UPTEC W 06 018
Examensarbete 20 p
Augusti 2006

Grundvattenpåverkan kring järnvägstunnlar i berg

Groundwater influence around railway tunnels in rock

Linda Ormann

Referat

Grundvattenpåverkan kring järnvägstunnlar i berg
Linda Ormann

Vatten i berg har ofta inneburit stora problem vid tunnelbyggen. Vatten som läcker in i tunnlar kan orsaka stora problem på såväl konstruktionen som miljön och dessutom kan ett stort inflöde medföra stabilitetsproblem. Om vatten läcker in kontinuerligt kan omgivningarna dräneras så att vattentillgången minskar och geotekniska problem kan uppstå i form av sättningar i marken. Det är därför av stor vikt att prediktera inläckaget och de konsekvenser som kan uppstå på omgivningen till följd av en grundvattensänkning.

Syftet med arbetet har varit att undersöka olika metoder för att förutspå inläckage och nivåförändring av grundvatten i samband med tunnelbygge i berggrund. Arbetet utfördes genom att en jämförelse gjordes mellan matematiska metoder, verkliga grundvatten-förändringar samt resultat från förundersökningar.

Undersökningar gjordes för tre järnvägstunnlar som är projekterade av Botniabanan AB. Varvsbergstunneln (2 km), Åsbergstunneln (1 km) samt Strannebergstunneln (1.4 km) som alla är belägna i närheten av Örnsköldsvik. Under examensarbetets gång har man hunnit driva igenom samtliga tre tunnlar.

Examensarbetet har påvisat svårigheterna i att förutspå grundvattnets beteende vid tunnelbyggen i berggrund. Detta beror på att berggrunden är ett komplext byggnadsmaterial vars egenskaper är svåra att bestämma. Konduktiviteten tycks vara den parameter som är svårast att bestämma med hög noggrannhet, och noggrannheten avspeglas i resultatet. Dessutom beror resultatet av vilken beräkningsmetod som väljs. Trots utförliga förundersökningar är det alltså svårt att bestämma bergets egenskaper med sådan noggrannhet att inläckage och nivåförändring av grundvatten kan förutspås med stor precision. Dock är matematiska metoder bra hjälpmedel för att bestämma grundvattenpåverkan kring järnvägstunnlar i berg.

Sökord: *berg, Botniabanan, grundvatten, injektering, inläckage, järnvägstunnlar, matematiska metoder, Stranneberget, Varvsberget, Åsberget, Örnsköldsvik*

Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Villavägen 16, SE-752 35 Uppsala
ISSN 1401-5765

Abstract

Groundwater influence around railway tunnels in rock
Linda Ormann

Rock groundwater has always caused major problems when tunnelling. Water leaking into tunnels can cause large problems, not only on the construction itself but also on the environment. A continuous water leakage can lead to a declining water supply, and geotechnical problems can occur as subsidence in the ground. Therefore it is of great importance to predict the consequences that can appear in the surroundings due to a declining groundwater surface.

The aim of the study was to investigate different methods for predicting leakage and changes in groundwater level due to tunnelling excavations in rock. This thesis was performed by comparing mathematical methods, actual groundwater changes and results from preliminary investigations.

Investigations were made for three railway tunnels planned by Botniabanan AB. Varvsbergstunneln (2 km), Åsbergstunneln (1 km) and Strannebergstunneln (1.4 km) all situated in the surroundings of Örnsköldsvik. During the time this thesis was performed, all tunnels have been fully excavated.

This thesis has emphasised difficulties in predicting groundwater behaviour as tunnelling excavations are made in rocks. The reason is the complex characteristics of rocks. The conductivity seems to be the parameter that is most difficult to determine with a high accuracy, and hence the accuracy shows in the results. Also the result is affected by the chosen mathematical method. Although careful preliminary investigations are made, it is hard to determine the rock characteristics with such accuracy that leakage and groundwater level changes can be predicted with high precision. However, mathematical methods are a good supplement when determining groundwater influences around railway tunnels in rock.

Keywords: *rock, Botniabanan, groundwater, grouting, leakage, railway tunnels, mathematical methods, Stranneberget, Varvsberget, Åsberget, Örnsköldsvik*

Department of Earth Sciences, Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 35 Uppsala
ISSN 1401-5765

Förord

Det här examensarbetet har utförts på uppdrag av Botniabanan AB med handledning av Per-Olof Pehrsson, anställd vid Tyréns AB samt hydrogeologiskt teknikstöd för Botniabanan AB. Examensarbetet omfattar 20 p och har utförts inom civilingenjörsprogrammet Miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Auli Niemi vid Institutionen för geovetenskaper har varit ämnesgranskare och Allan Rodhe vid Institutionen för geovetenskaper har varit examinator.

Jag vill tacka samtliga personer som på det ena eller andra sättet bidragit till detta examensarbete. Speciellt vill jag rikta ett stort tack till Per-Olof Pehrsson för den engagerade handledningen i exjobbet, men framförallt för trevliga och långa bilturer till Örnsköldsvik, roliga kvällar på Järven och svettiga pass i badmintonhallen och på inlines. Jag vill tacka Sven Hammarbäck, anställd på Bergab AB och bergkontrollant för Botniabanan AB, för trevliga stunder i fält och för den information du bidragit med om inläckage och grundvattennivåer. Göran Wallmark, anställd på Banverket och teknikansvarig på Botniabanan AB vill jag tacka för all kunskap du delgivit mig och för att du tagit med mig på alla möjliga spännande uppdrag i tunnlarna längs Botniabanan. Håkan Stille vid avd. för Jord- och bergmekanik, Inst. för Anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan vill jag tacka för givande diskussioner kring matematiska metoder. Jag vill också tacka alla er jag bott med på Järven, för sena kvällar och goda middagar, och hela avdelningen på Botniabanan AB i Örnsköldsvik för att ni svarat på frågor och gett mig tillgång till information, men även för trevliga lunch- och fikastunder. Slutligen vill jag tacka Auli Niemi som varit tålmodig längs hela rapportskrivningen, samt mina vänner och kurskamrater för goda tips och råd under examensarbetets gång.

Uppsala, maj 2006

Linda Ormann

Copyright © Linda Ormann och Institutionen för geovetenskaper, Luft- och vattenlära, Uppsala universitet.
UPTEC W 06 018, ISSN 1401-5765
Tryckt hos Institiutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2006.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING ..... - 1 -

1.1 BESKRIVNING AV UNDERSÖKNINGSOMRÅDET ..... - 2 -
1.1.1 Varvsberget ..... - 2 -
1.1.2 Åsberget ..... - 4 -
1.1.3 Stranneberget ..... - 5 -

2 BERGGRUNDEN SOM BYGGNADSMATERIAL ..... - 7 -

2.1 BERGARTER ..... - 7 -
2.2 TEKTONIK ..... - 8 -
2.3 VITTRING ..... - 8 -
2.4 INLÄCKANDE VATTEN TILL TUNNLAR – KONSEKVENSER ..... - 8 -
2.4.1 Miljöproblem ..... - 9 -
2.4.2 Tekniska problem ..... - 10 -

3 TUNNELTEORI ..... - 11 -

3.1 DRIVNING OCH TÄTNING AV TUNNLAR ..... - 11 -
3.2 MARKFÖRSTÄRKNING ..... - 13 -
3.3 HYDROGEOLOGISKA UNDERSÖKNINGSMETODER ..... - 14 -

4 TEORI - BERÄKNINGSMETODER ..... - 17 -

4.1 DEFINITIONER OCH GRUNDLÄGGANDE HYDRAULISKA BEGREPP ..... - 17 -
4.1.1 Darcys lag ..... - 17 -
4.2 MATEMATISKA METODER ..... - 17 -
4.2.1 Beräkning av inläckande grundvatten samt konduktivitet ..... - 18 -
4.2.1.1 Goodmans modell ..... - 18 -
4.2.1.3 Brantbergers modell ..... - 19 -
4.2.2 Beräkning av täthetskrav ..... - 21 -

5 RESULTAT FRÅN FÖRUNDERSÖKNINGAR ..... - 21 -

5.1 VARVSBERGET ..... - 23 -
5.2 ÅSBERGET ..... - 23 -
5.3 STRANNEBERGET ..... - 25 -

6 ANALYS AV GRUNDVATTENNIVÅER ..... - 27 -

6.1 VARVSBERGET ..... - 27 -
6.2 ÅSBERGET ..... - 29 -
6.3 STRANNEBERGET ..... - 31 -

7 RESULTAT AV MATEMATISKA METODER ..... - 33 -

7.1 VARVSBERGSTUNNELN ..... - 33 -
7.2 ÅSBERGSTUNNELN ..... - 34 -
7.3 STRANNEBERGSTUNNELN ..... - 35 -

8 DISKUSSION ..... - 37 -

8.1 GRUNDVATTENNIVÅER ..... - 37 -
8.1.1 Varvsbergstunneln ..... - 37 -
8.1.2 Åsbergstunneln ..... - 37 -
8.1.3 Strannebergstunneln ..... - 38 -
8.2 MATEMATISKA METODER ..... - 38 -
8.2.1 Beräkning av inläckage ..... - 38 -
8.2.2 Beräkning av konduktivitet ..... - 39 -
8.3 JÄMFÖRELSE MED FÖRUNDERSÖKNINGAR ..... - 39 -
8.3.1 Varvsberget ..... - 39 -
8.3.2 Åsberget ..... - 40 -

8.3.3 Stranneberget ..... *- 40 -*
8.3.3 Generell jämförelse ..... *- 40 -*
9 SLUTSATSER ..... **- 43 -**
REFERENSER ..... **- 45 -**
BILAGA ..... **- 49 -**
KONTROLLBERÄKNINGAR FRÅN FÖRUNDERSÖKNINGAR - VARVSBERGET ..... - 49 -

1 INLEDNING

Från Ångermanälven norr om Kramfors flygplats, via Örnsköldsvik till Umeå kommer Botniabanan att sträcka sig. Byggandet av Botniabanan leds av Botniabanan AB och projektet är Sveriges största järnvägsprojekt i modern tid. Byggandet startade hösten 1999 och kommer totalt att innefatta cirka 20 tunnlar med en sammanlagd längd av 2,5 mil. Botniabanan ska sättas i drift under hösten 2010.

Alla tunnlar som byggs under grundvattenytan kommer att erfara inläckage av grundvatten. Storleken på inflödet kommer att bero av storleken och djupet på tunneln och på berggrundens hydrogeologiska egenskaper. I områden där berggrunden har låg hydraulisk konduktivitet och liten sprickbildning kommer endast ett litet inflöde äga rum och dessa kan vanligtvis tas om hand utan problem (Freeze and Cherry, 1979). Men i områden där berggrunden har hög konduktivitet och där berget är sprickigt kan höga inflöden förekomma, med stabilitetsproblem och omgivningspåverkan som följd.

Då grundvatten läcker in i tunnlar skapas en permanent sänkning av grundvattenytan. En sänkning kan få förödande konsekvenser på omgivningen genom att t.ex. sättningar uppstår. Både vattenbrunnar och energibrunnar kan påverkas negativt, vattentillgångar kan minska och vegetation kan påverkas. Dessutom krävs under utförandeskedet att det inläckande grundvattnet är på en tillräckligt låg nivå så att en säker och fungerande drift kan utföras. Vid byggande av en tunnel måste därför i många fall vatteninläckaget begränsas. Tunnlar prövas som vattenverksamhet enligt miljöbalkens bestämmelser. Detta beroende av att inträngande grundvatten måste bortledas. Dessutom behövs ofta tillstånd för uttag av processvatten; endera i form av grundvatten från brunnar eller i form av ytvatten från något vattendrag i närheten. Ofta anges som villkor i besluten riktvärden för inläckande grundvatten (per 100 m tunnel) under bygg- respektive driftskede. För att få tillstånd att bortleda grundvatten krävs därför en redogörelse av vilken mängd vatten som förväntas läcka in i tunneln, hur stort område som kommer påverkas av grundvattensänkningen, s k influens-område, samt vilken påverkan grundvattensänkningen förväntas ha på omgivningen. Innan byggandet av en tunnel kan påbörjas krävs alltså mer eller mindre omfattande hydrogeologiska undersökningar. Kravet på undersökningarnas omfattning beror på omgivningens känslighet.

Det finns ett antal matematiska metoder för att prediktera inläckage av grundvatten till tunnlar. Dock bygger metoderna på många antaganden och ingen kan ge någon exakt prediktion. I detta examensarbete har en jämförelse gjorts mellan resultat från förundersökningar, matematiska metoder samt verkliga grundvattenförändringar. Syftet har varit att undersöka de olika metodernas tillförlitlighet i relation till verkliga förhållanden samt undersöka vilka parametrar som är mest betydande vid prediktering av inläckage och nivåförändring av grundvatten.

Undersökningarna har gjorts för tre järnvägstunnlar som är projekterade av Botniabanan AB. Varvsbergstunneln (2 km), Åsbergstunneln (1 km) samt Strannebergstunneln (1,4 km) vilka alla är belägna i närheten av Örnsköldsvik. De går genom liknande bergarter under grundvattenytans nivå men skiljer sig ändå åt i vissa avseenden. Varvsbergstunneln befinner sig i ett område där omgivningen är känslig för grundvattensänkning och därför

har omfattande undersökningar genomförts. Genom Åsberget löper sedan länge en tunnel som man nu har utökat och tätat och även där är omgivningen känslig för grundvattensänkning. Strannebergstunneln befinner sig i ett område som inte är lika känsligt för grundvattensänkning och därför har mycket få förundersökningar gjorts. Bergtäckningen är närmast obefintlig i vissa delar över tunneln. Frysning av ovanliggande jord har utförts vid tätning och vid byggandet av dessa partier går tunneln också genom betongvalv. Det frysta partiet undersöks inte i detta arbete, men en beskrivning av metoden lämnas.

Under tiden denna rapport skrevs har man hunnit driva igenom samtliga tunnlar.

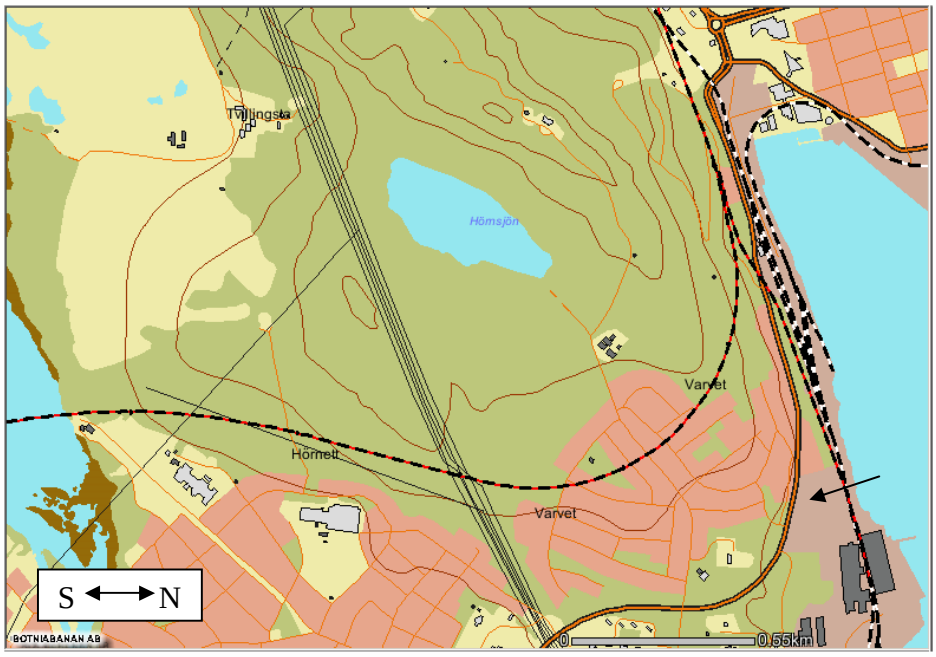
1.1 BESKRIVNING AV UNDERSÖKNINGSOMRÅDET

De tunnlar som undersökts i denna rapport går genom Varvsberget, Åsberget samt Stranneberget (Figur 1). De är belägna i närheten av Örnsköldsvik och utgör sammanlagt ca 4,5 km tunnel.

Figur 1. Botniabanans sträckning genom Varvsberget, Åsberget och Stranneberget.

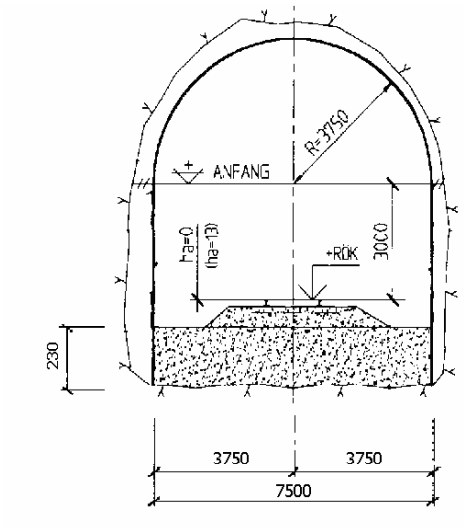
1.1.1 Varvsberget

Varvsberget är beläget strax söder om Örnsköldsvik centrum och undersökningsområdet ligger på sydöstra sidan av en topografiskt mycket markerad bergplint med en högsta höjd av ca 90 m. Hörnsjön är belägen på Varvsberget på en höjd av ca 81 m ö h, ca 60 meter ovanför tunnellinjen och kortaste avståndet till tunnellinjen är ca 550 meter (Figur 2). Sjön används kontinuerligt som råvattentäkt för Örnsköldsviks kommun. Nedanför Varvsberget i norra delen ligger Shells depålager för bensin. Bensinlagret är beläget ca 20 meter under tunnellinjen och ca 400 meter från tunnellinjen. Bensinlageranläggningen är beroende av ett grundvattentryck för att förhindra läckage av bensin till omgivande berg.



Figur 2. Botniabanans sträckning genom Varvsberget. Hörnsjön ligger på berget och pilen till höger i bilden pekar på bensinlagret.

Sträckningen går från km 549+530 (enligt Banverkets längdmätning) vid Veckefjärden, i nordostlig riktning riktning ca 970 m och viker därefter av mot nordväst i en vid båge som i princip slutar vid tunnelns norra mynning, km 551+600. Tunnelbottens nivå i det aktuella undersökningsområdet varierar mellan 17,6 m ö h. vid km 550+800 och 20,1 m ö h. vid km 551+300. pårtunnelns längd är 2065 m med 170 m servicetunnel och mellanpåslagstunnel. Dimensionerna i tunnelns profil följer standardmått för Botniabanans tunnlar (Figur 3).



Tunneln genom Varvsberget började byggas hösten 2003, sprängning startade i september 2003 och i februari 2004 hade man drivit hela servicetunneln och totalt ca 500 meter i spårtunnel och räddningstunnel. I mars 2005 hade genombrott skett åt båda håll. Tunneln var färdigställd augusti 2005 och hela entreprenaden färdigställdes januari 2006. För tunnelbygget har 175 000 kubikmeter berg eller 475 000 ton (volymvikt fast berg) sprängts ur Varvsberget. 250 000 ton av dessa 475 000 ton har används till bankbyggnad, erosionsskydd i slänter, underballast, vägar, planer m.m. Övrigt material har använts i bygget av stationsområdet i Örnsköldsvik (Edblom 2005).

Figur 3. Tunnelprofil med standardmått (Veidekke, 2004).

Berggrund
Berggrunden längs hela tunnelsträckningen domineras av en homogen röd-grå medel- till grovkornig granit. Partier med porfyrisk granit (centimeterbreda korn) samt inslag av gångbergarterna pegmatit och diabas förekommer. Berggrunden har tre dominerande sprickriktningar, två brantstående i N-S och O-V och en flack. Större lineament är orienterade i N-S, O-V och NV-SO (BOTNIA 2000: JP 41).

Fyra kärnborrhål har utförts längs den aktuella tunnelsträckan. Borrkärnorna har karterats av Bergsäker AB och i anslutning till borrningen har vattenförlustmätning utförts i kärnborrhålen. Mätningen utfördes med enkelmanschett i hela eller halva hålet. I alla hålen har berget bedömts vara tätt till relativt tätt (Bygghandling, Bergteknisk prognos 13.2).

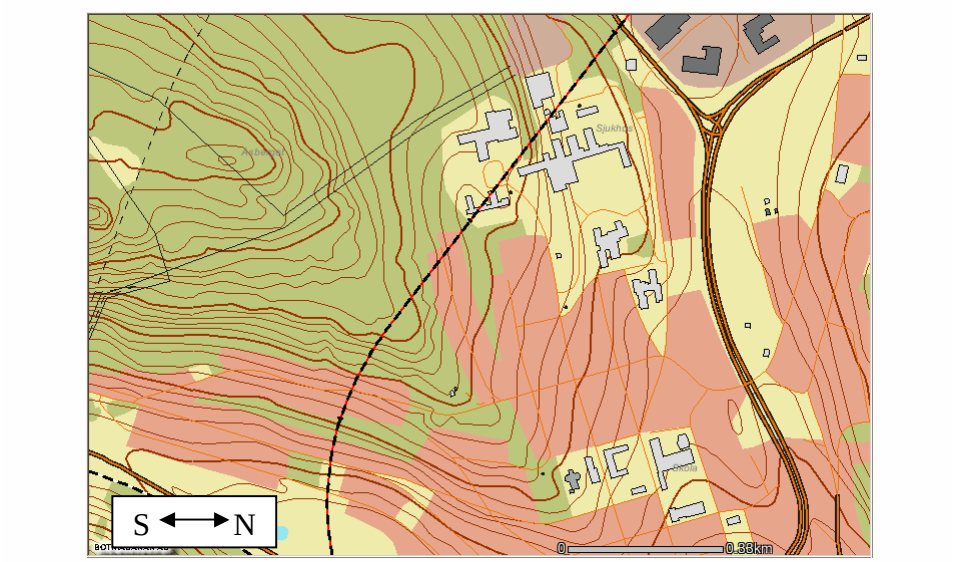
Jordlager
Jordlagerfördelningen är starkt präglad av de topografiska förhållandena. I de högre partierna vid Hörnsjön dominerar morän vilken är svallad och endast de grövre fraktionerna sand-grus återstår. Längre ned mot Örnsköldsviksfjärden förekommer huvudsakligen sand-, silt- och lersediment. Vid Hörnsjön är jordlagren tunna, 0-2 meter, medan de i en mindre sänka söder om bensinlageranläggningen lokalt överstiger 5 meter (BOTNIA 2000: JP 41).

Grundvatten
Uthålliga grundvattenmagasin i jord förekommer sparsamt beroende på topografin och de permeabla tunna jordlagren. Grundvattnet följer lågpunkter i bergets överyta varför grundvatten i jord saknas inom stora delar. Sannolikt finns en god hydraulisk kontakt mellan jordlager och berggrundens spricksystem (BOTNIA 2000: JP 41).

Grundvattnet varierar med djupet. Berggrundens övre 15-20 meter har en förhållandevis hög vattenförande förmåga med en hydraulisk konduktivitet på ca $5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Mot djupet sjunker konduktiviteten successivt för att vid tunnelnivån (25 m ö h) ligga mellan 10^{-8} och 10^{-7} m/s. Även grundvattnets trycknivå uppvisar ett djupberoende, ytnära ligger grundvattennivån 2-3 meter under markytan, medan den på djupet kan ligga så lågt som 10-15 meter under markytan (BOTNIA 2000: JP 41). Utredningarna har inte visat på någon skillnad i konduktivitet för olika delar av Varvsberget. Testerna tyder på relativt homogena hydrauliska förhållanden (BOTNIA 2000: JP 41).

1.1.2 Åsberget
Åsberget är en bergrygg belägen strax nordväst om Örnsköldsviks centrum. Området utmed järnvägslinjen är mycket kuperat och bebyggelse i form av mindre och större bostadshus förekommer längs bergets södra sluttning. Sjöar och våtmarker saknas i området varför dagvattnet snabbt rinner utmed bergssidorna (Figur 4). Genom bergets ostligare delar löper sedan tidigare en järnvägstunnel för godstrafik. Tunneln anlades på 1950-talet och saknar till stora delar tätning mot inläckande grundvatten. Den ursprungliga tunneln har utnyttjats för att bygga den nya tunneln. Vissa delar av den ursprungliga tunneln fungerar nu som servicetunnel och övriga delar har använts som huvudtunnel, dock har den ursprungliga tunneln vidgats och tätats för att överensstämma med Botniabanans standardmått. Längden på huvudtunneln genom Åsberget är 1000 m med modernisering och ny servicetunnel

(Botniabanan Gålnäs – Arnäs, ansökan om tillstånd för vattenverksamhet). Byggstart skedde i december 2003 och tunneln färdigställdes i december 2005.



Figur 4. Botniabanans sträckning genom Åsberget. Det är sträckningen på den nya tunneln som visas i figuren.

Berggrund
Berggrunden består främst av ådergnejs med inslag av granit och pegmatit. Sprickbildning liksom avsnitt med nedsatt bergkvalitet förekommer längs en del sektioner. De större sprickzonerna förekommer främst i den nordöstra delen. Berget har allmänt goda egenskaper ur bergbyggnadssynpunkt (Botniabanan Gålnäs – Arnäs, ansökan om tillstånd för vattenverksamhet).

Jordlager
På höjderna går berget i dagen över stora områden. I övrigt täcks det av ett tunt lager svallad morän. Längre ned utmed bergssidorna ökar moränens mäktighet men inga betydande jorddjup förekommer (Botniabanan Gålnäs – Arnäs, ansökan om tillstånd för vattenverksamhet).

Grundvatten
På Åsberget saknas det förutsättningar för mäktigare magasin av grundvatten i jord beroende på brant topografi och tunna jordlager. Förekomst av grundvatten i jord på de högre delarna av berget är sannolikt begränsade till tider på året då snösmältning pågår eller då riklig nederbörd förekommer (Botniabanan Gålnäs – Arnäs, ansökan om tillstånd för vattenverksamhet).

1.1.3 Stranneberget

Stranneberget befinner sig ca 6 km norr om Örnsköldsvik. Tunneln går genom en större bergplint, Stranneberget, med en högsta nivå på ca 115 m.ö.h. (Figur 5). Stranneberget är kraftigt markerat i terrängen och dess östra sida stupar brant ned mot flackare terräng vid ca km 13+520. Markförstärkningsarbeten har genomförts i detta flacka område (Strannyland)

eftersom bergstäckning inte fanns på hela tunnelsträckan (mellan km 13+552 – 13+615 och 13+740 – 13+850). Dels har marken har frysts ned under perioden februari - juni 2002 till -15 grader, dels har så kallad jet-grouting förstärkt marken på ett annat område (avsnitt 3.2). Efter mark-förstärkning sprängdes för tunneln under jord. Berggrunden upphör i öster vid km ca 14+165. En betongjuten tunnel tar där vid och mynnar ut strax öster om befintlig E4 (Botniabanan Örnsköldsvik – Husum, Del 2 (2001)). Bergtäckningen ovan tunneltak uppgår till som mest 85 meter i Stranneberget. Minsta bergtäckning, bortsett från partier med betonggjuten tunnel uppgår till 3-5 meter och påträffas vid sänkor kring km 12+900, 13+975,14+025 samt vid tunnelpåslagen (Botniabanan Örnsköldsvik – Husum, Del 2 (2001)).

Tunneln är 1400 m lång. Den började byggas i november 2001 och färdigställdes i februari 2004.

Figur 5. Till vänster visas Botniabanans sträckning genom Stranneberget. Tunnelpåslagen ligger strax söder om södra vägen och strax norr om norra vägen i figuren. Frysområdet finns i det flacka partiet. Till höger visas södra tunnelpåslaget (Foto: Linda Ormann).

Berggrund

Berget är helt blottat inom bergplinten och berggrunden i de blottade berghällarna längs den aktuella tunnelsträckningen utgörs till övervägande del av grå-rödgrå, medel-grovkornig gnejsgranit. Större kalifältspatkristaller (ögon) förekommer i gnejsgraniten. Dessa bergarter bedöms allmänt ha goda egenskaper ur tunnelbyggnadssynpunkt, med undantag för inlagringar och gångbergarter såsom diabas, grönsten, pegmatit och aplit som ger bergutfall i skivor och mindre block (Botniabanan Örnsköldsvik – Husum, Del 2 (2001)).

Jordlager

I den flackare terrängen med jordfyllda sänkor återfinns sulfidlera underlagrat av ett tunt lager friktionsmaterial. Sulfidlera innehåller järnsulfid och möjligen andra svavelföreningar. Detta kan medföra ett inflöde av surt vatten till tunneln vilket i sin tur kan ge negativa effekter på utförd injektering och förstärkning (Botniabanan Örnsköldsvik – Husum, Del 2 (2001)).

2 BERGGRUNDEN SOM BYGGNADSMATERIAL

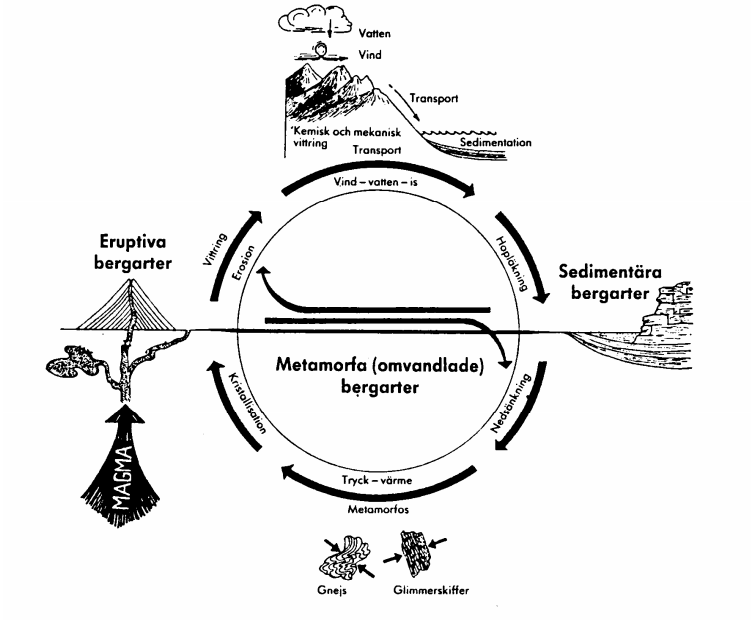
Berggrunden som byggnadsmaterial är komplext. Bergformationer är starkt varierande i sin uppbyggnad och tektoniska processer har gett sprickor och förkastningar. Omvandlings- och nedbrytningsprocesser har även påverkat berggrunden. Vattenförhållanden i främst berggrundens spricksystem har också betydelse för bedömning av berget som byggnadsmaterial (Nord och Stille, 1990).

2.1 BERGARTER

Bergarten är en väsentlig komponent vid bedömning av berggrundens lämplighet för undermarksbyggande.

Bergarter indelas i tre klasser efter sitt bildningssätt (Figur 6) (Nord och Stille, 1990):

1. Eruptiva bergarter (igneous rock) som har kristalliserats ur heta smältor från jordens inre. Exempel på dessa bergarter är granit, gabbro, basalt, porfyr, men även de lagrade vulkanbergarterna räknas till denna grupp.



Figur 6. Bildning av bergarter.

2. Sedimentära bergarter (sedimentary rock) som är sedimenterade kross och vittringsprodukter, som har kittats samman till bergarter. Exempel på sedimentära bergarter är sandsten, lerskiffer, kalksten och konglomerater.
3. Metamorfa bergarter (metamorphic rock) som har förändrats efter sin bildning genom påverkan av tryck, uppvärmning och genom utbyte av grundämnen. Exempel på meta-morfa bergarter är gnejser, glimmer-skiffer och marmor.

Av jordklotets landyta täcks 75 % av sedimentära och metasedimentära bergarter, vilka har bildats för 60-500 miljoner år sedan, således fr.o.m. den kambriska t.o.m. den tertiära tidsåldern. I Sverige är berggrunden till allra största delen av betydligt äldre datum, prekambrium, och utgörs av eruptiva eller metamorfa bergarter såsom granit och gnejs (Nord och Stille, 1990).

2.2 TEKTONIK

Jordskorpan befinner sig i ett ständigt och växlande spänningstillstånd. Dessa spänningar och krafter ger upphov till deformationer och brott i berggrunden och skapar därmed veckningar, sprickor mm. Med begreppet tektonik avses jordskorpans strukturella form förorsakad av dessa deformationer och brott (Nord och Stille, 1990).

Sprickor definieras som diskontinuitetsytor (separationsplan) längs vilka det har varit liten eller ingen rörelse. Sprickor förekommer i alla typer av bergarter och kan bildas under alla stadier av en bergarts utveckling. Sprickorna kan genetiskt indelas i skjuvsprickor och dragsprickor beroende på typen av brott i materialet. Dragbrott ger dragsprickor medan tryckbrott kan ge både skjuvsprickor eller dragsprickor s.k. spjälkning (Nord och Stille, 1990).

Sprickorna brukar normalt beskrivas utifrån följande faktorer:

- Orientering, stupning, strykning
- Frekvens
- Sprickmönster, systematiska eller icke systematiska sprickor
- Grad av öppenhet (sprickvidd)
- Grad av råhet
- Fyllnadsmaterial
- Ytbeläggning på sprickplanet
- Grad av läckning

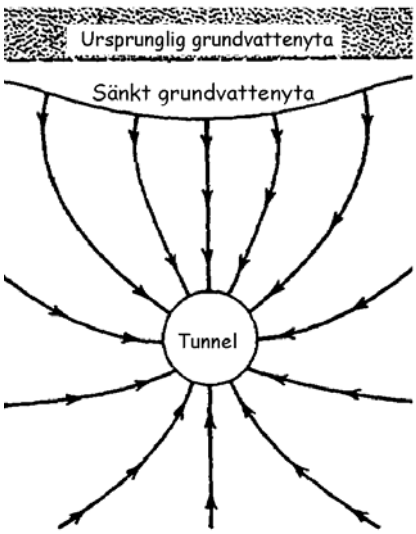
2.3 VITTRING

Traditionellt indelas vittringsmekanismer i fysisk, kemisk och biologisk vittring. En grundförutsättning för kemisk vittring är vatten. Vittringen angriper dels bergmassan då vattnet tränger fram i bergets porer, dels längs sprickor och förkastningszoner. Trots att porositeten i täta bergarter ligger omkring 1 % kan tillräckliga mängder vatten röra sig i berget för att orsaka vittring. Vatten som rör sig i sprickzoner medför vittring på större djup än det som tränger fram genom porerna i bergmassan. Vatten angriper i första hand de lättlösliga mineralerna (exempelvis fältspat) i bergmassan. Vidare löser vattnet ut exempelvis kalciumkarbonat och andra salter (Nord och Stille, 1990).

2.4 INLÄCKANDE VATTEN TILL TUNNLAR – KONSEKVENSER

Alla tunnlar som byggs under grundvattenytan kommer att erfara inläckage av grundvatten. Storleken på inflödet kommer att bero av storleken och djupet på tunneln och på berggrundens hydrogeologiska egenskaper. I berg med hög konduktivitet kan inflödet bli stort, men då konduktiviteten är låg kan inflödet oftast tas om hand utan större svårigheter (Freeze and Cherry, 1979). I områden där berggrunden har hög konduktivitet och där berget är sprickigt kan höga inflöden förekomma, med stabilitetsproblem och omgivningspåverkan som följd. Vid flera tillfällen har tunneldrivningen varit tvungen att stoppas långa perioder till följd av stora grundvatteninflöden. Ett för många välkänt exempel är tunnelbygget genom Hallandsåsen i södra Sverige där problemen med stora grundvatteninflöden fått allvarliga konsekvenser.

Konsekvenser till följd av inläckage av grundvatten till tunnlar kan delas in i två kategorier, miljöproblem och tekniska problem.



2.4.1 Miljöproblem

Påverkan på vattentillgångar: När grundvatten läcker in i tunnlar skapas en avsänkningstratt ovanför tunneln. Det innebär att området närmast ovanför tunneln kommer att erfara störst grundvattensänkning, men grundvatten-sänkningen minskar då avståndet från tunneln ökar (Figur 7). Storleken på grundvatten-sänkningen är beroende av lokala hydrogeologiska egenskaper och storleken på tunneln. I akvifärer som har dålig förbindelse med grundvattenbildnings-områden och liten grund-vattenbildning kan påverkan på grundvatten-tillgången i brunnar bli mycket stor även vid litet inläckage till tunneln (Cesano, 1999).

Figur 7. Grundvattensänkning kring tunnel.

Förändring av grundvattnets kemiska egenskaper: Konstruktionen av tunnlar kan direkt eller indirekt leda till förändringar i grundvattnets kemiska egenskaper, förorening av ytvatten och grundvatten samt annan kemisk påverkan. Källan till föroreningen kan vara kemikalier som används i tunneln. Under konstruktionen av tunneln genom Hallandsåsen användes 1780 ton hälsofarlig förinjektering i sidoväggarna längs en 300 meter lång sträcka, för att undvika höga grundvatteninflöden. Kemikalien som användes i förinjekteringen förändrade egenskaperna hos grundvattnet i omgivningen och påverkade grundvattentillgången och bidrog till hälsoproblem hos tunnelarbetarna (Cesano, 1999).

Påverkan på vegetationen: Grundvattensänkning till följd av tunnelbyggande kan påverka vegetationen. Effekten beror på jordlagrets hydrogeologiska egenskaper och nivån på den naturliga grundvattennivån (Cesano, 1999). Många gånger försörjs dock vegetationen till huvuddel av ytvatten och då är naturligtvis grundvattenpåverkan av underordnad betydelse.

Sättningar i marken: När vatten dräneras in i tunnlar minskas porvattentrycket i de övre jordlagren/berglagren vilket gör att den effektiva spänningen ökar. Resultatet blir att det uppstår sättningar i marken, framförallt på jord som har en ovanliggande belastning (Cesano, 1999). Skador på omgivningen kan också uppkomma p g a att marken dräneras genom läckage ned till bergtunnlar med konsolideringssättningar och ruttnande träpålar som följd (Nord och Stille, 1990). Det finns många exempel där sättningar uppstått till följd av tunnlar och att restaurera skadan innebär tekniska svårigheter och stora kostnader

2.4.2 Tekniska problem

Stabilitetsproblem: Grundvatteninflöde till tunnlar kan medföra att tunnelkonstruktionen blir instabil framförallt genom att friktionen mellan sprickorna minskar när de fylls med vatten eller vått material (Cesano, 1999).

Komplicerade konstruktionsförhållanden: Det finns en rad olika metoder för att undvika grundvatteninflöde till tunnlar. Den vanligaste metoden är att förinjektera väggarna (avsnitt 3.1). Dock är alla dessa metoder dyra och innebär diverse svårigheter. Det är mycket svårt att få en tunnel torr och hur tät tunneln kan bli är proportionell till hur mycket pengar man är beredd att spendera (Cesano, 1999).

3 TUNNELTEORI

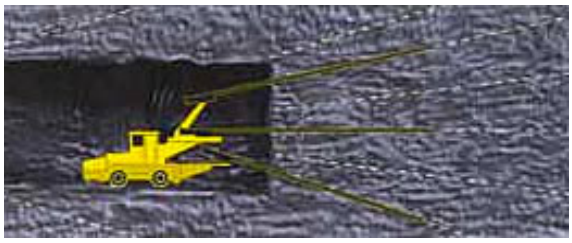
3.1 DRIVNING OCH TÄTNING AV TUNNLAR

När man bygger en tunnel i Sverige måste man, sedan Miljöbalken trädde i kraft 1 jan 1999, alltid utgå från en vattendom som talar om hur mycket vatten som får läcka in i tunneln. Det är miljödomstolen som beslutar om vattendomen, och mängden vatten som tillåts läcka in beror på omständigheter såsom omgivningens känslighet för en grundvattensänkning och dess effekter. Vid byggnationen av exempelvis Citytunneln i Stockholm har man höga krav på att inte släppa in i stort sett något vatten alls eftersom omgivningen ovan och kring tunneln är väldigt känslig. Tunnlar som är belägna långt ute på landsbygden där varken bostadshus eller vattentäkter finns, kan tillåtas ha en större mängd inläckande vatten.

Förutom hänsyn till omgivningen måste man också ta i beaktande den påverkan som det inläckande vattnet kan ha i järnvägstunneln. Av trafiktekniska skäl är det viktigt att undvika dropp på ledningar och räler samt bildning av svallis. Inläckaget till tunnlar kan begränsas och beror till stor del på hur mycket pengar och tid man lägger ned på att täta tunneln ifråga. Självklart blir det svårare att täta en tunnel desto mer porös och sprickig berggrunden är, men med stort tekniskt kunnande kan man göra de flesta tunnlar väldigt täta.

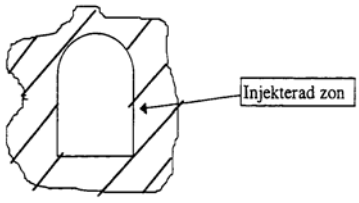
Under drivningen av tunnlar består arbetet i huvudsak av följande moment:

- Först borras ca 20 meter långa borrhål i berget från sprängfronten närmast parallellt med tunnellinjen, endast svagt riktade ut från tunneln (Figur 8). Om den bergtekniska prognosen visar på att det finns risk för vattenförande zoner i berget kan borrning utföras kring hela tunneln. I annat fall sker borrning ut från väggarna och från taket, så att borrhålen bildar ett mönster likt en solfjäder (Figur 9) (Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002). Tunnel genom Åsberget).



Figur 8. Förinjektering (Vägverket Region Stockholm)

- I borrhålen utförs vattenförlustmätningar, vilket innebär att vatten pumpas in i olika sektioner av borrhålen. De olika sektionerna avgränsas med manschetter. Utifrån resultaten från vatten-förlustmätningarna beslutas om och hur injektering ska utföras. Injektering innebär att cementsuspensioner, eller andra av Banverket godkända tätningsmedel, trycks in i borrhålen (se 10). Efter injektering utförs nya



Figur 9. injekterad zon kring en tunnel

Vattenförlustmätningar för att kontrollera att tätningen nått önskat resultat. Syftet med tätningen är, som nämnts tidigare, att begränsa mängden grundvatten som läcker in i tunneln. (Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002). Tunnel genom Åsberget)

- När förinjektering utförts borras 6 meter långa borrhål längs tunnellinjen (Figur 10). Borrhålen laddas med sprängämne, som detoneras. Inom varje injekteringsskärm utförs vanligen tre sprängningar (Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002). Tunnel genom Åsberget).

- Efter sprängning (Figur 11) vädras tunneln cirka 30 minuter genom att fläktar sätts igång. Fläktarna trycker den rena luften mot fronten och trycker ut spränggaserna genom tunneln. Därefter sker utlastning av bergmassor (Figur 12).

- Efter varje sprängsalva sker en geologisk kartering av berget med avseende på sprickor, bergarter etc., som ligger till grund för förstärkningsåtgärder och eventuell efterinjektering. Principerna för efter-injektering är desamma som för den injektering som utförs innan sprängning (för-injektering). (Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002). Tunnel genom Åsberget)

Figur 10. Borrning av spränghål (Vägverket Region Stockholm)

Figur 11. Sprängning (Vägverket Region Stockholm)

Figur 12. Utlastning (Vägverket Region Stockholm)

Figur 13. Skrotning och förstärkning (Vägverket Region Stockholm)

- Inne i tunneln skrotas bergväggar och tak d v s allt löst material knackas loss (Figur 13, Figur 14). Sedan förstärks bergytorna med sprutbetong – fiberarmerad sprutbetong cirka 40 mm – och 3 m långa kamstålbultar dimension 25 mm borras in och gjuts fast i berget.

Figur 14. Skrotning I Åsbergstunneln. (Foto: Linda Ormann)

De flesta tunnlar betongsprutas, dels för att minska riskerna för nedfallande berg, dels för att minska dropp. På vissa ställen där vatten läcker in i tunnlar krävs att dräner installeras. Dessa leder på ett kontrollerat sätt bort inläckande vatten från tak och väggar (Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002) Tunnel genom Åsberget).

Spänningsförhållandena i berget närmast omkring tunneln och därmed inläckningen påverkas av drivningen. Sprängningen innebär att sannolikheten ökar för att sprickor, ej vattenförande och vattenförande, får kontakt med varandra. Vattenflödet in i tunneln bestäms dock huvudsakligen av bergets hydrogeologiska egenskaper och vattentrycket. Ingetdera går att påverka med drivningsmetoden. Den totalt inläckande mängden bör därmed vara i stort sett oberoende av drivningsmetoden. Sättet att ta hand om vattnet och kostnaderna för detta kan däremot vara väsentligt olika (Alberts och Gustafsson, 1983).

3.2 MARKFÖRSTÄRKNING

Metoden att frysa mark används för att kunna driva fram en tunnel genom svåra förhållanden t ex krosszoner, förvittrade partier, sprickor fyllda med lera eller fin sand eller t o m passera besvärliga lösa jordlager eller rasmassor (Alberts och Gustafsson, 1983). Principen är att vattnet i porer och sprickor fryses varigenom bergmassan temporärt får betydligt ökad hållfasthet och täthet. Köldalstringen baseras på den temperatursänkning som erhålles när ett lämpligt köldmedium övergår från vätska till gas. Denna förångning kan man låta ske direkt i frysrör som placerats i borrhål i bergmassan. Efter förångningen kan köldmediet antingen gå i retur till en kompressor och kondensator eller också släppas ut i omgivningen. De frysta partierna erhåller en betydande hållfasthet, som är högre ju lägre temperaturen är. Hållfastheten är vidare beroende av jordartens kornstorlek och vattenhalt. Frusen sand har avsevärt större hållfasthet än frusen lera. Efter upptining är förhållandena i bergmassan relativt oförändrade vilket ibland kan vara önskvärt. Vattenmättat fruset poröst berg har avsevärt högre hållfasthet än ofruset (Alberts och Gustafsson, 1983).

Jet-grouting är en mer beprövad markförstärkningsmetod än att frysa marken. Det innebär att man borrar ett antal hål i jorden i vilka vatten och cement trycks ned genom ett munstycke som sitter på borrkronan. Över Strannebergstunneln har man borrat ner till två meter i berget vilket maximalt motsvarar 15 meter djupa hål. De cementpelare som bildas

har en diameter på 1,5 – 2 meter och tillsammans bildar cementpelarna en betongsköld som förhindrar att jordmassor rasar ner i tunneln under sprängning. Över Strannebergstunnlen har man borrat cirka 800 cementpelare på ett område som ska bli en 118 meter lång betongtunnel. Totalt krävs 4 000 ton cement för cementpelarna (Edblom, 2002).

3.3 HYDROGEOLOGISKA UNDERSÖKNINGSMETODER

Målsättningen med de hydrogeologiska förundersökningarna är att fastställa om det är möjligt att bygga anläggningen enligt förutsättningarna. Vidare ska de ge underlag för projektering, prognos av bergkvalitet, inläckande vattenmängder och påverkan på omgivningen (Gustafson och Wallman, 1995). För att prediktera inläckage och grundvattensänkningens utbredning kring en tunnel krävs kännedom om markens och bergets vattenförande egenskaper. Proceduren för att undersöka egenskaperna kan göras mer eller mindre utförlig och på olika sätt, med olika säkerhet och omkostnad. Undersökningarna utförs oftast steg för steg för att kunna optimera effektiviteten i varje steg (Cesano, 1999). Följande moment ingår oftast:

Geologisk kartering – omfattar vanligtvis kartering av berghällar och jordlager. Ytvattendelare och in- och utströmningsområden identifieras utgående från, jordlager, vegetation och topografi (BOTNIA 2000: JP 41). Från hällobservationer kan man ofta också analysera uppsprickningstyp och indirekt få information om vattenförande sprickgrupper (Gustafson och Wallman, 1995).

Markgeofysiska mätningar – kommer som regel efter geologisk kartering. Deras betydelse ligger främst i att de innan borrning utförts är de enda metoder som, någorlunda säkert, kan användas för att belägga och exploatera i ytan observerade lineament och zoner (Gustafson och Wallman, 1995). Med hjälp av geofysiska mätningar kan en uppskattning göras av jordlagrets mäktighet och bergets kvalitet, samt att förekomsten av eventuella kross- eller sprickzoners omfattning och utsträckning kan undersökas (BOTNIA 2000: JP 41).

Hammarborrningar och någon kärnborrning – är ofta lämpligt att sätta i detta skede. Huvudsakligen brukar man utforma borrprogrammet så att man söker belägga viktigare zoner som kan ge vatten- och byggnadsproblem. Det är viktigt att följa borrningarna noga och att registrera borrsjunkning, vattenföring och andra parametrar fortlöpande (Gustafson och Wallman, 1995).

Kaxprovtagning och kärnkartering – ger möjlighet att bestämma bergarterna i borrhålen. Kärnan har givetvis det högsta värdet eftersom man i den kan ge en detaljerad bergbeskrivning och bekräfta sprickfrekvens, sprickriktningar och bergtillväxt från ytkarteringen (Gustafson och Wallman, 1995).

Enklare hydrauliska tester och provpumpningar – utförs i detta skede för att skaffa en uppfattning om bergets genomsläpplighet och hydrauliska samband (Gustafson och Wallman, 1995). Exempel på hydrauliska brunnstester:

Observationer vid borrning – observerar nivåförändringar i befintliga närliggande borrhål och brunnar för att se om det uppstår någon respons och om det föreligger hydraulisk

kontakt mellan borr- och observationspunkt. Kan ge kvalitativ information som används för planering av de fortsatta testerna (BOTNIA 2000: JP 41).

Pulstest – används för att undersöka berggrundens och jordlagrens vattenförande förmåga närmast borrhål och brunnar. Testet innebär att vattennivån i brunnen momentant höjs eller sänks, varefter återställningsförloppet registreras. Mätning kan utföras med eller utan manschett. Från testerna kan transmissivitet, dominerande flödesregim och eventuella hydrauliska ränder utvärderas (BOTNIA 2000: JP 41).

Pumptest – kan utföras genom att en dränkbar pump placeras nere i brunnen. Efter att vattennivån i brunnen stabiliserats har pumpning utförts med nära konstant flöde. Vattnet avleds på tillräckligt långt avstånd för att inte orsaka störande återflöde. Vattennivån och flödet registreras och efter pumpning registreras återhämtning. Pumptesternas transienta förlopp utvärderas sedan enligt vedertagna metoder och transmissivitet och magasinkoefficient kan utvärderas (BOTNIA 2000: JP 41).

Infiltration med enkelmanschett – infiltration av vatten kan utföras under en enkelmanschett. Placeringen av manschetten baseras på borrhålets hydrauliska förutsättningar såsom fri vattennivå och förekomst av vattenförande sprickor. Testet inleds med att manschetten stängs varefter en förändring av grundvattennivån erhålls under och över manschetten. Då stabila förhållanden uppnås påbörjas testet och utförs med konstant flöde eller ökat flöde i successiva steg (BOTNIA 2000: JP 41).

Manschettmätningar för grundvattentryck – en enkelmanschett kan placeras i kärnborrhål för att undersöka grundvattentrycket på olik djup. I kärnborrhål med hög fri grundvattenyta kan en enkelmanschett placeras för att undersöka grundvattentrycket på olika djup. Inläckande ytnära vatten kan ge upphov till en högre fri vattenyta i borrhålet och ett därmed nedåtriktat vattenflöde. Med en manschett stängs detta flöde och nya grundvattennivåer inställer sig som motsvarar det naturliga grundvattentrycket. Vanligen stiger vattennivån över manschetten och sjunker under manschetten (BOTNIA 2000: JP 41).

Provpumpning – en viss kapacitet pumpas ur en brunn och under pumpningens gång observeras grundvattnets nivåförändringar i ett antal punkter. Man brukar skilja på långvariga och kortvariga provpumpningar. Grundvattenmagasinets vatten-genomsläpplighet, magasineringsförmåga och utbredning liksom storleken på vattentillrinningen från omgivande marklager kan därefter beräknas (Naturvårdsverket, 2003).

Analys av data – analys av data och prognos av bergförhållandena bör syfta till att förbättra och förfina den geologiska modellen över området. Speciellt bör förväntade problem identifieras så de kan tas hänsyn till eller undvikas i anläggningens utformning (Gustafson och Wallman 1995).

I Figur 15 visas två grundvattenrör vid Strannebergstunneln. Som beskrivits ovan används dessa vid hydrogeologiska undersökningar före tunnelbygget. Men de används också för att göra kontinuerliga grundvattenmätningar under och efter byggskedet för att kontrollera grundvattennivåer. På så sätt kan det lätt upptäckas om grundvattennivån skulle förändras till följd av tunneln.

Figur 15. Grundvattenrör vid Stranneberget i samband med grundvattenmätning 2005-05-16 (Foto: Linda Ormann)

4 TEORI - BERÄKNINGSMETODER

4.1 DEFINITIONER OCH GRUNDLÄGGANDE HYDRAULISKA BEGREPP

4.1.1 Darcys lag

Darcys lag bygger på att flödet genom ett porsystem är proportionellt mot tryckfallet dividerat med flödessträckan.

$$v = K \cdot \frac{dh}{dx} \qquad (1)$$

Där v är den s k. darcyhastigheten (m/s) och K hydraulisk konduktivitet (m/s). Konduktiviteten beror av det porösa mediets och vätskans egenskaper. Denna är temperaturberoende för vatten, men då vattentemperaturen normalt är konstant i ett grundvattenmagasin kan permeabiliteten ses som en materialkonstant. Skillnaden i trycknivå mellan två mätpunkter anges dh (m) och dx är avståndet (m) mellan mätpunkterna (Andersson, Andersson och Gustavsson, 1984).

4.2 MATEMATISKA METODER

Kvalitativa och kvantitativa metoder kan ge en bra beskrivning av det hydrogeologiska systemet, såsom bergets konduktivitet och sprickighet samt grundvattnets rörelser och nivåer. För att prediktera mängden vatten som kommer att läcka in i tunneln krävs matematiska modeller (Cesano, 1999).

Matematiska modeller försöker beskriva det hydrogeologiska systemet genom att använda matematiska formuleringar och skapa modeller av verkligheten. En modell är en förenklad beskrivning av verkligheten. Överensstämmelsen mellan verkligheten och en modell är till stor del beroende av antalet antaganden och kvalitén på tillgänglig data. Desto färre antaganden och ju fler fakta som används, ju mer tillförlitligt kan resultatet bli (Cesano, 1999).

De matematiska metoderna kan delas upp i analytiska och numeriska. De modeller som kan lösas i en sluten form kallas analytiska. Analytiska metoder baseras på en rad antaganden och antalet parametrar som används är begränsat jämfört med verkligheten. De vanligaste antagandena är att mediet är poröst homogent och isotropt, och de parametrar som används är vanligen baserade på konduktivitet, djup och tunnelstorlek. Numeriska metoder utnyttjar numeriska lösningar och är oftast implementerade i datamodeller. De kan beskriva mera komplexa system och mer exakta värden kan erhållas, men svårigheten i att avspegla verkligheten på ett korrekt sätt kvarstår (Cesano, 1999). Det är ofta mer betydelsefullt att kritiskt granska utvärderade parametrar från de hydrauliska testerna, än att använda komplicerade matematiska modeller för sin prognos (Gustafson och Wallman, 1989).

4.2.1 Beräkning av inläckande grundvatten samt konduktivitet

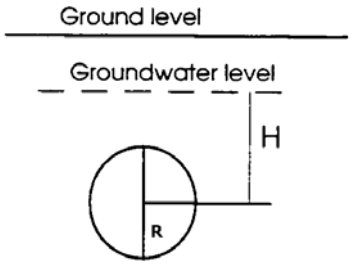
4.2.1.1 Goodmans modell

De första berömda försöken att bestämma inflöde till tunnlar ges av Goodman m fl. (1965). Formlerna är en bra början men bygger på en rad antaganden. Om tunneln antas fungera som en stationär dränering, (ingen nivåsänkning tillåts för grundvattnet) i ett homogent isotropt medium med hydraulisk konduktivitet *K*, så kan grundvatteninflödet bestämmas enligt (Freeze and Cherry, 1979).

$$q = \frac{2\pi KH}{2{,}3\log(2H/R)} \qquad (2)$$

Från ovanstående ekvation kan konduktiviteten bestämmas enligt

$$K = \frac{q \cdot 2{,}3\log\left(\frac{2 \cdot H}{R}\right)}{2 \cdot \pi \cdot H} \qquad (3)$$



Figur 16. Illustration av beteckningar.

där

q = vattenflödet [m^3/s, m]
K = bergmassans hydrauliska konduktivitet [m/s]
H = vattentrycket [m]
R = tunnelradien [m]

(Figur 16) (Freeze and Cherry, 1979).

Tunnelradien brukar anges som radien på den cirkel som har samma area (A) som tunneln. Det vill säga R beräknas genom (Gustafson, 1986):

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \qquad (4)$$

Ovanstående metod för beräkning av grundvatteninflöde kallas också spegling. Metoden bygger på att man genom att införa fiktiva källor och sänkor uppfyller randvillkoren för systemet och sedan enligt superpositionsprincipen adderar verkan av dessa. I fallet med en tunnel på djupet H förutsätts grundvattennivån vara en sådan rand, vilket kan vara rimligt om avsänkningen uppe vid ytan är liten. Randvillkoret uppfylls genom att man för in en fiktiv tunnel på samma nivå ovanför grundvattenytan, där samma mängd vatten förs till magasinet, som tas ur tunneln (Gustafson, 1986).

4.2.1.3 Brantbergers modell

Tunnlar utan injekterad zon

Ytligt förlagda tunnlar
För ytligt förlagda tunnlar kan vatteninflödet till en tunnel beräknas med ekvation 5
Med ytligt förlagda tunnlar menas i detta sammanhang tunnlar där djupet under grundvattenytan är mindre än ca 3-4 gånger tunneldiametern. Ekvation 5 förutsätter också att grundvattenytan ligger ca en tunnelradie eller mer över tunneltaket (Brantberger m fl., 1998).

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot (H - R)}{\ln\left(\frac{2 \cdot H}{R}\right) + \xi} \qquad (5)$$

Från ovanstående ekvation kan konduktiviteten bestämmas enligt

$$K = \frac{q \cdot (\ln\left(\frac{2 \cdot H}{R}\right) + \xi)}{2 \cdot \pi \cdot (H - R)} \qquad (6)$$

där

ξ = skinfaktor [-]

Skinfaktorn beaktar att det sker ett tryckfall vid tunnelperiferin. Denna faktor beror på flera faktorer såsom spänningsomlagringar i, och därmed minskad stabilitet i, närområdet, förekomst av en delvis vattenmättad zon som försvårar vattentillrinning till tunnel genom kapillära krafter och andra fenomen. Värdet på denna faktor har vid undersökningar på Äspö Hard Rock Laboratory bestämts till 3-7. Vid projektförhållanden avvikande från Äspö, skulle även andra värden på skinfaktorn kunna förväntas (Brantberger m fl., 1998). Enligt Håkan Stille (Inst. för Anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan, muntlig kommunikation 2005-01-21) vet man inte så mycket om storleken av denna faktor, och vad den beror på.

Djupt förlagda tunnlar
För djupt förlagda tunnlar, dvs. där djupet under grundvattenytan är större än ca 3-4 gånger tunneldiametern, kan vatteninflödet beräknas enligt ekvation 7 (Brantberger m fl., 1998)

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot H}{\ln\left(\frac{2 \cdot H}{R}\right) + \xi} \qquad (7)$$

Från ovanstående ekvation kan konduktiviteten bestämmas enligt

$$K = \frac{q \cdot (\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \xi)}{2 \cdot \pi \cdot H} \qquad (8)$$

Tunnlar med injekterad zon

Ytligt förlagda tunnlar

Problemet med en injekterad zon finns endast studerat för djupt förlagda tunnlar. Under förutsättning att allt tryckfall sker i den injekterade zonen, vilket kan antas rimligt i tunnlar med en normalt hög konduktivitet i berget, kan vatteninläckaget beräknas enligt ekvation 9. Skinfaktorn antas vara av ungefär samma storleksordning som i det otätade fallet. (Brantberger m fl., 1998, Håkan Stille Inst. för Anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan, muntlig kommunikation)

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K_i \cdot H}{\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \xi} \qquad (9)$$

Från ovanstående ekvation kan konduktiviteten bestämmas enligt

$$K_i = \frac{q \cdot (\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \xi)}{2 \cdot \pi \cdot H} \qquad (10)$$

där

K_i= injekterad zons hydrauliska konduktivitet [m/s]
t = tjocklek injekterad zon [m]

Djupt förlagda tunnlar

Om allt tryckfall kan antas ske i den injekterade zonen och den injekterade zonens konduktivitet kan reduceras till ca tio gånger lägre än bergets kan vatteninläckaget beräknas på samma sätt som vid ytligt förlagda tunnlar med ekvation 9. Om så inte är fallet gäller istället ekvation 11 (Brantberger m fl., 1998).

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K_i \cdot H}{\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \frac{K_i}{K} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot H}{R+t}\right) + \xi} \qquad (11)$$

Från ovanstående ekvation kan konduktiviteten bestämmas enligt

$$K_i = \frac{q(\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \xi)}{2 \cdot \pi \cdot H - \frac{q}{K} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot H}{R+t}\right)} \qquad (12)$$

Notera att ekvationerna för ytligt förlagda tunnlar ej beror av bergmassans konduktivitet, medan ekvationerna för djupt förlagda tunnlar beror av både bergmassans konduktivitet och den injekterade zonens hydrauliska konduktivitet.

4.2.2 Beräkning av täthetskrav

Krav på tätningseffektivitet beräknas enligt ekvation 20.

$$Krav\ på\ tätningseffektivitet\ (\%) = 1 - \frac{Krav\ på\ täthet\ efter\ injektering}{Inläckning\ utan\ injektering} \qquad (13)$$

där kravet på täthet efter injektering anges som maximalt tillåtna inläckage efter injektering (Brantberger m fl., 1998).

5 RESULTAT FRÅN FÖRUNDERSÖKNINGAR

5.1 VARVSBERGET

Utifrån bland annat den information som ges i avsnitt 1.1.1 Varvsberget, har Bergsäker konsult tillsammans med BERGAB – Berggeologiska undersökningar AB på uppdrag av Banverket Norra banregionen utfört förundersökningar på Varvsberget. Syftet har varit att utreda vilken påverkan en järnvägstunnel genom Varvsberget i Örnsköldsvik kan ha på Hörnsjön och befintliga bergrum för lagring av bensin (se avsnitt 1.1.1 Varvsberget) (BOTNIA 2000: JP 41).

I förundersökningen föreslogs tre scenarier

Scenario 1: Bensinlageranläggningens direkta influensområde är litet. Radiellt flöde runt anläggningen dominerar. De låga grundvattennivåerna i berg upp mot Hörnsjön antas bero på topografiska effekter (BOTNIA 2000: JP 41.). Grundvattensänkningen vid bensinlageranläggningen uppskattas till 1-2 m och till 8-9 m vid tunneln.

Scenario 2: ”Linjärt grundvattenflöde” råder mellan Hörnsjön och bensinlageranläggningen. Inläckage av vatten i tunneln påverkar vattenbalansen med följd av att grundvattennivån sjunker i hela området (BOTNIA 2000: JP 41.). Om grundvattennivån är konstant över bensinanläggningen (5 meter över anläggningen) uppskattas grundvattensänkningen vid tunneln vara ca 7 m. Om grundvattennivån vid anläggningen däremot sänks maximalt (1 meter under anläggningen) uppskattas grundvattensänkningen vid tunneln vara ca 13 m.

Scenario 3: Bensinlageranläggningens influensområde når via vattenförande spricka/zon upp mot järnvägslinjen. ”Linjärt grundvattenflöde” dominerar och grundvattennivån sänks i hela området (BOTNIA 2000: JP 41).

Oberoende av scenario antogs ett influensområde som sträcker sig ca 300 meter ut från tunneln.

I förundersökningen gjorde Bergsäker konsult diverse antaganden och de utförde beräkningar för att komma fram till vilka nivåer, influensområden mm som skulle föreslås. I den mån antaganden och beräkningar har varit tillgängliga redovisas de i Bilaga A. I bilaga A redogörs även för kontrollberäkningar tillsammans med resultat från kontrollberäkningarna och förundersökningarna. Kontrollberäkningarna har gjorts för att undersöka de beräkningsmetoder som använts, samt jämföra dem med de matematiska metoder som använts i detta arbete.

5.2 ÅSBERGET

Enligt miljökonsekvensbeskrivningen för Åsbergstunneln angavs att influensområdet under och efter byggandet inte kommer bli större än före byggandet. I Figur 17 visas utbredningen av det uppskattade influensområdet. (Botniabanan Gålnäs – Arnäs, ansökan om tillstånd till vattenverksamhet). Beräkningen av influensområdet är dels baserad på de

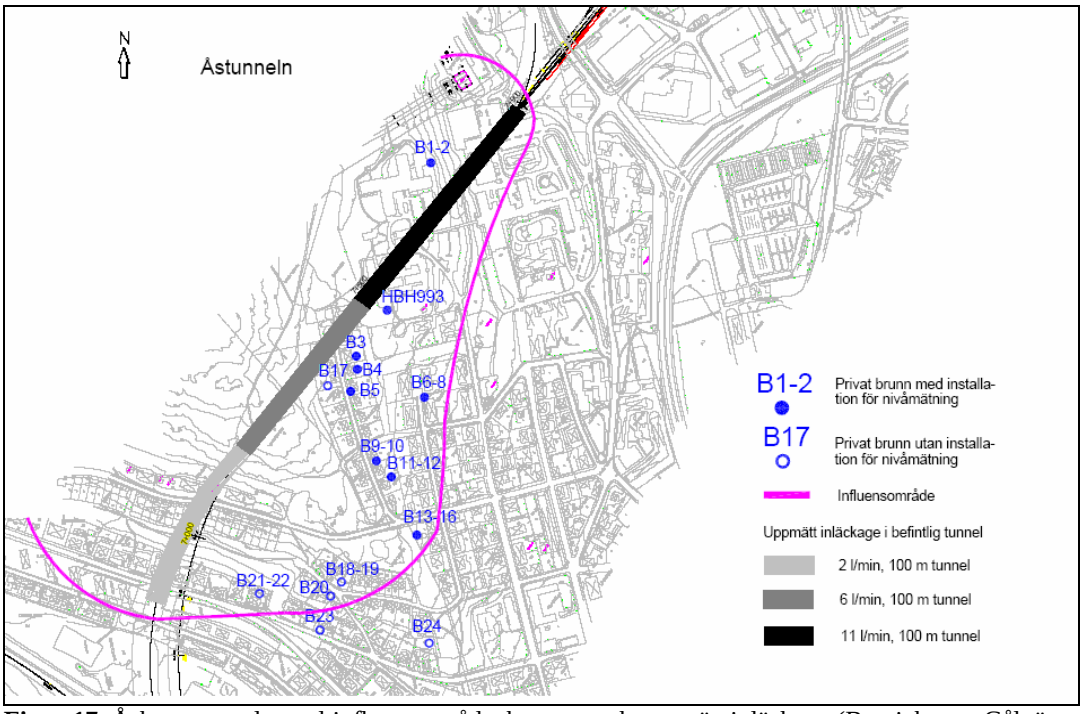
geohydrologiska förutsättningarna, bedömt inläckage till tunnlarna och eventuellt vattenuttag från borrade brunnar och dels erfarenheter från befintlig tunnel.

Mätning av inläckande grundvatten till den ursprungliga tunneln påvisade ett inläckage av i medeltal 6 liter per minut och 100 meter tunnel (Figur 17). (Botniabanan Gålnäs – Arnäs, ansökan om tillstånd till vattenverksamhet).

Liksom för Varvsbergstunneln har det bedömts att inläckaget under driftskedet kommer uppgå till maximalt 5 l/min per 100 meter tunnel. Det kommer därmed inte att läcka in mer vatten i nuvarande tunnel än den tidigare tunneln för godstrafik. Baserat på detta faktum kommer influensområdet att bibehållas (Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002) Tunnel genom Åsberget (MKB)).

Grundvattenflödet sker till största delen i öppna sprickor i bergmassan. De sprickzoner som identifierats i den befintliga tunneln och på markytan kan antas stå för minst 90 % av grundvattenflödet. Spricksystemen kommunicerar sannolikt med varandra i några sektioner, medan de är hydrauliskt avskärmade i andra (Botniabanan Gålnäs – Arnäs, ansökan om tillstånd till vattenverksamhet).

Mätningar av vattennivåer i brunnar visade att inläckaget till den dåvarande tunneln påverkade grundvattensituationen i berget. Trycknivåerna för grundvatten i berg var tydligt avsänkta och låg på några ställen nära tunneltakets nivå. På längre avstånd från tunneln var inte avsänkningen lika tydlig, vilket är naturligt i och med den grundvattenbildning som sker. Relativt kraftigt varierande nivåer har uppmätts i brunnar som ligger förhållandevis nära varandra. Det beror på att brunnarna penetrerar olika sprickor och vissa sprickor har direktkontakt med tunneln, medan andra inte har det (Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002) Tunnel genom Åsberget (MKB)).



Figur 17. Åsbergstunneln med influensområde, brunnar och uppmätt inläckage (Botniabanan Gålnäs – Arnäs, ansökan om tillstånd).

5.3 STRANNEBERGET

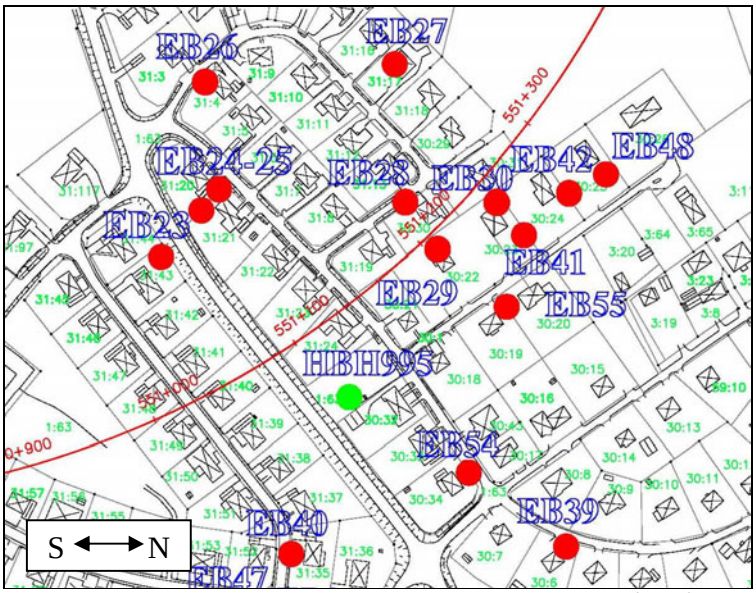
Inga utförliga förundersökningar eller beräkningar har gjorts för att prediktera inläckage eller influensområde till tunneln genom Stranneberget.

6 ANALYS AV GRUNDVATTENNIVÅER

6.1 VARVSBERGET

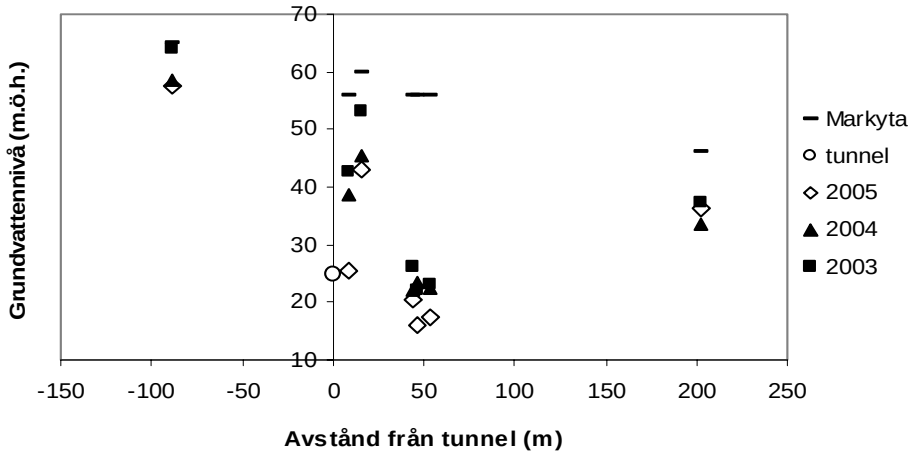
I följande analyser har medelnivåerna på grundvattnet undersökts före, efter och under tunnelbygget. Närmare bestämt har en jämförelse gjorts mellan sommaren 2003, 2004 och 2005. Tunneln genom Varvsberget började byggas hösten 2003, sprängning startade i september 2003 och i februari 2004 hade man kommit igenom servicetunneln och totalt ca 500 meter i spårtunnel och räddningstunnel. I mars 2005 hade genombrott skett åt båda håll.

På ett tunnelavstånd mellan ca km 551+200 m och km 551+300 m (detta område ligger mellan bensinlageranläggningen och Hörnsjön) har medelnivåerna på grundvattnet undersökts på olika avstånd från tunneln. I Figur 18 visas de brunnar som finns kring denna del av tunneln.



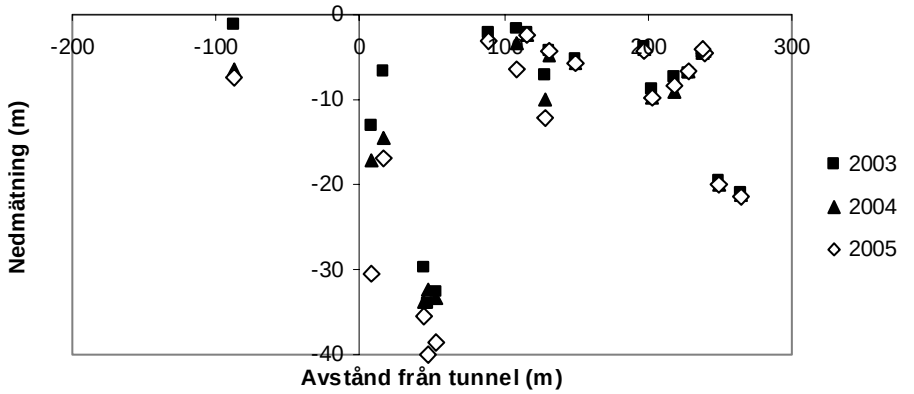
Figur 18. Karta över brunnar för mätning av grundvattennivåer på Varvsberget mellan bensinlageranläggningen och Hörnsjön.

Den östra sidan (mot bensinlageranläggningen) betecknas positiv i figuren nedan och den västra betecknas som negativ. I Figur 19 syns att grundvattennivån i stort följer markytan men att det finns punkter lokalt där grundvattnet står lågt. Tunneltaket ligger på nivån ca 25 meter över havet och därmed står grundvattennivån i vissa brunnar i stort sett i tunnelnivå. Kring avståndet 50 meter från tunneln står grundvattnet i nivå med tunneln vilket är betydligt lägre än i omgivningen, dock var nivån låg redan innan tunneln byggdes. I alla observationspunkter utom den längst bort från tunneln har nivån minskat sedan tunneln byggdes.



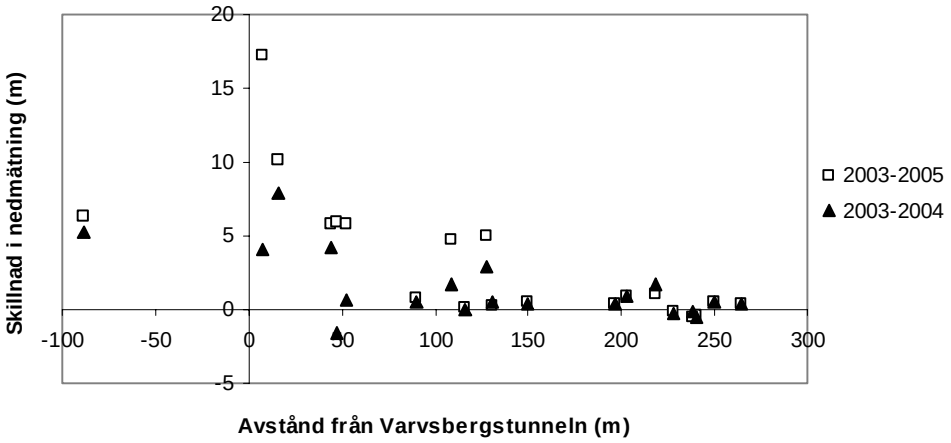
Figur 19. Grundvattennivåer kring Varvsbergstunneln, i området mellan bensinlageranläggningen och Hörnsjön. Medelnivåer somrarna 2003 (före tunnelnbygget), 2004 och 2005.

Då grundvattennivåerna undersökts längs hela Varvsbergstunneln är det inte meningsfullt att jämföra grundvattnets höjd över havet eftersom topografin varierar längs tunneln. Istället analyseras avståndet mellan markytan och grundvattenytan före respektive efter tunnelbygget för alla observationspunkter (Figur 20).



Figur 20. Grundvattnets nivå under markytan. Medelnivåer somrarna 2003, 2004 och 2005 på olika avstånd från Varvsbergstunneln, längs hela tunnelsträckan.

För att bättre kunna urskilja grundvattennivåernas förändring före respektive efter tunnelbygget har differensen mellan nivåerna ritats i Figur 21. Det syns att grundvattenavsänkningen avtar med avståndet från tunneln, samt att avsänkningen ökat med tiden efter att tunneln byggts.



Figur 21. Grundvattennivåernas förändring mellan åren 2003-2005 och 2003-2004, medelvärden, längs hela tunnelsträckan.

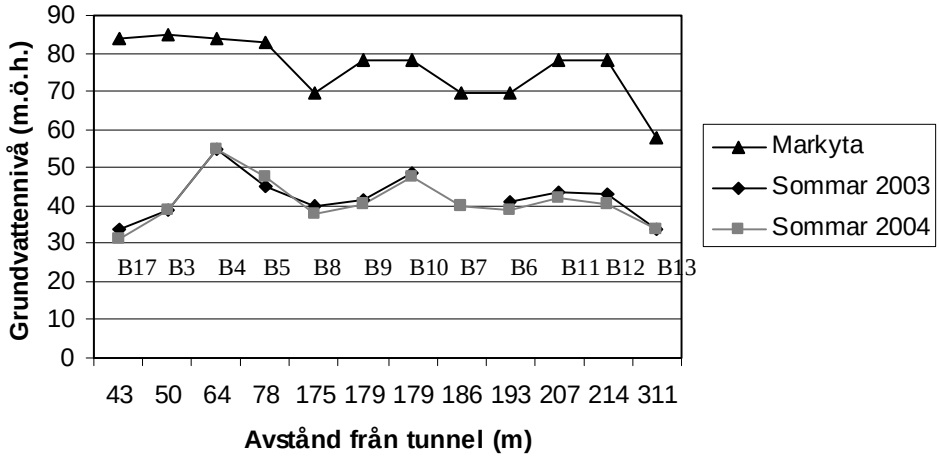
6.2 ÅSBERGET

I följande avsnitt har analyser gjorts av grundvattennivåer kring Åsbergstunneln. Jämförelser har gjorts mellan nivåerna då endast den ”gamla” tunneln fanns på platsen och nivåer efter att tunneln byggts ut och tätats. Sprängningsarbetet pågick feb – okt 2004.

På ett tunnelavstånd mellan ca km 7+260 m och km 7+460 m (se Figur 22) har nivån på grundvattnet uppmätts på olika avstånd från tunneln.

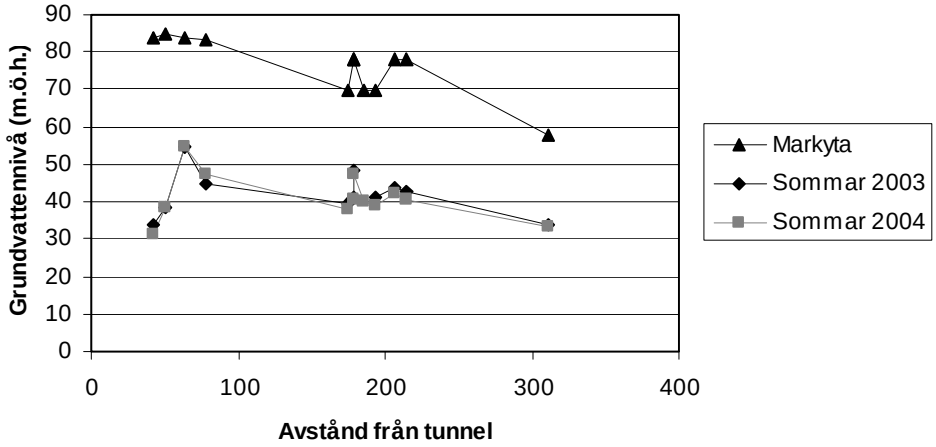
Figur 22. Karta över brunnar för mätning av grundvattennivåer på Åsberget.

Alla observationspunkter är belägna på den östra sidan om tunneln varför alla avstånd till tunneln satts som positiva i nedanstående figurer. Undersökningen visar att det i stort sett inte skett någon förändring i grundvattennivå efter tillbyggnaden av tunneln. Grundvattnet tycks följa marknivån utom vid mätpunkterna närmast tunneln där nivån är lägre. Tunneltaket ligger på nivån ca 35 meter över havet och därmed ligger grundvattennivån i brunnarna närmast tunneln i stort sett i nivå med tunneltaket. Se Figur 23 och Figur 24. Grundvattennivån i brunn B17 ligger ca 10 meter lägre än i brunn B3 trots att skillnaden i avstånd till tunneln endast är 7 meter och markytan ligger på ungefär samma nivå. Mellan brunn B3 och brunn B4 skiljer nivån på grundvattnet ca 15 meter trots att avståndet dem emellan endast är drygt 20 meter och avståndet till tunneln endast skiljer ca 15 meter.



Figur 23. Nivåer på grundvatten och markyta kring en central del av Åsbergstunneln. Observera att ekvidistanser används mellan brunnarna i skalan på x-axeln.

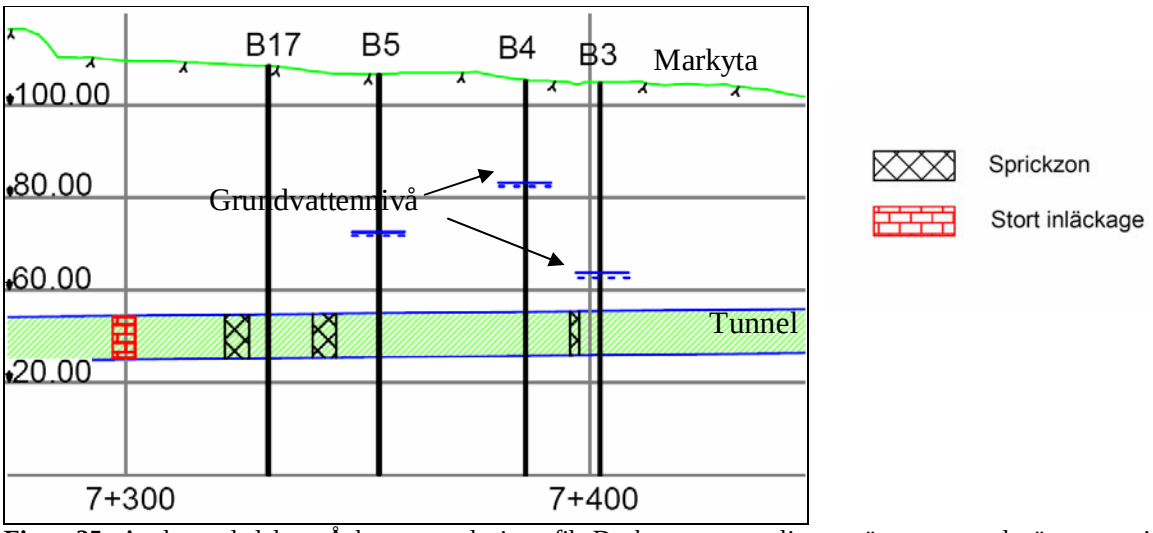
I Figur 23 är det tydligt hur grundvattenytan följer markytan.



Figur 24. Nivåer på grundvatten och markyta kring en central del av Åsbergstunneln. En linjär skala används för att visa avståndet från tunneln på x-axeln.

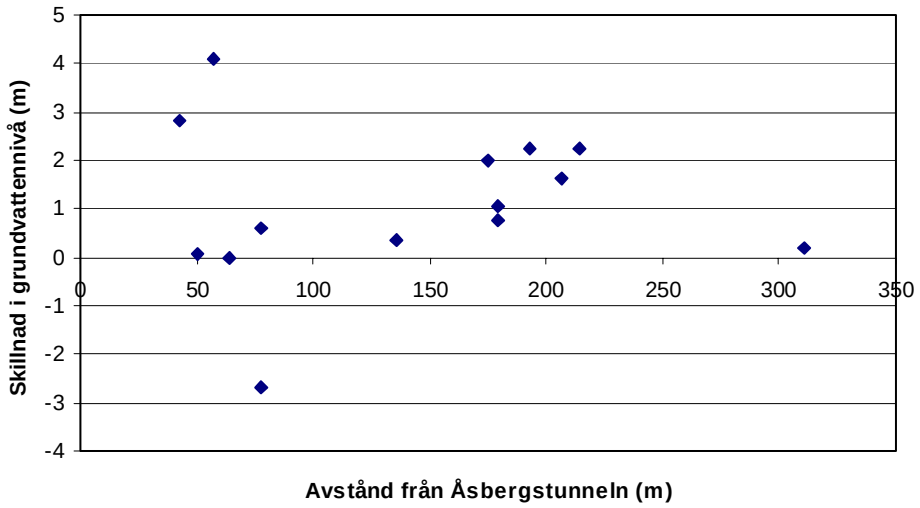
I Figur 25 visas profilen av den del av Åsbergstunneln som analyserats ovan. De fyra brunnarna som ligger närmast tunneln redovisas i figuren och tillsammans med Figur 16

erhålles därmed en bra bild av sprickzonernas lägen i förhållande till brunnarna. För tre av brunnarna (B5, B4 och B3) är grundvattennivån markerad.



Figur 25. Analyserad del av Åsbergstunneln i profil. De brunnar som ligger närmast tunneln är utsatta i figuren.

Skillnaden i grundvattennivå, längs hela tunnelsträckan, mellan sommaren 2003 och 2004 visas i Figur 26. Det kan ses från figuren att skillnaden avtar med avståndet från tunneln.



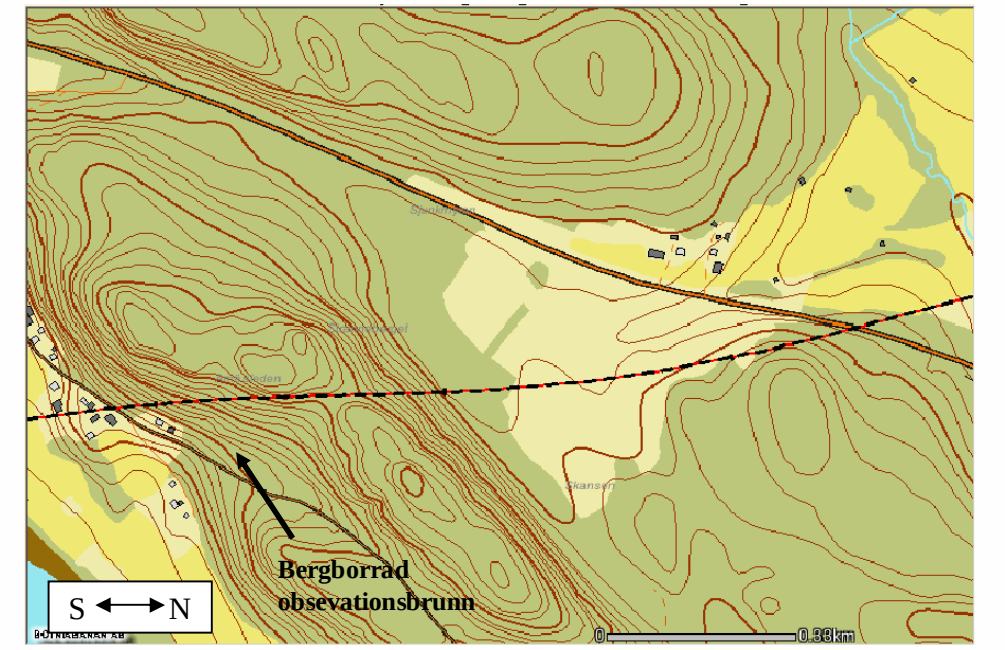
Figur 26. Skillnaden i grundvattennivå före (sommaren 2003) respektive efter (sommaren 2004) tunnelbygge, längs hela tunnelsträckan.

6.3 STRANNEBERGET

Analys av grundvattennivå på Stranneberget har gjorts för en bergborrad brunn i sektion km 13+100. Då borrhålet loggas ser grundvattennivån ut som visas i Figur 27. Under 2002 sker en kraftig grundvattensänkning, varefter grundvattennivån tycks stabilisera sig ca 5 m

under tidigare stabil nivå. Orsaken till detta diskuteras i diskussionen. Lokaliseringen av borrhålet i förhållande till tunneln visas i Figur 28.

Figur 27. Månadsmedelvärden för åren 1998 – 2005.



Figur 28. Lokalisering av bergborrad observationsbrunn på Stranneberget.

7 RESULTAT AV MATEMATISKA METODER

7.1 VARVSBERGSTUNNELN

Den ursprungliga konduktiviteten i det omgivande berget kring tunneln, och inläckaget till tunneln efter tätning är känd. Då kan det inläckage som skulle ha ägt rum om tunneln inte tätats beräknas. Detta kan jämföras med uppmätt inläckage efter tätning för att få en bild av hur mycket inflödet reducerats p g a tätningen. Dessutom kan konduktiviteten i den tätade zonen beräknas. Då fås en bild av hur mycket konduktiviteten har minskat till följd av tätningen.

För att beräkna hur stort inläckaget skulle ha varit till Varvsbergstunneln om den inte tätats har metoderna i avsnitt 4.2.1 används. Resultatet redovisas i Tabell 1.

Tabell 1. Beräknat inläckage (Q) till Varvsbergstunneln, utan injekterad zon

Metod	**Matematisk formel**	**Inläckage (l/min, 100m)** ($K=10^{-8}$ m/s, H=20 m, $\xi=7$)	**Inläckage (l/min, 100m)** ($K=10^{-7}$ m/s, H=30 m, $\xi=3$)
Goodman (1965)	$q = \frac{2\pi KH}{2{,}3\log(2H/R)}$	Q=3,4 l/min, 100m	Q=43,5 l/min, 100m
Tunnlar utan injekterad zon (Brantberger M., et. Al 1998) Ytligt förlagda tunnlar	$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot (H-R)}{\ln\left(\frac{2 \cdot H}{R}\right)+\xi}$	Q=0,64 l/min,100m	Q=17,2 l/min, 100m
Djupt förlagda tunnlar	$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot H}{\ln\left(\frac{2 \cdot H}{R}\right)+\xi}$	Q=0,82 l/min,100m	Q=20,2 l/min, 100m

Varvsbergstunneln är ett gränsfall mellan ytligt och djupt förlagd tunnel, och därför har båda metoderna använts. Det beräknade inläckaget (för tunnel utan injekterad zon) till Varvsbergstunneln varierar mellan ca 0,5 - 45 l/min, 100 m beroende på vilken modell som används, samt vilken konduktivitet, vattentryck och skinfaktor som antagits i ekvationen. Störst variation uppkommer genom att olika inparametrar har använts. Enligt förundersökningarna har konduktiviteten kunnat bestämmas med en noggrannhet som varierar med en tiopotens, och således varierar resultatet med samma storlek. Konduktiviteten i nivå med tunneln har bedömts ligga mellan 10^{-7} och 10^{-8} m/s, avståndet mellan tunnelns centrum och grundvattennivån har uppskattats ligga mellan ca 20-30 m och skinfaktorn har antagits vara 7-3.

Om inläckaget efter tätning antas vara upp till 5 l/min, 100 m kan tätningseffektiviteten (ekvation 13) beräknas till mellan 70-90 % om konduktiviteten i berget uppgår till 10^{-7} m/s, medan tätningseffektiviteten är 0 % om konduktiviteten i berget är så låg som 10^{-8} m/s.

För att beräkna konduktiviteten i den tätade zonen i Varvsbergstunneln har metoderna i avsnitt 4.2.1 används. Resultatet redovisas i Tabell 2.

Tabell 2. Injekterad zons hydrauliska konduktivitet, Varvsberget

Metod	**Matematisk formel**	**Konduktivitet (m/s)** Q=0,1 l/min, 100 m, K=10^{-8} m/s H=20 m, ξ=7)	**Konduktivitet (m/s)** Q=2,4 l/min, 100 m, K=10^{-7} m/s H=30 m, ξ=3)
Tunnlar med injekterad zon (Brantberger M., et. Al 1998) Ytligt förlagda tunnlar	$K_i = \frac{q \cdot (\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \xi)}{2 \cdot \pi \cdot H}$	$K_i = 1{,}0 \cdot 10^{-9}\, m/s$	$K_i = 8 \cdot 10^{-9}\, m/s$
Djupt förlagda tunnlar	$K_i = \frac{q(\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \xi)}{2 \cdot \pi \cdot H - \frac{q}{K} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot H}{R+t}\right)}$	$K_i = 3{,}6 \cdot 10^{-8}\, m/s$	$K_i = 1{,}5 \cdot 10^{-7}\, m/s$

Den beräknade konduktiviteten i den injekterade zonen i Varvsbergstunneln varierar mellan $1{,}5 \cdot 10^{-7}\, m/s$ och $1 \cdot 10^{-9}\, m/s$ beroende på vilken modell och vilka inparametrar som använts. Konduktiviteten i det omgivande berget används i ekvationen för djupt förlagda tunnlar men ej i ekvationen för ytligt förlagda tunnlar. Det gör att skillnaden i resultat blir stor mellan ekvationerna, men den stora osäkerheten i konduktivitet medför också stor variation i resultatet för djupt förlagda tunnlar. Inläckaget efter att tunneln tätats varierade under dec 2005 – jan 2006 mellan ca 0,1-1,0 l/min, 100m och det uppskattas att inläckaget bör kunna öka till ca 2,4 l/min, 100 m under vår och sommar.

7.2 ÅSBERGSTUNNELN

Inläckaget till tunneln är känt både före och efter tätning för olika delar av tunneln, däremot finns inga uppgifter om konduktivitet. Konduktiviteten både före och efter tätning kan beräknas.

För att beräkna konduktiviteten före och efter tätning av Åsbergstunneln har de matematiska metoder som redovisades i avsnitt 4.21. används. I Tabell 3 och Tabell 4 redovisas resultatet av dessa beräkningar.

Tabell 3. Beräknad konduktivitet i Åsberget före injektering.

Metod	**Matematisk formel**	**Konduktivitet (m/s) Del 1** (Q=2 l/min, 100m, H=3,5 m)	**Konduktivitet (m/s) Del 2** (Q=6 l/min, 100m, H=22 m)	**Konduktivitet (m/s) Del 3** (Q=11 l/min, 100 m, H=5 m)
(Goodman 1965)	$K = \frac{q \cdot 2{,}3 \log\left(\frac{2 \cdot H}{R}\right)}{2 \cdot \pi \cdot H}$	K= $9 \cdot 10^{-9}\, m/s$	K= $2 \cdot 10^{-8}\, m/s$	K= $5 \cdot 10^{-8}\, m/s$
Ytligt förlagd tunnel utan injekterad zon. (Brantberger M., et. Al 1998)	$K = \frac{q \cdot (\ln\left(\frac{2 \cdot H}{R}\right) + \xi)}{2 \cdot \pi \cdot (H - R)}$	K= $7 \cdot 10^{-8} m/s$	K= $5 \cdot 10^{-8}\, m/s$	K= $3 \cdot 10^{-7}\, m/s$

Lägst konduktivitet har Del 1 (Figur 17), vilket är rimligt då denna del har det minsta inläckaget. Konduktiviteten ökar sedan norrut mot del 3 som har störst inläckage.

Tabell 4. Injekterad zons hydrauliska konduktivitet, Åsberget

Metod	**Matematisk formel**	**Konduktivitet (m/s) hela tunneln** (Q=2,1 l/min, 100 m, H=3,5 m)
Ytligt förlagd tunnel med injekterad zon (Brantberger M., et. Al 1998)	$K_i = \frac{q \cdot (\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \xi)}{2 \cdot \pi \cdot H}$	K= $8 \cdot 10^{-8}\, m/s$

Det genomsnittliga inläckaget för hela tunneln har uppmätts till 2,1 l/min, 100 m och konduktiviteten i den injekterade zonen beräknas till i genomsnitt $8 \cdot 10^{-8}\, m/s$ över hela tunneln.

7.3 STRANNEBERGSTUNNELN

Inläckaget till tunneln är känt efter att den tätats, men det finns inga uppgifter om konduktivitet. Konduktiviteten i den injekterade zonen kan beräknas.

För att beräkna konduktiviteten i den injekterade zonen i Strannebergstunneln har Brantbergers ekvation för tunnlar med injekterad zon används (4.2.1.3 Brantberger). För Stranneberget kan endast ekvationen för ytligt förlagda tunnlar användas eftersom formeln för djupt förlagda tunnlar kräver att den ursprungliga konduktiviteten i det nedre lagret är känd. Strannebergstunneln ligger på gränsen mellan att vara djupt respektive ytligt förlag tunnel. I Tabell 5 redovisas resultatet av beräkningen.

Tabell 5. Injekterad zons hydrauliska konduktivitet, Stranneberget

Metod	**Matematisk formel**	**Konduktivitet Injekterad zon (m/s)** (Q= 3,9 l/min, 100m, H=27m)
Tunnlar med injekterad zon (Brantberger M., et. Al 1998)		
Ytligt förlagda tunnlar	$K_i = \frac{q \cdot (\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \xi)}{2 \cdot \pi \cdot H}$	K_i=2 *10^{-8} m/s

8 DISKUSSION

8.1 GRUNDVATTENNIVÅER

8.1.1 Varvsbergstunneln

Kring Varvsberget har det funnits en mängd energibrunnar och grundvattenrör där mätningar har utförts kontinuerligt under en lång tid. Därför har förutsättningarna för att analysera variationer i grundvattennivå varit mycket goda. Dock har vissa energibrunnar och grundvattenrör visat sig vara ur funktion under mätningens gång.

Det märks tydligt att berggrunden inte är helt homogen utan att sprickor påverkar kontakten mellan observationspunkterna (energibrunnar och grundvattenrör) och tunneln. Således har grundvattnet i områden som står i kontakt med tunneln påverkats mycket av tunneln medan andra knappt påverkats alls. I det stora hela är det dock tydligt att grundvattennivån påverkats mest nära tunneln. Det syns framförallt i Figur 21 där skillnaderna i grundvattennivå jämförs mellan olika år. Detta visar på en viss homogenitet i berget.

8.1.2 Åsbergstunneln

Observationspunkterna kring Åsbergstunneln är ganska få och uppgifter om grundvattennivåer finns endast från 2003 och 2004. Detta innebär begränsningar i den analys som gjorts. Sprängningsarbetet pågick mellan feb. – okt. 2004 och grundvattennivån i berget skulle alltså kunna förändras ytterliggare till följd av tunneln även efter 2004.

Då grundvattennivåerna analyseras kring Åsbergstunneln syns, som sig bör, en markant skillnad jämfört med Varvsbergstunneln. Detta beror sannolikt på att det hela tiden funnits en tunnel genom Åsberget då nivåmätningarna ägt rum. Antingen den ursprungliga otätade tunneln från 1950-talet eller den nya utökade och tätade tunneln. Kring Åsbergstunneln syns tydliga nivåvariationer kopplade till topografin i området, men skillnaden i grundvattennivå kring ursprunglig tunnel och ny tunnel är liten. I Figur 26 syns dock att skillnaden i grundvattennivå mellan år 2003 och 2004 avtar med avståndet från tunneln. Därmed kan man dra slutsatsen att tunneln påverkat grundvattnet under byggskedet. Då grundvattennivån står i berggrunden tar det vanligtvis lång tid innan den stabiliseras efter en förändring, men eftersom kontakten med tunneln i huvudsak verkar ske genom vattenledande sprickor bör nivån i de flesta observationspunkter stabiliseras efter en kortare tid. Att nivån på grundvattnet inte höjts efter att man tätat tunneln kan tyckas konstigt, men då är det värt att notera att den utökade tunneln är större vad gäller både bredd och höjd, samt att en ytterligare servicetunnel byggts jämte den ordinarie. Dessutom sker ofta ett större inläckage under byggskedet, och grundvattennivån kan alltså komma att stiga efter hand. Tunneltaket ligger på nivån ca 35 meter över havet vilket är ungefär samma nivå som mätts upp i brunnarna närmast tunneln (43 meter från tunneln). Här tycks grundvattennivån vara påverkad av tunneln. Att grundvattennivån ligger på samma låga nivå även drygt 300 meter från tunneln bör inte ha med tunneln att göra utan beror troligen på lågpunkter i topografin.

8.1.3 Strannebergstunneln

Kring Strannebergstunneln har det endast funnits ett fåtal grundvattenrör och de flesta har varit lokaliserade kring det låglänta partiet där markförstärkningsarbeten utförts. En annan svårighet med Strannebergstunneln är den kuperade terrängen och den varierande bergtäckningen. Därför valdes att endast analysera data från en bergborrad brunn belägen på krönet av bergplinten, där grundvattennivåer registrerats kontinuerligt ända sedan 1998.

Grundvattennivån minskade drastiskt under andra halvan av 2002. Det ligger nära till hands att tro att minskningen beror på tunneln eftersom den började byggas i november 2001. Grundvattennivån sjönk dock drastiskt i hela Västernorrland denna sommar och höst beroende på den ringa nederbörden som föll mellan mars 2002 och början av 2003 (muntlig kommunikation med Sven Hammarbäck, Bergab). En viss del av minskningen i grundvattennivå bör därigenom förklaras. Vad som skulle kunna vara en permanent sänkning av grundvattennivå (troligen beroende på tunneln) är den som syns från andra halvan av 2003 och framåt, på ca 5 meter. Loggningen blev manuell i november 2002. Detta bör ej ha påverkat mätresultaten, förutom att färre mätningar utförts.

8.2 MATEMATISKA METODER

Validering av resultat från matematiska metoder för beräkning av inläckage till tunnlar i relation till verkliga inläckage är ett relativt outforskat område. De analytiska modeller som finns är få, och de påminner mycket om varandra. Modellerna förutsätter ett homogent isotropt berg där grundvattenytan ligger på en fördefinierad nivå, och beroende på avståndet mellan grundvattenyta och tunnel görs olika antaganden om tryckfall. Det gick inte att hitta någon ekvation framtagen för beräkning av konduktivitet i det omgivande berget kring en tunnel men det är möjligt att lösa ut konduktiviteten ur Brantbergers model för inläckage, för att beräkna konduktiviteten i den injekterade zonen kring en tunnel.

Det innebär mycket jobb att ta fram alla parametrar som ingår i de matematiska ekvationerna, exempelvis tunneldiameter, vattentryck, konduktivitet, skinfaktor och tjocklek på den injekterade zonen. Allmänt känt är att dessa parametrar är osäkra och svåra att bestämma. Framförallt gäller det konduktiviteten som lätt kan variera med en tiopotens i storleksordning. Detta påverkar resultatet signifikant. Det är också svårt att veta vilken skinfaktor som skall användas och det visade sig att bakgrunden till denna faktor är ett relativt outforskat område. De värden som använts i denna rapport är baserade på undersökningar gjorda på Äspö Hard Rock Laboratory.

8.2.1 Beräkning av inläckage

För att kunna beräkna inläckaget till en tunnel måste konduktiviteten i det omgivande berget vara känd. Därför är det endast Varvsberget som kunnat användas för beräkning av inläckage. Det beräknade inläckage som skulle ha skett till Varvsbergstunneln om tunneln inte tätats varierar mellan ca 0,6 - 44 l/min, 100 m. Det är en stor variation i detta resultat och variationen beror framförallt på att uppgifterna om konduktivitet varit osäkra. Men förutom konduktiviteten beror variationen till viss del också på vilken beräkningsmetod som används.

Det är svårt att uppskatta hur stort inläckaget till Varvsbergstunneln skulle ha varit om tunneln inte tätats. Inläckaget till Åsbergstunneln före tätning uppmättes till ca 2 – 11 l/min, 100m och till ca 2 l/min, 100 m efter tätning. Om det antas att tätningseffektiviteten i Åsberget och Varvsberget är ungefär densamma betyder det att inläckaget till Varvsbergstunneln före tätning också skulle ha legat kring ca 2 – 11 l/min, 100 m vilket, innebär att konduktiviteten i Varvsberget i genomsnitt ligger kring ca 10^{-8} m/s.

8.2.2 Beräkning av konduktivitet

Den injekterade zonens hydrauliska konduktivitet har kunnat beräknas för samtliga tunnlar. Då konduktiviteten beräknas i den tätade zonen i Varvsberget blir variationen ganska stor ($1{,}5 \cdot 10^{-7} - 8{,}0 \cdot 10^{-9}\, m/s$). Det beror dels på vilka inparametrar som antas, men framförallt på om ekvationen för djupt eller ytligt förlagda tunnlar används. Ekvationen för djupt förlagda tunnlar är en funktion av konduktiviteten i det omgivande berget, men i ekvationen för ytligt förlagda tunnlar ingår ej konduktiviteten i det omgivande berget. Den stora osäkerheten i konduktivitet medför stor variation i resultatet för djupt förlagda tunnlar, men också variation i resultatet mellan ekvationerna för ytligt och djupt förlagda tunnlar. Konduktiviteten i Varvsberget (ej injekterad zon) har tidigare antagits till ca 10^{-8} m/s, och konduktiviteten i den injekterade zonen bör ej vara högre än så. Alltså ger metoden för ytligt förlagda tunnlar det mest trovärdiga resultatet i det här fallet. Då konduktiviteten beräknas i den tätade zonen i Åsberget och Stranneberget blir resultatet i storleksordningen 10^{-8} m/s. Vilket skulle kunna vara rimligt, om än kanske något högt.

Konduktivitet i berg före injektering av tunnel har endast kunnat beräknas för Åsberget eftersom formeln kräver uppgift om inläckage för otätad tunnel. Den konduktivitet som beräknas i Åsberget före injektering varierar mellan $2{,}9 \cdot 10^{-7} - 8{,}5 \cdot 10^{-9}\, m/s$. Variationen i resultatet beror på både inparametrar och metod. Den genomsnittliga konduktiviteten i den injekterade zonen i hela Åsbergstunneln beräknas till $7{,}7 \cdot 10^{-8}\, m/s$ med Brantbergers metod för ytligt förlagd tunnel med injekterad zon. För att kunna jämföra konduktiviteten före och efter injektering hade det varit en fördel om inläckaget hade mätts upp separat i vardera delen av tunneln, precis som det gjorts före man byggde om tunneln. Eftersom resultaten dessutom varierar beroende på inparametrar och metod är det svårt att utläsa hur mycket konduktiviteten har förändrats i och med att tunneln tätats.

8.3 JÄMFÖRELSE MED FÖRUNDERSÖKNINGAR

8.3.1 Varvsberget

På Varvsberget har en utförlig förundersökning gjorts. Bland annat har mätningar gjorts på konduktiviteten i berget. Därefter har Bergsäker konsult utfört beräkningar för att prediktera den påverkan en järnvägstunnel genom Varvsberget skulle ha på Hörnsjön och bensinlageranläggningen. Efter en hel del ansträngningar insågs att konsultens beräkningar inte gick att få tag på, så dessa kunde därmed inte undersökas eller valideras. Efter visst samråd med konsulten utfördes istället beräkningarna på egen hand. Samma resultat erhölls genom de egna beräkningarna, men huruvida dessa beräkningar är utförda på samma sätt eller ej går inte att veta. Dock är det resultatet av beräkningarna som är intressant vid jämförelsen med matematiska metoder.

I förundersökningarna uppskattades att influensområdet skulle sträcka sig 300 meter ut från tunneln. I figur 21 visas förändringen av grundvattennivå mellan 2003-2005, och där tycks grundvattennivån vara opåverkad av tunneln efter ca 250 meter. Alltså är uppskattningen i förundersökningen rimlig om än kanske något tilltagen. Eftersom nästan alla observationspunkter är belägna öster om tunneln kan ingen uppskattning göras av influensområdet på den västra sidan.

Efter analysen av grundvattennivåer verkar scenario 2 vara det mest rimliga när det gäller grundvattensänkning. Enligt detta scenario bedöms grundvattensänkningen över tunneln till som mest ca 13 meter, och i Figur 21 har en grundvattensänkning på ca 17 m uppmätts i en av brunnarna över tunneln. Bensinlageranläggningen befinner sig ca 400 meter öster om tunneln och därifrån finns inga grundvattennivåer registrerade, men den avtagande grundvattensänkningen tyder på att grundvattennivåns förändring vid bensinlageranläggningen är obetydlig. Den låga grundvattennivån i brunnen närmast tunneln tyder på att det förekommer sprickbildning eller hydraulisk kontakt mellan brunnen och tunneln. Att det däremot skulle förekomma stora sprickbildningar eller hydraulisk kontakt mellan tunneln och bensinlageranläggningen och/eller Hörnsjön (scenario 3) är inte troligt då grundvattennivåerna trots tunneln är förhållandevis stabila.

8.3.2 Åsberget

Det influensområde som predikterats enligt Figur 17 kan vara rimligt, men det är svårt att bedöma från de grundvattennivåer som uppmätts eftersom endast en mätpunkt befinner sig på ett till synes opåverkat avstånd från tunneln (Figur 26).

Vid en jämförelse mellan Figur 23 och Figur 25 förstår man att brunn B17 och brunn B3 är påverkade av de närliggande sprickzonerna medan brunn B4 och B5 inte tycks stå i kontakt med sprickorna som visas i Figur 25. Dock befinner sig brunn B4 och B5 längre ifrån tunneln (se Figur 22) vilket gör att sannolikheten att sprickan står i kontakt med brunnarna blir lägre. Detta tyder på att spricksystemen kommunicerar med varandra i några sektioner, medan de är hydrauliskt avskärmade i andra. Detta beskrivs också i förundersökningarna.

8.3.3 Stranneberget

Endast översiktliga förundersökningar har gjorts vad gäller influensområde och avsänkning kring bergtunneln. Inga predikterade värden finns att jämföra med.

8.3.3 Generell jämförelse

Generellt ger förundersökningarna en bra bild av hur grundvattnet påverkas av tunnelbygget. Dock bör noteras att dessa undersökningar gett utrymme för ganska stora variationer i resultatet. Exempelvis har tre olika scenarier föreslagits för Varvsbergstunneln, mellan vilka grundvattenpåverkan varierar kraftigt. Enligt kontrollberäkningarna i Bilaga A kan man utläsa att en hel del grova antaganden har gjorts. Exempelvis antas att grundvattenflödet är horisontellt och magasinet antas vara homogent och slutet. Dessutom görs grova bedömningar av hur stor grundvattenbildningen är i olika delar av berget. Syftet med förundersökningarna är dock inte att ge en exakt bild av hur grundvattnet kommer påverkas utan snarare att bedöma verkan av möjliga utfall.

I förundersökningarna utgår alla beräkningar från Darcys lag (se Bilaga A, tabell 6), och de är betydligt mer förenklade än de matematiska metoder som undersöks i detta arbete. I förundersökningarna antas genomgående att inläckaget är känt och syftet med beräkningarna är att bestämma nivåförändringar och influensområden. I de matematiska metoder som undersöks i denna rapport är inläckaget istället en av de parametrar som ska bestämmas. Således har de olika beräkningsmetoderna olika förutsättningar och olika syften. För att få en samlad bedömning av grundvattnets påverkan kring en tunnel bör därför kombinationen av de olika beräkningsmetoderna vara det bästa

9 SLUTSATSER

Användning av matematiska metoder för prediktering av inläckage till bergtunnlar bör ske med försiktighet, eftersom metoderna aldrig kan avspegla verkligheten exakt. Dessutom är ofta osäkerheterna i indata för stora. Man bör ta i beaktande att så länge osäkerheten i indata är hög och spänner över stora intervall kommer också utdata att vara mycket osäkra. De matematiska metoderna är dock bra hjälpmedel för att få en uppfattning om vilken storleksordning som kan antas i inläckage eller konduktivitet.

Utifrån beräkningarna i detta arbete dras slutsatsen att konduktiviteten är den parameter som är svårast att bestämma med hög noggrannhet. Konduktiviteten kan ofta ha en osäkerhet på någon tiopotens, vilket medför att beräkningarna får ett resultat som har samma osäkerhet. Den stora osäkerheten i indata gör att valet av matematisk metod spelar mindre roll.

Vid beräkning av konduktivitet i den injekterade zonen är det dock oftast valet av matematisk metod som har störst inverkan på resultatet. Det beror på att inläckaget och de övriga parametrarna för indata ofta är kända eller kan mätas med förhållandevis stor noggrannhet.

Utifrån analysen av grundvattennivåer dras slutsatsen att det är sprickbildning i berg som påverkar konduktivitet och inläckage av grundvatten allra mest.

De överslagsberäkningar som gjorts i förundersökningarna till Varvsbergstunneln tycks vara tillräckliga för att få en bild av hur grundvattennivån kommer att påverkas av tunnelbygget. För att få en än mer utförlig bedömning av grundvattnets påverkan vid tunnelbyggen bör dock överslagsberäkningarna kombineras med andra matematiska metoder

REFERENSER

Publicerade källor

Alberts C., Gustafson G. (1983). *Undermarksbyggande i svagt berg: 4 Vattenproblem och tätningsåtgärder*, Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo 106. Stockholm 1983.

Andersson A-C., Andersson O., Gustavsson G. (1984). *Brunnar, Undersökning – Dimensionering – Borrning – Drift*. Chalmers tekniska högskola, VA-Teknik, Statens byggforskningsråd. Rapport R42:1984.

Brantberger M., Dalmalm T., Eriksson M., och Stille H. (1998). *Styrande faktorer för tätheten kring en förinjekterad tunnel*. Avd. för Jord- och bergmekanik, Inst. för Anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan. Rapport 3049.

Carlsson L., Gustafson G. (1991). *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik*. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm *R66:1991*.

Cesano D. (1999). *Methods for prediction of groundwater flows into underground constructions in hard rocks – A state of the art report.* Division of land and Water Resources, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of technology, S-100 44 Stockholm, Trita-Ami Report 3050.

Committee on Fracture Characterization and Fluid flow, National research council (1996). *Rock fractures and fluid flow, Contemporary Understanding and Applications*. National Academy press, Washington D.C.

Freeze A. R., Cherry J. A. (1997). *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, Upper Saddle River, NJ07458.

Goodman R.E., Moye D., Schalkwyk A. and Javandel I. (1965). *Groundwater inflows during tunnel driving*. Geol. Soc. America Publication – Engineering Geology, Vol. 2, pp. 39-56.

Grip H., Rodhe A. (2000). *Vattnets väg från regn till bäck*, Hallgren & Fallgren studieförlag, Uppsala.

Gustafson G., Wallman S. (1995). *Geohydrologisk undersökningsmetodik vid bergbyggnade: Erfarenheter från tre fallstudier*. SveBeFo rapport, 1104-1773; 16 Stockholm.

Gustafson G. (1986). *Geohydrologiska förundersökningar i berg. Bakgrund – metodik – användning*. Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo 84:1/86. Stockholm 1986.

Gustafson G., Wallman S. (1989). *Bolmenprojektet: Bergmassans hydrauliska egenskaper* Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo 160:3/89. Stockholm 1989.

McWhorter D., Sunada D.K. (1977). *Ground water hydrology and hydraulics*. Water Resources Publications.

Nord G., Stille H. (1990a). *Bergmekanik Del 1*. Inst. För jord- och bergmekanik, Kungliga tekniska högskolan. Stockholm.

Nord G., Stille H. (1990b). *Bergmekanik Del 2*. Inst. För jord- och bergmekanik, Kungliga tekniska högskolan. Stockholm.

Svenska Geotekniska Föreningen (2004). *Fälthandbok Miljötekniska markundersökningar*, SGF rapport 1:2004, Statens geotekniska institut, Lidköping.

Övriga källor

BERGAB – Berggeologiska Undersökningar AB (2002-11-15) Entreprenad nr: E 454. Bygghandling, Bergteknisk prognos Handling 13.2, Tunnel- och terrasseringsarbeten, Tunnel Varvsberget.

BOTNIA 2000: JP 41. Gålnäs – Arnäs via centrala Örnsköldsvik, Fördjupad undersökning av tunnel genom Varvsberget, Passage av Hörnsjön och bensinlager, Underlagsmaterial.

Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002). Ansökan om tillstånd enligt miljöbalken för vattenverksamhet vid Åsberget. Km 6+850 – 8+000. Ansökningshandling.

Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002). Tunnel genom Åsberget – bortledande av grundvatten mm km 6+850 – 8 000. Teknisk beskrivning (TB). Ansökningshandling.

Botniabanan Gålnäs – Arnäs (2002). Tunnel genom Åsberget – bortledande av grundvatten mm. Miljökonsekvensbeskrivning (MKB). Ansökningshandling.

Botniabanan Örnsköldsvik – Husum, Del 2 (2001-01-15). Tunnel- och terrasseringsarbeten Km 12+780 – 14+360, Entreprenad 5415. Förfrågningsunderlag. Bergteknisk prognos, Handling 13.2.

Botniabanan JP 41 Gålnäs – Arnäs, utställelsehandling 2(6) flik 11, 2

Edblom Eva (2002). *Tunnel genom berg, jord och vatten*. Broschyr, Botniabanan AB Örnsköldsvik

Edblom Eva (2005). *Varvsbergstunneln i Örnsköldsvik – Visning för allmänheten den 10 september 2005*. Broschyr, Botniabanan AB Örnsköldsvik

Naturvårdsverket (2003). Handbok 2003:6 med allmänna råd – Vattenskyddsområde

Vägverket Region Stockholm (2006), http://www.sodralanken.nu/miljoteknik_berg.shtml (2006-03-27)

Veidekke Stockholm AB 2004. Arbetshandling Hällbergstunneln södra påslaget. Nyland-Örnsköldsvik. Måttritning 1. Fastställd av Banverkets skrivelse 2004-06-11.

Muntliga källor

Håkan Stille, Avd. för Jord- och bergmekanik, Inst. för Anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan, 2005-01-21

Sven Hammarbäck, anställd på Bergab och bergkontrollant för Botniabanan AB, kontinuerlig kommunikation under examensarbetets gång.

Karl Persson, Bergab, 2005-05-03

Ulf Sundqvist, Aqualog, 2005-05-03

BILAGA

Kontrollberäkningar från förundersökningar - Varvsberget

Som nämndes i avsnitt 5 var det inte möjligt att få tillgång till de beräkningar som utfördes i förundersökningarna till Varvsbergstunneln. Dock var det känt att beräkningarna utgått från enkla matematiska samband genom Darcys lag och således hade inga av de matematiska metoder som undersökts i denna rapport används.

Genom att ta reda på vilka antaganden som konsulten gjort i förundersökningarna har ett försök gjorts att efterlikna dess beräkningar. I följande text är alla antaganden tagna från förundersökningarna medan beräkningarna är gjorda på egen hand i ett försök att efterlikna de beräkningar som gjordes i förundersökningen.

Antagande

Vid beräkning av tunnelns påverkan på grundvattennivån är storleken av rådande grundvattenflöde och därmed grundvattenbildningen av avgörande betydelse. Inläckaget till tunneln antas uppgå till 5 l/min per 100 meter tunnel (detta är det maximala inläckaget som tillåts i vattendomen). Grundvattenflödet antas vara horisontellt och magasinet antas vara homogent och slutet. Grundvattenflödet kring bensinlageranläggningen antas vara styrt av en konstant trycknivå i öster (Örnsköldsviksfjärden med nivån 0). Det antas att det huvudsakliga flödet sker i bergets övre del (mäktigheten antas vara 20 meter) med antagen konduktivitet på ca $5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Mängden grundvatten som strömmar från den övre till den undre mindre konduktiva berggrunden bedöms till 50 mm/år. Det medför ett influensområde som sträcker sig ca 300 meter ut från tunneln (BOTNIA 2000: JP 41.).

Beräkning

Om inläckaget antas vara 5 l/min per 100 meter kan influensområdet beräknas enligt:

$$I = \frac{Q}{2 \cdot l \cdot v}$$

Där flödet *Q=5 l/min=2628 m^3/år,* längden *l=100m* och hastigheten på grundvattnet $v = 50 \cdot 10^{-3}$ *m/år* ger influensområdet *I*=263 m $\approx$ 300m.

Detta är enligt Carl Persson på Bergab ett slags yttre område inom vilket grundvattensänkning kan förekomma.

Grundvattenflödet i det övre bergavsnittet vid tunnelläget beräknas med Darcys ekvation till ca 30 l/min (BOTNIA 2000: JP 41.).

Darcy: $v = K \cdot \frac{dh}{dx}$, $v = \frac{Q}{A} \rightarrow Q = K \cdot A \frac{dh}{dx}$

Där konduktiviteten $K = 5 \cdot 10^{-6}$ m/s, arean A=2000 m^2 (mäktighet 20 m räknat över 100 m tunnel), lutningen $\frac{dh}{dx} = \frac{(81-53)}{550}$ =0,05 där dx är avståndet mellan tunneln och Hörnsjön och dh är skillnaden i grundvattennivå däremellan. Detta ger *Q*=30 l/min.

Antagande
Grundvattenbildningen svarar för drygt 10 l/min och från angränsande höjdområden antas inströmning av ca 5 l/min. Resterande 15 l/min antas strömma från Hörnsjön. Grundvattenflödet i det övre bergavsnittet i anslutning till bensinlageranläggningen beräknas till ca 36 l/min, varav ca 1 l/min antas dräneras via jordlager i sänkan sydost om anläggningen (BOTNIA 2000: JP 41.).

Scenario 1:
Bensinlageranläggningens direkta influensområde är litet. Radiellt flöde runt anläggningen dominerar. De låga grundvattennivåerna i berg upp mot Hörnsjön antas bero på topografiska effekter (BOTNIA 2000: JP 41.).

Baserat på nettoutpumpning från anläggningen, 120 m^3/år beräknas med angiven grundvattenbildning ett influensområde på ca 35x35 meter (BOTNIA 2000: JP 41.). Grundvattenbildning kring anläggningen har antagits samma som över tunneln, dvs. 110 mm/år.

Beräkning
Influensområdet kan beräknas enligt:

$$A = \frac{Q}{v}$$

Där *Q*=120 m^3/år och *v*=110 mm/år. Detta ger arean A=1090m^2 vilket motsvarar $33 \cdot 33$ m $\approx 35 \cdot 35$ m

Antagande
Den begränsade inläckningen tyder även på att inströmningen av grundvatten från områden utanför berganläggningen är liten, sannolikt beroende på att berget har låg hydraulisk konduktivitet (BOTNIA 2000: JP 41.).

En bortledning av vatten och resulterande grundvattensänkning vid tunneln medför att tillströmningen av vatten mot området vid bensinlageranläggningen reduceras. Därmed kommer även grundvattennivån vid anläggningen sjunka något. Hur stor avsänkningen blir beror bl.a. på resulterande grundvattenbildning och flödesmönster, vilket ej går att beräkna med enklare analytiska modeller. En rimlig bedömning är att nivån vid lagret kommer att sjunka med 1-2 meter Denna begränsade avsänkning kommer inte att påverka lagrets grundvattenskydd på ett negativt sätt (BOTNIA 2000: JP 41.).

Det minskade grundvattenflödet mellan tunneln och bensinlageranläggningen medför en minskad gradient förutsatt stationära förhållanden, oförändrad grundvattenbildning och ej

ändrad hydraulisk konduktivitet. Utförda beräkningar visar på en resulterande grundvattensänkning vid tunneln på maximalt 8-9 meter. Sannolikt kommer avsänkningen att bli betydligt mindre (BOTNIA 2000: JP 41.).

Scenario 2:
Linjärt grundvattenflöde råder mellan Hörnsjön och bensinlageranläggningen. Inläckage av vatten i tunneln påverkar vattenbalansen med följd av att grundvattennivån sjunker i hela området (BOTNIA 2000: JP 41.).

Scenario 3:
Bensinlageranläggningens influensområde når via vattenförande spricka/zon upp mot järnvägslinjen. Linjärt grundvattenflöde dominerar och grundvattennivån sänks i hela området (BOTNIA 2000: JP 41.).

Sammanställning
I Tabell 6 visas en sammanställning av resultaten från de tre scenarierna gällande grundvattenpåverkan kring Varvsberget. Tabellen läses som ett Excelark där raderna och kolumnerna är numrerade. Fälten med vit bakgrund innehåller parametrar som är nödvändiga för beräkningarna och de grå rutorna är resultat. Mörkgrå fält (kolumn C) är resultat från förundersökningarna. Ljusgrå fält i kolumn B är resultaten från egna beräkningar för att efterlikna resultaten från förundersökningarna. Ljusgrå fält i kolumn D visar hur beräkningarna har utförts samt vilka parametrar som ingått i ekvationerna.

Tabell 6. Sammanfattning av resultaten från de tre scenarierna gällande grundvattenpåverkan kring Varvsberget. Mörkgrå fält – resultat från förundersökning, ljusgrå fält – resultat av kontrollberäkning

		Grv-nivå före tunnel (m.ö.h.)	**Nivå (m.ö.h).**	**Avstånd till tunneln (m)**
Rader/ kolumner	A	B	C	D
4	Hörnsjön:	81	81	550
5	Tunnelläget: (taket)	53	25	0
6	Bensinlager:	5		340
7	Örnsköldsviksfjärden:	0	0	423
8				
9	Huvudsakligt grv-flöde sker i bergets övre del.			
10		Mäktighet: (m)	20	
		konduktivitet: (m/s)	0.000005	
		Egna beräknade värden	Resultat från förstudie	Matematisk formel
11	$Q_{in,tunnel}$ (l/m, 100 m)	5		Antaget värde
12	$Q_{in,tunnel}$ (m3/s)	8.33333E-05		B11/60000
13	**Före tunnelbygget**			
14	Grv-flöde i övre bergavsnittet över tunneln			
15	Q över tunnel: (m3/s)	0.000509091		(D10*100*D9*(B4-B5)/D4)
16	Q över tunnel: (l/min, 100m)	30.54545455	(30 l/min,100m)	(B15*60000)
	Grv-flöde i övre bergavsnittet över bensinlageranläggningen. (antas styrt av konstant trycknivå i öster (Örnsköldsviksfjärden))			
19	Q över anläggning: (m3/s)	0.00060241		(D10*100*D9*(B6-B7)/(D7-D6))
20	Q över anläggning: (l/min, 100m)	36.14457831	(36 l/min,100m)	(B19*60000)
21				
22	**Efter tunnelbygget**			
23	***Scenario 1:***	Förändring av grv-gradient mellan lagret och öviksfjärden förutsatt grv-flöde på 25 l/min. antas styrt av konstant trycknivå i öster (Örnsköldsviksfjärden)		
24	dh	3.32		0.0004*(D7-D6)/(D10*100*D9)
25	ursprunglig dh	4.98		0.0006*(D7-D6)/(D10*100*D9)
26	gradientförändring m/m	0.02075		(B25-B24)/80
27	grv-sänkning vid anläggningen	1.66	(1-2m)	(80*B26)
28	grv-sänkning vid tunneln	8.77725	(8-9m)	(B26*D7)
29				
30	***Scenario 2:***	(förändring av grv-gradient mellan lagret och tunneln förutsatt grv-flöde på 25 l/min. Ska det vara 30l/min fast över anläggningen?)		
31	dh	13.6		0.0004*D6/(D10*100*D9)
32	ursprunglig dh	20.4		0.0006*D6/(D10*100*D9)
33	gradientförändring m/100m	2.266666667	(ca 2.3 m/100m)	((B32-B31)*100/300)
34	*konst grv-nivå över anläggn. Dvs+5m*			
35	grv-avsänkning vid tunnel	7.706666667	(ca 7m)	(B33*D6/100)
36	*max grv-sänkning över anläggn. Dvs -1m*			
37	grv-avsänkning vid tunnel	13.70666667	(ca 13 m)	(B35+6)

	Scenario 3:	Det förutsätts att det finns en vattenförande zon som sträcker sig från bensinlageranläggningen upp mot tunneln (står i kontakt med tunneln) utgående från tolkad grv-nivå och bedömd grv-bildning, beräknas flödet i zonens sydöstra del till maximalt 20 l/min (och 100m). Om trycknivån i zonen vid tunneln antas till ca +38 beräknas transmissiviteten i zonen till ca 5*10^-5 m2/s.