB 11 sådana kortvariga variationer.

Grundvattennivåmätningarna i borrhålen KM 5 och HB 01 visar inte sådana kortvariga nivåvariationer. Detta indikerar antingen att variationerna i pumpningen dämpas ut på vägen mot borrhålen, eller att de är belägna utanför påverkansområdet för pumpningen. Baserat på uppmätta grundvattennivåer är bedömningen att påverkansavståndet är 30–130 m i väster om anläggningen och 65–200 m i nord- nordöstlig riktning från anläggningen.



Figur B2-22. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen BH 4, HB 01, KB 08, KB 11 och KM 5 vid berganläggningen i Blädinge. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes BH 4, HB 01, KB 01, KB 08, KB 11 and KM 5 at the Blädinge rock facility.)

Skattkärr

Anläggningen ligger cirka 3 km öster om Skattkärr i Värmlands län. Anläggningen består av ett oinklätt bergrum som delvis förstärkts med sprutbetong. Den totala lagringskapaciteten är cirka 57 000 m³, där endast 50 000 m³ lagrades. Lagringsprincipen var fast vattenbädd. Diesel lagrades under hela drifttiden 1975–1996. Bergrummet ligger 21–37 m under markytan, som i området varierar mellan 56–72 m.ö.h. (VBB VIAK 1998).

Berggrunden i området består av gnejs med inslag av amfibolitskikt och glimmer. Berget täcks av morän med varierande mäktighet. Via bäckar och diken når läckvattnet recipienten (sjön Vänern) cirka 1,2 km väster om anläggningen. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 300 mm (Rodhe et al. 2006).

Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 15 mätpunkter. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå och läckvattenflöde. Mätdata finns tillgängliga från 1997 och framåt.

Asphyttan

Anläggningen är belägen i Rockberget, cirka 1,5 km väster om Asphyttan i Värmlands län. Anläggningen består av ett oinklätt bergrum med en total lagringskapacitet på 57 000 m³, men endast cirka 50 000 m³ lagrades. Inlastningen skedde 1974 och diesel lagrades på fast vattenbädd fram till utlastningen 1995. Bergrummet ligger 30–34 m

under markytan, som i området varierar mellan 144–148 m.ö.h. (Svedberg och von Brömssen 2001).

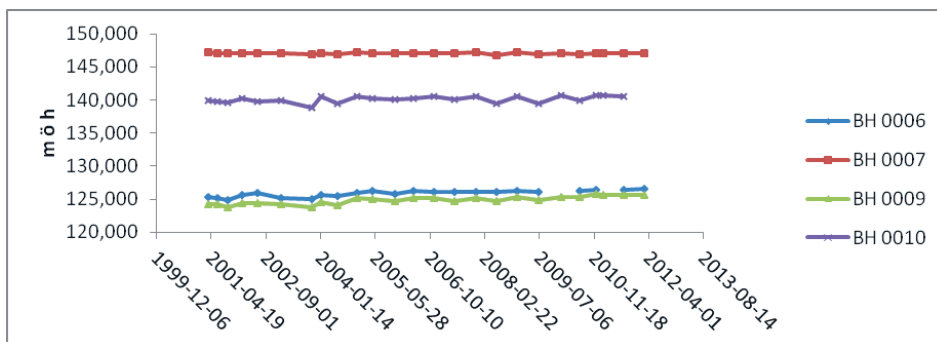
Berggrunden består av gråröd till rödgrå, medel- till grovkornig, förgnejsad granit. Berget är mycket tätt och det finns endast få sprickor. Närområdet täcks av ett tunt moräntäcke omväxlande med berg i dagen. Primär recipient är Rockbergsbäcken som ungefär 700 m sydöst om anläggningen mynnar i sjön Aspen. Beräknad grundvattenbildning i området är cirka 300–375 mm (Rodhe et al. 2006).

Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 10 mätpunkter, upp till cirka 150 m från anläggningen. Mätningar har avslutats i en mätpunkt 2003. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå. Mätdata finns tillgängliga från 1997 och framåt. Tabell B2-11 anger lägena för fyra av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-11. *Borrhåslägen i förhållande till berganläggningen i Asphyttan. (Locations of boreholes in relation to the Asphyttan rock facility.)*

Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
BH 0006	65	Syd
BH 0007	80	Norr
BH 0009	45	Norr
BH 0010	150	Syd

Tidsserierna på uppmätta grundvattennivåer (figur B2-23) tyder på en återhämtning av grundvattennivån i borrhålen BH 0006 och BH 0009, vilket indikerar att påverkansområdet runt anläggningen är större än 65 m. Även grundvattennivån i borrhålet BH 0010 uppvisar en viss återhämtning; mätserien tyder dock på stora nivåvariationer som kan vara naturliga. Grundvattennivån i borrhålet BH 0007 uppvisar ingen återhämtning och bedöms därför vara belägen utanför påverkansområdet.



Figur B2-23. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen BH 0006, BH 0007, BH 0009 och BH 0010 vid berganläggningen i Asphyttan. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes BH 0006, BH 0007, BH 0009 och BH 0010 at the Asphyttan rock facility.)

Vänersborg

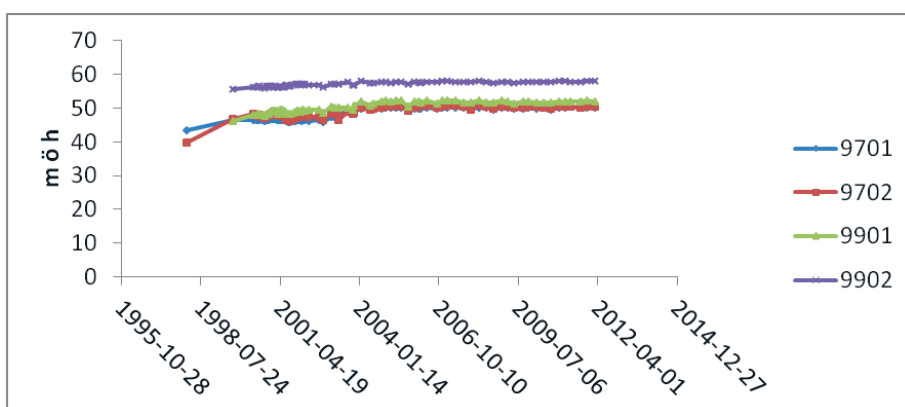
Anläggningen ligger cirka 1 km nordväst om Vänersborg i Västra Götalands län. Anläggningen består av 4 bergrum med en total lagringskapacitet på 20 000 m³. Från inlastningen 1965 fram till 1980 lagrades MC77. Därefter lagrades diesel fram till utlastningen 1996. Fram till 1976 utnyttjades hela lagringsvolymen, därefter lagrades endast 16 000 m³ produkt. Lagringsprincipen var rörlig vattenbädd. Markytan i området varierar från Vänersnivå (cirka 44 m.ö.h.) till cirka 74 m.ö.h direkt över anläggningen. Bergrummen ligger cirka 40 m under markytan. Berggrunden utgörs av en enhetligt röd, grov, något skiffrig Kroppefjällsgranit. Jordlagren i höjdpardiet där bergrummen är insprängda är tunna och det finns områden med berg i dagen. I berget kring anläggningen finns det flertalet sprickor. Anläggningen är belägen nära sjön Väneren, som är recipient för läckvattnet (Ejdeling 1999). Beräknad grundvattenbildning i området är ca 375 mm (Rodhe et al. 2006).

Mätprogrammet kring anläggningen omfattar grundvattennivåmätningar i 4 mätpunkter, upp till cirka 180 m från anläggningen. Mätprogrammet omfattar även vattenbäddnivå, läckvattenflöde och ytvattennivå (sjön Väneren). Mätdata finns tillgängliga från 1998 och framåt. Tabell B2-12 anger lägena för fyra av bergborrhålen i förhållande till berganläggningen.

Tabell B2-12. Borrhålslägen i förhållande till berganläggningen i Vänersborg. (Locations of boreholes in relation to the Vänersborg rock facility.)

Rör	Avstånd (m)	Väderstreck
9701	65	Väst
9702	15	Sydöst
9901	30	Öst
9902	160	Väst

Figur B2-24 redovisar tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i samtliga borrhål kring berganläggningen. Det ska påpekas att borrhålet 9701 är beläget knappt 30 m från tillfartsrampen. Samtliga tidsserier uppvisar responser av den hydrauliska avledningen och bedöms därför vara belägna inom påverkansområdet.



Figur B2-24. Tidsserier på uppmätta grundvattennivåer (m.ö.h.) i borrhålen 9701, 9702, 9901 och 9902 vid berganläggningen i Vänersborg. (Time series of measured groundwater levels (m.a.s.l.) in boreholes 9701, 9702, 9901 and 9902 at the Vänersborg rock facility.)

Sammanfattning med avseende på påverkansavstånd

För respektive beredskapslager har tidsserier på uppmätta grundvattennivåer i borrhål i berg används som underlag för en enkel, grov analys av påverkansavståndet från anläggningen till följd av avvecklingen och tillhörande vattennivåförändring i bergrummen. Genom denna analys har avståndet kunnat bestämmas till borrhål i olika riktningar från anläggningen där den uppmätta grundvattennivån uppvisar respektive ingen respons på avvecklingen (se tabell B2-13).

Ungefär hälften av de undersökta anläggningarna uppvisar respons på avvecklingen i samtliga borrhål kring anläggningen. I dessa fall anges påverkansavståndet anges då vara större än avståndet till det borrhål som är beläget på störst avstånd från berganläggningen. Enligt tabellen är påverkansavståndet 150 m eller mindre för fem av

de studerade anläggningarna. Vid en anläggning är påverkansavståndet minst 160 m eller större. Vid de övriga fem studerade anläggningarna är de mest avlägsna borrhålen belägna 45–100 m från anläggningen, vilket begränsar möjligheterna att dra slutsatser endast utifrån uppmätta grundvattennivåer. En försiktig slutsats baserat på den genomförda dataanalysen är att påverkansavståndet i berg kring de studerade berganläggningarna troligen är mindre än 150 m i de flesta fall.

Tabell B2-13. *Sammanställning av påverkansavstånd i berg, baserat på grundvattennivåmätningar vid avveckling av oljelager i bergrum. (Summary of influence distances in rock, based on groundwater-level measurements during decommissioning of oil storages in rock caverns.)*

Anläggning	Påverkansavstånd i berg (m)	Kommentar
Asphyttan	< 150	
Blädinge	< 130	
Gällö	< 115	
Gånghester	> 55	Ingen observation på större avstånd.
Kälarne	< 100	
Köping 2	> 45	Påverkan på upp till 200 m konstaterats men i riktning där annan anläggning finns. Ingen observation på större avstånd i ostörd riktning.
Kristinehamn	> 60	Ingen observation på större avstånd
Motala	> 60	Ingen observation på större avstånd.
Murjek	< 90	
Sala	> 100	Ingen observation på större avstånd.
Vänersborg	> 160	Ingen observation på större avstånd.

Inläckage av grundvatten

Som del av avvecklingen av beredskapslager för olja genomför SGU prognoser av uppfyllningstiden. Dessa prognoser baseras på bergrummens volym och uppmätt inläckage. Tabell B2-14 redovisar dels verkligt utfall, dels differensen mellan prognosresultat vid tre olika tidpunkter och det verkliga utfallet. Ett minus i tabellen betyder således att den prognostiserade uppfyllnadstiden var kortare än den verkliga uppfyllningstiden. Som exempel betyder Gällö (-26) att det tog 26 månader längre att fylla upp berganläggningen jämfört med den prognos som gjordes baserat på bergrumsvolym och uppmätt inläckage. Resultaten i tabellen tyder på att denna typ av prognos underskattar uppfyllnadstiden. Det kan möjligen förklaras av att inläckaget minskar med tiden i takt med att bergrummet fylls upp, beroende på att den hydrauliska gradienten mot bergrummet minskar.

Tabell B2-14. Verklig uppfyllnadstid samt jämförelser med resultat från prognoser vid tre olika tidpunkter. (Actual fill-up times and comparisons with predictions at three different points in time.)

Anläggning	Verkligt utfall (antal månader)	Diff. för prognos #1 2000-08-16 (antal månader)	Diff. för prognos #2 2001-01-19 (antal månader)	Diff. för prognos #3 2007-009-26 (antal månader)
Gällö	36	-26	-26	
Hofors	68	-8	-8	
Kälarne	30	-6	-6	
Köping 1	48	-6	-6	
Lycksele	9	-7	-7	
Lärbro	24	-6	-6	
Lärbro	26	15	-2	
Motala	122	-2	-2	-2
Sala	2	0	0	
Skattkärr	38	-14	-14	
Skogaby	82	-46	-46	
Vad	36	6	6	
Vilshult	80	100	-20	
Vänersborg	12	-10	-10	
Värnamo	85	-19	-19	1
Åtvidaberg	172	44	20	-28

Genomförd numerisk flödesmodellering

Tabell B2-16 ger en kortfattad sammanställning av de numeriska modelleringsverktyg som använts inom ramen för avvecklingen av beredskapslager för olja. Tabell B2-16 redovisar differenser (Diff.) mellan prognoser och verkliga utfall. För att kunna göra jämförelserna har två borrhål valts ut vid respektive berganläggning, i lägen som sammanfaller med motsvarande modells ekvidistanter på prognostiserade grundvattennivåer. Medelvärdet på den uppmätta grundvattennivån i respektive borrhål har använts för jämförelse med den prognostiserade grundvattennivån.

Man kan konstatera att möjligheterna att dra slutsatser reduceras av det begränsade dataunderlaget. En observation som dock kan göras är att de två prognoser på grundvattennivåer med bäst passning mot det verkliga utfallet under avvecklingen (Vänersborg och Gällö) är baserade på tvådimensionella modeller.

Tabell B2-15. Förteckning över verktyg för numerisk flödesmodellering som använts för prognoser inför avveckling av oljelager i berggrum. (List of numerical flow-modelling tools used for predictions prior to decommissioning of oil storages in rock caverns.)

Anläggning	Program	Modelltyp
Gånghester	FLOWPATH	Finita differenser (3D)
Jönköping	MODFLOW	Finita differenser (3D)
Vänersborg	SEEP/W	Finita element (2D)
Asphyttan	MODFLOW och MODPATH	Finita differenser (3D)
Kristinehamn	MODFLOW	Finita differenser (3D)
Gällö	WINFLOW och MODFLOW	Finita differenser (2D)
Blädinge	GMS/MODFLOW	Finita differenser (3D)

Tabell B2-16. Differenser mellan prognoser och verkliga utfall på olika avstånd från oljelager i berggrum. (Differences between predictions and measurements at various distances from oil storages in rock caverns.)

Anläggning	Avstånd till borrhål 1 (m)	Avstånd till borrhål 2 (m)	Diff. borrhål 1 (m.ö.h.)	Diff. borrhål 2 (m.ö.h.)
Gånghester	20	30	30	15
Vänersborg	65	150	7	0
Kristinehamn	40	50	15	8
Gällö	65	115	5	4

Mätprogram och dataunderlag för beredskapslagren

De mätprogram som genomförs i samband med avveckling av beredskapslager för olja innefattar vattennivåer i berganläggningen, grundvattennivåer i berg och i begränsad omfattning även ytvattennivåer och avledd vattenmängd. Mätningar genomförs i regel 4–6 gånger per år. Vid många av dessa berganläggningar finns det ett förhållandevis stort antal mätpunkter. För tiden innan avvecklingen inleddes finns det ofta endast grundvattennivådata från enstaka borrhål.

I samband med avvecklingen av ett berggrum tas det alltid fram en rapport ("Geomiljö i berg") som beskriver hydrogeologiska förhållanden och redovisar (i förekommande fall) resultat från genomförda prognoser rörande påverkansområdets utsträckning. Det huvudsakliga syftet med dessa rapporter är att beskriva risker för spridning av petroleumprodukter i berg och att redogöra för möjligheterna att utföra hydraulisk avledning. Detta innebär att det i samtliga fall finns att tillgå beskrivningar av de hydrogeologiska förhållandena i berganläggningens omgivning.

Underlag för fortsatta studier

Bedömningen är att de mätningar och prognoser som görs i samband med avvecklingen av beredskapslager för olja gör dessa berganläggningar till lämpliga kandidater för fortsatta studier. Som framgått av ovanstående beskrivningar finns det en stor mängd data och information att tillgå om varje berganläggning. Bergrummen är inte injekterade, de är spridda över landet och prognoser har genomförts med olika metoder. Detta innebär att de sammantaget ger en bra grund för att fördjupa kunskaperna om hydrogeologiska och hydrologiska processer kring berganläggningar samt tillämpbarheten för olika prognosmetoder. Ett problem i sammanhanget är dock att data och information om anläggningarna är spridd och inte samlad. SGU har arkiv och databaser med en stor mängd data och information, som dock inte är komplett och till stor del inte tillgänglig i digital form.

2.2 Oljebergrum i Gävle

Beskrivning av berganläggningen

Berganläggningen är uppförd för lagring av oljeprodukter och består av nio bergrum (Björnsell och Enström 2008). Anläggningen är belägen i Gävle hamn. Varje bergrum har en bredd på cirka 15 m och det längsta bergrummet har en längd på 250 m lång. I dagsläget bortleds 150 000 m³ inläckande grundvatten från anläggningen varje år (Björnsell och Enström 2008). I samband med uppförandet borrades 22 borrhål i berg och användes bland annat för vattenkemisk provtagning för att undersöka inläckagevattnets ursprung (Larsson et al. 1977). Infiltrationsbrunnar är anlagda mellan bergrummen i syfte att förhindra produktspridning.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berget består av en blandning av gnejs, gnejsgranit, amfibolit, pegmatit och diabas, med dominans av bandad gnejs (Larsson et al. 1977). Bergrummen korsas av både små och stora sprickzoner i berget. Berget överlagras av morän med relativt hög vattengenomsläpplighet.

Topografiska förhållanden

Markytan ovan anläggningen har endast små nivåvariationer.

Potentiell grundvattenbildning till jord

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inga prognoser har rapporterats.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

I samband med uppförandet av ett av bergrummen genomfördes grundvattennivåmätningar i 14 borrhål i berg, upp till cirka 250 m från anläggningen. I direkt anslutning till bergrummet noterades en största sänkning av tryckhöjden i berg på cirka 10 m under uppförandet. Sänkningen uppgick som mest till 5 m på ett avstånd av ungefär 125 m från bergrummet. Grundvattennivån i borrhål längre från anläggningen

är svåra att utvärdera, eftersom de vid tiden för mätningen var påverkade av andra, nyligen uppförda bergrum i samma område.

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen bedöms inte vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

2.3 Bergumsanläggningen vid Syrhåla

Beskrivning av berganläggningen

Vid Syrhåla, strax norr om Torshamnen i Göteborgs kommun, finns fyra bergrum som uppfördes 1975–1981 för beredskapslagring av petroleumprodukter. Bergrummen tömdes och övertogs av Göteborgs stad 1990. Sedan ett antal år används två av bergrummen av Gryaab för slamavvattning (endast ett används i dagsläget). Ett av bergrummen används av Göteborgs Hamn som upplag av muddermassor och sedan 2010 används det fjärde bergrummet för mellanlagring av råolja. Bergrummen har vardera en längd på cirka 500 m, en bredd på 20 m och en höjd på 30 m. De är parvis förbundna med varandra (Gryaab 2011, GHAB 2012).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Bergrummen är uppförda i en bergplint och har därför sannolikt tunna eller inga jordlager ovanpå berget och heller inga ytvattenförekomster.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Prognoser av inläckage av grundvatten eller dess hydrogeologiska eller hydrologiska effekter i omgivningarna har såvitt känt inte genomförts.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Enligt kontrollprogrammen för driften av bergrummen (Gryaab 2011, GHAB 2012) sker mätning av grundvattennivå i 21 borrhål i berg, ovan eller i direkt anslutning till bergrummen. För Gryaabs bergrum redovisas mätdata sedan 1998.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Prognoser har såvitt känt inte genomförts (se ovan).

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen bedöms inte vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

3 Mellan- och slutförvaring av avfall

3.1 Mellanlager för använt kärnbränsle (Clab)

Beskrivning av berganläggningen

Anläggningen Clab är belägen på Simpevarpshalvön, nära Oskarshamns kärnkraftverk i Oskarshamns kommun. Anläggningen används för mellanlagring av använt kärnbränsle och vissa hårdkomponenter i avvaktan på inkapsling och slutförvaring av det använda kärnbränslet. Mellanlagringen sker i bassänger i två parallella bergtrum, som uppfördes 1980–85 respektive 1999–2004. Bergtrummens tak och botten är belägna på nivåerna 20 respektive 50 m under havet, 30–60 meter under markytan (Werner 2010). Varje bergtrum är ungefär 21 m brett, 28 m högt och 115 m långt. En vattenfylld transportkanal förbinder de två bergtrummen med ett bränslehissschakt, som går upp till anläggningens ovanmarksdel.

Bergundersökningar gjordes i samband med uppförandet av bergtrummen och tillhörande tunnlar (Eriksson 1982, Stanfors et al. 1998). Dessa undersökningar inkluderade bland annat kartering av bergarter och geologiska strukturer. Vid uppförandet av Clab 1 gjordes bland annat förinjektering av bergtrummens tak och väggar. Vid uppförandet av Clab 2 gjordes systematisk förinjektering kring hela bergtrummet (Werner 2010). Clab är beläget på industrimark, nära Oskarshamns kärnkraftverk.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Finkorning dioritoid är den dominerande bergarten vid Clab, med inslag av aplit- och pegmatitgångar. Berget närmast kring bergtrummen har en hög sprickfrekvens och det finns två sprickzoner alldeles väster och öster om berganläggningen. Många av de sprickor som påträffades under uppförandet av Clab är dock inte grundvattenförande.

Jordlagren domineras av fyllning och morän. Simpevarpshalvön har en stor andel berg i dagen, och jordmäktigheterna i jordtäckta områden är generellt små eller mycket små (som mest någon meter). Havsbotten kring Simpevarpshalvön domineras av morän, delvis överlagrad av leryttja. Det finns inga bäckar på Simpevarpshalvön. Norr om berganläggningen finns en reglerad branddamm för kärnkraftverkets behov (Werner 2010). Simpevarpshalvön har en flack topografi.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Såvitt känt gjordes inga prognoser avseende hydrogeologisk och hydrologisk omgivningspåverkan inför uppförandet av det första bergtrummet (Clab 1). Inför uppförandet av Clab 2 genomfördes modellberäkningar med modellverktyget MODLOW. Modellen kalibrerades dels mot ostörda förhållanden, det vill säga grundvattennivådata innan Clab 1 uppfördes, dels uppmätta grundvattennivåer under driften av Clab 1 (Rhén et al. 1998).

Enligt modellberäkningarna ger grundvattenbortledningen från berggrummen upphov till en sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg maximalt upp till 500 m från anläggningen, sannolikt med påvisbara sänkningar endast i direkt anslutning till anläggningen.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Kring anläggningen görs sedan slutet av 1970-talet grundvattennivåmätningar i borrhål i berg. I samband med uppförandet av Clab 2 påbörjades även mätningar i grundvattenrör och i enskilda bergbrunnar i Clabs omgivning (Werner 2010). Efter uppförandet av Clab 2 har inläckaget ökat från 30–40 till 40–50 liter per minut. Med undantag från några borrhål i berg i direkt anslutning till berganläggningen visar inte mätdata på någon trycksänkning till följd av uppförandet av Clab 1 eller Clab 2.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

För driften av Clab 1 och Clab 2 bedömdes inläckaget under drift öka med cirka 25 % jämfört med driften av enbart Clab 1 (Rhén et al. 1998), vilket stämmer relativt väl med den uppmätta ökningen. Likaså har enbart sänkning av grundvattnets tryckhöjd enbart kunnat observeras i direkt anslutning till berganläggningen.

Underlag för fortsatta studier

Genom SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) bör det finnas möjlighet att tillgå kvalitetssäkrade data, dock först från och med 1998 då ett av de två berggrummen redan var i drift. Berganläggningen bedöms dock vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

3.2 Slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark

Beskrivning av berganläggningen

SKB ansökte 2011 om att uppföra och driva en slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle i Forsmark i Östhammars kommun. Den planerade 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 och en yta på 3–4 km² (Werner et al. 2010).

Omfattande platsundersökningar genomfördes 2002–2007 på två platser, Forsmark i Östhammars kommun och Laxemar-Simpevarp i Oskarshamns kommun (SKB 2008a, 2009a). De resultat av platsundersökningarna som är utgångspunkt för detaljprojektering sammanfattas i SKB (2009b, c). Nära den planerade berganläggningen finns Forsmarks kärnkraftverk med industriområde, dräneringssystem och kylvattentunnlar, samt den befintliga slutförvarsanläggningen SFR (se avsnitt 3.4).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Granit är den dominerande bergarten i området. De övre cirka 150 m av berget innehåller ett nätverk av flacka sprickzoner (där vissa kan vara så kallade bankningsplan) med hög horisontell hydraulisk konduktivitet. Den mellanliggande bergmassan är betydligt mindre vattengenomsläpplig, med undantag för brantstående

sprickzoner med hög vattengenomsläpplighet. Bergets vattengenomsläpplighet avtar kraftigt med djupet och under ungefär 150 m djup är sprickfrekvensen betydligt lägre (Werner et al. 2010).

Siltig-sandig morän är den dominerande kvartära avlagringen i området, med förekomst av lerig morän samt blockig morän i vissa områden. Jordlagren är relativt tunna, med en mäktighet som typiskt är under 5 m. I området finns det ett antal relativt små och grunda sjöar, våtmarker och små bäckar. Under perioder med höga havsnivåer sker inträngning av havsvatten till de lägst belägna sjöarna närmast kusten. Forsmarksområdet är låglänt och karaktäriseras av en småskalig topografi.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet har generisk flödesmodellering avseende inläckage till och omgivningspåverkan från en berganläggning av aktuell typ genomförts av bland andra Stokes and Thunvik (1978) och Painter and Sun (2005).

Plats- och anläggnings specifika prognoser avseende uppförande och drift har utförts med modelleringsverktyget MIKE SHE (Mårtensson och Gustafsson 2010). Modellering genomfördes även med verktyget DarcyTools (Svensson och Follin 2010), men denna modellering fokuserar på berget och dess interaktion med förvaret. Motsvarande modellberäkningar har även utförts för en alternativ lokalisering av förvaret till Laxemar-Simpevarpsområdet i Oskarshamns kommun (Mårtensson et al. 2009, Svensson och Rhén 2010).

Enligt MIKE SHE-modelleringen kommer trycksänkningar i berget att uppstå i relativt stora områden. Trycksänkningens storlek och utbredning ökar med djupet. På nivån 50 m under havet bedöms trycksänkning uppstå i ett område som omfattar 20–30 km², beroende injekteringsskärmens vattengenomsläpplighet. Själva grundvattenytan kommer främst att sänkas av i relativt små områden (i storleksordningen 1 km²) med brantstående sprickzoner med hög vattengenomsläpplighet som har kontakt med de ovanliggande jordlagren.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Det hydrogeologiska och hydrologiska mätprogram i Forsmark som initierades och utvecklades inom ramen för platsundersökningarna pågår (SKB 2007). Programmet omfattar bland annat grundvattennivåmätningar i kärn- och hammarborrhål, grundvattennivåmätningar i grundvattenrör i jord samt ytvattennivåer- och flöden.

Underlag för fortsatta studier

Genom SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) bör det finnas möjlighet att tillgå kvalitetssäkrade data. Ansökan om att uppföra och driva anläggningen lämnades in 2011. Anläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

3.3 Slutförvar för använt kärnbränsle på ön Olkiluoto i Finland

Beskrivning av berganläggningen

Berganläggningen ONKALO är en forskningstunnel på ön Olkiluoto i Euraåminne kommun, Finland. Anläggningen drivs av Posiva Oy och syftar till platskaraktärisering samt geovetenskaplig och teknisk utveckling rörande slutförvaring av använt kärnbränsle. Enligt planerna ska ONKALO i ett senare skede byggas ut med deponeringstunnlar. Uppförandet av anläggningen påbörjades år 2004, och planerad försvarsnivå (420 meter under havet) nåddes år 2010.

Anläggningen består av en nedfartsramp, schakt och forskningstunnlar. Anläggningens huvudnivå är belägen på nivån 420 meter under havet och dess största djup är 520 m. I dagsläget omfattar anläggningen 8,5 km, inklusive alla tunnlar och schakt. Vid en utbyggnad av anläggningen för deponering av använt kärnbränsle tillkommer cirka 50 km tunnlar samt ytterligare 2–4 schakt.

Omfattande platsundersökningar har genomförts på ön Olkiluoto i över 20 år (Posiva 2009). Initiellt genomfördes ytbaserade undersökningar, som efter 2004 kompletterats med detaljundersökningar i samband med uppförandet av ONKALO. Berganläggningen är förinjekterad främst i de första 1 000 m av rampen (Arenius et al. 2008).

På ön Olkiluoto finns även ett kärnkraftverk, ett mellanlager för använt kärnbränsle, ett mellanlager för låg- och medelaktivt driftavfall samt slutförvaringsutrymme för driftavfall (Posiva 2008).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berget på ön Olkiluoto består huvudsakligen av gnejs och granit. De övre 120–140 m av berget har högre sprickfrekvens och vattengenomsläpplighet jämfört med djupare delar av berget. Jordlagren på ön domineras av sandig morän, lera och silt, med mellanliggande sandiga-grusiga jordlager. Jordlagren har i regeln en mäktighet på mellan 2 och 5 m.

På ön finns det ett antal vattendrag, bland annat bäckarna Lapinjoki och Eura, samt ett antal våtmarker. På ön finns även Korvensou-reservoaren, som används för kärnkraftverkets vattenförsörjning, som spolvattenreservoar vid borrningsarbeten och för övriga vattenbehov vid ONKALO (Posiva 2009). Olkiluoto är en relativt platt ö med små nivåvariationer (Posiva 2009).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet av ONKALO gjordes prognoser avseende inläckage av grundvatten till ONKALO samt grundvattenbortledningens effekter på grundvattennivåer och hydrologiska förhållanden (Löfman och Mészáros 2004, 2005, Vieno et al. 2003). Prognoserna gjordes med modelleringsverktyget FEFTRA (Löfman et al. 2007). Modelleringsresultaten indikerade att grundvattenbortledningen skulle ge upphov till en avsänkning av grundvattenytan på upp till 300 m inom ett påverkansområde på 2,5 km². Avsänkningen skulle främst uppstå i områden där det finns sprickzoner i berget som står

i kontakt med ramp och schakt. Med injektering skulle den största avsänkningen bli som högst 30 m och påverkansområdet skulle främst omfatta områden kring ramp och schakt.

Inför uppförandet gjordes utredningar avseende anläggningens injekteringsbehov, inklusive analytiska inläckageberäkningar (Riekkola et al. 2003). I utredningen gjordes även en sammanställning av erfarenheter rörande inläckage till olika typer av berganläggningar i Finland, Norge och Sverige. Utredningar visar tydligt att det finns en hel del data och information kring inläckage till berganläggningar, men ytterst lite tillgängligt underlag som behandlar hydrogeologiska och hydrologiska effekter av grundvattenbortledning från berganläggningar i de nordiska länderna. Med avseende på ONKALO uppdaterades utredningen något år efter byggstart (Sievänen et al. 2006).

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Hydrogeologiska och hydrologiska mätningar har pågått på Olkiluoto sedan 1989. Mätprogrammet som löpt under uppförandet av ONKALO presenterades inför byggstart (Posiva 2003a). Programmet omfattar bland annat grundvattennivåmätningar i hammar- och kärnbrorrhål, grundvattennivåmätningar i grundvattenrör i jord samt flödesmätningar i avrinningsstationer. Resultat från det hydrogeologiska mätprogrammet presenteras i Ahokas et al. (1993), Hänninen (1996), Voipio et al. (2004), Lehtimäki (2001), Ahokas et al. (2005), Tammisto et al. (2006), Klockars et al. (2007) och Vaittinen et al. (2008, 2009, 2010, 2011)). Denna publika rapportserie torde vara unik i sitt slag, givet att de data som presenteras representerar förhållanden inför, under och efter uppförandet av en större berganläggning i ett berg som motsvarar typiska svenska förhållanden.

Mätdata avseende meteorologi, flöden i vattendrag och grundvattennivåmätningar i enskilda brunnar presenteras i en egen rapportserie (Haapanen (ed.) (2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011)). Enligt detta mätprogram har ingen påverkan på enskilda brunnar på Olkiluoto kunnat observeras. Man har dock kunnat observera ett ökat läckage från Korvensou-reservoaren sedan efter uppförandet av ONKALO påbörjades.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Under uppförandet av ONKALO har det kontinuerligt gjorts uppdateringar av de platsbeskrivande flödesmodellerna, baserat på observationer från de hydrogeologiska och hydrologiska mätningarna (Karvonen 2011, Löfman et al. 2009, Rämä 2011). Utvärderingarna av hydrogeologiska effekter till följd av grundvattenbortledningen från ONKALO utgår från en "baseline" under perioden 1990–2004 (Ahokas et al. 2008, Posiva 2003b). Det ska alltså noteras att uppdatering av flödesmodeller genom jämförelser med mätdata, samt uppföljning av grundvattenbortledningens hydrogeologiska och hydrologiska effekter, är integrerade med den platsbeskrivande modelleringen. Detta motiveras av att berganläggningen ONKALO är ett viktigt objekt på platsen och att störningarna från grundvattenbortledningen ger viktiga bidrag till platsförståelsen (Posiva 2009).

Den senaste datautvärderingen (Karvonen 2011) baseras på mätdata från sammanlagt 338 mätpunkter. En numerisk flödesmodell har kalibrerats dels mot mätdata för opåverkade förhållanden (se ovan), dels mot mätdata som representerar olika steg i

uppförandet av ONKALO. Skillnaden mellan två modellberäkningar, som alltså kalibrerats mot olika datamängder, används sedan i nästa steg för att producera kartbilder över trycksänkning i berg samt avsänkning av grundvattenytan. Enligt kartorna medför grundvattenbortledningen från ONKALO i dagsläget (2010) en avsänkning av grundvattenytan som är 0,1 m eller mer på avstånd upp till något hundratal meter från anläggningen.

Underlag för fortsatta studier

Genom Posiva bör det finnas möjlighet att tillgå kvalitetssäkrade data, som även publiceras i publika rapporter. Berganläggningen bedöms därför vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

3.4 Slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall (SFR)

Beskrivning av berganläggningen

SFR är belägen i Forsmark, Östhammars kommun i Uppland. SFR är en slutförvarsanläggning för radioaktivt driftavfall från de svenska kärnkraftverken samt radioaktivt avfall från sjukhus, industri och forskning. Anläggningen togs i drift 1988. En utbyggnad av anläggningen är planerad för att ta emot rivningsavfall från kärnkraftverk från och med 2020 (SKB 2008a).

SFR består av en tillfartstunnel från markytan, en silo samt olika bergsalar. De senare är cirka 160 m långa, 10–20 m höga och 14–20 m breda. Bergrummet som rymmer silon har en höjd på 70 m och en diameter på 30 m. Undermarksdelens tak är beläget cirka 60 m under havets botten. Anläggningens djupaste del är belägen ungefär 140 m under havsbotten. Den totala längden av bergrum och tunnlar uppgår till cirka 4,5 km.

Inför och under uppförandet genomfördes omfattande undersökningar (Axelsson 1997a). Undersökningsprogrammet inför en utbyggnad av anläggningen presenteras i SKB (2008c). Delar av den befintliga anläggningen är bergförstärkt och injekterad (Carlsson and Christiansson 2007).

SFR är beläget nära Forsmarks kärnkraftverk, med tillhörande kylvattentunnlar samt dräneringssystem under reaktorbyggnaderna. I området planeras även uppförandet av en slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle (se avsnitt 3.2).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

SFR är uppfört i berg som består av pegmatisk granit, pegmatit samt metagranodiorit. Havsbotten ovan anläggningen domineras av morän, med vissa förekomster av glaciallera. Anläggningen är belägen under havsbotten. Havsbotten ovanför SFR har endast små nivåvariationer, liksom Forsmarksområdet i övrigt.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Det är inte känt huruvida det genomfördes prognoser av grundvattenbortledningens hydrogeologiska och hydrologiska effekter inför uppförandet av SFR.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Under uppförandet av SFR påbörjades grundvattennivåmätningar i ett antal tunnelborrhål. Detta mätprogram övergick så småningom i ett kontrollprogram för anläggningen och omfattar i dagsläget 12 borrhål, uppdelade i totalt 38 mätsektioner (Jönsson 2010). År 2002 påbörjades ett omfattande hydrogeologiskt och hydrologiskt mätprogram inom ramen för platsundersökningar för ett slutförvar för använt kärnbränsle (se avsnitt 3.2).

De grundvattennivåmätningar som sedan uppförandet av SFR genomförts i tunnelborrhålen visar att grundvattentrycket i borrhålen föll under uppförandet. Under driftskedet har grundvattentrycken närmast sig relativt stabila nivåer (Jönsson 2010). De grundvattennivåmätningar som år 2002 påbörjades inom ramen för platsundersökningarna år 2002 indikerade att grundvattenbortledningen från SFR inverkar på grundvattennivåerna i de övre delarna av berget inom ett relativt stort område (Follin 2008). Mätningarna indikerade bland annat på sannolika trycksänkningar i berget på cirka 3–5 m på ett avstånd av 500 m från SFR.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

I samband med den platsbeskrivande modelleringen för lokalisering av en slutförvarsanläggning i Forsmark användes inläckagedata från berganläggningen och grundvattennivådata från dess omgivning i syfte att undersöka eventuella effekter av grundvattenbortledningen på grundvattennivåer i berg inom ett större område (Bosson et al. 2008, Mårtensson och Gustafsson 2010). Beräkningarna genomfördes med modelleringsverktyget MIKE SHE. Modellberäkningarna visade generellt på god överensstämmelse mellan modellberäknade och uppmätta grundvattennivåer, givet att den befintliga SFR-anläggningen togs med i modellen.

Underlag för fortsatta studier

Genom SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) bör det finnas möjlighet att tillgå kvalitetssäkrade data. Berganläggningen är därför lämplig kandidat för fortsatta studier.

3.5 Djupförvar för farligt avfall från Rönnskärs smältverk

Beskrivning av berganläggningen

Boliden Mineral AB planerar att slutdeponera restprodukter vid smältverket på Rönnskär i en berganläggning under ön Hamnskär inom smältverksområdet i Skellefteå kommun, Västerbotten. Under förstudieskedet har även ett alternativ studerats vid gruvan i Åkulla (Dolk 2011).

Den planerade berganläggningen kommer att förläggas till ett djup på 300–350 m djup under markytan. Övriga delar av berganläggningen består av en 3 km lång spiralformad transportramp samt ett ventilationsschakt (Lundgren 2010). Förvarsdelen planeras av ”bergrumsskepp” i två plan. Varje bergrum planeras få en höjd på 17 m, en bredd på 16 m, en tvärsnittsarea cirka 250 m² och en längd på 160–180 m. Alla bergrumsskepp kommer att omges av en transportort.

Genomförda förundersökningar omfattar bland annat geologi (Allan 2009), grundvattenkemi (Brink Bylund 2009) samt hydrogeologi (Wladis 2008, 2011ab). Anläggningen kommer att uppföras under Rönnskärs industriområde, det vill säga under ett område som till stor del utgörs av utfyllda och hårdgjorda ytor.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berggrunden under Rönnskär utgörs huvudsakligen av metamorfa bergarter av sedimentärt och intrusivt ursprung och som genomskärs av pegmatit- och amfibolitgångar (Lundgren 2010). Pegmatiterna är ofta sprödare än sidoberget och kan lokalt ha en högre vattengenomsläpplighet jämfört med sidoberget. Berget innehåller korta kross- och sprickzoner. De övre 50–100 m av berget är mer uppsprucket jämfört med berget på större djup.

I dag utgörs marken inom Rönnskärs industriområde till cirka två tredjedelar av utfylld mark och naturlig mark förekommer inte längre inom industriområdet (Lundgren 2010). Den planerade anläggningen kommer att förläggas i anslutning till havet. Markområdena ovan den planerade berganläggningen har en flack topografi, med en total nivåskillnad som är mindre än 10 m (Lindeström et al. 2010).

Sammanfattning av genomförda prognoser

I miljökonsekvensbeskrivningen (Lindeström et al. 2010) redogörs inte för grundvattenbortledningen hydrogeologiska och hydrologiska effekter under uppförande och drift, eftersom det är uppenbart att inga allmänna eller enskilda intressen kan skadas.

Enligt den tekniska beskrivningen (Lundgren 2010) kommer avsänkningen kring berganläggningen under uppförande och drift att vara lokal och sannolikt begränsas till området i direkt anslutning till anläggningen. Undantaget är områden med granitisk berggrund inom den västra delen av industriområdet där det finns kraftiga horisontella sprickor (bankningsplan) i den övre delen av berget. I detta område bedöms grundvattenytan kunna sänkas av ned till havsnivå. I övrigt görs bedömningen att enskilda sprickor töms i princip ända ner till förvarsnivå, men i regel finns det en grundvattenyta 1–10 m ned i berget.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Det bedöms främst finnas behov av grundvattennivåmätningar i samband med att inlagringen av avfall slutförts, förvaret förslutits och grundvattenbortledningen upphört (Lundgren 2010). Detta kan till exempel ske genom avläsning av grundvattennivå i det ventilationsschakt som eventuellt ska anläggas och som har fysisk kontakt med rampen. När detta schakt fylls med gråberg bör därför en eller flera (till olika nivåer om ”pluggar” sätts) kraftiga rörbrunnar först installeras i schaktet.

Underlag för fortsatta studier

Ansökan om att uppföra och driva anläggningen lämnades in 2010. Anläggningen kan vara lämplig kandidat för fortsatta studier. I ansökan ses dock främst behov av

grundvattennivåmätningar när anläggningen förslutits, och man gör där bedömningen att anläggningen inte kräver tillstånd för vattenverksamhet (SGI 2012).

4 Gruvor

4.1 Garpenberg

Beskrivning av berganläggningen

Undermarksgruvan i Garpenberg i Hedemora kommun har anor sedan 800-talet. Gruvan drivs av Boliden Mineral AB sedan 1957. I samband med en tillståndsansökan 2011 gällande produktionsökning görs även en prövning av grundvattenbortledningen från gruvan, eftersom denna inte ingått i tidigare prövningar av gruvverksamheten (Eriksson och Lindeström 2011).

Huvuddelen av malmbrytningen sker i dagsläget på 800–1 100 m djup. I samband med en utökning av produktionstakten kommer ett bytt malmschakt att uppföras ned till ett djup på 1 175 m. Den fortsatta malmbrytningen planeras ske på 500–1 500 m djup. Under malmbrytningen genomförs i regel bergförstärkning men inte injektering. Det finns planer på dränering av tidigare obrutna delar av berget i syfte att minska risker i gruvan. Områdena ovan gruvan är påverkade av den långvariga gruvnäringen i form av slagg- och varphögar, sandmagasin och gruvhål.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berggrunden i Garpenbergsområdet består i huvudsak av sura och intermediära vulkaniska bergarter med inslag av kalksten (Axelsson et al. 1994a, Eriksson och Lindeström 2011).

Den dominerande jordarten i området är morän, med en mäktighet som generellt varierar lokalt från några meter till ett tiotal meter. Mindre förekomster av gyttna och lera finns i vissa dalgångar, främst i anslutning till sjöar och våtmarker. I området finns det ett antal sjöar (bland annat Gruvsjön, Finnhytte-Dammsjön, Rylshyttssjön, Stora Gransjön samt Lilla och Stora Jälken), vattendrag och klarningsmagasin. Flera av dessa har använts eller används inom gruvverksamhetens vattenhantering. Samtliga sjöar inom Garpenbergsområdet har anlagts eller dämats upp genom byggandet av dammar (Eriksson och Lindeström 2011).

Sammanfattning av genomförda prognoser

I samband med en genomgång av de hydrogeologiska förhållandena vid ett antal svenska gruvor, använde Axelsson et al. (1994a) analytiska modeller för planparallellt respektive radiellt grundvattenflöde för att beräkna påverkansområdet för sänkning av grundvattnets tryckhöjder kring Garpenbergsgruvan. Dessa beräkningar gav påverkansavstånd på mellan 0,8 och 3,3 km för dåvarande grundvattenbortledning och brytningsdjup (650 m), beroende på antaganden om flödesgeometri och grundvattenbildning.

Enligt miljökonsekvensbeskrivningen (Eriksson och Lindeström 2011) medför grundvattenbortledningen för nuvarande gruvdrift en sänkning av grundvattnets

tryckhöjder i berg inom 1 km från gruvan. Den nu planerade utökningen av gruvan, samt den förberedande dräneringen av bergmassan (i djupintervallet 500–600 m) i tidigare obrutna delar av berget, bedöms leda till sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg upp till cirka 2 km från gruvan.

Eftersom grundvattenbildningen till jord är betydligt högre än till bergmassan bedöms påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning komma att sträcka sig cirka 1 km från gruvan (Eriksson och Lindeström 2011). Sjöarna Stora Gransjön samt Lilla och Stora Jälken är belägna inom 1 km från gruvan. För dessa sjöar är prognosen att deras vattennivå kan komma att sänkas av 0,2–0,3 meter under utloppströsklarna i samband med torrår.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Grundvattennivåmätningar kring gruvan har inte genomförts inom ramen för hittillsvarande gruvdrift (Axelsson et al. 1994a). Inför den fortsatta gruvdriften har en inventering gjorts av enskilda brunnar i gruvans omgivning (Eriksson och Lindeström 2011). Boliden Mineral AB planerar ett mätprogram för att kunna följa upp eventuell påverkan från grundvattenbortledningen på grundvattennivåer i området.

Underlag för fortsatta studier

Garpenbergsgruvan kan vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

4.2 Rönnbäcken

Beskrivning av berganläggningen

I området Rönnbäcken i Storumans kommun planeras malmbrytning i två dagbrott till 300 m djup, med ett inbördes avstånd på cirka 5 km (IGE 2010). Förundersökningar omfattar främst tidigare provbrytningar. Injekttering för att minska inläckaget av grundvatten till dagbrotten planeras inte, eftersom dagbrotten kommer att utvidgas efter hand. Övriga grund- eller ytvattenpåverkande verksamheter (markanvändning, urban/rural miljö, andra berganläggningar m.m.).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Brytningsområdet befinner sig i den övre skollberggrunden i gränzonen mellan två delar som kallas Seve- respektive Køliskollorna. Dessa ursprungligen sedimentära bergarter är i varierande grad omvandlade till skifferar, kvartsiter och marmor. I brytningsområdet är skifferar med låg omvandlingsgrad – fylliter - vanliga, men även kalkrika bergarter och inlagringar av vulkaniska och magmatiska bergarter förekommer. I det aktuella området har dessa bergarter en utsträckning i NNW-SSO. Samma huvudsakliga utsträckning har också förekomsten av den ultrabasiska, magmatiska bergarten peridotit som är av intresse för utvinning av nickel. Den är i viss omfattning omvandlad och benämns därför även serpentinsten. Någon systematisk kartläggning av sprickzoner i berget har inte utförts, men den morfologi som visas av fjällkartan och flygbilder tyder inte på att kraftiga sprick- eller krosszoner förekommer i anslutning till dagbrotten.

Morän med generellt liten mäktighet är den dominerande jordarten i och kring brytningsområdena. Brytningsområdena är belägna i anslutning till sjösystem som skapats genom uppdamning av de forna stora sjöarna Nedre Björkvattnet (Lill-Björkvattnet), Seimajaure och Vojtjajaure (Vojtja). Brytningsområdet ligger relativt lågt i terrängen i en av de dalgångar som avrinner till Umeälven.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Enligt miljökonsekvensbeskrivningen (IGE 2010) bedöms grundvattenbortledningen från dagbrotten endast att medföra en lokal avsänkning på grundvattenytan inom några tiotals meter från respektive dagbrott. Påverkansområdet för sänkning av grundvattnets tryckhöjd i berg kan dock bli större i eventuella sprickzoner i berget.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

I det förslag på kontrollprogram som anges i miljökonsekvensbeskrivningen (IGE 2010) ingår inte grundvattennivåmätningar i gruvans omgivning.

Underlag för fortsatta studier

I förslaget på kontrollprogram ingår inte grundvattennivåmätningar i gruvans omgivning. Av denna anledning bedöms dagbrotten vid Rönneberg inte vara lämpliga som objekt för fortsatta studier.

4.3 Erfarenheter från andra gruvor

Detta avsnitt ger en sammanställning av prognoser och mätprogram rörande hydrogeologisk och hydrologisk omgivningspåverkan kring ett antal övriga gruvor i Sverige. Innehållet är till största delen hämtad från Axelsson et al. (1994a), Axelsson (1997b), Axelsson och Follin (2000), Ragvald (2012) samt direkta kontakter med gruvbolagen.

Aitik

I Aitik i Gällivare kommun pågår malmbrytning i ett dagbrott sedan 1968. I dagsläget är dagbrottet 430 m djupt. Berggrunden består av metamorfa bergarter av sedimentärt ursprung. Morän är den dominerande jordarten, med en mäktighet på upp till 20 m.

Enligt analytiska beräkningar i Axelsson et al. (1994a) erhålls ett påverkansavstånd på mellan 0,3 och 4,3 km för sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg kring dagbrottet i Aitik, för dåvarande grundvattenbortledning och brytningsdjup (170 m).

Grundvattennivåmätningar genomfördes i borrhål i berg kring dagbrottet under perioden 1977–1988. Mätningarna väster respektive öster om dagbrottet påvisade en trycksänkning på upp till 50 m respektive 10 m. Den västra delen av dagbrottet var under den aktuella perioden utformad som en hängvägg, medan den östra delen var utformad som en liggvägg. Väster om dagbrottet noterades en trycksänkning på 40 m i borrhål i en sprickzon, på ett avstånd av 700–750 m från dagbrottet Axelsson et al. (1994a).

Grängesberg

Malmbrytningen i undermarksgruvan i Grängesberg påbörjades i början på 1900-talet och lades ner 1989. Det finns planer på att återuppta gruvdriften. Berggrunden domineras av pegmit och pegmatit.

Enligt analytiska beräkningar i Axelsson et al. (1994a) erhålls ett påverkansavstånd på mellan 0,8 och 4,6 km för sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg kring undermarksgruvan i Grängesberg, för dåvarande grundvattenbortledning och brytningsdjup (690 m).

Grundvattennivåmätningar genomfördes i borrhål på 650 m djup under perioden 1985–1988. Mätningarna indikerar på relativt höga grundvattentryck kring delar av gruvan även under då pågående drift (Axelsson et al. 1994a).

Kirunavaara

Malmbrytningen i Kiruna har pågått sedan 1898. I dagsläget är undermarksgruvans djupaste punkt på cirka 1,5 km djup. Malmen utgörs av apatitjärnoxidmalm, på gränsen mellan kvartsförande porfyr och kvartsfattig syenitporfyr.

Enligt analytiska beräkningar i Axelsson et al. (1994a) erhålls ett påverkansavstånd på mellan 0,9 och 5,1 km för sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg kring undermarksgruvan i Kiruna, för dåvarande grundvattenbortledning och brytningsdjup (795 m).

Grundvattennivåmätningar genomfördes i borrhål i gruvan på 740–795 m djup åren 1985, 1988 och 1991 (Axelsson et al. 1994a). Det har tidigare inte genomförts grundvattennivåmätningar i områden utanför gruvan, men sådana mätningar har påbörjats (Anders Lundqvist, LKAB, pers. komm. 2011).

Gruvberget-Svappavaara

Dagbrottsbrytningen i Svappavaara i Kiruna kommun påbörjades 2010 (LKAB 2011a). Dagbrottet i Gruvberget beräknas bli 450 m långt, knappt 350 m brett och 130 m djupt under markytan. För uppföljning av verksamheten genomförs bland annat manuella grundvattennivåmätningar i ett antal grundvattenrör kring dagbrottet.

Masugnsbyn

I Masugnsbyn i Kiruna kommun bryts dolomit i ett dagbrott (LKAB 2011b). För uppföljning av verksamheten genomförs bland annat manuella grundvattennivåmätningar i ett grundvattenrör och i fyra enskilda brunnar kring dagbrottet.

Kristineberg

Malmbrytningen i Kristinebergs undermarksgruva i Lycksele kommun har pågått sedan 1940. I dagsläget sker brytning ner till mer än 1 km djup. Malmen finns i klorit- och sericitskiffer.

Enligt analytiska beräkningar i Axelsson et al. (1994a) erhålls ett påverkansavstånd på mellan 0,7 och 3,2 km för sänkning av grundvattnets tryckhöjder i berg kring undermarksgruvan i Kristineberg, för dåvarande grundvattenbortledning och brytningsdjup (1 000 m). Det genomförs inga grundvattennivåmätningar vid gruvan.

Zinkgruvan

Malmbrytningen i Zinkgruvans undermarksgruva i Askersunds kommun har pågått sedan 1857. Gruvan är i dagsläget omkring 1 100 m djup. Zinkgruvan är belägen i ett hörn av Bergslagens grönstensbälte. Det genomförs inga grundvattennivåmätningar vid gruvan (Tomas Karlsson, Zinkgruvan Mining AB, pers. komm. 2011).

Sammanfattningsvis kan det alltså konstateras att det vid många gruvor i Sverige i dagsläget inte genomförs någon systematisk uppföljning av grundvattenbortledningens hydrogeologiska och hydrologiska effekter i gruvans omgivning. Primära miljöfrågor i samband med gruvdrift brukar vara hantering av uppumpat gruvvatten, buller, luftburen spridning av tungmetaller och liknande (Sidenvall och Birgersson 1998). I en motsvarande genomgång av undermarksgruvor i USA (Blodgett and Kuipers 2002) framgår att systematisk uppföljning av omgivningspåverkan från gruvverksamhet i USA påbörjades först i slutet av 1970-talet. Deras genomgång visar att det i synnerhet råder brist på dokumentation av grundvattenbortledningens effekter på de hydrogeologiska och hydrologiska förhållandena.

5 Forskningsanläggningar

5.1 Äspö Hard Rock Laboratory

Beskrivning av berganläggningen

Berganläggningen Äspö Hard Rock Laboratory är en forskningstunnel på södra delen av ön Äspö i Oskarshamns kommun, cirka 2 km norr om Oskarshamns kärnkraftverk. Anläggningen drivs av SKB för geovetenskaplig och teknisk utveckling rörande slutförvaring av använt kärnbränsle. Anläggningen uppfördes 1990–1995. Tunneln går i spiralform ner till ett djup på 450 m. Den totala tunnellängden är 3,6 km. Den första delen av tunneln är uppförd genom borrhning och sprängning, medan de sista 400 m av tunneln är borrarad med en tunnelborrmaskin med en diameter på 5 m. Tunneln har förbindelser med markytan via tre schakt.

Det maximala inläckaget under uppförandeskedet var 1 900 liter per minut och inläckaget är i dagsläget cirka 1 100 liter per minut (Hartley et al. 2007). Omfattande undersökningar genomfördes under perioden 1986–1995 inför och under uppförandet av anläggningen. Sammanfattningar finns bland annat beskrivna i Almén och Stenberg (2005) samt Rhén et al. (1997). Delar av berganläggningen är injekterad (Bäckblom 2002).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berget domineras av Smålandsgranit och Äspödiorit. Tunneln korsar ett antal vattenförande sprickzoner. Morän är den dominerande jordarten på Äspö. Anläggningen är uppförd under en ö i havet. Det finns endast små vattendrag på ön.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet av anläggningen genomfördes prognoser av inläckage, trycksänkning och avsänkning, dels för en anläggning med ett vertikalt schakt, dels en spiralformad ramp (Axelsson 1987). För det första fallet (vertikalt schakt) skulle enligt modellberäkningarna grundvattenbortledningen från anläggningen medföra en trycksänkning på över 5 m på ett avstånd av 1 km från anläggningen, på 500 m djup i berget. På knappt 2 km avstånd bedömdes trycksänkningen bli drygt 1 m på samma djup. För det andra fallet (spiralformad ramp) erhöles något mindre trycksänkningar i berget. Dessa prognoser uppdaterades kontinuerligt under uppförandet av anläggningen (Rhén et al. 1997).

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Berganläggningen har ett omfattande hydrogeologiskt och hydrologiskt mätprogram (Almén och Stenberg 2005). Enligt mätprogrammet ger grundvattenbortledningen upphov till en trycksänkning i berg på upp till 80–90 m på ön Äspö (Rhén et al. 1997, Rhén and Hartley 2009). Även grundvattennivåmätningar i bergborrhål på längre avstånd från anläggningen indikerar på påverkan från grundvattenbortledningen, bland annat på ett avstånd av cirka 1 km på västra delen av ön Ävrö (trycksänkning 2–5 m)

och på fastlandet i den södra delen av Laxemarområdet (trycksänkning 0,5–2 m). Påvisbara responser från grundvattenbortledningen på grundvattennivåer i berg kan noteras upp till 2 km från anläggningen.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

I samband med den platsbeskrivande modelleringen för lokalisering av en slutförvarsanläggning i Laxemar-Simpevarpsområdet användes inläckagedata från berganläggningen och grundvattennivådata från dess omgivning i syfte att undersöka dess eventuella interferens med en slutförvarsanläggning på fastlandet i Laxemar (Bosson and Sassner 2009, Hartley et al. 2007, Molinero et al. 2002, Rhén and Hartley 2009). Beräkningarna genomfördes med modelleringsverktygen MIKE SHE, CONNECTFLOW och TRANMEF-3 och baserades på uppdaterade beskrivningar av de hydrogeologiska egenskaperna i berg och jord jämfört med vad som fanns tillgängligt tidigare. Modellberäkningarna visade generellt på god överensstämmelse mellan modellberäknade och uppmätta grundvattennivåer, inklusive grundvattennivåer i borrhål som bedöms vara påverkade av berganläggningen.

Underlag för fortsatta studier

Genom SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) bör det finnas möjlighet att tillgå kvalitetssäkrade data. Berganläggningen är därför lämplig kandidat för fortsatta studier.

5.2 Forskning kring grundvattenkemiska förändringar vid grundvattenbortledning: Gårdsjön och Äspö

I Gårdsjön utanför Göteborg och på ön Äspö har fältförsök genomförts rörande grundvattenkemiska förändringar till följd av grundvattenuttag från berg (Hultberg et al. 2005, Mossmark 2010, Mossmark et al. 2008a). Experimentet i Gårdsjön innefattade dels hydrogeologiska och hydrologiska mätningar och grundvattenuttag från ett (under en period två) bergborrhål i 4,5 år inom ett litet avrinningsområde, dels mätningar inom ett referensavrinningsområde.

Enligt mätningarna gav grundvattenbortledningen upphov till en sänkning av grundvattnets tryckhöjd i berg med 5–20 m. Avsänkningen av grundvattenytan uppgick till ungefär 5 m. Man kunde även notera att grundvattennivån i både jord och berg uppvisade större säsongsvariationer under den tid som grundvattenuttaget pågick. Avrinningen från avrinningsområdet från vilket grundvattenuttaget skedde minskade med ungefär 50 %.

I ett liknande försök på ön Äspö gjordes grundvattenuttag under 2,5 år. I detta experiment var grundvattenuttaget lägre än det i Gårdsjön. Uttaget gav endast upphov till små effekter på grundvattennivåer i jord och berg, med undantag för ett bergborrhål beläget nära det borrhål från vilket grundvattenuttaget skedde. Vidare noterades endast små effekter på avrinningen från det undersökta avrinningsområdet.

6 Tunnlar för överföring av el, tele eller vatten

6.1 Bolmentunneln

Beskrivning av berganläggningen

Bolmentunneln är en vattenförsörjningstunnel som uppfördes 1975–1986 mellan sjön Bolmen i Småland och Perstorp i Skåne. Tunneln är 80 km lång, den har en tvärsnittsarea på cirka 8 m² och är belägen 40–100 m under markytan (Ellisson 2010). Det totala inläckaget till den färdiga tunneln var i storleksordningen 500 liter per sekund (Bäckblom 2002). Omfattande förundersökningar (se till exempel Stanfors 1987, Olofsson 1991b). Ungefär en fjärdedel av tunnel är injekterad (Bäckblom 2002, Ellisson 2010).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berget längs tunneln domineras av gnejs, ställvis med amfibolitgångar, samt doleritgångar i de södra delarna tunneln (Bäckblom 2002, Olofsson 1991, Olofsson et al. 1988). Jordlagren består av sandig-siltig morän med en mäktighet på 4–8 m. Längs vissa tunnelavsnitt förekommer glaciofluviala avlagringar och vissa våtmarker.

Det finns ett stort antal sjöar och vattendrag längs tunneln, till exempel Bolmen, Bodasjö, Källshultasjö, Lidhultasjö, Porssjön, Kraxasjön, Vårsjön, Algustorpasjön, Kärrabäcken och Lagan. Delen vid Stavershult karakteriseras av en platt topografi, med en topografisk skillnad på cirka 20 m (Olofsson 1991).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Prognoser av inläckage av grundvatten eller dess hydrogeologiska eller hydrologiska effekter i omgivningar har såvitt känt inte genomförts.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Mätprogrammet för tunneln är omfattande, med över 400 mätpunkter i jord och berg längs tunneln 1969–1987 (Olofsson 1991b). Mätprogrammet omfattade totalt 324 enskilda jordbrunnar, 63 grundvattenrör i jord och 21 borrhål i berg, belägna på ett avstånd av upp till 500 m från tunnellen.

Olofsson (1991b) analyserade grundvattennivådata med olika korrelations- och regressionsmetoder, inklusive nivådata från referensrör som med all säkerhet var opåverkade av tunnelbygget. Enligt analysen blev drygt hälften av mätpunkterna i jord och över 80 % av borrhålen i berg påverkade. Medelavsänkning i påverkade jordbrunnar 0,40 m, jordrör 0,80 m och borrhål i berg över 3,5 m. Influensavståndet var cirka 200–300 m i berg och 100 m i jord. Det ska dock observeras att det generellt var endast en svag korrelation mellan avsänkning i jord trycksänkning i berg och avståndet från tunneln. I några fall noterades en tidig påverkan, när tunneln var mer än 1 km från mätpunkten.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Prognoser har såvitt känt inte genomförts (se ovan).

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen bedöms inte vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

6.2 Skanstull-Solberga

Beskrivning av berganläggningen

Skanstull-Solbergatunneln är en kraftledningstunnel mellan Skanstull och Solberga i Stockholms stad. Berganläggningen utgörs av en äldre 1,3 km lång bergtunnel under Årstafältet, en ny 1,9 km lång bergtunnel mellan Skanstull och Årsta och en ny 3,1 km lång bergtunnel mellan Örby och Solberga. Bergtunnlarna är belägna 30–60 m under markytan. Tunnlarna har en bredd på cirka 4 m och en höjd på cirka 5 m. De nya tunnlar är uppförda med konventionell borrhning och sprängning (WSP 2004b).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Kraftledningstunneln mellan Skanstull och Årsta sträcker sig under Stockholmsåsen och vidare under Årstas fastmarksområde, som domineras av berg i dagen eller endast tunna lerlager. Mellan Örby och Solberga passerar kraftledningstunneln genom Östberghöjdens berg- och fastmarksområde, med mindre inslag av lerområden. Mellan Östberga och Solberga passerar tunneln genom ett berg - och fastmarksområde som i norr gränsar mot områden med mäktiga lerlager (WSP 2004b).

Grundvattenförhållandena i anslutning till den befintliga tunneln ansågs vara det besvärligaste området ut sättnings synpunkt, eftersom detta område sedan tidigare är påverkat genom dränering via Södra länkens tunnelsystem (WSP 2004b).

Genomförda förundersökningar visar att berget i området kring tunnlar innehåller sprickzoner med hög vattengenomsläpplighet. Förundersökningarna visar vidare att den övre delen av berget har något högre vattengenomsläpplighet jämfört med djupare delar. Vad gäller jordlagren visade förundersökningarna på högst vattengenomsläpplighet dels i de sandiga lagren på Årstafältet, dels i Stockholmsåsen. Markytan ovan tunnelleninjen uppvisar nivåvariationer på cirka 20 m.

Enligt SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut) är årsmedelnederbörden i Stockholmsområdet 640 mm, varav 40–50 % avgår i form av avdunstning. Baserat på dessa uppgifter har grundvattenbildningen i området kring tunneln uppskattats till 2 mm per år i lerområden, 20 mm per år i områden med berg i dagen samt 250 mm per år i områden med friktionsjord (sand och grus) i dagen (WSP 2004b).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inget underlagsmaterial rörande genomförda prognoser har inhämtats inom ramen för förstudien.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Inför uppförandet av de nya tunnarna sammanställdes ett kontrollprogram med specifikation av mätpunkter och mätintervall (Bergab 2007a). Enligt mätprogrammet skulle grundvattennivåer mätas i grundvattenrör i jord en gång per månad under uppförandet. Grundvattenrör belägna närmare än 250 m från tunnelfront skulle mätas oftare (en gång per vecka). Enligt kontrollprogrammet skulle även grundvattennivåer mätas under en begränsad tid under driftskedet. Utvalda grundvattenrör skulle mätas varannan månad under två år och sedan en gång per kvartal under ytterligare två år. Grundvattennivåmätningar i borrhål i berg skulle mätas var tredje månad inför och uppförandet. Om mätningarna påvisade grundvattennivåsänkning i något borrhål skulle mätningarna ske varje månad.

Genomförda utvärderingar av mätdata under uppförandet visar på endast små effekter av grundvattenbortledningen på grundvattennivåer i jord och berg under perioden 2007–2009. Under år 2009 påvisades dock en sänkning av grundvattennivån i de flesta mätpunkterna som antogs bero på grundvattenbortledningen från tunneln (Bergab 2009a).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Inga jämförelser har genomförts inom ramen för förstudien.

Underlag för fortsatta studier

Som framgår av ovanstående beskrivning har inga data eller information erhållits rörande prognoser inför uppförandet. De hydrogeologiska förundersökningarna var dock omfattande och ett kontrollprogram har upprättats. Bedömningen är därför att berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

6.3 Käppalaförbundet

Käppalaförbundet driver Käppala reningsverk i Lidingö kommun, med tillhörande ledningstunnlar. Reningsverket ligger insprängt i berg på ön Lidingö. Totalt driver förbundet 60 km tunnlar norr om Stockholm. Dessa berganläggningar uppfördes i huvudsak under 1950- och 1960-talen och med dåtidens lagstiftning behövdes inga tillstånd för grundvattenbortledningen från tunnarna. Baserat på detta faktum samt en genomgång av Käppalaförbundets miljörapport (Käppalaförbundet 2010), är bedömningen att det sannolikt finns ytterst begränsat med data och information rörande inläckage av grundvatten eller grundvattennivåer kring förbundets tunnlar. Dessa berganläggningar är således inte lämpliga kandidater för fortsatta studier.

6.4 Frösundatunneln

Beskrivning av berganläggningen

Frösundatunneln i Solna stad innehåller de högspänningsledningar som går mellan Bergshamra och Järva. Tunneln har en längd på cirka 2,5 km och sträcker sig genom Nationalstadsparken under Stockholmsåsen och vidare under motorväg E4. I den östra delen ansluter tunneln till en befintlig tunnel i sydöstra Bergshamra (Bergab 2001). Tunneln började uppföras år 2003 (Solna stad 2004).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Den dominerande bergarten i området där tunneln är belägen utgörs av sedimentgnejs, med viss förekomst av yngre graniter. Tunneln korsar tre dalgångar med sträckning nord-nordväst till syd-sydost samt nordväst till sydost. I dessa dalgångar har jordlagren relativt stor mäktighet. Tunneln korsar tre av dessa sprickdalar; Sänkan vid Stockholmsåsen och Sköndals område, Ulriksdalsfältet samt Bagartorpsringen. De tre sprickdalarna har något olika geologiska förhållanden. De östligaste delarna av dalgångarna domineras av glaciofluviala avlagringar och närmast Brunnsviken förekommer ytliga lerlager. Ulriksdalsfältet i väster består av mäktiga lager med friktionsjord, som utgörs av morän i norr och sand i söder.

De ovan nämnda sandlagren har en mäktighet på upp till 10–20 m. Både Brunnsviken och Edsviken har stor inverkan på grundvattenförhållandena kring tunneln. I samband med höga ytvattennivåer sker ett inflöde av ytvatten till Stockholmsåsen och vid låga ytvattennivåer sker ett utflöde från åsen till Brunnsviken och Edsviken. Vidare har det påvisats hög hydraulisk konduktivitet i sprickzonen i berg under Ulriksdalsfältet samt god hydraulisk kontakt mellan berggrunden och ovanförliggande jordlager (Bergab 2001).

Ovan tunneln uppvisar markytan nivåvariationer på cirka 25 m. Enligt SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut) är årsmedelnederbörden i Stockholmsområdet 640 mm, varav 40–50 % avgår i form av avdunstning. Baserat på dessa uppgifter har grundvattenbildningen i området kring tunneln uppskattats till 2 mm per år i lerområden, 20 mm per år i områden med berg i dagen samt 325–390 mm per år i områden med friktionsjord (sand och grus) i dagen. Grundvattenbildningen uppskattades till 125–160 mm per år på Ulriksdalsfältet (Bergab 2001).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet genomfördes prognoser av inläckage av grundvatten till tunneln samt grundvattennivåsänkning i jord till följd av grundvattenbortledningen (Bergab 2001). Prognosmetoden beaktade endimensionellt grundvattenflöde i jord längs med dalgångarna och utgår från Brunnsvikens vattennivå. Utifrån denna nivå och uppmätta grundvattennivåer beräknas den hydrauliska konduktivitet som behövs i sektioner längs dalgången för att uppnå uppmätta hydrauliska gradienter vid ett visst antaget grundvattenflöde. Grundvattenbildningen till jord beräknades med modelleringsverktyget Winsoil (Jansson 1998). Detta modelleringsverktyg beräknar grundvattenbildningen till jord baserat på meteorologiska data samt vegetations- och jordartsförhållanden (Bergab 2001).

Resultatet av beräkningar påvisar ett grundvattenflöde i friktionsjorden på cirka 100 000 m³ per år vid tunnelns korsning av Ulriksdalsfältet, motsvarande 190 liter per minut. Baserat på tillåtet inläckage till tunneln (enligt tillståndet 3 liter per minut i detta område), var prognosen att grundvattensänkning här skulle uppgå till 0,1–0,3 m i jordlagren ovan tunneln. Enligt prognoserna begränsas grundvattensänkning av närheten till och kontakten med Brunnsviken. Vid tunnelläget vid Bergtorpsringen beräknades grundvattenflödet i jordlagren uppgå till 15 000 m³ per år, motsvarande 28 liter per minut.

Baserat på tillåtet inläckage till tunneln i detta område, var prognosen att grundvattensänkningen skulle uppgå till högst 1,6 m i jordlagren ovan tunneln. För områden med mäktiga lerlager ovan friktionsjorden gjordes bedömningen att ingen grundvattensänkning skulle ske till följd av grundvattenbortledningen (Bergab 2001).

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Det finns ett kombinerat kontroll- och åtgärdsprogram för tunneln. Inom ramen för detta program genomförs grundvattennivåmätningar i 22 grundvattenrör i jord samt i två enskilda brunnar. Vidare ingår vattennivåmätningar i Brunnsviken i kontroll- och åtgärdsprogrammet (Solna stad 2004). Genomförda inläckagemätningar under uppförandet visar på ett totalt inläckage på ungefär 4–7 liter per minut per 100 meter tunnel (Solna stad 2004).

Inför byggstarten år 2003 var grundvattennivåerna i området kring tunneln lägre än normalt; i vissa grundvattenrör var grundvattennivån till och med lägre än ansatta larmnivåer. Genomförda utvärderingar av mätdata under uppförandet visar på endast små effekter av grundvattenbortledningen på grundvattennivåer i jord och berg under uppförandet av tunneln (Solna stad 2004).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Inga jämförelser har genomförts inom ramen för förstudien.

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

6.5 Hjorthagentunneln

Beskrivning av berganläggningen

Hjorthagentunneln är en kraftledningstunnel mellan Fisksjöäng och Värtan i Stockholms stad. Tunneln stod färdig 2009 och är belägen mellan 15 och 70 m under markytan. Berganläggningen består av en 1 km lång huvudtunnel samt en drygt 300 m lång tillfartstunnel. Huvudtunneln har en tvärsnittsarea på cirka 18 m² och tillfartstunnelns tvärsnittsarea är cirka 25 m² (HD 2010). Huvudtunneln är vid ändarna förbunden med markytan via vertikala schakt med en längd på 25 m respektive 50 m (Bergab 2009a). Inför uppförandet planerades berg- och jordinjektering, inklusive ridåinjektering till några meters djup under bergschaktbotten.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Berganläggningen är uppförd i ett område med upp till 3 m mäktig morän på berg och karaktäriseras av komplexa geologiska förhållanden. Bergöverytan liksom grundvattenytans nivå har en amplitud på någon meter längs tunnellen. Enligt grundvattennivåmätningar är grundvattenytan belägen i moränen. Moränen överlagras av ett cirka 2 m mäktigt lager med torrskorpelera, som i sin tur överlagras av fyllning bestående av slagg, sand och lera. Det finns sannolikt inget övre grundvattenmagasin (HD 2010). I ett område nära en havsvik (Husarviken) finns det dock fyllnadsmassor med stor mäktighet som utgör ett grundvattenmagasin och har kontakt med viken. Det

undre grundvattenmagasinet (i moränen) är dock inte i kontakt med viken. Det undre och det övre grundvattenmagasinet har begränsad kontakt med varandra. Grundvattenbildningen inom tunnelns avrinningsområde är uppskattad att vara i det ungefärliga intervallet 70 000–150 000 m³ (HD 2010).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Bedömningar gjordes av inläckage av grundvatten till tunneln samt grundvattennivåsänkning i jord och berg till följd av grundvattenbortledningen. Enligt prognoserna skulle grundvattensänkning bli störst under uppförandeskedet. Leran ovan moränen bedöms inte vara känslig för grundvattensänkning i moränen (HD 2010).

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Mätprogrammet under uppförandeskedet omfattade uppskattningar av inläckaget av grundvatten, baserade på mätningar av bortledd vattenmängd, processvattenförbrukning och i ett senare skede även mätvallar i tunneln. Enligt dessa mätningar var inläckaget under uppförandet 1–3 liter per minut per 100 meter tunnel. Mätprogrammet omfattade även grundvattennivåmätningar i jord och berg inför och under uppförandet, på avstånd upp till 250 m från tunneln (Bergab 2009a).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Data från mätprogrammet visar endast på små effekter på grundvattennivåer i jord och berg under uppförande och drift av tunneln, med motsvarande nivåer och nivåvariationer som uppmättes innan tunneln började uppföras (Bergab 2009a).

Underlag för fortsatta studier

Det finns en stor mängd mätdata och även prognosresultat att tillgå från berganläggningen. Det finns dock endast begränsad information om de prognosmetoder som använts. Berganläggningen bedöms dock vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

6.6 Juktans pumpkraftverk

Beskrivning av berganläggningen

Berganläggningen är belägen i Storumans kommun, Västerbottens län. Anläggningen uppfördes 1973–1978 som ett pumpkraftverk med ett omfattande tunnelsystem mellan sjöarna Storjuktan, Blaiksjön och Storuman och togs i drift 1979 (Olsson 1979). Anläggningens konverterades till vanligt kraftverk 1996.

Tunnlarna i tunnelsystemet har en total längd på cirka 25 km och en tunnelarea på 60–80 m². Anläggningen omfattar även ett maskinområde med ett antal vertikala schakt (total längd 750 m) samt bergrum med olika tekniska installationer. Bergtäckningen varierar mellan 20 och 380 m, eller 60–120 m under opåverkad grundvattenyta (Axelsson och Olsson 1979, Axelsson et al. 1994b). Inför driftstart 1979 var det totala inläckaget till anläggningen cirka 250 liter per sekund.

Undersökningar inför och under uppförandet av Juktans pumpkraftverk genomfördes och nyttjades inom ramen för Statens Vattenfallsverks hydrogeologiska

forskningsprogram (Olsson 1979). Förundersökningarna påbörjades 1970 och avslutades 1973. Dessa omfattade flyg- och markgeofysiska undersökningar längs den tilltänkta tunnellen samt borrhålsundersökningar (kartering av borrhäror samt vattenförlustmätningar) vid det planerade maskinområdet, vid tunnelanslutningarna vid sjöarna och vid dammlägen. Undersökningar under uppförandet omfattade inläckagemätningar samt kompletterande undersökningar av hydrogeologiska egenskaper i jord och berg.

Under uppförandet genomfördes omfattande bergförstärkning samt injektering med cement i avloppstunneln (Axelsson et al. 1994b). Under uppförandet hade området ingen annan bebyggelse eller verksamhet.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Anläggningen är uppförd i berg som huvudsakligen består av s.k. Revsundsgranit. I den norra delen av anläggningen består berget av gnejs eller granit med inslag av gnejs. I berget förekommer även pegmatit- och dioritlager eller -gångar. Tunnellen korsas av ett antal tektoniska zoner med högre vattengenomsläpplighet jämfört med bergmassan i övrigt. Berget mer uppsprucket i ytan.

Morän är den dominerande jordarten längs tunnelsystemet. Området innehåller även många torvmossor. En mindre andel av området består av glaciofluviala avlagringar eller berg i dagen. Övan berganläggningen finns det flera sjöar (Blaisjön, Storjuktan, Storuman och Renbergssjön), myrmarker samt ett antal små tjärnar. Markytan längs tunnellen har stora nivåvariationer, med en nivåskillnad på cirka 400 meter mellan den lägsta (sjön Storuman) och den högsta punkten (berget Storblaiken).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inga prognoser av berganläggningens hydrogeologiska och hydrologiska effekter gjordes inför uppförandet. Carlsson och Olsson (1978) etablerade en enkel förväntansmodell för påverkansområdets storlek vad gäller sänkning av tryckhöjd i berg kring berganläggningen i Juktan samt Himmerfjärdstunneln. Modellen tar hänsyn till vattengenomsläpplighet i bergmassa respektive tektoniska zoner, grundvattenflöde från jord till berg samt berganläggningens djup. Enligt denna modell förväntas ett påverkansavstånd vad gäller på 300 m i bergmassan och 4–5 km i tektoniska zoner för Juktans tunnlar, vilket motsvarar ett påverkansområde på cirka 50 km².

Då anläggningen var färdig genomförde Axelsson och Olsson (1979) numerisk flödesmodellering med finita-elementmodellen GEOFEM-G (Runesson et al. 1978). De kalibrerade modellen för opåverkade (utan berganläggningen) respektive påverkade förhållanden mot uppmätta grundvattennivåer före respektive efter anläggningen uppfördes, i fyra enskilda brunnar belägna 1–2 km från tunnellen.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Enligt Olsson (1979) genomfördes grundvattennivåmätningar i 38 stycken bergborrhål ovan maskinområdet under uppförandet av berganläggningen. Som nämnts tidigare genomfördes även grundvattennivåmätningar i fyra enskilda brunnar, belägna upp till 2

km från tunnellen. I samband med uppförandet av berganläggningen torrlades fyra jordbrunnar och ersattes med bergborrade brunnar.

Befintlig dokumentation (Axelsson och Olsson 1979, Olsson 1979) redogör enbart för resultat från grundvattennivåmätningarna i de enskilda brunnarna. Enligt dokumentationen påvisades en sänkning av tryckhöjden i brunnarna med 23–37 m. Enligt Olsson (1979) noterades även en avsevärd sänkning av vattennivån i en tjärm, belägen i anslutning till en av tillfartstunnlarna.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Som nämnts tidigare kalibrerade Axelsson och Olsson (1979) en numerisk flödesmodell mot uppmätta grundvattennivåer i bergborrade brunnar, belägna 1,5–2 km från tunnellen. Genom att minska dels grundvattenbildning till bergmassa och tektoniska zoner, dels vattengenomsläppligheten i bergmassan, erhålls en sänkning av tryckhöjden i brunnarna på 28–44 m (uppmätt 23–37 m).

Underlag för fortsatta studier

Mätdata finns sannolikt tillgängliga i Vattenfalls arkiv. Efter driftstarten 1979 fylldes tunnelsystemet med vatten, vilket innebär att förnyade mätningar i borrhål eller enskilda brunnar är av mindre intresse i dagsläget.

6.7 Kymmentunneln

Beskrivning av berganläggningen

Kymmentunneln är belägen i Sunne kommun, Värmland. Kymmentunneln färdigställdes som pumpkraftverk 1987 som del av Kymmenprojektet. Kymmens kraftverk ligger vid sjön Kymmen i nordvästra delen av Sunne kommun. Det utnyttjar vattenföringen i älvarna Rottnan och Granån plus den naturliga tillrinningen till Kymmen, det egentliga vattenmagasinet.

För att dra nytta av vattenföringen i älvarna byggdes en 9,2 km lång överledningstunnel från Rottnan till Kymmen. Rottnans vattenyta måste då höjas och det finns därför en jorddamm som säkrar och skapar vattenmagasinet. Överledningstunneln passerar under Granån som där leds in i tunneln. För att reglera Granån finns en mindre damm.

Kymmens vattenyta kan sänkas 7 meter vintertid. Från sjöns södra ända leds vattnet via en 2,5 km lång tilloppstunnel ner till kraftstationen för att sedan släppas ut i sjön Rottnan genom en 600 m lång utloppstunnel. Kraftverket har utformats som ett pumpkraftverk för att variationen i elkraftbehovet ska kunna utnyttjas. Det innebär att vatten pumpas tillbaka till Kymmen när elbehovet är lågt under nätter och helger. Pumpningen sker genom att turbinernas rotationsriktning ändras. Berganläggningen omfattar totalt 13,5 km tunnlar.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Palmqvist and Stanfors (1987) genomförde kartering av den TBM-borrade delen av tunneln (4,5 km). Berget domineras av granitgnejs, med inslag av granit.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Prognoser av inläckage av grundvatten eller dess hydrogeologiska eller hydrologiska effekter i omgivningarna har såvitt känt inte genomförts.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Enligt (Palmqvist and Stanfors 1987) är det brist på information för att uttala sig om omgivningspåverkan, vilket här tolkas som att relevanta hydrogeologiska och hydrologiska mätdata till stora delar saknas.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Prognoser har såvitt känt inte genomförts (se ovan).

Underlag för fortsatta studier

Enligt ovan är det sannolikt brist på relevanta data och information, vilket innebär att berganläggningen inte bedöms vara lämplig för fortsatta studier.

6.8 Rödbotunneln

Beskrivning av berganläggningen

Rödbotunneln vid Kungälv i Göteborgs kommun är en gemensamhetstunnel för tele-, vatten- och avloppsledningar som uppfördes av Gryaab 1970–1972. Tunneln har en längd på 2,8 km och en tvärsnittsarea på 15 m². Förundersökningarna omfattade berggrundsgeologisk kartering ovan mark inför uppförandet och tunnelkartering under uppförandet. Den senare är dock bristfällig, eftersom förstärkningsåtgärder längs vissa delsträckor måste genomföras innan karteringen.

Tunneln har delvis tätats med för- och efterinjektering. Sprutbetong påfördes tunnelns väggar längs hela tunnelns längd. Vid tiden för uppförandet var området längs tunnelsträckningen i stort sett obebyggt.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Bergat längs tunneln består huvudsakligen av gnejs. Längs tunneln förekommer tektoniska svaghetszoner samt sprickor med leromvandlat berg. Mycket dåligt berg med kraftiga inläckage av grundvatten förekom på en cirka 400 m lång sträcka i den sydöstra delen av tunneln.

Området längs tunneln domineras av höjdområden med ett tunt lager av morän, svallgrus eller berg i dagen, samt dalgångar där jordlagren utgörs av lera som underlagas av morän eller grovt friktionsmaterial. Tunneln gränsar i öster till Göta Älv och i norr till Nordre Älv. Topografin längs tunneln karaktäriseras av långa bergryggar med mellanliggande dalgångar.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Prognoser av inläckage av grundvatten eller dess hydrogeologiska eller hydrologiska effekter i omgivningarna har såvitt känt inte genomförts.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Generellt finns det endast begränsad dokumentation om Gryaab's gamla tunnlar och bergrum som uppfördes på 1970-talet (Sven-Ove Pettersson, Gryaab, pers. komm. 2011). Inom ramen för ett projekt hos SGI (Statens geotekniska institut) installerades dock kring Rödbotunneln 10 grundvattenrör och tre borrhål i berg för grundvattenmätningar inför, under och en viss tid efter uppförandet av tunneln. Mätningarna genomfördes 1969–1974.

Baserat på det genomförda mätprogrammet bedöms grundvattenbortledningen från tunneln ha påverkat grundvattennivåer i jord och berg upp till 400–500 m längs tektoniska zoner och 300–400 m utanför sådana zoner. Trycksänkningen bedömdes vara upp till 40 m intill tunneln och upp till cirka 4 m på ett avstånd av 400–500 m från tunneln.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Prognoser har såvitt känt inte genomförts (se ovan).

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen bedöms inte vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

6.9 Lerumstunneln

Beskrivning av berganläggningen

Lerumstunneln är en spillvattentunnel i Göteborg med förorter. Tunneln uppfördes 2007–2011 (Gryaab 2012). Tunneln har en längd på 8 km och en tvärsnitt area på 10,6 m². I samband med uppförandet byggdes även en 300 m lång arbetstunnel ner till 45 m under markytan. Bergtäckningen längs tunneln varierar generellt mellan 20 och 100 m.

Genomförda förundersökningar omfattar geologisk kartering, geofysiska undersökningar, borrhålsundersökningar, provpumpningar samt grundvattennivåmätningar. I samband med uppförandet genomfördes förinjektering. Området längs tunneln är till största delen obebyggt.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Anläggningen är uppförd i berg som huvudsakligen består av gnejs (MD 2004). Sprickfrekvensen bedöms vara normal för bergarten. Tunneln korsar ett antal svaghetszoner i berget. Jordlagren i området längs tunneln är generellt tunna och består huvudsakligen av morän. Lågområden domineras av lera på friktionsjord. I lågpunkter i terrängen finns ett antal bäckar (bland annat Kåbäcken och Torskebäcken/Svartåbäcken) och våtmarker. Markytan längs tunnelinjen är kuperad, med en nivåvariation på cirka 50 m.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inför uppförandet gjordes bedömningen att grundvattnets tryckhöjd i berg ovan tunneln skulle komma att sänkas 10–20 m under uppförandet (MD 2004). Påverkansområdet för sänkning av tryckhöjd i berg bedömdes sträcka sig 300–500 m från tunnelinjen under

uppförandeskedet och bli något mindre under driftskedet. Påverkan på vattenföring i vattendragen bedömdes bli marginell.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Enlig genomförda mätningar skedde sänkning av tryckhöjder i berg kring tunneln under uppförandet. I takt med tunnelns framdrift och injektering har grundvattennivåer stabiliserats på en ny nivå jämfört med innan uppförandet.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Inga jämförelse har genomförts inom ramen för förstudien.

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

6.10 Kistatunneln

Beskrivning av berganläggningen

Kistatunneln i Stockholms stad är en planerad VA-tunnel för överföring av dag- och spillvatten. Den nya tunneln kommer att anslutas till en tidigare uppförd dagvattentunnel. Vidare kommer en arbetstunnel (en tunnel som enbart ska användas under uppförandet) att anslutas till den nya tunneln. Spillvattnet kommer att överföras i ledningar som är upphängda längs med tunnelväggen. Tunneln kommer att förläggas 3–30 m under bergets överyta och den totala tunnellängden på den nya tunneln är cirka 1,5 km. Tunnelns tvärsnittsarea kommer att bli mindre än 20 m².

Tillstånd för grundvattenbortledningen från tunneln erhöles år 2012. Tillståndet omfattar grundvattenbortledning på 40 liter per minut för hela tunneln, inklusive arbetstunneln. Enlig projekteringen av tunneln kommer den att tätas med cementinjektering. Om mätprogrammet påvisar grundvattenavsänkning i jord så kommer infiltration att genomföras.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Det finns ett antal sprick- och krosszoner i anslutning till den planerade tunneln. Det är främst via dessa zoner som större inläckage av grundvatten kan ske till tunneln. Sträckningen av dessa zoner är generellt sydost-nordväst, med ett par zoner i nord-syd och sydväst-nordost.

Jordlagren kring tunneln utgörs av ett lerlager med en mäktighet som lokalt kan uppnå till över 20 m. Leran överlagrar ett moränlager med varierande mäktighet och slutna grundvattenförhållanden. I ett antal höjdområdet går berget eller moränen i dagen.

Grundvattennivåerna i berg uppvisar relativt små variationer längs den planerade tunnelsträckningen. Grundvattenflödet i området sker främst längs med dalgångarna. På 1970-talet anlades en så kallad infiltrationstunnel i anslutning till den befintliga dagvattentunneln. Från denna tunnel tillförs vatten i berget genom borrhål. Infiltrationstunnelns påverkansområde är relativt stort, vilket innebär att denna tunnel

har gjort området mindre känsligt för grundvattenpåverkande åtgärder. Markytan ovan tunneln har endast små nivåvariationer.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Påverkansområdets utbredning har beräknats med olika analytiska modeller (Werner 2004). Generellt ansattes påverkansavståndet i berg till maximalt 250–300 m från tunneln. Längs yttligare förlagda delar av tunneln och i områden med god bergkvalitet ansattes påverkansavståndet till 100–150 m från tunneln.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Pågående mätprogram inför uppförandet omfattar grundvattennivåmätningar i jord i det under grundvattenmagasinet. Detta mätprogram har varit i drift sedan år 2007. Det finns även mätdata från tidigare grundvattennivåmätningar som utförts inom ramen för Stockholms stads grundvattennät. Det finns även enstaka grundvattennivådata från ett antal grundvattenrör som installerades under förprojekteringen av den nya tunneln.

Underlag för fortsatta studier

Det kommer att finnas relativt långa tidsserier på grundvattennivåer att tillgå innan tunneln börjas uppföras. Detta gör berganläggningen intressant för fortsatta studier. Den befintliga infiltrationstunneln och eventuella infiltrationsåtgärder kan dock försvåra utvärderingen av mätdata för perioden från byggstart och framåt.

6.11 Päijännetunneln

Beskrivning av berganläggningen

Päijännetunneln uppfördes 1973–1982. Tunneln är en vattenledningstunnel och går mellan sjön Päijänne och Silvolareservoaren, belägen vid gränsen mellan Helsingfors och Vantaa i Finland. Tunneln är världens längsta oinjekterade tunnel (Niini 2004).

Tunnelns längd är 120 km och den kan nås längs hela sin längd via 24 tillfartstunnlar (Niini 2004). Tunneln tvärsnittsarea varierar mellan 13,5 och 18 m². Tunneln är i belägen 50–100 m under markytan. Det naturliga flödet i tunneln ger för närvarande ett överskott och detta nyttjas i ett kraftverk längs halva tunnelsträckan. Genomförda förundersökningar omfattar geologisk kartering, geofysiska undersökningar samt borrhålsundersökningar (Niini 1968a, b). Endast 15 % av tunneln är injekterad eller bergförstärkt (Niini 2004).

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Tunneln passerar bland annat genom en 50–100 m bred deformationszon (Niini 2004).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Prognoser som genomfördes inför bygget presenteras i Soveri (1971). I samband med framtagandet av en karta över områden som kan ge upphov till förorening av vattnets i tunneln gjordes en bedömning av tunnelns påverkansområde (Lipponen 2002). Enligt denna utredning är påverkansområdet högst 2 km från tunnelnlinjen.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Längs en sträcka på 25,6 km i den södra delen av tunneln mättes grundvattennivåer under perioden 1976–1993 (Lipponen 2006). Längs en sträcka på 35,2 km i den norra delen genomfördes motsvarande mätningar 1973–1993. I samband med tömning och reparation av den norra halvan av tunneln 2001 genomfördes grundvattennivåmätningar i 102 enskilda brunnar, ett borrhål i berg och i 92 grundvattenrör i jord längs tunnellen. Grundvattenrören belägna i direkt anslutning till tunneln upp till 650 m från tunneln (Lipponen 2006).

Mätprogrammet fram till 1993 ger indikation på interaktion mellan grundvatten i jord och berg. Mätprogrammet har främst utvärderats baserat på grundvattennivådata från borrhål i berg och grundvattenrör i jord, eftersom grundvattennivåer i enskilda brunnar kan vara påverkade av vattenanvändning (Lipponen 2006). De grundvattennivåförändringar som observerades var främst kopplade till utförandet och därmed av temporär karaktär.

Som utfall av utvärderingen av grundvattennivåmätningarna i samband med tömning och reparation 2001 (fyra månader, varav totalt tre veckor för att tömma respektive återfylla tunneln) gjordes en indelning i påverkade och opåverkade mätpunkter. Mätpunkterna delades även i avstånd till tunneln och förekomst av topografiskt karterade sprickzoner. Under tömningen av tunneln observerades trycksänkning på flera meter i borrhålet i berg, 70 m från tunneln. En avsänkning kunde noteras i 95 % av grundvattenrören i jord. I 80 % av rören var avsänkningen lägre än 1 m och i 40 % lägre än 0,5 m. Den genomsnittliga avsänkningen var 0,4 m. Analysen påverkas dock av generellt sjunkande nivåer till följd av en torrperiod innan och under tömningen, samtidigt som lokal nederbörd gav höjda nivåer under tömningsperioden. Gradienten mot tunneln under tömningen var dessutom olika, eftersom tunnelns djup under grundvattenytan varierar (Lipponen 2006).

Den observerade avsänkningen var generellt störst närmast tunneln och i anslutning till topografiskt tolkade sprickzoner. Avsänkning över 0,1 m bedömdes inte ha ägt rum på avstånd mer än 300 m från tunnel. Avsänkningen var dock precis 0,1 m i ett grundvattenrör beläget 550 m från tunneln.

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Inga jämförelser har genomförts inom ramen för förstudien.

Underlag för fortsatta studier

Enligt Lipponen (2002) finns mätdata från tunneln arkiverade hos Helsinki Metropolitan Area Water Company samt hos deras konsulter. Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

6.12 Ormentunneln

Beskrivning av berganläggningen

Ormentunneln är ett dagvattenmagasin i Stockholms innerstad. Tunneln uppfördes 1990–1993. Tunneln har en längd på 3,7 km lång, varav 2,8 km är TBM-borrad.

Tunneln har en diameter på 3,5 m. Tunnelns djupaste del är vid en pumpstation, 55 m under markytan.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Tunneln är uppförd i berg som domineras av gnejs, gnejsgranit och granit. Sprickfrekvensen är cirka 5–10 vattenförande sprickor per 100 m tunnel (Cesano och Olofsson 1997). Jordlagren ovan tunnellen består av tunna moränlager, överlagrad av sand. I lågområden förekommer glaciallera och ställvis postglacial lera. Tunnellen passerar nära Stockholmsåsen.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Prognoser av inläckage av grundvatten eller dess hydrogeologiska eller hydrologiska effekter i omgivningarna har såvitt känt inte genomförts.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Inför och under uppförandet av tunneln genomfördes i Stockholms stads regi grundvattennivåmätningar i 72 grundvattenrör i jord. Normalt görs upp till 6 mätningar per år i dessa rör, men mätfrekvensen ökades till minst 2 gånger per månad under tunnelbygget (Cesano och Olofsson 1997).

Avsänkningen i grundvattenrören beräknades genom att nyttja grundvattennivådata från referenspunkter i SGU:s grundvattennät. Enligt utvärderingen uppstod en påvisbar avsänkning av grundvattenytan i områden belägna upp till 300 m från tunneln, främst längs sprickzoner i berget (Cesano och Olofsson 1997).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Prognoser har såvitt känt inte genomförts (se ovan).

Underlag för fortsatta studier

Berganläggningen är lämplig kandidat för fortsatta studier.

7 Kyl- och varmvattenlager

7.1 Hornsberg kylvattenlager

Beskrivning av berganläggningen

Kylvattenlagret vid Hornsberg i Stockholms stad uppfördes under perioden 2007–2009 (Bergab 2009c). Berganläggningen består av fem delar; ett vattenlager, en maskinhall, en nedfart samt en nedre och en övre arbetstunnel. I området där kylvattenlagret är beläget finns det ett antal äldre berganläggningar, tunnelbana samt en ledningstunnel med arbetstunnel.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Området där kylvattenlagret är beläget domineras av berg i dagen. I området finns det även svackor i berget, där berget överlagras av lera på friktionsjord. Det huvudsakliga grundvattenflödet sker i lagren med friktionsjord. Den huvudsakliga grundvattenbildningen sker i slänter mot höjdområden där friktionsjorden går i dagen. Kylvattenlagret är beläget i den relativt branta sluttningen som leder ner till Karlbergssjön. Den genomsnittliga avrinningen i Stockholmsområdet är cirka 200–220 mm per år.

Sammanfattning av genomförda prognoser

Inga data eller information har erhållits rörande prognoser inför uppförandet. Genom utformningen av kontrollprogrammet (se nedan) samt villkor i tillståndet för grundvattenbortledningen från berganläggningen ges dock indikationer om det på förhand bedömda inläckaget och grundvattensänkningen i jord.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Mätprogrammet innefattar mätning av inläckaget av grundvatten till kylvattenlagret samt grundvattennivåmätningar i grundvattenrör, belägna upp till ungefär 300 m från berganläggningen. Inför uppförandet genomfördes grundvattennivåmätningar varje månad (Bergab 2007b). Under uppförandet minskades mätintervall till veckovisa mätningar (Bergab 2010). Under driftsskedet är mätintervall varannan månad under de första åren efter färdigställandet, varefter mätintervall ska utökas till kvartalsvisa mätningar (Bergab 2009d). Mätningarna under planeras totalt pågå i fyra år för att därefter upphöra.

Enligt inläckagemätningarna har inläckaget varit cirka 250m³ per månad sedan kylvattenlagret vattenfylldes 2009 (Bergab 2010). Redovisningen och utvärderingen av grundvattennivåmätningarna som sker inom ramen för kontrollprogrammet (Bergab 2007b, 2009b) indikerar inte att grundvattennivåerna kring berganläggningen förändrats i någon större utsträckning till följd av grundvattenbortledningen. De naturliga grundvattennivåfluktuationerna är dock relativt stora, vilket försvårar utvärderingen. Sydöst om anläggningen, längs Igeldammsgatan, kan en påverkan på grundvattennivån i det undre grundvattenmagasinet i jord upp till 300 m från kylvattenlagret eventuellt

härledas till uppförandet av berganläggningen (Anders Berzell, SWECO Environment AB, pers. komm. 2012).

Jämförelser mellan prognoser och utfall

Inga jämförelser har genomförts inom ramen för förstudien.

Underlag för fortsatta studier

För denna berganläggning finns det omfattande data och information, inklusive grundvattennivåmätningar inför, under och efter uppförandet av anläggningen. Berganläggningen är därför lämplig kandidat för fortsatta studier. Om berganläggningen ska nyttjas inom ramen för fortsatta studier behöver dock åtkomsten till mätdata kontrolleras med verksamhetsutövarna (Fortum Värme samägt med Stockholms stad). En komplicerande faktor är att området innehåller flera andra, äldre berganläggningar med delvis bristfällig dokumentation.

7.2 Avesta försöksanläggning

Beskrivning av berganläggningen

Avesta försöksanläggning uppfördes 1980–1982 i syfte att undersöka hetvattenlagring i bergrum och värmetransport i berg (Axelsson et al. 1985, Björzell och Enström 2008). Anläggningen består av en forskningstunnel samt ett bergrum med en volym på cirka 15 000 m³, beläget ungefär 50 m under grundvattenytan. Bergets hydrogeologiska förhållanden undersöktes inför och under uppförandet, dels som underlag för byggnationen, dels som underlag för utvärdering av dess funktion som hetvattenlager. Viss injektering genomfördes i samband med uppförandet av berganläggningen.

Hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden

Hydrogeologiska undersökningar indikerar att berget kring anläggningen är anisotropt, med högre vattengenomsläpplighet tvärs bergrummet jämfört med bergrummets längdaxel. Grundvattenbildningen i området bedöms uppgå till 50–300 mm per år (Axelsson et al. 1985).

Sammanfattning av genomförda prognoser

Axelsson et al. (1985) beräknade trycksänkning i berg till följd av grundvattenbortledning innan berganläggningen togs i drift. De använde dels en analytisk (tvådimensionell) modell, dels genomfördes numeriska modellberäkningar med en tredimensionell finit-elementmodell. Modellberäkningarna visar på ett påverkansavstånd på 200–250 m kring berganläggningen.

Mätprogram under uppförande och/eller drift

Grundvattennivåmätningar genomfördes i borrhål i berg, borrade i direkt anslutning till eller i anläggningen. Mätningar i borrhål borrade från markytan påbörjades åtta månader inför byggstart. Initiellt genomfördes manuella mätningar i nio borrhål. Mätprogrammet förändrades successivt under uppförandeskedet. Vissa borrhål som var borrade från markytan interfererade sedermera med anläggningen och vissa som borrades från forskningstunneln interfererade så småningom med bergrummet. Av de ursprungliga nio

borrhålen föll således fyra bort från mätprogrammet och tre borrhål tillkom. Automatiska grundvattennivåmätningar påbörjades först i den senare delen av uppförandeskedet.

Trycksänkningar kunde enbart mätas under uppförandeskedet, eftersom anläggningen med undantag från kontrollrum och liknande är vattenfylld under drift. Grundvattennivåmätningarna visar på en maximal, kortvarig sänkning av tryckhöjd i berg på 10 m under uppförandet. Den maximala trycksänkningen stabiliserades så småningom till 3 m innan bergrummet fylldes med hetvatten. Den maximala trycksänkningen uppmättes dock inte direkt ovan anläggningen, vilket förklaras av bergets anisotropa hydrogeologiska egenskaper (Axelsson et al. 1985). Det fanns inga borrhål tillgängliga för nivåmätning på större avstånd från anläggningen, vilket innebär att trycksänkningens verkliga påverkansavstånd inte gick att undersöka.

Underlag för fortsatta studier

Mätprogrammet omfattade inte borrhål på större avstånd från berganläggningen, vilket innebär att den inte bedöms vara lämplig kandidat för fortsatta studier.

Bilaga 3 – Kontakter med verksamhetsutövare, konsulter och tillsynsmyndigheter

Ett stort antal verksamhetsutövare, konsulter och länsstyrelser (tillsynsmyndighet för vattenverksamhet) har kontaktats inom ramen för förstudien. Dessa kontakter har syftat till att samla in dels data och information om specifika berganläggningar, dels generella synpunkter och erfarenheter rörande de frågeställningar som är relevanta i förstudien. Nedan anges några av de verksamhetsutövare, konsulter och länsstyrelser som har kontaktats och till stor nytta för förstudien bidrag med data, information, synpunkter och/eller erfarenheter:

- **Trafikverket.**
- **LKAB.**
- **Boliden Mineral AB.**
- **Zinkgruvan Mining AB.**
- **Gryaab.**
- **Göteborg Vatten.**
- **Mark & Miljö (David Wladis).**
- **SWECO Environment AB (Ingvar Rhén, David Ekholm).**
- **Golder Associates AB (Charlie Axelsson).**
- **COWI (Ulf Sundqvist).**
- **Structor (Per-Olof Persson).**
- **Faveo projektledning (Leif Backlund).**
- **Länsstyrelsen Stockholm.**
- **Länsstyrelsen Östergötland.**
- **Länsstyrelsen Västra Götaland.**
- **Länsstyrelsen Norrbotten.**
- **Länsstyrelsen Gävleborg.**



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befonline.org • www.befonline.org
Visiting address: Storgatan 19

ISSN 1104-1773