



NYTTAN AV VATTENFÖRLUSTMÄTNINGAR VID TÄTNING AV TUNNLAR

Anna Engström

Karl Persson

Gunnar Gustafsson

NYTTAN AV VATTENFÖRLUSTMÄTNINGAR VID TÄTNING AV TUNNLAR

THE USE OF WATER PRESSURE TESTS (WPT) IN SEALING OF TUNNELS

Anna Engström och Karl Persson

Bergab Berggeologiska Undersökningar AB

Gunnar Gustafsson

Chalmers Tekniska Högskola

BeFo Rapport 91

Stockholm 2009

ISSN 1104 – 1773

ISRN SVEBEFO-R—91—SE

FÖRORD

Vattenproblem och tätningsåtgärder har varit ett tema inom bergtekniken sedan BeFo bildades. Tättningen utförs av två huvudsakliga syften; för att i möjligaste mån undvika negativ miljö- och omgivningspåverkan, samt att uppfylla de funktionskrav som ställts på anläggningen under driftskedet. Täthetskraven med avseende på både miljö och funktion har tenderat att öka under de senaste åren.

Bortledning av grundvatten är en tillståndspliktig verksamhet som prövas av miljödomstolen. Det är vanligt att leda bort viss mängd vatten och täta anläggningarna så att inläckaget inte överskrider föreslaget riktvärde.

En vanlig orsak till att bergarbeten försenas och fördyras är problem med vatten. Inläckaget till en tunnel kan innan påbörjat bygge uppskattas med beräkningar. Under byggandet mäts vanligen inläckaget i mätvallar utplacerade på strategiska platser, för att kunna övervaka att inläckagekravet ej överskrids.

Vattenförlustmätningar i sonderingshål vid stufv ger information om hur tätt berget kan förväntas vara innan tätning, samt optimalt, kan användas till att styra injekteringsarbetet.

Att utnyttja data från vattenförlustmätningarna kan vara lättare sagt än gjort. Föreliggande rapport utvärderar hur vattenförlustmätningar använts vid tre svenska tunnelbyggen och hur informationen från sådana mätningar kan användas på ett systematiskt sätt.

Studien bekräftar tidigare forskning som visat på betydelsen av att känna till vattenproblematiken för att minska tidsspillan och kostnader vid undermarksbyggen. Injekteringsdesignen måste också anpassas för olika bergförhållanden. Ett rimligt antal vattenförlustmätningar kan användas för att välja lämplig design. Studien visar också att teknik och utrustning för vattenförlustmätningar kan förbättras så att uppställda krav bättre kan följas. Behovet av utbildning och erfarenhetsåterföring är som i alla andra bergtekniska områden avgörande för framgångspotentialen.

Stockholm i juni 2009

Mikael Hellsten

SAMMANFATTNING

Nyttan av vattenförlustmätningar vid tätning av tunnlar studerades genom att i efterhand utvärdera injekteringsprotokoll från tre järnvägstunnlar på Botniabanan; Varvsberget, Kalldal och Strannebergstunneln. Vi har testat om resultatet av vattenförlustmätningarna hade kunnat användas för att förutspå om skärmen överhuvudtaget hade behövt tätas. Vidare testas om man genom att använda data systematiskt kan erhålla ett "kvitto" på om tätningen lyckades. Vi använder en utvärderingsmodell som behandlar skärmen som en helhet och som baseras på konfidenssannolikheter.

Studien visar att vattenförlustmätningar kan förutspå att injektering ej hade behövts i Varvsberget för att uppfylla Miljödomens täthetskrav. I Kalldal där berget var betydligt mer vattenförande visade vattenförlustmätningarna att tätning var nödvändigt. Utvärderingsmetoden visade dessutom att många av skärmarna ej var tillräckligt tätade. Dock var det ej möjligt att utvärdera vilka skärmar som var tillräckligt tätade på grund av att mätnoggrannheten var för låg i förhållande till det angivna täthetskravet. Mätmetoden kan dock utvecklas med enkla medel för att kunna verifiera om skärmen är tillräckligt tät även vid högt ställda krav.

SUMMARY

The use of water pressure tests (WPT) as a tool to evaluate the tightening of tunnels by grouting was evaluated by an analysis of data from three railway tunnels along the new Botnia line: The Varvsberget, Kalldal and Stranneberg tunnels. We tested if the WPTs could be used to predict if grouting of a fan should be made or not. Further it was evaluated if the success of a grouting fan could be assessed by a systematic use of WPT data. We use an assessment model based on confidence probabilities.

The paper shows that WPTs predict that grouting would not have been necessary in the Varvsberget tunnel to fulfil the requirement postulated by the environmental court. For the Kalldal tunnel, where the rock was more pervious, WPTs showed that sealing of the tunnel was necessary. The assessment method showed also that many of the fans were unsatisfactory. It was, however, not possible to evaluate which fans were satisfactory because of poor measurement accuracy in relation to the tightness requirement. The measurement accuracy should be possible to improve with rather simple means in order to verify that a fan is sufficiently tight also for high tightness demands.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING OCH SYFTE	1
2	BAKGRUND OCH TEORI	3
2.1	BERÄKNING AV INLÄCKAGE TILL BERGTUNNLAR	3
2.1.1	<i>Grundvattennivå i berg</i>	4
2.1.2	<i>Grundvattentillgång</i>	5
2.1.3	<i>Bergets vattenförande förmåga</i>	5
2.2	VATTENFÖRLUSTMÄTNINGAR VID TUNNELFRONTEN	6
2.3	UTVÄRDERING AV VATTENFÖRLUSTMÄTNINGAR SOM BESLUTSUNDERLAG FÖR INJEKTERING.....	7
2.3.1	<i>Transmissivitet för sonderingshål</i>	8
2.3.2	<i>Konfidensintervall för mediantransmissiviteten</i>	8
2.3.3	<i>Värdering av inflöden till en injekterad tunnel</i>	11
3	STUDERADE TUNNELPROJEKT	13
3.1	VARVSBERGET	13
3.2	KALLDALEN.....	15
3.3	STRANNEBERGET	16
4	DEL A – BERÄKNING AV INLÄCKAGE MED UNDERLAG FRÅN FÖRUNDERSÖKNINGAR (VARVSBERGET)	19
4.1	METOD	19
4.2	BERÄKNINGSEXEMPEL VARVSBERGET	19
4.2.1	<i>Geologiska förhållanden</i>	19
4.2.2	<i>Hydrogeologiska förhållanden i berget</i>	19
4.2.3	<i>Miljödom</i>	23
4.2.4	<i>Utförda beräkningar</i>	23
4.2.5	<i>Resultat</i>	25
4.3	DISKUSSION	26
5	DEL B – HUR HAR VATTENFÖRLUSTMÄTNINGAR ANVÄNTS VID DRIVNING AV VARVSBERGSTUNNELN	27
5.1	SYFTE	27
5.2	BAKGRUND.....	27
5.3	STATISTIK KRING VATTENFÖRLUSTMÄTNINGAR	28
5.4	JÄMFÖRELSE MELLAN BYGGHANDLINGAR OCH UTFÖRANDE	29
5.5	DISKUSSION	31
6	DEL C – ANVÄNDANDE AV VATTENFÖRLUSTMÄTNINGAR VID STUFF FÖR ATT FASTSTÄLLA OM TÄTNING ERFORDRAS (VARVSBERGET)	33
6.1	BERÄKNINGSEXEMPEL VARVSBERGET	33
6.1.1	<i>Utförda statistiska analyser och beräkningar</i>	33
6.1.2	<i>Indata till beräkningarna</i>	34
6.1.3	<i>Resultat</i>	34
6.2	DISKUSSION	36
7	DEL D – VATTENFÖRLUSTMÄTNINGARNAS ANVÄNDNING VID PASSAGE AV DEFORMATIONSSTRUKTURER	39
7.1	METOD	39
7.2	KALLDALSBERGET.....	39
7.2.1	<i>Sammanfattning av geologi, injektering och vattenförlust</i>	39
7.2.2	<i>Beräkningsexempel Kalldalsberget</i>	41
7.2.3	<i>Resultat</i>	42
7.2.4	<i>Hur blev resultatet?</i>	46
7.3	STRANNEBERGET	46

7.3.1	<i>Indata till beräkningar</i>	47
7.3.2	<i>Resultat</i>	47
7.3.3	<i>Hur blev resultatet?</i>	53
7.3.4	<i>Diskussion</i>	53
8	SUMMERING AV DELSTUDIERNA	55
8.1	ANALYS AV VATTENFÖRLUSTMÄTNINGARNAS MÄTINTERVALL	55
9	IMPLEMENTERING	57
10	SLUTSATSER	59
11	REFERENSER	60

Beteckningar

L_t	[m]	längden på injekteringskärmen
H	[m]	grundvattennivå över tunneln
Q	[m ³ /s]	flöde
r_t	[m]	tunnelns radie
K	[m/s]	hydraulisk konduktivitet
A	[m ²]	tvärsnittsarea
ξ	[-]	skinfaktorn
t	[m]	injekteringszonens tjocklek
Lu	[liter/min * m * MPa]	Lugeonvärde
q_d	[m ³ /s]	det inläckage som inte ska överskridas
$\frac{dh}{dL}$	[-]	potentialändring per längdenhet

T_m	[m ² /s]	mediantransmissiviteten
$T_{m,inj}$	[m ² /s]	mediantransmissiviteten i den injekterade zonen
T_0	[m ² /s]	transmissiviteten före injektering
T_e	[m ² /s]	effektivvärdet av transmissiviteten för bergvolym
T_{inj}	[m ² /s]	transmissiviteten i den injekterade zonen
T_{crit}	[m ² /s]	kritisk transmissivitet
$T_{crit,inj}$	[m ² /s]	kritisk transmissivitet för den tätade tätade zonen

1 INLEDNING OCH SYFTE

Tätning av bergtunnlar genom förinjektering med cement utförs med två syften. Dels utförs tätningen för att minska risken för omgivningspåverkan på grund av grundvattennivåsänkningar, dels för att ställda funktionskrav kopplade till inläckande grundvatten uppfylls utan överdriven omfattning av dräner.

Rörande omgivningspåverkan finns det flera faktorer än tätningen som styr tunnarnas påverkan, såsom vattenbalans och förekomst av känsliga objekt. Dessa faktorer utreds under projekteringskedet och mynnar ut i riktvärden eller gränsvärden för hur mycket vatten som får läcka in i tunnarna. Eftersom det finns en direkt koppling mellan tätheten i injekteringskärmen och inläckagets storlek används i många projekt vattenförlustmätningar för att styra injekteringsarbetet. Sådana mätningar är dock ifrågasatta. En orsak till detta är att mätningarna tar tid och således kostar en del pengar. En annan orsak är att det finns oklarheter i hur resultatet från mätningarna ska användas. Det övergripande syftet med utfört projekt är att utvärdera dels hur vattenförlustmätningar använts vid tre svenska tunnelbyggen och dels hur informationen hade kunnat användas på ett mer systematiskt sätt.

I studien har beräkningsexempel från redan byggda tunnlar längs Botniabanan använts. Projektet har utförts i olika delar för att belysa viktiga faktorer som behöver beaktas vid design och styrning av tätningsarbeten:

I del A används en etablerad hydrogeologisk beräkningsmodell för att med ledning av utförda förundersökningar beräkna om tunnarna genom Varvsberget behövde tätas eller ej. Längs tunnarnas sträckning var berget generellt av god kvalitet ur tätnings synpunkt och det saknades större vattenförande zoner. Syftet med beräkningarna var att se om det redan innan bygget startade gick att dra slutsatser om tätningsbehovet, samt att belysa vilka osäkerheter sådana prognoser innehåller.

Del B beskriver hur arbetet vid Varvsberget utfördes i praktiken, samt hur data från utförda vattenförlustmätningar användes för att styra tätningsarbetet. Studien har genomförts genom att studera protokoll från vattenförlustmätningar och injektering, samt genom att intervjua personal som arbetade i projektet.

Del C beskriver ett alternativt sätt som kunnat tillämpas för att styra injekteringen vid Varvsberget. Frågeställningen var om det med ledning av resultatet från vattenförlustmätningarna gick att fastställa om tätning av berget erfordrades för att uppnå kraven i miljödomen. Utgångspunkten har varit samma teoretiska beräkningsmodell som använts i del A.

Del D beskriver avsnitt längs tunnlarna genom Stranneberget och Kaldalsberget där berget är av sämre kvalitet. Mer specifikt har studerats vilken information vattenförlustmätningarna gett vid passage av dessa svaghetszoner. En viktig frågeställning har varit om vattenförlustmätningar i kontrollhål kunnat ge stöd för om berget blivit tillräckligt tätt eller ej efter utförd tätning.

I studien har svagheter i de hydrogeologiska beräkningsmodellerna och felkällor i vattenförlustmätningarna beskrivits. Med ledning av utförda studier har slutsatser dragits om hur vattenförlustmätningarna kan användas vid tätningsarbete.

2 BAKGRUND OCH TEORI

För att sätta utförda analyser i ett sammanhang beskrivs nedan relevant bakgrundsinformation. I utredningen har en etablerad hydrogeologisk beräkningsmodell använts och denna beskrivs, med dess begränsningar, i avsnitt 2.1 och 2.3. Vattenförlustmätningarnas utförande och begränsningar beskrivs generellt under avsnitt 2.2. De tre tunnelprojekt som studerats i arbetet beskrivs kort i avsnitt 3.

2.1 Beräkning av inläckage till bergtunnlar

Att leda bort grundvatten definieras i miljöbalkens elfte kapitel som vattenverksamhet. Sådan verksamhet är tillståndspliktig och prövas av miljödomstolen. En vanlig strategi för miljöprövningar av tunnlar är att sökande ansöker om att leda bort viss mängd grundvatten, alternativt åtar sig att täta tunnlar så att inläckaget inte överstiger föreslaget riktvärde. Att beräkna hur stort inläckage som förväntas uppkomma i en tunnel är emellertid komplext. Det krävs att omfattande förundersökningar utförs för att erhålla någorlunda noggrannhet i beräkningarna. Ett vanligt angreppssätt är att använda någon typ av matematisk formel som bygger på Darcys lag.

$$Q = -KA \frac{dh}{dL} \quad (1)$$

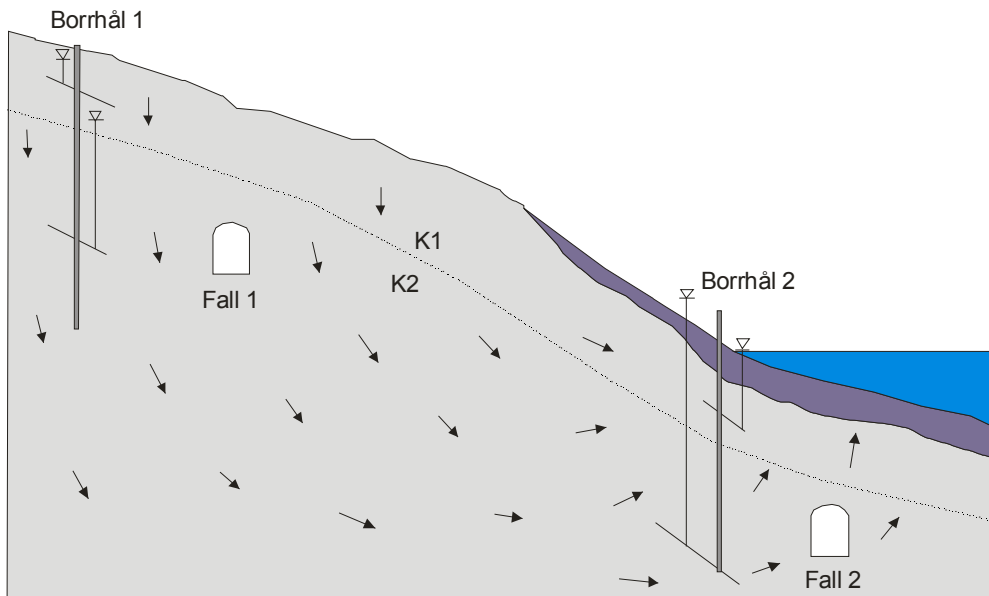
Inläckaget till en tunnel, vare sig den är injekterad eller ej kan beräknas med (Gustafson et al. 2004):

$$q = \frac{2\pi T_e \cdot H / L_t}{\ln(2H / r_t) + (T_0 / T_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t / r_t) + \xi} \quad (2)$$

Här är H vilande grundvattennivå, r_t är tunnelradien och t den injekterade zonens tjocklek. T_0/T_{inj} är kvoten för transmissiviteterna för den aktuella injekteringsskärmen före och efter injektering.

Sambanden för att beräkna inläckage gäller under vissa förutsättningar, som aldrig helt kan vara uppfyllda i den svenska berggrunden. Därför är det viktigt

med en god förståelse för hur olika parametrar ska skattas när ekvationer används. Sambandet måste användas med försiktighet under beaktande av platsspecifika osäkerhetsfaktorer. Den mest styrande parametern är oftast bergets vattenförande förmåga, men även grundvattenytans läge och vattentillgången är viktigt att ta hänsyn till.



Figur 1 Principskiss över hur en tunnels läge i ut- respektive inströmningsområde, samt tunnelns djup, kan påverka förutsättningarna för inläckage. Grå färg representerar berg, stålgrå moränjordlager och blå ytvatten. I fall 1 är tunneln lokaliserad i ett inströmningsområde, där grundvattnets trycknivå minskar med djupet (borrhål 1). I fall 2 är tunneln lokaliserad i ett utströmningsområde och grundvattnets trycknivå ökar där med ökat djup (borrhål 2). En viktig förutsättning är också att svensk kristallin berggrund ofta är mer vattenförande ytligt (K1) än på större djup (K2).

2.1.1 Grundvattennivå i berg

Grundvattenytans läge ansätts ofta till markytan vid beräkningar med hydrogeologiska modeller. Om man studerar figur 1 ser man att de allmänna hydrogeologiska förhållandena såsom vattentillgång, bergets vattenförande förmåga och topografin påverkar trycknivån i bergets sprickor. Trycknivån varierar i hög grad, varför ett enskilt borrhål ofta inte ger tillräcklig information för att bedöma grundvattenytans läge. Det krävs således att en hydrogeologisk analys utförs för att korrekt skatta grundvattenytans läge i berggrunden.

2.1.2 Grundvattentillgång

Flera svenska tunnlar är byggda ytligt, där grundvattentillgången ofta är begränsad (se figur 1). För sådana tunnlar kan inte prognoser av inläckage göras utan att hänsyn tas till detta. Vattenbalansen blir då av central betydelse. Om tunneln ligger på ett större djup, samt om det förekommer positiva hydrauliska ränder (såsom i fall 2) är vattentillgången inte begränsande.

2.1.3 Bergets vattenförande förmåga

Inläckaget till en otätad tunnel är proportionellt mot bergets vattenförande förmåga. Den vattenförande förmågan uttrycks ofta som hydraulisk konduktivitet. En förutsättning för att kunna använda konduktivitet är dock att berget fungerar som ett poröst medium. I kristallin berggrund är berget i stort sett tätt, medan vattenflödet sker i sprickor. Systemet av sprickor styr den vattenförande förmågan. I en lokal skala, exempelvis i ett borrhål som penetrerar ett fåtal sprickor, går det därför inte att utvärdera den hydrauliska konduktiviteten i berget. Då är det mer korrekt att tala om transmissivitet. Vid en tillräckligt stor skala, såsom en lång bergtunnel som penetrerar åtskilliga spricksystem, går det dock att använda konduktivitet utan att alltför stora fel introduceras under förutsättning att det inte förekommer större dominerande spricksystem längs tunneln.

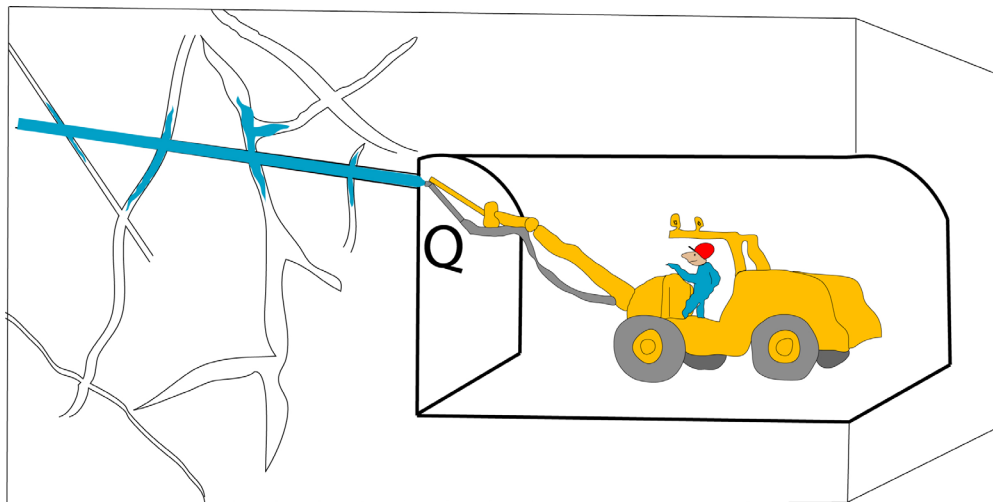
Det är vanligt att den vattenförande förmågan i svensk, kristallin, berggrund är högre ytligt än på större djup (se figur 1). Det är en viktig förutsättning som måste tas hänsyn till vid hydrauliska förundersökningar i borrhål. Vid tester som utförs i hela hålet, dvs. utan att avskärma en speciell sektion med manschett, kommer därför ytbergets hydrauliska egenskaper att bestämmas. Om tunneln inte ska gå genom ytberget erhålls vid sådana tester inga värden på bergets vattenförande egenskaper på tunnelnivå. En annan faktor som är viktig att tänka på är att undersökningsborrning framför allt utförs vid passager av tunneln som förväntas bli kritiska med hänsyn till sämre bergförhållanden. I många fall är bergets vattenförande förmåga högre vid dessa passager än i berget i övrigt.

Beroende på bergets heterogenitet krävs det normalt att hydrauliska tester utförs för att få en tillräcklig kunskap om sprickzonernas vattenförande egenskaper vid upprättande av prognoser för inläckage.

2.2 Vattenförlustmätningar vid tunnelfronten

Vattenförlustmätningar utförs under drivning av flertalet bergtunnlar. I de studerade tunnelbyggnadsprojekten har vattenförlustmätningar utförts i samtliga sonderings- och injekteringshål före injektering. Dessutom har vattenförlustmätningar gjorts i kontrollhål.

Vid en vattenförlustmätning försöker man att efterlikna en injektering, fast med vatten, genom att uppnå ett fortvarighetstillstånd med ett stabilt flöde vid ett visst övertryck (figur 2). Noggrannheten och reproducerbarheten av vattenförlustmätningar i borrhål har visat sig vara god (Gustafson och Stille 1996). Det uppmätta värdet används som oftast till att bedöma bergets vattenförande egenskaper, genom att räkna om värdet till transmissivitet, konduktivitet, eller kanske vanligast, Lugeonvärde. Vattenförlusten är ett resultat av alla sprickors bidrag (figur 2), men studier visar att ett fåtal sprickor kan ge ett mycket stort bidrag till den totala transmissiviteten (Liedholm 1991a, 1991b; Fransson 2001a).



Figur 2 Illustration av vattenflödet från ett borrhål vid en vattenförlustmätning. Den totala transmissiviteten är summan av sprickornas transmissivitet. Bild Bergab.

Generellt utförs vattenförlustmätningar vid stoff genom att montera en manschett någon meter in i borrhålet, varvid reglerventilen öppnas och vatten trycks in med ett konstant tryck. I Varvsberget t.ex. användes en tryckmätare och en elektronisk flödesmätare som var kopplade till injekteringsriggen för att

styra mätningarna. Beroende på bergtäckning så justerades vattentrycket in med högtryckspump ifrån borrhjulen.

Mätningen av flödet påbörjas ofta direkt efter att reglerventilen öppnats genom att flödesmätaren nollställs. Efter två minuter avläses det totala flödet i liter. I Varvsberget har det erhållna värdet avrundats till närmaste heltal. I protokollet för vattenförlust redovisas även Lugeonvärden.

2.3 Utvärdering av vattenförlustmätningar som beslutsunderlag för injektering

Ett vanligt problem är att avgöra om injektering skall utföras eller om en injektering kan godkännas på grundval av vattenförlustmätningar. Syftet är då att avgöra om inläckaget, q , för en injekteringsskärm, L_v , kommer att vara mindre än ett kritiskt designvärde, q_d . Eftersom transmissiviteten, T , bestämd från vattenförlustmätningar oftast är lognormalfördelad har frågan inte något exakt svar förrän tunneln är utsprängd och inflödet kan mätas. Man kan emellertid med utgångspunkt från ett enkelt statistiskt resonemang uppskatta sannolikheten (konfidensnivån) för att lyckas. Detta kan användas både för att styra en injekteringsprocess och för att utvärdera genomförda injekteringar.

Effektivvärdet för den större bergvolym som omsluter injekteringsskärmen, T_e , är omdebatterat. Om man använder ett aritmetiskt medelvärde är erfarenheterna att prognoserna ger ett mycket högre värde än vad man sedan uppmätt (Olsson 1992). Det kan givetvis också ha andra orsaker som förändringar i bergspänningen, luft i sprickorna närmast tunneln och kemiska utfällningar. Inverkan av dessa brukar man dock sammanfatta i skinfaktorn, ξ .

Ett ofta använt uttryck för den hydrauliska konduktivitetens effektivvärde, K_e , är Matherons förmodan (Matheron 1967):

$$K_e = K_g \cdot \exp\left[\sigma_{\ln K}^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{D}\right)\right] \quad (3)$$

Här är K_g det geometriska medelvärdet för en lognormalfördelad hydraulisk konduktivitet, $\sigma_{\ln K}$ är den logaritmiska standardavvikelsen och D dimensionaliteten hos flödessystemet. Om vi antar att flödet i huvudsak är radiellt mot tunneln (cylindriskt) är $D = 2$. Vi kan då bestämma den effektiva

transmissiviteten som:

$$T_e = K_g \cdot L_t \quad (4)$$

Om vi sedan antar att transmissiviteterna är lognormalfördelade och oberoende (vilket oftast inte är helt sant) kan vi bestämma den effektiva transmissiviteten till fördelningens medianvärde, $T_e \cong T_m$.

För en oinjekterad tunnel faller den andra termen i nämnaren i ekvation 2 bort och vi kan beräkna det sannolika inflödet i skärmen till:

$$q = \frac{2\pi T_m \cdot H / L_t}{\ln(2H / r_t) + \xi} \quad (5)$$

2.3.1 Transmissiviteter för sonderingshål

Vattenförlustmätning i ett sondhål ger ett lokalt värde för transmissiviteten (Fransson 2001b):

$$T \approx Q / dh = \frac{Q \cdot \rho_w g}{\Delta p_w} \quad (6)$$

Q är injekterad vattenmängd och $dh = \Delta p_w / \rho_w g$ är det pålagda övertrycket mätt i m vattenpelare. För en inflödesmätning där borrhålet får rinna fritt mäts inflödet, Q , och vilande grundvattentrycknivå, H , vilket ger transmissiviteten:

$$T \approx Q / H \quad (7)$$

Även om vi finner att mätta transmissiviteter är lognormala är osäkerheten stor för värdet på medianen eftersom antalet borrhål är litet. Vi behöver därför en metod för att beräkna sannolikheten för att medianen är mindre än ett visst kritiskt värde: $p(T_m \leq T_{crit}) = p_m$.

2.3.2 Konfidensintervall för mediantransmissiviteten

Det kritiska värdet för mediantransmissiviteten får vi genom att sätta in designvärdet, q_{dr} , för inflödet i ekvation 5 och lösa ut den motsvarande transmissiviteten:

$$T_{crit} = \frac{\ln(2H/r_t) + \xi}{2\pi} \cdot \frac{L_t}{H} \cdot q_d \quad (8)$$

Om vi tar en godtycklig vattenförlustmätning i ett sondhål följer direkt från medianens definition att sannolikheten för att det är större än medianen är $\frac{1}{2}$. Samma gäller givetvis för sannolikheten för att det ska vara mindre än medianen. Vi får alltså:

$$p(T < T_m) = 0,5 \quad (9a)$$

$$p(T > T_m) = 0,5 \quad (9b)$$

Om vi testar två sondhål, T_1 och T_2 finner vi:

$$p(T_1 \text{ och } T_2 < T_m) = 0,25 \quad (10a)$$

$$p(T_1 \text{ eller } T_2 < T_m) = 0,50 \quad (10b)$$

$$p(T_1 \text{ och } T_2 > T_m) = 0,25 \quad (10c)$$

Detta kan enkelt generaliseras till att gälla flera observationer. Om vi kallar antalet observationer mindre än T_m för N^- och antalet observationer som är större för N^+ blir hela antalet tester $N = N^- + N^+$. Sannolikheten för att antalet tester N^+ utav N stycken som är större än medianen är då binomialfördelat så att:

$$p(N^+) = 1 - \text{Binomial}(N^+, N, 1/2) \quad (11)$$

I vårt fall vill vi bestämma sannolikheten, p_m , för att medianen är mindre än det kritiska värdet T_{crit} . Man gör det genom att anta att T_{crit} är medianen och sedan beräkna sannolikheten för att det verkligen är så. Vi testar alltså N borrhål, jämför de utvärderade transmissiviteterna med T_{crit} och ser efter hur många värden $N^+ \in [0, N]$ som är större. Med hjälp av ekvation 11 kan vi göra en tabell för detta.

Här bör man diskutera vilken konfidensnivå man bör eftersträva. För en injekteringsskärm är antalet sondhål litet (2 – 5). Emellertid är det oftast inte ett problem om en skärm inte lyckas i en serie av skärmar längs en tunnel. Vi finner dock att om vi vill ha en konfidensnivå $p_m \approx 0,9$ kan vi inte acceptera att något av tre borrhål har $T > T_{crit}$. Om vi accepterar $p_m \approx 0,7$ får inte något av två

borrhål eller högst ett av fyra ha högre transmissivitet o.s.v.

Tabell 1. Konfidensnivåer för mediantransmissiviteten att vara mindre än ett kritiskt värde för ett antal vattenförlustmätningar.

N/N	0	1	2	3	4	5
1	0,50	-	-	-	-	-
2	0,75	0,25	-	-	-	-
3	0,88	0,50	0,13	-	-	-
4	0,94	0,69	0,31	0,06	-	-
5	0,97	0,81	0,50	0,19	0,03	-
6	0,98	0,89	0,66	0,34	0,11	0,02

För en längre tunnelsträcka, säg 100 m, som oftast motsvarar ca. 5 skärmar finns det 5 gånger så många sonderingshål. Samma tabell för detta fall visas i Tabell 2.

Tabell 2 Konfidensnivåer för mediantransmissiviteten att vara mindre än ett kritiskt värde för ca. 5 injekteringsskärmar.

N \ N+	0	1	2	3	4	5	7	9	10
10	1,00	0,99	0,95	0,83	0,62	0,38	0,05	0,00	0,00
15	1,00	1,00	1,00	0,98	0,94	0,85	0,50	0,15	0,06
20	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,87	0,59	0,41
25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,89	0,79
30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,95

Här ser vi att om vi inte accepterar några $T > T_{crit}$ kommer vi att vara mycket säkra på att medianen är mindre, $p_m \approx 1,00$. Vi finner alltså att ett större antal observationer ökar vår konfidensnivå för samma antal $T > T_{crit}$. Från Tabell 2 kan vi utläsa att om vi använder 3 sonderingshål för varje skärm, $N = 15$, och högst tillåter ett överskridande per skärm kommer vi alltid att ha en konfidensnivå $p_m > 0,85$ för hela sträckan. Hur många sonderingshål vi väljer och vilken konfidensnivå vi anser oss behöva måste givetvis diskuteras och väljas för varje tunnel.

För praktiskt bruk kan det vara enklare att direkt jämföra med utflödet från öppna sondhål. För att det ska bli rätt måste dock alla man inte mäter på vara stängda. Från ekvation 7 och 8 får vi:

$$Q_{crit} = H \cdot T_{crit} = \frac{\ln(2H/r_t) + \xi}{2\pi} \cdot L_t \cdot q_d \quad (12)$$

Detta värde jämförs sedan med vad man mäter från borrhålen och på samma sätt som tidigare räknar man antalet överskridanden, N^+ , av totalantalet, N , och går in i tabellerna för att bestämma konfidensnivån. Man kan också använda specifik kapacitet, $(Q/dh)_{crit}$ eller till och med Lu_{crit} beräknade enligt samma princip om det känns bättre.

2.3.3 Värdering av inflöden till en injekterad tunnel

Inflödet till en injekterad tunnel kan uppskattas med ekvation 2. Parametrarna i ekvationen är som regel inte kända när man skall utvärdera om en injekteringsskärm är godkänd eller inte. Vi kan dock med vissa förenklingar ställa upp kriterier som kan användas på samma sätt som för den oinjekterade tunneln. En lyckad injektering förutsätter att vi får en effektiv tätning i den injekterade zonen, $T_0/T_{inj} \rightarrow 50-200$. Vidare kan vi normalt anta att tjockleken på den injekterade zonen är av ungefär samma storleksordning som diametern på tunneln. Sätter vi in detta i ekvation 2 får vi:

$$q \approx \frac{2\pi H}{L_t} \cdot \frac{T_{inj} \cdot T_m}{T_0} \quad (13)$$

För att utvärdera kvoten T_0/T_{inj} måste vi analysera flödesfältet runt tunneln. Data visar att både T_0 och T_{inj} i stort sett är lognormalfördelade (Funehag 2007) och statistiskt oberoende. Detta innebär att kvoten också är lognormalfördelad. Samma data visar att varianserna också i stort sett är desamma. Vidare vet vi inte särskilt mycket om flödesfältet runt tunneln men vi kan trots det anta att dimensionaliteterna, D , är ungefär desamma. Under dessa förutsättningar kan vi reducera kvoten till:

$$\frac{T_0}{T_{inj}} \approx \frac{T_m \cdot \exp[\sigma_{\ln K}^2 (1/2 - 1/D)]}{T_{m,inj} \cdot \exp[\sigma_{\ln K}^2 (1/2 - 1/D)]} = \frac{T_m}{T_{m,inj}} \quad (14)$$

Om detta sätts in i ekvation 13 får vi:

$$q \approx \frac{2\pi H}{L_t} \cdot T_{m,inj} \quad (15)$$

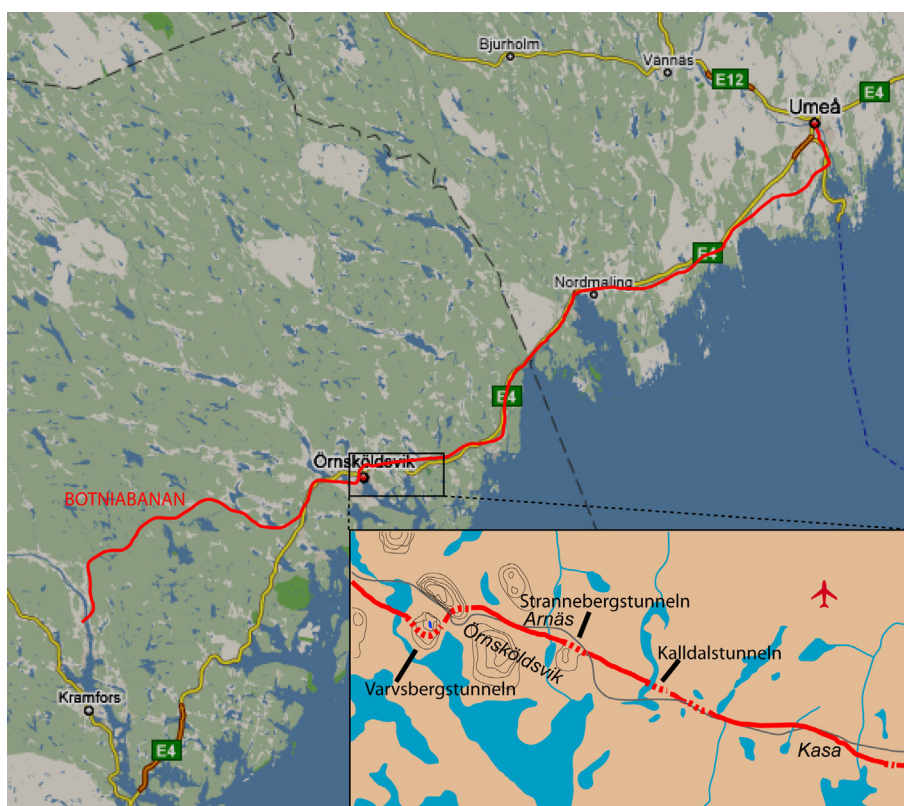
Här är $T_{m,inj}$ medianen för kontrollhålens transmissiviteter. Det innebär att samma angreppssätt som för sondhålen kan användas också för dessa. Det värde som man då skall jämföra med är:

$$T_{crit,inj} = \frac{q_d \cdot L_t}{2\pi H} \quad (16)$$

Också i detta fall kan man givetvis också använda inflöden, specifika kapaciteter eller Lugeonvärden omräknade från ekvation 16.

3 STUDERADE TUNNELPROJEKT

I denna studie har material från tre tunnelprojekt studerats. Tunnelarna byggdes av olika entreprenörer mellan åren 1999 och 2005 på sträckan Örnsköldsvik-Husum, Botniabanan. Varvsberget är beläget i centrala Örnsköldsvik, medan Strannebergstunneln ligger strax utanför samhället Arnäs. Kalldalstunneln är belägen mellan orterna Arnäs och Kasa (figur 3). Kostnaderna för tunnelprojekten uppgick till 194 miljoner, 161 miljoner, samt 61,8 miljoner kronor för respektive tunnel (www.Botniabanan.se).



Figur 3. Karta som visar Botniabanan sträckning, samt detaljerad skiss över sträckan Örnsköldsvik-Kasa som visar lokaliseringen av Varvsbergs-, Strannebergs- och Kalldalstunneln.

3.1 Varvsberget

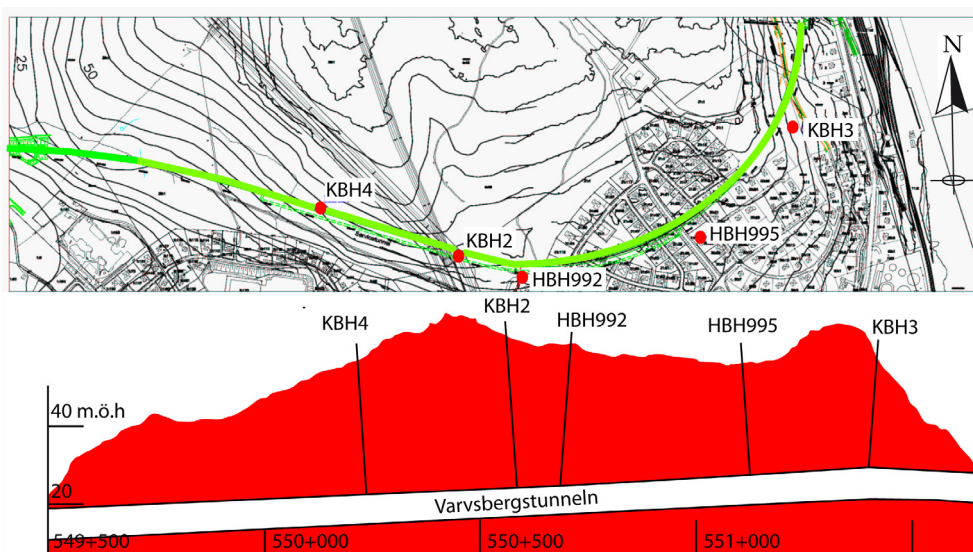
Varvsberget är en mycket markerad bergplint vars högsta punkt sträcker sig upp till 149 meter över havet (figur 4). Väster om bergets fot ligger Veckefjärden

och i öster Örnsköldsviksfjärden, som båda är en del av Östersjön. Uppe på berget ligger Hörnsjön, en smal och djup sjö med ett mycket begränsat tillrinningsområde.

Tågtunneln som löper genom berget är ca 2,1 km lång och parallellt med denna löper också en ca 1,0 km lång servicetunnel. Dessutom finns en ca 150 m lång tillfartstunnel, som ansluter ungefär mitt på servicetunneln och tågtunneln. Bergtäckningen varierar längs tunnelsträckningen, men uppgår mestadels till ca 30 m. I närheten av tunnelarna saknas det ytvattenförekomster och större grundvattenmagasin i jord.

Under projekteringen av tunnelarna har flera tester utförts i syfte att bestämma bergets hydrauliska egenskaper, såsom pulstester och infiltrationsförsök (interferenstest). Testerna visade att berget generellt var tätt och att det saknades större vattenförande svaghetszoner. Berget var mer uppsprucket i ytan (ca 20 m under markytan) än på tunnelns nivå ca 30-40 m under markytan. I miljödomen fanns det krav på tunnelns täthet (täthetskrav på ca 5 liter/min och 100 m tunnel). Förundersökningarna indikerade att detta krav inte var speciellt hårt satt. Det fanns begränsningar i både vattenförande förmåga och vattentillgång. Under bygget tätades tak och väggar med 13 hål, medan botten inte tätades. Tanken var att tätta botten vid passager av svaghetszoner, dvs. när vattenförlustmätningarna visade på höga vattenförluster. Beroende på de små inläckage som uppkom i tunnelarna tätades dock aldrig botten. Tätningen gjordes alltså med syfte att minska dropp.

Tunnelarna genom Varvsberget sprängdes ut under 2004-2005 av Skanska.



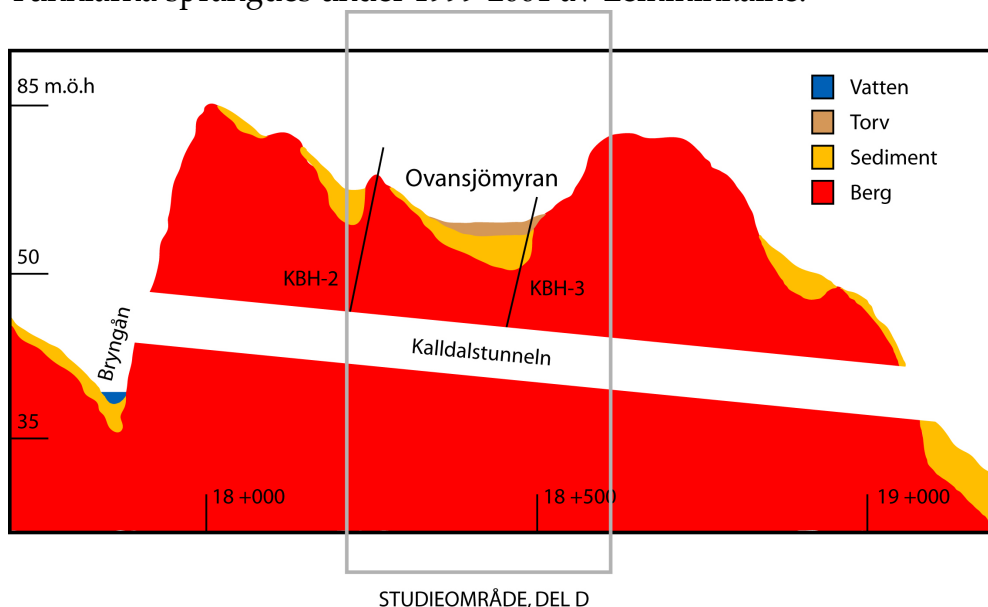
Figur 4. Skiss av tunneln genom Varosberget, plan samt profil. Bilden är modifierad från Bergab 2002a. Figuren visar även lokaliseringen av kärnborrhål (KBH) och Hammarborrhål (HBH).

3.2 Kalldalen

Tunnlarna genom Kalldalsberget löper från Bryngeån i väster till Kalldalen i öster, en sträcka om ca 1,1 km. Bergets höjder ligger kring +85, medan tunneln ligger på nivån ca +55. Centralt på berget ligger Ovansjömyran (figur 5). Berggrunden utgörs av diabas i den västra delen av tunnelsträckningen, grovkornig granit i den centrala delen och sedimentgnejs i den östra delen. Under Ovansjömyren har flera tektoniska krosszoner identifierats under förundersökningarna (figur 5).

Området under myren som omfattar ca 400 m har studerats i föreliggande projekt (figur 5). Längs sträckan varierade omfattningen på tätningen i olika täthetsklasser (I-III). Klass I och II innehåller bottenhål medan skärmar i klass III endast tätades i tak och väggar. Tätningen styrdes också aktivt på plats, bland annat genom att antalet injekteringshål och antalet kontrollhål anpassades till observationer i tunneln och vattenförlustmätningarnas resultat. Trots detta blev det problem med inläckage som låg nära de tillåtna (5 liter/min och 100 m tunnel), varför vissa efterinjekteringar utfördes för att minska inläckaget.

Tunnlarna sprängdes under 1999-2001 av Lemminkäine.



Figur 5. Skiss av tunneln genom Kalldal, profil modifierad från Bergab 1999. Figuren visar tolkningen av berg- och jordarters utbredning. Området som har undersökts i denna studie (Del D) är inramat.

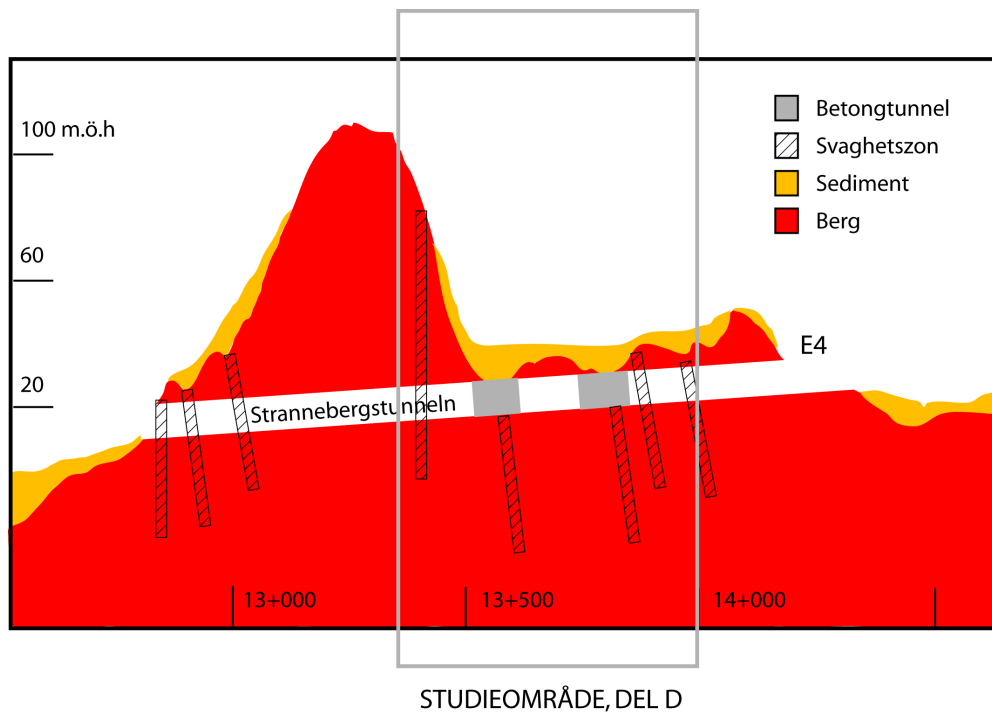
3.3 Stranneberget

Tunnlarna genom Stranneberget går från väster genom en större bergplint, som har en högsta nivå i tunnellinjen av ca +115 (figur 6). Berget består till största delen av gnejs. Öster om bergplinten går tunnlarna genom flackare terräng. Den totala sträckan uppgår till ca 1,3 km. Längs tunnlarna förekommer det flera tektoniska svaghetszoner, speciellt i den låglänta delen. Längs två delar av sträckan saknas bergtäckning, varför marken har frysts för att möjliggöra en konventionell tunneldrivning förbi dessa sektioner. Tunneln har i dessa områden förlagts i betongtunnel. Innan, mellan och efter betongtunnlarna förekommer det ett område med sämre berg, som har studerats i detta projekt.

Tätningen av tunnlarna utfördes i detta avsnitt både för att klara kraven i miljödomen (inläckagekrav på 5 liter/min och 100 m tunnel), men även för att minska dropp. I Strannetunneln användes tre olika injekteringsklasser. Vattenförlustmätningar utfördes före injektering i alla injekteringshål, och med ledning av dessa styrdes t.ex. val av start-vct, och injekteringsordning. Vattenförlustmätning utfördes även i kontrollhål för att verifiera uppnådd täthet.

Under bygget översteg inläckaget tidvis kraven i miljödomen. Sektioner av tunneln efterinjekterades därför löpande.

Tunnlarna sprängdes under 2001-2004 av Lemminkäinen.



Figur 6. Skiss av tunneln genom Stranneberget, profil. Figuren visar betongtunneldelarnas läge samt en förenklad bild av berg- och jordarter samt storskalig deformation (modifierad från Bergab 2001). Området som har studerats i Del D, är inramat.

4 DEL A – BERÄKNING AV INLÄCKAGE MED UNDERLAG FRÅN FÖRUNDERSÖKNINGAR (VARVSBERGET)

4.1 Metod

Inläckaget till Varvsbergets tunnlar utan tätning beräknades med ekvation 5 (se 2.3.1).

Syftet var att se om det med ledning av förundersökningarna gick att fastställa om tätning var erforderlig eller ej för att uppnå villkoren i miljödomen.

Beräkningarna har gjorts för otätade tunnlar och värdena har jämförts med villkoren i miljödomen, samt uppmätta inläckage.

Vid beräkningarna gjordes förenklingen:

$$\frac{T_m}{L_t} = K \quad (17)$$

Där K motsvarar bergets hydrauliska konduktivitet i en större skala.

4.2 Beräkningsexempel Varvsberget

4.2.1 Geologiska förhållanden

Berggrunden i Varvsberget domineras av en homogen grå till röd-grå medel- till grovkornig granit. Ställvis förekommer partier med porfyrisk granit. Graniten skärs av 0,2-0,3 m breda gångar av pegmatit och diabas.

Under förundersökningen identifierades fyra huvudsakliga sprickgrupper, tre subvertikala som stryker 30-40°, 90° och 330-340° samt subhorisontella bankningsplan. Längs tunneln prognostiserades flera brant stående zoner med kraftigt uppsprucket berg, vittring samt med inslag av sprickfyllnader av lera, kalcit och klorit (Bergab 2002b). Kartering av berget under drift visade dock att berget var betydligt bättre än förväntat och endast ett fåtal områden med sämre berg identifierades (Bergab 2006a).

4.2.2 Hydrogeologiska förhållanden i berget

Berggrundens vattenförande förmåga

På Varvsberget har omfattande hydrauliska undersökningar utförts för att bestämma berggrundens vattenförande förmåga (Bergab 2000). Borrhålens lokalisering visas i figur 7. Nedan presenteras en sammanfattning av resultaten från förundersökningarna:

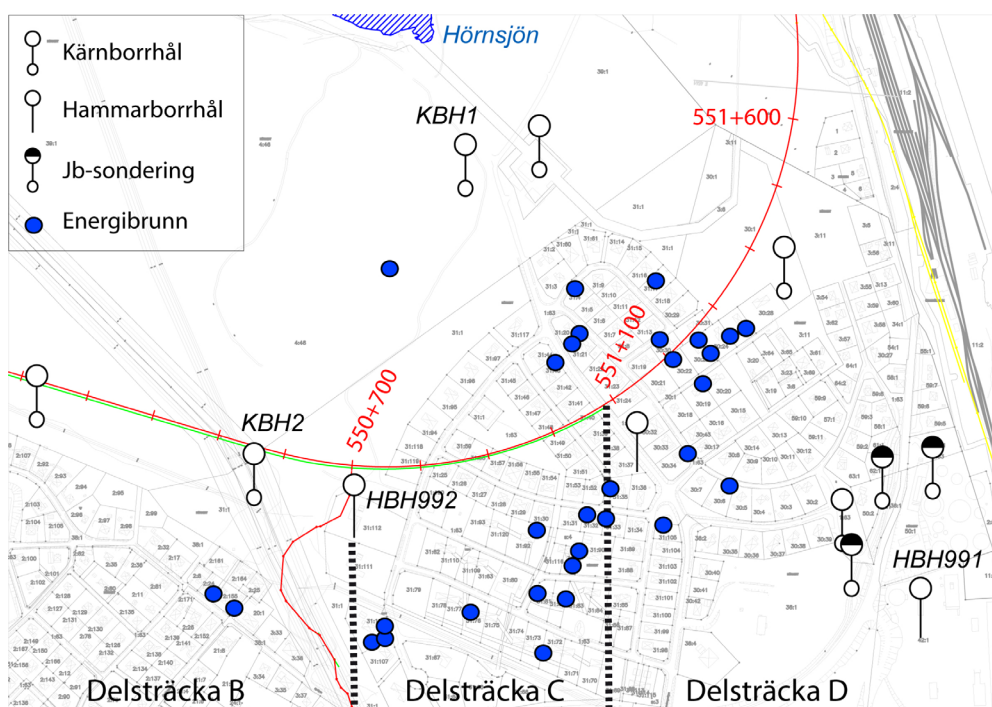
- **Brunnsinventering:** Inventeringen omfattade 126 brunnar inom det bergartsområde med granit som Varvsberget tillhör. Transmissiviteten beräknades med hjälp av data från brunnsarkivet med sambandet $T \approx Q/d$ (där Q är brunnens kapacitet och d är brunnens djup). Brunnskapaciteten bestäms ofta efter borrning genom att borrarerna blåser ur allt vatten från brunnen, varvid uppfyllnadsförloppet registreras. Transmissiviteten bestämdes utifrån inventeringen till ca $2,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Bergab 2000). Värdena för de brunnar som ligger på Varvsberget är något lägre, ca $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Brunnarna på Varvsberget var i genomsnitt 133 m, vilket gör att transmissiviteten motsvarar en hydraulisk konduktivitet på ca $0,8 \times 10^{-9} \text{ m/s}$.
- **Pulstester i borrhål:** Totalt elva borrhål i berg har undersökts (Bergab 2000), varav tre kärnborrhål med manschett. Testerna visar att bergets övre del är mer vattenförande än den undre delen.
- **Provpumpningar och infiltrationstester:** Tre provpumpningar i hammarborrhål samt tre infiltrationstester utfördes i kärnborrhål av Bergab (2000). Även dessa tester visade att bergets övre del är mer vattenförande än den undre delen.

Sammantaget visade testerna som utfördes av Bergab att transmissiviteten i den undre delen av berggrunden, där Botniabanans tunnlar är lokaliserade, ligger kring $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, vilket i större skala motsvarar en konduktivitet på mellan 10^{-8} och 10^{-7} m/s . Värdena är något högre än de som utvärderats från brunnsinventeringen. Undersökningarna visade inte några skillnader i vattenförande förmåga för olika delar av Varvsberget. Inte heller observerades några hydrauliska indikationer på dominerande flöden i zoner eller andra linjära strukturer.

Tabell 3. De hydrauliska testerna i borrhål på Varosberget visar att bergets vattenförande förmåga är djupberoende. Sammanställning från Bergab 2000.

Borrhål	Övre del (m ² /s)	Undre del (m ² /s)
KBH1 (kärnborrhål)	4×10^{-5}	1×10^{-6}
KBH2 (kärnborrhål)	4×10^{-5}	9×10^{-6}
HBH991 (hammarborrhål)	1×10^{-5}	2×10^{-6}
HBH992 (hammarborrhål)	9×10^{-6}	5×10^{-6}

Det tydliga djupberoendet i bergets hydrauliska egenskaper har betydelse för vattenflödet i berget. Det är troligt att det huvudsakliga grundvattenflödet sker i bergets övre del, som är mer konduktivt. Det kan i sin tur påverka grundvattenbildningen till bergets djupare delar, genom att grundvattenbildningen begränsas.



Figur 7. Figur som visar lokaliseringen av borrhål och energibrunnar efter Bergab 2000. De undersökningshål som används i denna studie är namngivna i figuren som även visar indelningen av tunnelsträckan som används i delstudie A och C. Observera att inga undersökningar är utförda för delsträcka A, därav att denna sträcka ej visas.

Grundvattnets trycknivå i bergets sprickor

Den effekt med olika trycknivåer i olika sprickor som beskrivs i figur 1 har uppmätts i kärnborrhål på östra delen av Varvsberget, som utgörs av ett inströmningsområde (Bergab 2002a). Under förundersökningarna installerades manschetter i olika borrhål, och på olika djup. I borrhål KBH1 (markyta +80) installerades en manschett på nivån ca +66, varvid vattennivån i övre delen av borrhålet ställde in sig på ca +79 och den undre på ca +70. I borrhål KBH2 (markyta +60,5) installerades en manschett på nivån ca +45, varvid vattennivån i övre delen ställde in sig på ca +59,5 och den undre på ca +58. Det är troligt att grundvattnets trycknivå i sprickor på tunnelns nivå (ca +25) är ytterligare lägre. I den västra delen av Varvsberget, strax nedströms tunnellen, förekommer det källor från berget. Det kan därför antas att grundvattnets trycknivå i de västra delarna följer markytan vid tunnellen.

Grundvattenbildning

Hela området ligger under högsta kustlinjen och har således en gång legat under havsytan. Jordlagren har därför varit utsatta för erosion genom svallning av havets vågor. Uppe på bergets höjder går berget i dagen över stora delar och i övrigt förekommer det endast tunna lager av kraftigt svallad morän. Förutsättningen för grundvattenbildning är därför dålig. Hörnsjön, som skulle kunna bidra med större mängder grundvatten, har enligt den geologiska kartan finmaterial i botten som troligen begränsar grundvattenbildningen till berg. Sammantaget utgörs alltså Varvsberget av ett inströmningsområde. Grundvattenbildningen har i förundersökningen bedömts uppgå till 50 mm/år (Bergab 2000).

Tre provpumpningar har utförts på Varvsberget, varav två med interferenstest vilket också kan ge ledning om grundvattentillgången. Provpumpning i HBH991 utfördes under en dag med ett flöde på ca 25 liter/min, varvid nivån i KBH1 ca 100 m från pumpbrunnen sjönk ca 15 cm. Provpumpning i HBH992 utfördes ca en halv dag med ett flöde på ca 13 liter/min, varvid nivån i KBH2 ca 150 m från pumpbrunnen sjönk ca 7 dm. Resultaten visar inte hur stor grundvattenbildningen är, men det kan konstateras att ett inläckage på 7-13 liter/min och 100 m till Botniabanans tunnlar skulle leda till betydande grundvattennivåsänkningar.

4.2.3 Miljödom

Miljödomstolen gav 2003-03-21 Banverket tillstånd att leda bort grundvatten om en mängd av högst 10 liter/min och 100 m tunnel under byggtiden, samt högst 5 liter/min och 100 m tunnel under drifttiden. Detta motsvarar ca 320 liter/min under byggtiden och ca 160 liter/min under drifttiden. Mängderna uttrycktes som riktvärde och årsmedelvärde. Banverket hade själva föreslagit villkoren. De baserade sig främst på vattenbalansberäkningar.

4.2.4 Utförda beräkningar

Med ledning av förundersökningarna har inläckaget till bergtunnlarna genom Varvsberget beräknats i denna studie. Sträckan har delats in i fyra delar med delvis olika beräkningsförutsättningar (se figur 7).

Sträcka A (längdmätning 549+500 - 550+100) Den västra tunneldelen.

Sträcka B (550+100 - 550+700). Sträckan från att spårtunnel och räddningstunnel börjar löpa parallellt till anslutningen av tillfartstunneln.

Sträcka C (550+700 - 551+100). Sträckan från anslutningen av tillfartstunneln så långt räddningstunneln löper.

Sträcka D (551+100 - 551+600). Sträckan fram till det östra tunnelpåslaget.

Beräkningarna har utförts på följande sätt:

- Grundvattenytan har antagits ligga i markytan för sträcka A och B. Antagandet har gjorts för att det förekommer källor från berget strax nedströms tunnellen. För sträcka C och D har det antagits att grundvattenytan ligger 12 m under markytan. Antagandet har gjorts med ledning av uppmätta nivåer i bergborrade energibrunnar och manschettmätningar i borrhål.
- Bergets vattenförande förmåga har bestämts utifrån förundersökningarna (se avsnitt 4.2.2). I beräkningarna har omräkning från transmissivitet till hydraulisk konduktivitet utförts. Förundersökningarna indikerade ett spann på konduktiviteten mellan 10^{-8} och 10^{-7} m/s. I beräkningarna har två värden mellan dessa valts och använts (Tabell 4).

- Radien för spårtunneln har bestämts till 4,2 m (tunneln är 8 m bred och 9 m hög). Där räddningstunnel och spårtunnel går parallellt har radien

beräknats med sambandet $r = \frac{\sqrt{l \cdot d}}{2}$, där l är avståndet mellan tunnarna och d är spårtunnelns diameter.

- Skinfaktorn har ansatts till 3.
- Grundvattenbildningen har bedömts uppgå till 50 mm/år (Bergab 2000). Med ledning av utförda provpumpningar bedöms detta rimligt (se avsnitt 4.2.2). Tillrinningsområdet har beräknats sträcka sig upp till ytvattendelaren.

Tabell 4. Indata till beräkningarna.

	A (549+500 - 550+100)	B (550+100 - 550+700)	C (550+700 - 551+100)	D (551+100 - 551+600)
Sträcka (m)	600	600	400	500
Tunnlar	Spårtunnel	Spår- och räddningstunnel	Spår- och räddningstunnel	Spårtunnel
Tunneltak	+23	+26	+29	+31
Markyta (medel)	+40	+58	+57	+52
Grundvattenyta	+40	+58	+45	+40
Bedömd hydraulisk konduktivitet (m/s)	4×10^{-8} 7×10^{-8}	4×10^{-8} 7×10^{-8}	4×10^{-8} 7×10^{-8}	4×10^{-8} 7×10^{-8}
Skinfaktor	3	3	3	3
Tunnelns radie	4,2	6,7	6,7	4,2

4.2.5 Resultat

Resultat från beräkningarna uppdelat på de olika sträckorna visas i tabellen nedan.

Tabell 5. Beräknade inläckage till bergtunnlarna på Varosberget. I exemplet redovisas inte tillfartstunneln.

	A (549+500 - 550+100)	B (550+100 - 550+700)	C (550+700 - 551+100)	D (551+100 - 551+600)
Sträcka (m)	600	600	400	500
Tunnlar	Spårtunnel	Spår- och räddningstunnel	Spår- och räddningstunnel	Spårtunnel
Tillåtet inläckage byggtiden (liter/min)	60	120	80	50
Tillåtet inläckage drifttiden (liter/min)	30	60	40	25
Beräknat inläckage ($k=4 \times 10^{-8}$) (liter/min)	30	55	21	15
Beräknat inläckage ($k=7 \times 10^{-8}$) (liter/min)	53	96	37	27
Beräknad nybildning av grundvatten (liter/min)	24	42	21	30

De beräknade värdena kan jämföras med de faktiskt uppmätta. Det tog lång tid att färdigställa projekterade mätdammar och det saknas därför information om inläckage uppdelat i delsträckor under byggtiden. Mätningar av inläckage utfördes dock i sprängfronten under byggtiden. Om det totala inläckaget på ca 2,5 liter/min och 100 m tunnel fördelas på de olika sträckorna motsvarar detta:

- 15 liter/min för sträcka A
- 30 liter/min för sträcka B
- 20 liter/min för sträcka C
- 12,5 liter/min för sträcka D

4.3 Diskussion

Vid en studie av resultatet kan det konstateras att de beräknade inläckagen utan tätning av tunnlarna inte uppnår de tillåtna läckagen för drifttiden vid lägre ansatta värdet på bergets konduktivitet. Vid det högre ansatta värdet krävs det viss tätning för att klara kraven. Det kan också konstateras att grundvattenbildningen ligger i samma storleksordning som de tillåtna inläckagen, varför en nivåsänkning i berget kan förväntas. I så fall minskas inläckaget. Det är därför troligt att tunnlarna genom Varvsberget inte skulle behöva tätas.

Resultaten visar på komplexiteten i att förutsäga inläckage i en bergtunnel. Trots omfattande undersökningar på Varvsberget förekommer det betydande osäkerheter. Den största osäkerheten rör grundvattenytans läge, samt bergets vattenförande förmåga på tunnelnivå. Eftersom dessa två parametrar i mycket hög grad styr vilket inläckage som uppkommer i en tunnel blir osäkerheten i beräkningarna höga. En viktig slutsats av dessa beräkningar är därför att man inte kan förvänta sig att prognoser för inläckage som görs under förundersökningen ska generera en exakt siffra för vilket inläckage som ska uppkomma i tunnlarna. Förundersökningarna bör istället användas för att dels bedöma hur mycket vatten som maximalt får läcka in i tunnlarna för att undvika skador på känsliga objekt, dels ge underlag för en injekteringsdesign.

5 DEL B – HUR HAR VATTENFÖRLUSTMÄTNINGAR ANVÄNTS VID DRIVNING AV VARVSBERGSTUNNELN

5.1 Syfte

Varvsbergstunneln är ett exempel på en entreprenad där vattenförlustmätningar har utförts rutinmässigt. Syftet med del B är att få en inblick i hur man i praktiken har använt sig av dessa data för att styra injekteringsarbetet vid stuff. Dels utvärderas resultatet av mätningarna med avseende på utförande och statistik, dels görs en direkt jämförelse med vad som anges i bygghandlingen (Bergab 2002b) och hur det har efterföljts genom att studera injekterings- och vattenförlustmättningsprotokoll upprättade av Skanska.

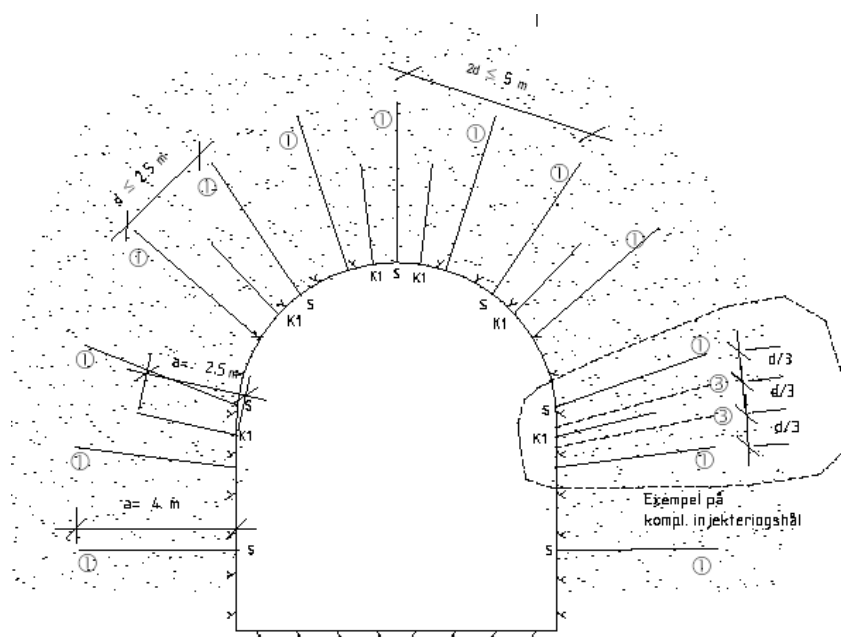
5.2 Bakgrund

Tunnlarna genom Varvsberget drevs på konventionellt sätt med borrhning och sprängning. Före utsprängning utfördes injektering. Först drevs en tillfartstunnel, som ansluter mitt på tunnelsträckningen, och därefter drevs huvud- och servicetunneln i båda riktningarna.

Två injekteringsklasser användes under drift, klass I (4 skärmar i tillfartstunneln) och klass II (alla övriga skärmar).

Injekterings-skärmarna i huvudtunneln (klass II) omfattar 13 hål i tak och vägg enligt föreskrift i bygghandlingen (figur 8). Servicetunnelns skärm består av 10 hål, pga. att huvudtunnelns sprängfront låg strax framför och således var väggen mellan service- och huvudtunneln redan tätad. Hållängden är 27 m i både huvud- och servicetunneln, förutom de första ca 6-8 skärmarna i nordlig och sydlig riktning från tillfartstunnelns korsning med huvudtunneln, vilka är 21 eller 15 m.

Det bruk som användes i Varvsberget var Cementas bruk Injektering 30 blandat med flytmedel Cementas Set Control. Cement-vattenblandningar som användes var vct 2, 1, 0,8 samt 0,5. Tester av bruket visade en vattenseparation på 41, 17, 9 och 0,5 % per respektive blandning enligt löpande testprotokoll skärm 2-10 (Skanska 2005).



Figur 8. Schematisk skiss över skärmdesign vid Injektionsklass II, Varosberget. Hämtad från Bergteknisk prognos, Bergab 2002b. Ritning BB_4541-585-001B

5.3 Statistik kring vattenförlustmätningar

Totalt borrades och injekterades 147 skärmar i huvud- och servicetunneln (Tabell 6). Kontrollhål sattes i 18 skärmar i huvudtunneln samt i 15 skärmar i servicetunneln. Samtliga injektionshål och kontrollhål vattenförlustmättes.

Totalt utfördes 1722 vattenförlustmätningar i skärnhål i de båda tunnarna, enligt protokollen. Merparten av dessa (81 %) visade ingen vattenförlust. Mätningarna med registrerad vattenförlust ligger mellan 0,1 liter/ 2 min och 110 liter/ 2 min. Normalt avrundas volymen till närmaste heltal, eller för större tal, tiotal. I början av tunnelprojektet, då tillfartstunneln drevs, har man angett vattenförluster under 1 liter/ 2 min med en decimals noggrannhet (37 mätningar). Motsvarande siffra för hela huvudtunneln är en mätning med en decimals noggrannhet. I huvudtunneln var det minsta registrerade flödet 1 liter/ 2 min. Vid omräkning från volym till Lugeonvärden har avrundning skett, och Lugeonvärdet är oftast redovisat med en decimals noggrannhet. Lugeonvärden som efter omräkning blir mindre än 0,1 är avrundade till 0.

Av protokollet framgår det ej tydligt vid vilket tryck mätningen är utförd, samt ej heller vilket grundvattentryck som antagits. I protkollet anges "sluttryck", vilket motsvarar övertryck enligt den arbetsledaren på Skanska som bearbetat vattenförlustmätningensprotokollen (Urhammar personlig kommunikation). Sluttrycket anges i protokollen till 0,5 MPa eller 0,7 MPa. Enligt uppgift skall grundvattentrycket ha approximerats till 0,2 MPa för större delen av tunneln, vilket medför att vattenförlust-mätningarna troligen utfördes vid 0,7-0,9 MPa tryck.

Tabell 6. Sammanställning av vattenförlustmätningar i Varvsberget Huvud- och servicetunnel.

	Norra huvudtunneln	Norra servicetunneln	Södra huvudtunneln	Södra servicetunneln	Totalt
Antalet skärmar	44	19	54	30	147
Antalet nollskärmar	20	7	25	13	65
Skärnhål					
Antalet hål	532	193	701	296	1722
Antalet nollhål	394	168	604	235	1401
Maximal vattenförlust	110 liter/ 2 min 3 Lu	44 liter/ 2 min 1,7 Lu	76 liter/ 2 min 2,9 Lu	70 liter/ 2 min 3,4 Lu	
Kontrollhål					
Antalet skärmar med kontrollhål	5	7	13	8	33
Totalt antal kontrollhål	13	18	35	32	98
Antalet nollhål	9	17	32	25	83

5.4 Jämförelse mellan bygghandlingar och utförande

Nedan presenteras hur det var tänkt att vattenförlustmätningarna *skulle* användas under produktionen samt resultatet, dvs. hur mätningarna faktiskt användes.

- **Bygghandling:** Täta hål (hål där ingen vattenförlust uppmätts) fylls med cementbruk vct < 0,3 med en separation på max 1 %.

Praktik: Enligt injekteringsprotokollen har samtliga hål utan vattenförlust hålfyllts med vct 0,5 till sluttryck 0,5 MPa. Hål med låga

vattenförlusttal, vanligen 5-6 liter/ 2 min (0,2-0,4 Lu) har även hålfyllts vid flertalet tillfällen. Sporadiskt har man även hålfyllt hål med betydande vattenförlust, upp emot 26 liter (1 Lu).

- **Bygghandling:** Injektering startas med hål som har de största vattenförlusterna

Praktik: Injekteringsordningen styrs som oftast av vattenförlust, i och med att hål med störst vattenförlust ofta injekteras först. Hål med samband eller likvärdiga vattenförluster injekteras oftast som en grupp, först alla hål med t.ex vct 2, sedan alla hål med vct 1 osv.

- **Bygghandling:** Hål med vattenförlust < 1,0 liter/min, m, MPa injekteras med start vct 2, följt av vct 1, 0,8 och 0,5. Hål $\geq 1,0$ liter/min, m, MPa injekteras med start vct 1, följt av 0,8 och 0,5

Praktik: Vilka start vct-tal som använts vid injektering och successionen av dessa varierar mellan skärmar, likväl som inom en skärm. Variationen beror delvis av produktionsanpassade lösningar vid samband mellan hål och läckande stuff. Därför finns det flera exempel på hål med höga Lugeonvärden som injekterats med start vct 0,8 eller hålfyllts med vct 0,5. Även för hål utan samband verkar vattenförlusttalet ha en ringa betydelse för valet av start vct. Hål med vattenförluster > 1,0 liter/min, m, MPa injekteras med start vct 2 eller 1 i ungefär lika stor utsträckning.

- **Bygghandling:** Tätningsresultatet kontrolleras med kontrollhål.

Praktik: Efter förinjekteringen sattes kontrollhål i vissa fall. Samtliga skärmar utan vattenförlust saknar kontrollhål. I skärmar med vattenförlust finns ibland kontrollhål. Det finns inget samband mellan borrning av kontrollhål och Lugeontal. Flera skärmar med höga Lugeonvärden saknar kontrollhål. Troligtvis har man istället enbart beaktat förbrukade cementmängder vid beslut om borrning av kontrollhål, samt ev. synliga läckage.

- **Bygghandling:** Kontrollhålens vattenförlust styr antalet kompletterande injekteringshål, i Klass I skall fler hål sättas om vattenförlusten överstiger 0,15 liter/min, m, MPa, i Klass II och Klass III är gränsen 0,30 liter/min, m, MPa.

Praktik: I de fall där kontrollhål uppvisar höga Lugeonvärden ($> 0,15$ liter/min, m, MPa) har man ej kompletterat med extra hål. De fåtal skärmar med extra hål, förutom de 13 ursprungliga, och ev. kontrollhål, uppvisar ytläckage eller samband mellan läckande hål.

5.5 Diskussion

Det största användningsområdet för vattenförlustmätningarna i Varvsberget under pågående produktion var att hål utan läckage kunde hålfyllas. Vidare användes vattenförlusterna i praktiken till att få ökade kunskaper om spricksystemens samband eftersom att läckage ofta uppkom i näraliggande hål vid inpumpning av vatten. Hål med samband kunde sedan injekteras tillsammans. På liknande sätt kunde även injekteringsordningen styras. Däremot har man inte beaktat läckagets storlek vid ansättning av kontrollhål, ej heller enbart förlitat sig på Lugeonvärden vid styrning av vct-tal. I fallet Varvsberget blev det slutliga inläckaget till tunneln lågt. I de fall där extra hål sattes för att kontrollera skärmens täthet, visade i stort sett alla hål på att injekteringen haft en god effekt. Endast 15 kontrollhål av 98 uppvisade mätbara vattenförluster (Tabell 6).

6 DEL C – ANVÄNDANDE AV VATTENFÖRLUSTMÄTNINGAR VID STUFF FÖR ATT FASTSTÄLLA OM TÄTNING ERFORDRAS (VARVSBERGET)

Som framgår av del A är det svårt att förutsäga om tätning av en tunnel kommer att erfordras eller ej för att uppnå kraven i miljödomen med ledning av förundersökningar. Detta trots att det i fallet Varvsberget gjorts betydande insatser för att klarlägga hydrogeologiska förhållanden. En rimlig fråga är därför om det går att använda vattenförlustmätningar vid stuff för att fastställa om tätning erfordras. Även i detta fall har Varvsberget studerats. Det angreppssätt som använts i den här studien är att utgå från samma teoretiska samband som i del A, men att istället för att räkna ut inflöde beräknas en kritisk vattenförande förmåga för varje injekteringskärm. Teorin som ligger bakom detta angreppssätt finns redovisat under avsnitt 2.3.

6.1 Beräkningsexempel Varvsberget

6.1.1 Utförda statistiska analyser och beräkningar

Följande statistiska analyser och beräkningar har utförts för Varvsberget:

- Beräkning av transmissivitet med hjälp av ekvation 7. Grundvattenytans läge har antagits ligga i markytan. Flödet har tagits från vattenförlustmättnings-protokollen (Skanska 2005).
- Beräkning av kritisk transmissivitet (T_{crit}), under vilket värde tätning inte behövs. Som underlag för beräkningarna användes data i tabell 7. Tunneln har delats in i fyra sträckor, på samma sätt som beräkningen i del A (se figur 7).
- Jämförelse av kritisk transmissivitet (T_{crit}) och beräknade transmissiviteter (T) för att analysera behovet av tätning utifrån konfidenssannolikheter (Tabell 1, Tabell 2).

Tabell 7. Indata till beräkningarna. Avsnittens lokalisering visas i figur 7.

	A (549+500 - 550+100)	B (550+100 - 550+700)	C (550+700 - 551+100)	D (551+100 - 551+600)
Sträcka (m)	600	600	400	500
Tunnlar	Spårtunnel	Spår- och räddningstunnel	Spår- och räddningstunnel	Spårtunnel
Tunneltak	+23	+26	+29	+31

Markyta (medel)	+40	+58	+57	+52
Grundvattenyta	+40	+58	+45	+40
Injekteringskärms längd (m)	22	22*	22*	22
Tillåtet inläckage (liter/min * 100 m)	5	5	5	5
Skinfaktor	3	3	3	3
Tunnelns radie	4,2	6,7	6,7	4,2

**De 16 injekteringskärmarna i räddningstunneln samt 12 skärmar i huvudtunneln som ligger närmast tillfartstunnelns anslutning var kortare, men särskilda beräkningar har inte utförts för dessa skärmar.*

6.1.2 Indata till beräkningarna

Som indata till beräkningarna har följande data använts:

- Samma indata för tunnelradie och grundvattenyta har använts som i del A.
- Varje injekteringskärm har varit ca 27 meter, med överlapp på ca 5 m. Det har antagits att berget är tätt i överlappet och parametern L_i har därför ansatts till 22 m.
- Skinfaktor har ansatts till 3 (samma värde som i del A).

Då flödet 0 liter/min har angivits i protokollen har detta värde översatts med 0,01 mindre än det minsta mätbara värdet. I Varvsberget var det minsta mätbara värdet $1,01 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

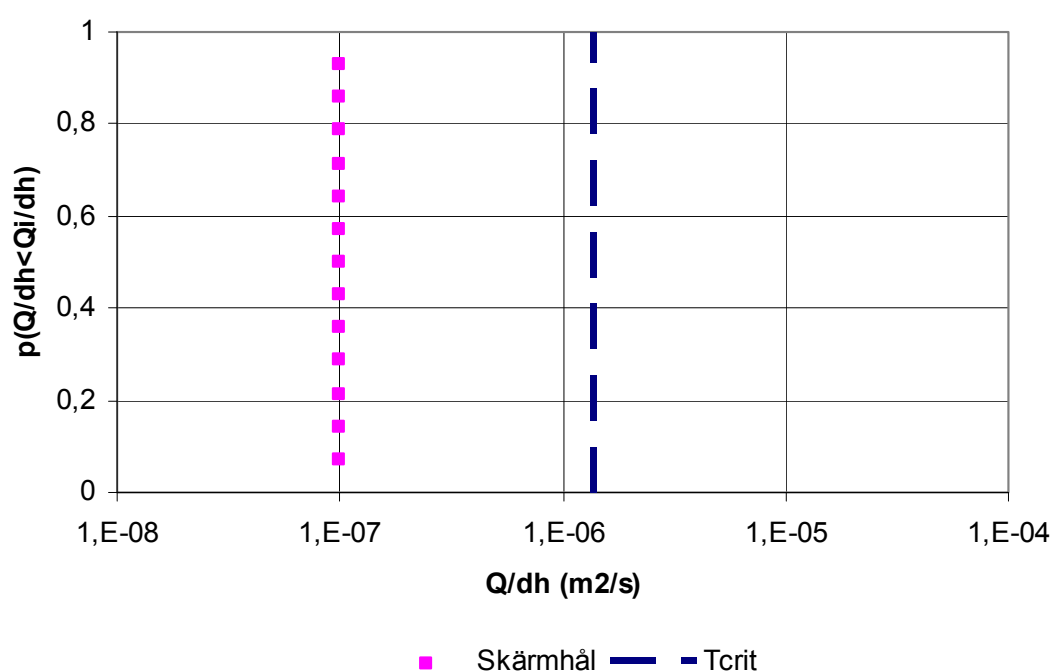
6.1.3 Resultat

Den kritiska transmissiviteten för vardera deltunnel, beräknades till mellan $8,7 \times 10^{-7}$ och $1,7 \times 10^{-6}$ (Tabell 8).

Vattenförlustdata från samtliga injekteringskärmarna i Varvsbergets huvudtunnel, totalt 98 st plottades och utvärderades. En injekteringskärm består av 13 skärmmål fördelade i tak, anfang och vägg. Totalt utfördes 1233 mätningar av vattenförlust i skärmmål i huvudtunneln. Av dessa angavs flödet till 0 liter/2 min i 80 % av mätningarna, vilket medför att de flesta skärmar endast innehåller sk. nollhål. Det innebär att vattenförlusten låg under metodens undre gräns.

Som figur 9 visar blir fördelningsdiagrammet för en skärm med bara nollhål ganska ointressant. Att villkoret att medianen skall vara mindre än det kritiska värdet är uppfyllt behöver man dock i detta fall inte tveka om. Således är skärmen i figur 9 att betrakta som tät innan den injekteras med avseende på Miljödomens krav.

En sammanställning av samtliga utvärderade injekterings-skärmar kan ses i tabell 9. Av tabellen framgår att av 98 utvärderade skärmar var samtliga hål mindre än det kritiska värdet i 52 skärmar. Nio skärmar innehöll ett hål vardera med ett hål större än det kritiska värdet, 10 skärmar hade två hål större, etc. Om vi låter 3 skärnhål eller färre av 13 st vara större än det kritiska värdet är konfidensnivån 83 %, vilket betyder att sannolikheten är hög för att skärmen är tillräckligt tät utan injektering. Läger man ihop flera skärmar och utvärderar en större datamängd kommer man att inse att sannolikt behöver de flesta av de resterande 22 skärmarna ej heller tätas (se tabell 2).



Figur 9. Fördelning av sannolikhet för en typisk skärm, Varvsberget. Den streckade linjerna markerar det beräknade värdet för kritisk transmissivitet.

Tabell 8. Beräknat kritiskt värde för delsträcka A-D.

	A (549+500 - 550+100)	B (550+100 - 550+700)	C (550+700 - 551+100)	D (551+100 - 551+600)
Sträcka (m)	600	600	400	500
Tunnlar	Spårtunnel	Spår- och räddningstunnel	Spår- och räddningstunnel	Spårtunnel
Kritisk transmissivitet, T_{crit} (m ² /s)	$8,7 \times 10^{-7}$	$9,6 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$

Tabell 9. Statistisk sannolikhetsfördelning av antalet skärmar/hål som överskrider det kritiska värdet T_{crit} längs huvudtunneln. Exempelvis så är det 16 skärmar där samtliga hål är mindre än T_{crit} i delsträcka A. 5 skärmar uppvisar vardera ett hål med ett värde som överskrider T_{crit} osv.

	A (549+500 - 550+100)	B (550+100 - 550+700)	C (550+700 - 551+100)	D (551+100 - 551+600)	Hela tunneln	Konfidens $T_m < T_{crit}$
Sträcka (m)	600	600	400	500	2100	
Totalt antal skärmar (n)	25	29	20	24	98	
n, 0 hål * $T > T_{crit}$	16	11	12	13	52	~100 %
n, 1 hål * $T > T_{crit}$	5	2	1	1	9	99 %
n, 2 hål * $T > T_{crit}$	2	3	4	1	10	95 %
n, 3 hål * $T > T_{crit}$	1	4	-	-	5	83 %
n, 4-13 hål * $T > T_{crit}$	1	9	3	9	22	

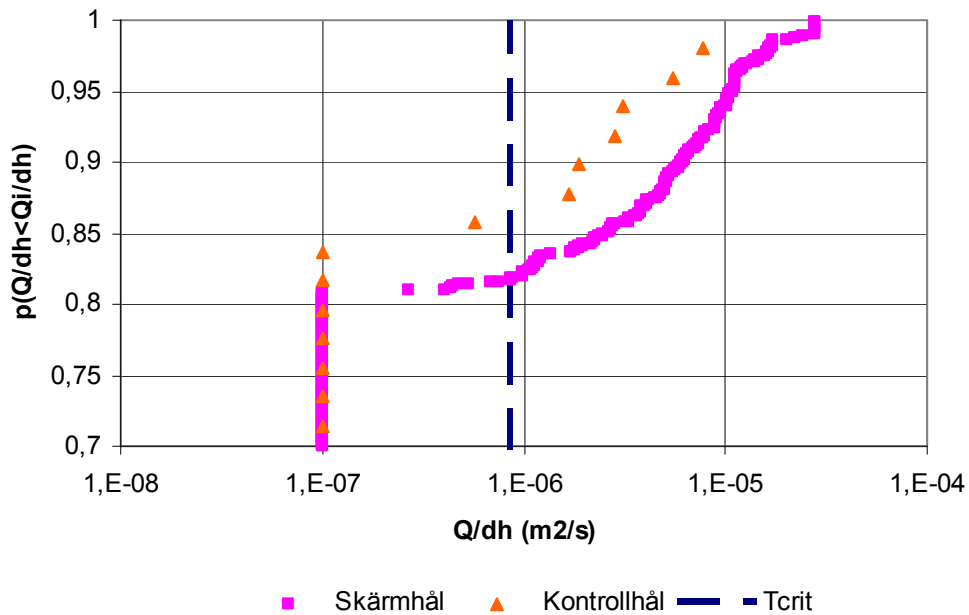
6.2 Diskussion

Beräkningsexemplet från Varvsberget visar att de osäkerheter som förelåg från förundersökningarna om tätning överhuvudtaget behövdes för att klara kraven i miljödomen kunnat klaras ut under byggtiden. Med ledning av vattenförlustmätningarna har det kunnat säkerställas att huvuddelen av tunnelsträckan inte hade behövt tätas. Dock har tätning ändå utförts, beroende på tunnelns funktionskrav.

I fallet Varvsberget är inläckagekraven förhållandevis låga. Den kritiska transmissiviteten ligger med god marginal till vattenförlustmätningens undre mätgräns (figur 9). I andra tunnelbyggen, om kraven på att begränsa inläckaget är högre, kan den kritiska transmissiviteten vara korresponderande låg. Om samma mätmetod och utförande som i Varvsberget tillämpas på ett sådant bygge kan det få till följd att den kritiska transmissiviteten hamnar under mätningarnas undre begränsning. Konsekvensen av detta är att den statistiska modell som presenteras ovan endast kan användas inom ramen för vattenförlustmätningarnas mätområde. Vid högre krav på täthet krävs det således att felkällorna i mätmetoden begränsas.

Fördelningen av transmissivitet beräknade från totalt 1233 mätningar i huvudtunneln visas i figur 10. Det minsta registrerade värdet motsvarar en transmissivitet på ca 1×10^{-7} . Från kurvan kan man även tyda en övre och en undre gräns där kurvan planar ut. Det kan tolkas som att antalet registreringar

av dessa värden ej är korrekt representerat. Troliga orsaker till detta är att små, men mätbara flöden har avrundats till 0, alternativt avrundats till närmaste heltal. Höga flöden är på samma sätt ofta avrundade till närmaste tiotal.



Figur 10. *Fördelning av sannolikhet för uppmätta transmissivitet i skärnhål före injektering ($n = 1233$ mätningar), samt kontrollhål ($n = 49$ mätningar). Den streckade linjen markerar det beräknade värdet för kritisk transmissivitet.*

7 DEL D – VATTENFÖRLUSTMÄTNINGARNAS ANVÄNDNING VID PASSAGE AV DEFORMATIONSTRUKTURER

Medan Botniabanan genomgående mötte relativt tät berg i Varvsberget, var situationen något annorlunda längs vissa sektioner genom Stranneberget och Kalldalsberget. Motivet med del D är att klarlägga vilken information vattenförlustmätningarna gett vid passage av svaghetszoner med relativt otätt berg. Syftet har varit att söka svar på om vattenförlustmätningarna gett erforderligt underlag för att visa om injekteringskärmen blivit tillräckligt tät.

7.1 Metod

För att finna ut om tunnlarna genom Kalldal och Stranneberget hade behövt tätas har beräkningar av T_{crit} och T utvärderats. Dessutom har en utvärdering av skärmens täthet efter injektering genomförts med beräkningar och teorier presenterade i avsnitt 2.3.

Följande statistiska analyser och beräkningar har utförts för Kalldalsberget och Stranneberget:

- Beräkning av transmissivitet, T , med hjälp av ekvation 7, med utgångspunkt från data från vattenförlustmätningar vid stuff. Övertrycket har satts till 0,5 MPa.
- Beräkning av kritisk transmissivitet (T_{crit}), under vilket värde tätning inte behövs (ekvation 8).
- Beräkning av kritisk transmissivitet ($T_{crit,inj}$), för den tätade zonen (ekvation 16).
- Jämförelse av T_{crit} och $T_{crit,inj}$ och beräknade transmissiviteter, T , utifrån ett sannolikhetsresonemang.

Resultatet av tätningen visas i utvalda diagram.

7.2 Kalldalsberget

7.2.1 Sammanfattning av geologi, injektering och vattenförlust

Som beskrivits i avsnitt 3 har ett avsnitt med sämre berg prognostiserats vid passage under Ovansjömyran. Den sträcka som har studerats sträcker sig från

km 18+209 till km 18+606, dvs ca 400 m (Tabell 10). Läckagen var omfattande i denna del och resulterade i att efterinjektering tillämpades.

Bergprognos

Bergprognosen inom det aktuella området baserades på två kärnborrhål, seismik samt ytkartering. Partiet domineras av gnejs eller granit. Förundersökningarna antydde flera större sammanhängande sprick- och krosszoner med klorit- och leromvandling samt partier med mindre deformerat berg. Med ledning av detta anpassades injekteringskärmarna till att omfatta injekteringsklass I, II eller III.

Injektering och vattenförlustmätningar

Samtliga borrhåll sonderings- och injekteringshål har vattenförlustmätts enligt liknande metodik som i Varvsberget (se 2.2). Antalet borrhåll per skärm varierar enligt injekteringsklass. I injekteringsklass I (tillämpad på 10 av 24 skärmar) sattes 25 hål, samt 12 kontrollhål. Hela tunneln inkl. botten injekteras. Vid fortsatt läckage, som indikerats av höga Lugeonvärden eller stora cementmängder vid injektering, sattes ytterligare hål. I injekteringsklass II (8 skärmar) sattes 11 till 19 hål, samt 2-8 kontrollhål. Hela tunneln, inklusive botten injekteras. I injekteringsklass III (6 skärmar) borrhålades 7 till 9 hål. Inga kontrollhål sattes. Hållängden i injekteringskärmarna var 21 m i alla injekteringsklasser, kontrollhålen mätte 18 m.

Den totala vattenförlusten mättes under 2 minuter och redovisas i hela liter. I området km 18+209 till km 18+606 varierar den uppmätta förlusten mellan 1 liter (0,03 Lu) och 142 liter (4,2 Lu).

Tabell 10. Sammanfattning av vattenförluster Kalldal, sträckan under Ovansjömyran.

Sträcka (längdmätning)	km 18+209 till km 18+606
Sträcka (m)	397
Antalet skärmar	24
Antalet nollskärmar	0
Förinjekteringskärmarna	
Antalet hål	409
Antalet nollhål	96

Max liter/ 2 min	142 liter/ 2 min (4,2 Lu)
Kontrollhål	
Antalet skärmar med kontrollhål	17
Totalt antal hål	150
Antalet nollhål	62
Max liter/ 2 min	36 liter/ 2 min (1,5 Lu)

7.2.2 Beräkningsexempel Kalldalsberget

Indata till beräkningarna

Beroende på att myren antas fungera som en positiv hydraulisk rand kan det antas att man kan bortse från grundvattenbildningen storlek vid användande av ekvation 5. Följande data användes vid beräkning av kritisk transmissivitet:

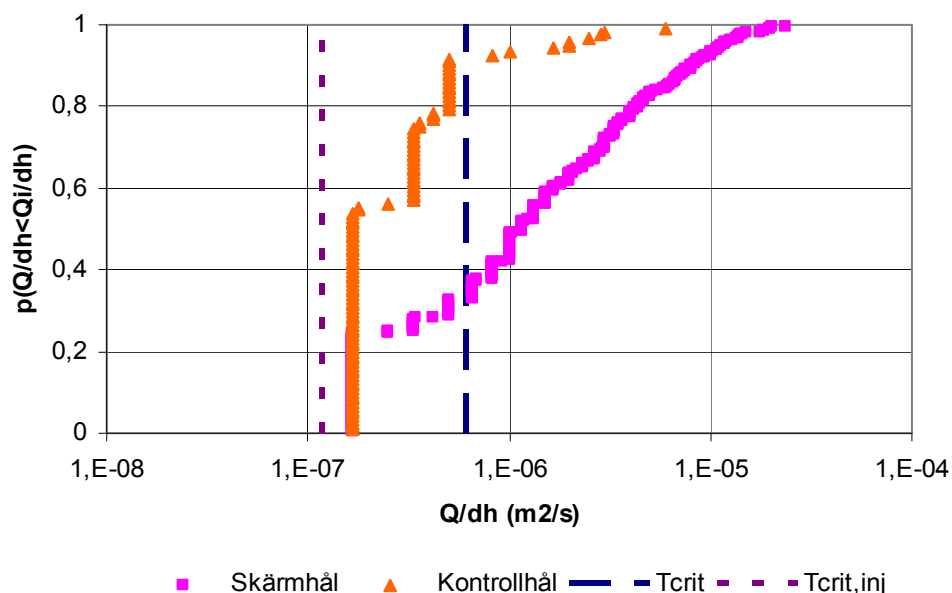
Tabell 11. Indata till beräkning av kritisk transmissivitet.

	Indata
Sträcka (m)	400
Tunnlar	Spårtunnel
Tunneltak	+50
Markyta (medel)	+68
Grundvattenyta	+68
Injekteringsskärms längd (m)	16
Tillåtet inläckage (liter/min * 100 m)	5
Skinfaktor	3
Tunnelns radie [m]	4,2

Då flödet 0 liter/min har angivits i protokollen har detta värde översatts med 0,01 mindre än det minsta mätbara värdet. I Kalldal var det minsta mätbara värdet $1,67 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

7.2.3 Resultat

Den kritiska transmissiviteten beräknades till $6,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Den kritiska transmissiviteten för den injekterade zonen är storleksordningen en halv tiopotens lägre, $1,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, och faller således under vattenförlustmätningarnas mätgräns ca $1,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (figur 11).



Figur 11. Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärnhål före injektering i skärm 29-52 Kalldalstunneln ($n = 409$ mätningar), samt beräknad transmissivitet från mätningar i kontrollhål ($n = 150$ mätningar). Streckade linjer anger den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.

Tabell 12. Resultatet från utvärderingen av samtliga injekteringsskärmar från klass I och klass III. I klass III sattes inga kontrollhål, varvid det ej går att utvärdera sannolikheten att man lyckades täta skärmen. De skärmar som ej kan utvärderas m a p tätning i klass I beror av flertalet ej mätbara värden.

Utvärdering av otätad tunnel				Utvärdering av tätad tunnel	
Skärm	Antal hål	Antal hål $T > T_{crit}$	Behöver skärmen tätas	Antal kontrollhål	Blev skärmen tät?
IK III					
31	9	7	Ja	-	
36	7	1	Nej	-	
37	7	1	Nej	-	
45	7	2	Ja	-	
47	7	4	Ja	-	
IK I					
38	25	15	Ja	12	Sannolikt ej tillräckligt tätad
39	25	23	Ja	12	Sannolikt ej tillräckligt tätad
40	25	21	Ja	12	Sannolikt ej tillräckligt tätad
41	25	23	Ja	12	Går ej att utvärdera
42	25	9	Nej	12	Sannolikt ej tillräckligt tätad
43	25	10	Nej	12	Går ej att utvärdera
44	25	1	Nej	12	Går ej att utvärdera
50	25	23	Ja	12	Sannolikt ej tillräckligt tätad
51	25	25	Ja	12	Sannolikt ej tillräckligt tätad
52	25	15	Ja	12	Sannolikt ej tillräckligt tätad

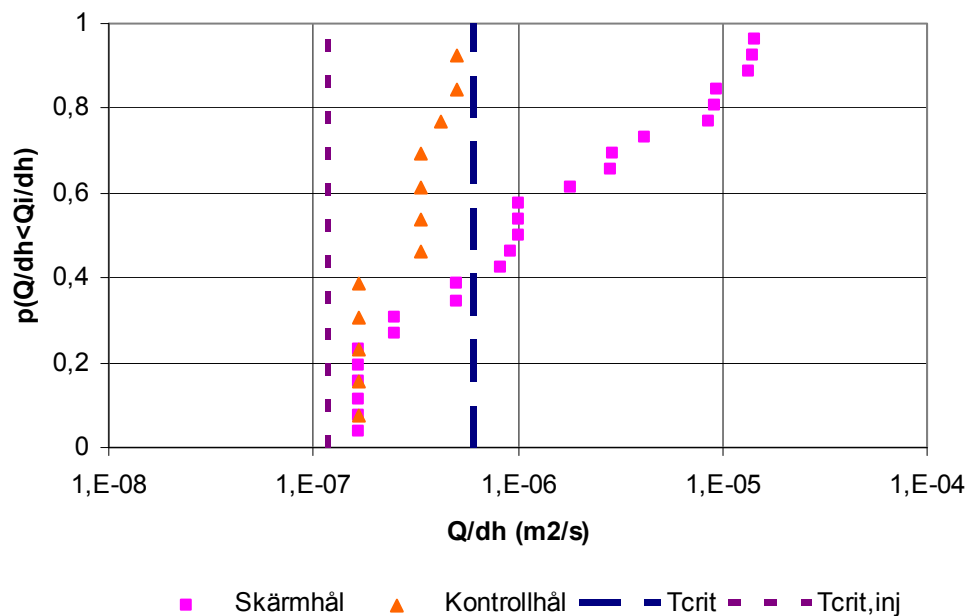
Utvärdering av km 18+209 till km 18+606

Längs sträckan var det endast fåtalet injekteringsskärmar där vattenförlusterna före tätning i de flesta hål understeg den kritiska transmissiviteten. Totalt hade tre eller fyra skärmar kunnat lämnas otätade beroende av vilken konfidensnivå, som hade varit rimlig att anta för området (Tabell 1, Tabell 12). Samtliga hål och skärmar injekterades dock, och efter tätning är de flesta skärmars transmissivitet minskad, men inte tillräckligt i flera fall.

Exempel på hur man kan utvärdera enskilda skärmar

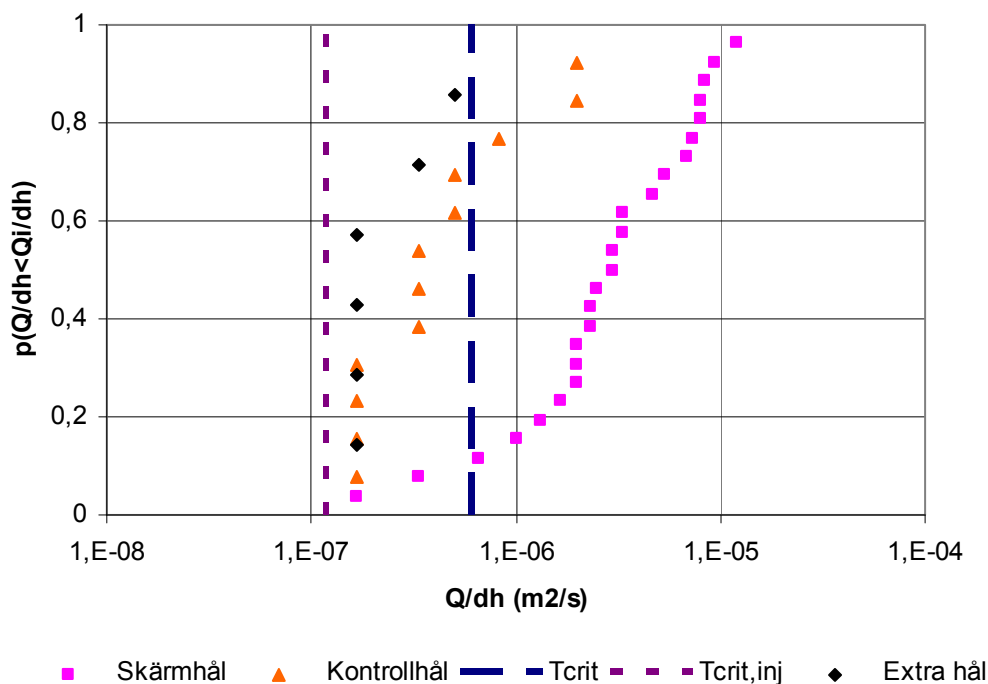
I figur 12 visas utvärderingen av injekteringsskärm 38. Vattenförlustmätningar före injektering visar att mer än hälften av skärmhålen (15 av 25) är större än det kritiska värdet, dvs. utan tätning kommer skärmen att överstiga miljödomens täthetskrav. Efter injektering kontrolleras tätningen i kontrollhål mot det kritiska värdet för den tätade zonen. Av grafen framgår att skärmen har blivit tätare, men

att tätningsinsatsen ej är tillräcklig. Fler än hälften av kontrollhålen (7 av 12) ligger över det kritiska värdet för den injekterade zonen. Det betyder att sannolikheten är stor för att skärmen ej kommer att uppfylla kravet i miljödomen.



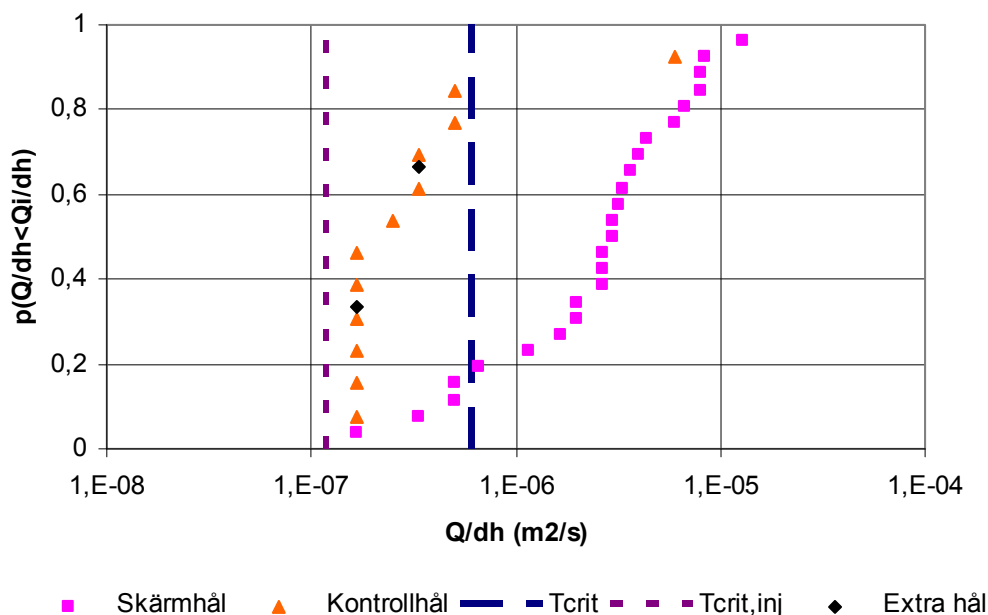
Figur 12. *Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärnhål före injektering i skärm 38 Kalldalstunneln, samt beräknad transmissivitet från mätningar i kontrollhål. Streckade linjer ange den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.*

Utvärderingen av skärm 41 visar att de flesta hålen i skärmen har vattenförluster som överstiger det beräknade kritiska värdet innan tätning (figur 13). Transmissiviteten i kontrollhål indikerar att skärmen efter tätning har blivit tätare. En jämförelse mot det kritiska värdet för den injekterade zonen indikerar dock att tätningsinsatsen ej är tillräcklig. Efter tätningen av kontrollhålen borrades 6 nya hål ("extra hål" i figuren), som har använts för att utvärdera om en andra tätningsinsats ytterligare ökade skärmens täthet. Av grafen framgår att skärmen blivit ytterligare tätad, dock är det svårt att utvärdera om tätningen är tillräcklig. Detta beror på att noggrannheten i vattenförlustmätningarna inte är tillräcklig. Det beror i sin tur främst på att tillräckligt små vattenmängder inte kan mätas med den utrustning som finns på riggen. Med metoden så som den är utförd i Kalldal, kan man ej mäta värden mindre än $1,7 \times 10^{-7}$. Om man extrapolerar fördelningen av "extra hålen" så pekar det dock mot att tätningen lyckats.



Figur 13. *Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärnhål före injektering i skärm 41 Kalldalstunneln, samt beräknad transmissivitet från mätningar i kontrollhål och extra hål som utförts i en kompletterande injekteringssomgång. Streckade linjer anger den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.*

Slutligen demonstreras att man med hjälp av en grafisk utvärdering även kan bedöma om en tätningssats krävs för att täta ex. en vattenförande spricka. I Kalldal skärm 40 kan man se att efter tätning finns det ett parti, representerat av ett kontrollhål, som avviker från lognormalfördelningen av data (figur 14). Även om detta hål skulle vara det enda hålet som ligger över det kritiska värdet så bör partiet eventuellt tätas ytterligare. Efter den andra injekteringsomgången testades skärmens täthet igen med två extra hål. Av grafen framgår det att tätningen gett påtaglig effekt i det avvikande partiet. Det framgår även att tätningssatsen ej är tillräcklig för skärmen som helhet eftersom flera mätbara värden är större än det kritiska värdet för den injekterade zonen.



Figur 14. *Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärnhål före injektering i skärm 40 Kalldalstunneln, samt beräknad transmissivitet från mätningar i kontrollhål och extra hål som utförts i en kompletterande injekteringsomgång. Streckade linjer anger den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.*

7.2.4 Hur blev resultatet?

Trots att vattenförlustmätningarna visade att injekteringen gett resultat med ökad täthet skedde ett oacceptabelt högt inläckage. Tätheten var alltså inte tillräcklig i förhållande till de täthetskrav som ställts på tunneln, vilket utvärderingarna visade. Påföljden av detta blev efterinjekteringar i de partier som läckte mycket. Insatsen utfördes pga. att mätningar i mätdammar indikerade nivåer som närmade sig gränsvärdet 5 liter/min och 100 m tunnel under byggtiden. I det studerade området sattes 145 hål, ca 4-10 m långa inom två huvudsakliga områden. Det ena området är lokaliserat mellan skärm 49 och 51 (km 18+240 till km 18+279), det andra mellan skärm 39 och 41 (km 18+399 till km 18+494). Utöver detta verkar ett mer koncentrerat läckage ha uppkommit vid skärm 31 (km 18+542 till 18+603) och 29 (km 18+598 till km 18+610).

7.3 Stranneberget

I Stranneberget har den östra tunneln studerats från km 13+350 till km 14+000. Inom detta område har två delar av tunneln betonggjutits pga. att

bergtäckning saknas, från km 13+522 till km 13+615 (totalt 93 m) och km 13+740 till km 13+850 (totalt 110 m) (Se figur 6). Totalt studerades 22 skärmar. Valda skärmar visas och diskuteras nedan.

Bergprognos

Bergarten inom det aktuella området består av medel till grovkornig gnejs av granodioritisk sammansättning. Gnejsen är svagt folierad med ögon av kalifältspat och skärs av gångar med gråvacka, pegmatit, diabas, grönsten och aplit. Seismiska undersökningar av berget indikerade flera svaghetszoner.

7.3.1 Indata till beräkningar

Följande data användes vid beräkning av kritisk transmissivitet:

Tabell 13 Indata till beräkning av kritisk transmissivitet.

	Delsträcka 1	Delsträcka 2	Delsträcka 3
Sträcka (m)	165 m	141 m	158 m
Tunnlar	Spårtunnel	Spårtunnel	Spårtunnel
Tunneltak	+20	+20	+20
Markyta (medel)	+48	+48	+48
Grundvattenyta	+48	+48	+48
Injekterings-skärms längd (m)	16	16	16
Tillåtet inläckage (liter/min * 100 m)	5	5	5
Skinfaktor	3	3	3
Tunnelns radie [m]	4,2	4,2	4,2

Då flödet 0 liter/min har angivits i protokollen har detta värde översatts med 0,01 mindre än det minsta mätbara värdet. I Stranneberget var det minsta mätbara värdet $1,67 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

7.3.2 Resultat

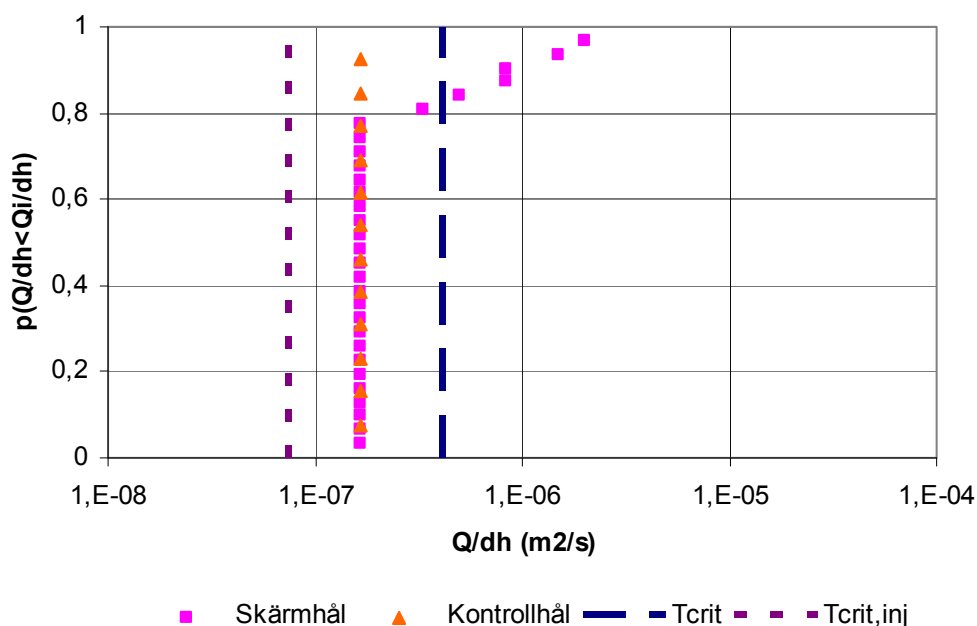
Den kritiska transmissiviteten för det otätade berget beräknades till $4,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. För den tätade zonen beräknades värdet till $7,6 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Utvärderingen av skärmarna visar att flera likvärdiga typskärmar kan indentifieras. Dessa beskrivs nedan:

Tätt berg, $T_m < T_{crit}$

Flera skärmar uppvisade alla, eller alla förutom ett fåtal hål, mindre än det kritiska värdet. För dessa skärmar är sannolikheten stor för att tätning ej hade behövts (figur 15).

I Stranneberget har man dock injekterat alla hålen. En utvärdering av tätningen visar i många fall att skärmen blivit tät såtillvida att samtliga hål är mindre än det lägsta mätbara värdet (ex. figur 15). Eftersom det kritiska värdet för den injekterade zonen även faller under mätgränsen för vattenförlustmätningarna så som metoden är utförd i Stranneberget, kan man ej avgöra om mätningarna i själva verket är större eller mindre än värdet. Baserat på kunskapen om skärmens täthet före injektering kan man dock anta att skärmen är erfoderligt tätad.

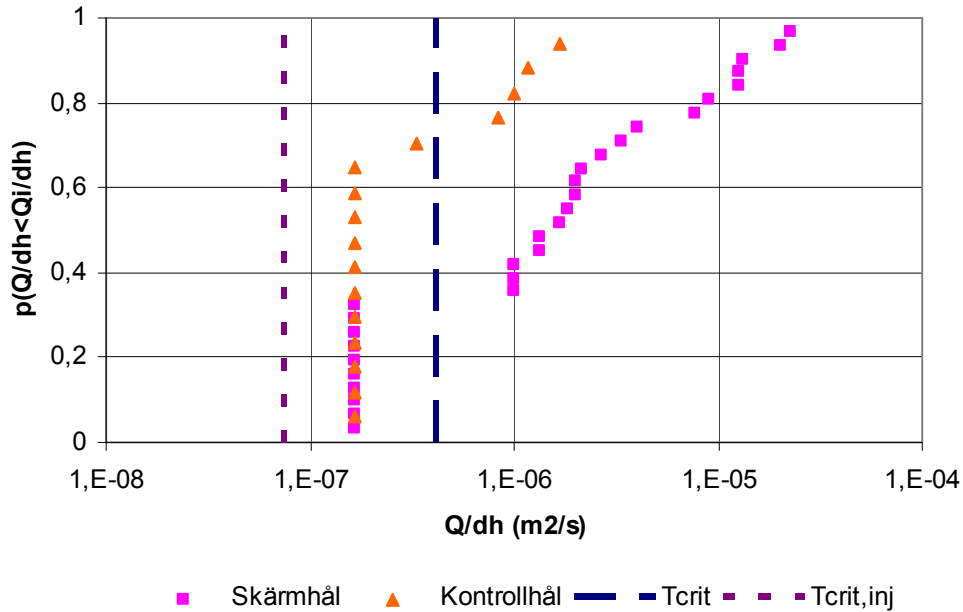


Figur 15. Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärnhål före injektering i skärm 48 Strannebergstunneln, samt beräknad transmissivitet från mätningar i kontrollhål. Streckade linjer anger den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.

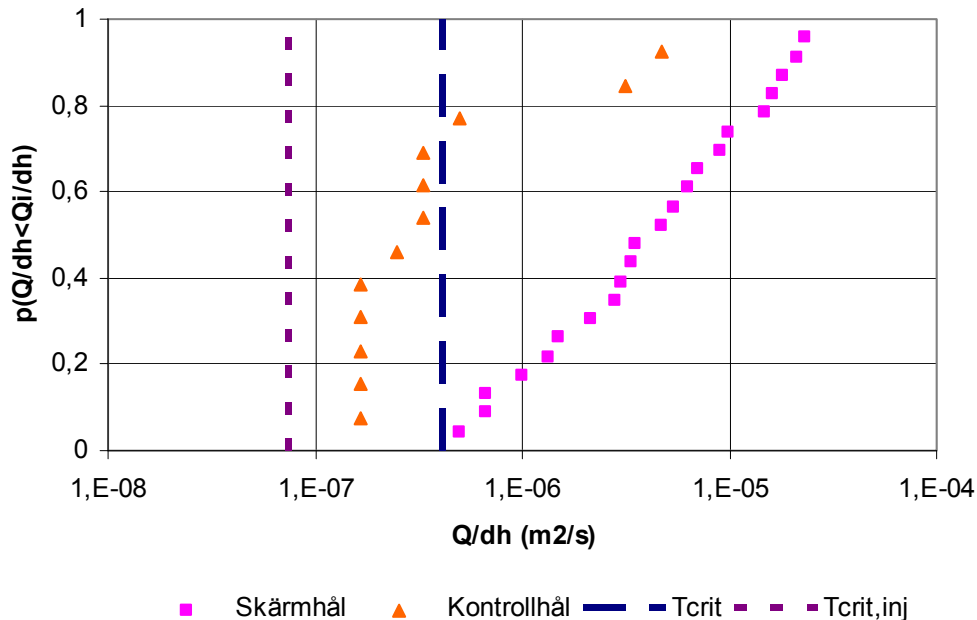
Otätat berg som överskrider Miljödomen, $T_m > T_{crit}$

Flera skärmar påvisades vara kraftigt vattenförande innan tätning, här exemplifierat med skärm 61 och 38 (figur 16, figur 17). Samtliga vattenförlustmätningar (skärm 61) eller nästintill samtliga (skärm 38) visar värden större än det kritiska värdet. Efter injektering visar utvärderingen att skärmarna blivit tätare. Trots detta är tätningen ej tillräcklig då 5 av 12 (skärm 38) och 7 av 12 (skärm 61) vattenförlustmätningar påvisar transmissiviteter som är större än det kritiska värdet för den tätade zonen. Dessa skärmar kommer

sannolikt att bidra till att risken ökar för att täthetskravet i vattendomen överskrids.



Figur 16. Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärmhål före injektering i skärm 38 Strannebergstunneln, samt beräknad transmissivitet från mätningar i kontrollhål. Streckade linjer anger den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.



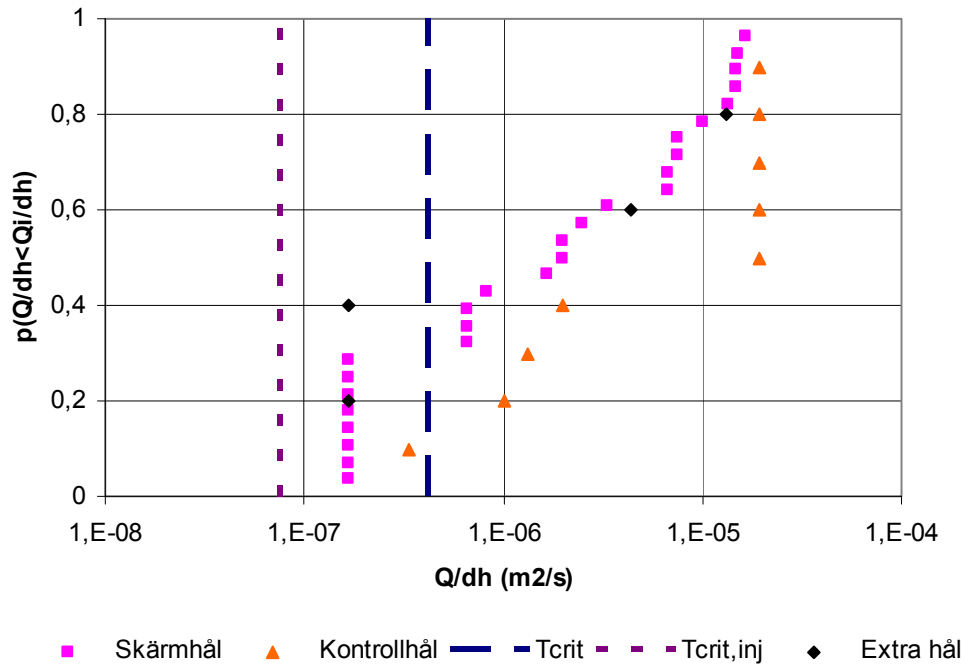
Figur 17. Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärmhål före injektering i skärm 61

Strannebergstunneln, samt beräknad transmissivitet från mätningar i kontrollhål. Streckade linjer anger den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.

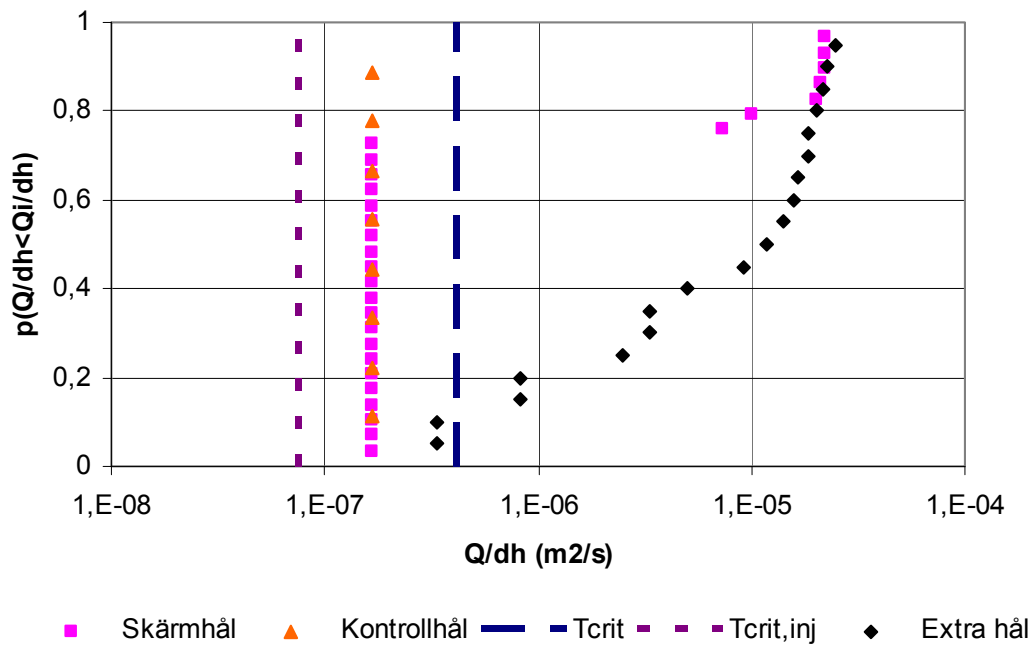
Skärmar vars transmissivitet ökar efter injektering

Skärm 88 är satt precis utanför en av betongtunnlarna. I samtliga hål är transmissiviteten högre än den kritiska, vilket medför att skärmen behöver tätas m a p miljökravet (figur 18). Skärmen tätades, men inga kontrollhål sattes för att kontrollera resultatet. Efter en vecka sattes en ny skärm, skärm 91, pga. läckage (visas som "kontrollhål" i figur 18). Utvärderingen av vattenförlustmätningarna visar att skärmen är mer vattenförande än innan tätning. Hålen injekterades och kontrollerades med 4 hål ("extra hål" i figur 18). Utvärderingen av transmissivitet i extra hål visar att skärmen blivit tätare, men i jämförelse med tätningsgraden före injektering, har man ej lyckats täta skärmen nämnvärt.

Skärm 100 ligger även den utanför samma betongtunnel som skärm 88. Utvärderingen visar initialt på ett tätt berg, där även injekteringen kan bedömas som lyckad (skärmhål + kontrollhål i figur 19). Även här har dock skärmen börjat läcka någon vecka efter injektering. En ny skärm sattes, skärm 102, och vattenförlustmätningar utfördes innan injektering (21 st extra hål i figur 19). Utvärderingen av mätningarna konfirmerar att berget är kraftigt vattenförande. Efter tätningen av extra hålen kontrollerades ej hur tätningen lyckades. Baserat på datat i figur 19 kan man anta att skärmen ej är erforderligt tätad.



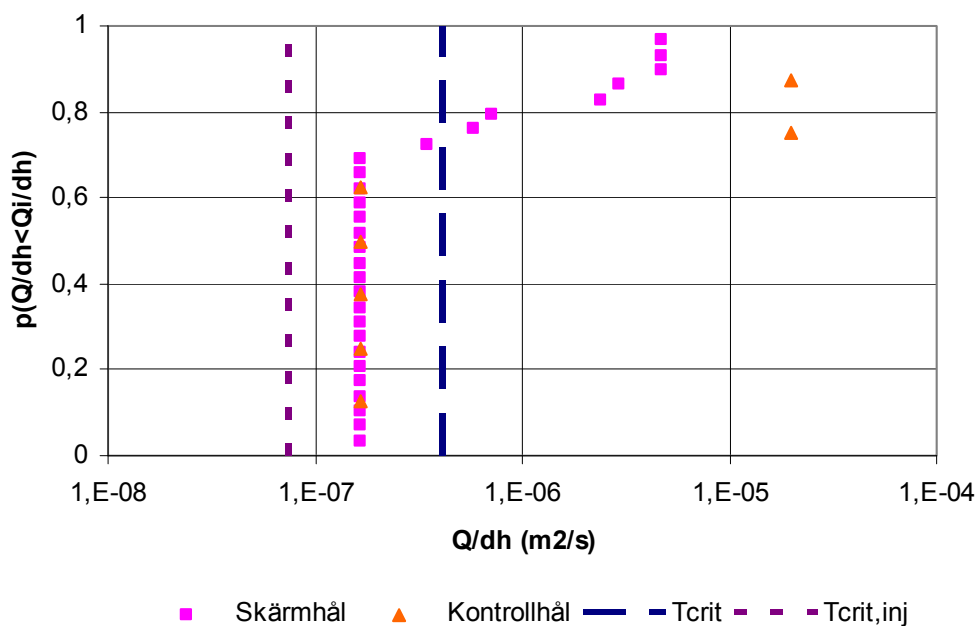
Figur 18. *Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärnhål före injektering i skärm 88 Strannebergstunneln, samt beräknad transmissivitet från mätningar i skärm 91 (kontrollhål och extra hål) som utförts i en kompletterande injektering efter ca en vecka. Streckade linjer anger den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.*



Figur 19. *Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärnhål före injektering i skärm 100 Strannebergstunneln, samt beräknad transmissivitet från mätningar i skärm 102 (kontrollhål och extra hål) som utförts i en kompletterande injektering efter ca en vecka. Streckade linjer anger den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.*

Skärmar med hål som avviker från lognormalfördelning

Fördelningen av transmissiviteter i kontrollhålen i skärm 61 (figur 17) indikerar att två hål har en avsevärt högre vattenföring jämfört med övriga värden. Dessa två värden följer ej kurvan som utgörs av resterande mätbara värden. Även i skärm 97 (figur 20) finns två kontrollhål med avvikande värden. Fördelningen av data som beskrivs ovan kan tolkas som om borrhålet/borrhålen har penetrerat en anomal struktur som ej är representativ för berget som helhet. Skärm 100 (figur 19) uppvisar registreringar av vattenförlust i skärnhål som ej är mätbara, samt höga transmissiviteter, och inget där emellan. Även kontrollhålen i figur 18 uppvisar en avvikande fördelning. I båda fallen ovan kan fördelningen tolkas som heterogent berg.



Figur 20. *Fördelning av sannolikhet för beräknad transmissivitet baserad på uppmätt vattenförlust i skärnhål före injektering i skärm 97 Strannebergstunneln, samt beräknad transmissivitet från mätningar i kontrollhål. Streckade linjer anger den kritiska transmissiviteten för den otätade och tätade tunneln.*

7.3.3 Hur blev resultatet?

Efterinjektering skedde systematiskt inom det studerade tunnelavsnittet i Stranneberget. Injektering av passagen skedde under juli 2002 till januari 2003. Mätningar av inläckande grundvatten mellan juli 2003 och juli 2006 visade att ett antal mätningar översteg 5 liter/min och 100 m. Maximalt registrerades 7 liter/min och 100 m. Medianen för samtliga mätningar i perioden var 3,4 liter/min och 100 m.

7.3.4 Diskussion

Exempel på injekteringsskärmar från Kalldal och Stranneberget som presenterats i denna delstudie visar att skärmar som ej har tätats tillräckligt har kunnat identifierats med hjälp av data från vattenförlustmätningar. I de studerade fallen har det dock varit svårare att säkerställa när tillräcklig tätning uppnåtts. Detta p.g.a. att det kritiska värdet för den tätade zonen ($T_{crit,inj}$) ligger under mätmetodens detektionsnivå.

Resultaten från vattenförlustmätningarna vid Stranneberget och Kalldal visar dels att skärmens transmissivitet innan tätning varierar inom zoner med dåligt berg samt att tätningseffekten varierar kraftigt efter utförd injektering. När betongtunneldelarna konstruerades så frystes marken. Problemet med ökat läckage efter injektering kan troligen hänföras till en upptining av frysta sprickor, efter det att betongtunneldelarna konstruerats.

8 SUMMERING AV DELSTUDIERNAS

I delstudie A kan man konstatera att beräkningar av förväntat inläckage är osäkra. Trots en omfattande förundersökning är det svårt att bestämma bergets vattenförande förmåga på tunnelnivå, samt bestämma grundvattenytans läge i sprickor.

I delstudie B visar en jämförelse av olika handlingar från Varvsberget att avsteg från bygghandlingar kan ske lättvindigt, på gott och ont. Injekteringen styrdes ej med vattenförlustmätningar under byggskedet på det sätt det var tänkt.

Delstudie C visar att en utvärdering av vattenförlustmätningar kunde påvisa att tätning ej hade behövts av Varvsbergstunneln för att klara det uppställda miljökravet.

Delstudie D visade på komplexiteten med att täta passager med sämre berg. Utvärdering av skärmarna visade att de flesta skärmarna behövde tätas, samt att tätningen ej var tillräcklig i många fall.

8.1 Analys av vattenförlustmätningarnas mätintervall

I både Varvsberget och Stranneberget är det lägsta registrerade mätvärdet 1 liter/ 2 min. Man har endast registrerat heltal. I Varvsberget har man sannolikt avrundat små värden till noll. Det medför att den undre gränsen för mätmetodens noggrannhet blir försämrad. Med enkla medel, t.ex. genom att registrera flöden med en decimala noggrannhet, kommer man att kunna öka metodens mätnoggrannhet med rådande utrustning. Kan man dessutom mäta flöden < 1 liter/ 2 min kan man ytterligare öka mätintervallet. Idag finns flödesmätare som kan mäta mycket små flöden. Om flöden i storleksordningen dl och cl hade registrerats i Varvsberget hade mätnoggrannheten kunnat ökas till 10^{-8} respektive 10^{-9} , vilket skulle räcka för att utvärdera om erforderlig tätning uppnåtts i Botniabanans tunnlar.

9 IMPLEMENTERING

Design av ett injekteringskoncept baserat på resultatet från vattenförlustmätningar kan utföras genom att välja ett antal sonderingshål och utvärdera sannolikheten av att skärmens median är mindre än det uppställda miljökravet. För uppenbart vattenförande skärmar kan det istället fokuseras på att säkerställa att erforderlig tätning är uppnådd.

Någon säkerhetsmarginal kan vara rimlig att anta vid tillämpningen av denna utvärderingsmetod med tanke på svårigheten med att beräkna det kritiska värdet utifrån ibland osäkra indata. Vilken konfidensnivå som skall väljas bör även bero av uppställda täthetskrav. En risk när metoden används är att den förutspådda transmissiviteten från borrhålet ej stämmer överens med verkligheten. Medan konduktiva och täta sprickor blir korrekt skattade med ett fåtal testhål, är det svårare att korrekt skatta intermediära sprickor (Fransson och Gustafson 2000). Det krävs därför att en hydrogeologisk bedömning utförs nere vid stuff. Analyser av tunneldata visar att det krävs olika många tester i olika tunnlar för att uppnå statistiskt säkerställda nivåer pga. olika spricklängder och konduktiviteter (Zetterlund och Larsson 2004). För intermediärt konduktiva sprickor bör längden mellan de testade hålen ej överskrida 3-4 m (Fransson och Gustafson 2000). Är intermediära sprickor frekventa bör rimligen flera sonderingshål testas, än vid täta eller läckande hål. Därför krävs det övergripande kunskaper om förväntad hydrogeologi innan en tätningsdesign baserad på utvärderingen av vattenförlustmätningar kan användas.

I beräkningen av det kritiska värdet för den tätade zonen sker antaganden om tätningseffekten. Eftersom tätningseffekten varierar från skärm till skärm kommer det kritiska värdet i vissa fall indikera att tätningen ej är tillräcklig, trots att tätningen i själva verket kan vara erforderlig. I fallet Kalldal var det flera skärmar som innan tätning var erforderligt täta, men efter tätning, ej hade tätats tillräckligt, enligt utvärderingsmodellen. I praktiken kan det vara nödvändigt att utvärdera kraftigt vattenförande skärmar på ett annat sätt jämfört med täta skärmar, eller skärmar med små läckage, då de hydrologiska förhållandena som beräkningsmodellerna baseras på skiljer sig mellan de två fallen.

I kraftigt vattenförande berg uppstår problem med att utvärdera hur länge

tätningen måste fortgå, samt hur man skall utvärdera kontrollhål. Kontrollhål är ofta få till antalet och ansätts ofta för att testa sprickor där man är osäker på hurvida tätningen lyckats eller ej. De uppvisar ett mer negativt värde än resultatet av tätningen som helhet. Statistiskt finns det ett belägg för att låta visst läckage kvarstå. Dock kan det vara svårt att avgöra med vattenförlustmätningar vilka hål som behöver extra tätning. För att kunna designa tätningen behöver flera bergkarakteristiska parametrar beaktas och överföras till en genomförbar tätningsstrategi. Om tätningen av zonen skall utvärderas statistiskt krävs en slumpvis placering av ett antal hål. Antalet styrs av vilken konfidensnivå man anser vara rimlig.

10 SLUTSATSER

- Vattenförlustmätningar fungerar för att utvärdera om injektering möter kraven, förutsatt att de är rätt använda.
- Studien visade att man genom ett rimligt antal vattenförlustmätningar kan avgöra vilken design som bör användas.
- Noggrannheten i vattenförlustmätningarna bör utvecklas för att man ska kunna avgöra om injekteringen möter täthetskraven.

För att implementera utvärderingsmetoden behövs fortsatta studier kring vattenförlustmätningar. Frågor som behöver besvaras är hur utvärdering av vattenförlustdata kan göras produktionsvänligt samt vilken noggrannhet som mätmetoden kan uppnå med enkla medel.

En viktig slutsats som dragits av resultaten från vattenförlustmätningar vid passage av svaghetszoner är att det där krävs ett anpassat utförande, som i hög grad kan skilja sig från injekteringen längs passager med bra berg. Vid sådana passager måste det accepteras att framdriften störs, att det blir dyrare, samt att beställaren aktivt styr arbetet på plats.

Längs delar med bra berg bör istället omfattningen av tätningen skäras ner, vilket kan spara pengar. Detta kräver en engagerad och kunnig byggläsningsorganisation samt utbildning av den personal som utför mätningarna.

11 REFERENSER

Bergab 1999. Banverket Botniabanan, Delen Örnsköldsvik – Husum, Del 2, Km 12+000 – 22+400 Tunnel genom Kalldalsberget, Bilaga 1 Geologiska, hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden.

Bergab 2000. Botniabanan JP41. Gålnäs-Arnäs via centrala Örnsköldsvik. Fördjupad undersökning av tunnel genom Varvsberget. Passage av Hörnsjön och bensinlager. Underlagsmaterial till järnvägsplan JP 41, delen Gålnäs-Arnäs.

Bergab 2001. Banverket Botniabanan, Delen Örnsköldsvik – Husum, Del 2 Tunnel genom Stranneberget, Teknisk beskrivning, 1-12.

Bergab 2002a. E 4541 Botniabanan Gålnäs-centrala Örnsköldsvik Tunnel genom Varvsberget KM 549+400 – 6+400, Teknisk PM geohydrologi, Ansökningshandling, Handling C.

Bergab 2002b. E 4541 Botniabanan Gålnäs-Örnsköldsvik KM 547+400 – 548+110, 548+250-548+840, 549+420-551+645 Tunnel- och terrasseringsarbeten, Tunnel Varvsberget Förfrågningsunderlag Bergteknisk prognos Handling 13.2, 1-23.

Bergab 2006a. Botniabanan, Gålnäs-Örnsköldsvik C. Tunnel Varvsberget. Geoteknik, Undersökning Geologisk kartering, förstärkningar, mm Ritning G201G0001-001 till G201G0001-023.

Bergab 2006b. Botniabanan, Arnäsvall-Högbysjön, Tunnel Stranneberget Geoteknik, Undersökning Geologisk kartering, förstärkningar, mm Ritning: G202C0001_001 till G202C0001_018.

Fransson Å och Gustafson G 2000. The use of Transmissivity data from probe holes for predicting tunnel grouting. Analyses of data from the access tunnel to the Äspö hard rock laboratory. Tunneling and Underground Space Technology 15, 365-368.

Fransson Å 2001a. Characterization of a fractured rock mass for a grouting field test. Tunneling and Underground Space Technology 16, 331-339.

Fransson Å 2001b. Characterisation of fracture geometry using specific capacities: numerical and experimental study of a fracture replica. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 60, No.2, 139-144.

Funehag J 2007. Grouting of fractured rock with silica sol- Grouting design based on penetration length. Doktorsavhandling, GEO Institutionen, Chalmers tekniska högskola, ISBN/ISSN: 978-91-7291-879-5.

Gustafson G, Fransson Å, Funehag J, Axelsson M 2004. Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering. Väg- och vattenbyggaren 4.

Liedholm, M 1991a. "PM- The fracture transmissivity and the average hydraulic conductivity in the 3-m scale of two sections of KAS 06". SKB-Äspö Hard Rock Laboratory PR 25-90-16a, Conceptual modelling of ÄSPÖ, Technical Note 13.

Liedholm M 1991b. "PM- The average hydraulic conductivity and the coated fracture frequency in the 3-m scale". SKB-Äspö Hard Rock Laboratory PR 25-90-16b, Conceptual modelling of ÄSPÖ, Technical Note 21.

Matheron G. 1967. *Elements pour une Theorie des Milieux Poreux*. Masson et Cie., Paris.

Olsson O (ed.) 1992: Site Characterisation and validation – Final Report. SKB on behalf of OECD/NEA, Stripa TR No 92-22.

Skanska 2005. Protokoll, Dokumentation enligt KMA-plan. E4541-Gålnäs-Örnsköldsvik. KM 547+400 – 548+110, 548+250-548+840, 549+420-551+645 Tunnel- och terrasseringsarbeten, 5.4 Injektering.

Zetterlund M och Larsson T 2004. Evaluation of water pressure tests in control boreholes as a method of appraising the grouting result. A case study of Nordlänken, Öxnered-Trollhättan. Examensarbete, Chalmers, 2004, 64 pp.

Bergab – Berggeologiska Undersökningar AB

Chalmers

Anna Engström och Karl Persson

Gunnar Gustafson



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

Tlf: 08- 762 62 20 • info@svebefo.se
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 0281-4714

tbk.