

INJEKTERING - TILLÄMPNING AV INJEKTERINGSFORSKNING I FÄLT

Björn Stille
Fredrik Andersson

Injektering - tillämpning av injekteringsforskning i fält

Pre-grouting – application of grouting research in the field

Björn Stille, Skanska Teknik

Fredrik Andersson, Skanska Teknik

SveBeFo rapport 79
Stockholm 2008

ISSN 1104 – 1773

ISRN SVEBEFO-R—79—SE

FÖRORD

Med början under nittonhundraåttiotalet har ett stort antal forskningsprojekt genomförts för att öka kunskaperna om injektering för att tätta bergtunnlar. Flera av projekten har varit doktorandarbeten vid KTH och Chalmers och de har rört både kunskaper om mediet, den spruckna bergmassan som ska tätas, och om injekteringsmaterialens egenskaper med avseende på deras förmåga att tränga i bergets spricksystem. Beräkningsmodeller har utvecklats för att beskriva förloppen, både för att bedöma förväntade tätningsresultat och för att ge bättre grund för att välja ”rätt” injekteringsmedel och metodik för tätningsarbetet. Flera av projekten har bedrivits inom ramen för SveBeFos forskningsprogram, medan andra har genomförts i regi av SKB eller andra finansiärer.

SveBeFos engagemang i injekteringsforskningen syftar till ökad kunskap men också till att på bästa sätt omsätta forskningsresultaten i praktisk nytta. Med det syftet har bland annat boken ”Cementinjektering i hårt berg” publicerats 2005 och projektet ”Injektering – tillämpning av injekteringsforskning i fält”, vars första rapport här föreligger. Arbetet har utförts i samband med Skanskas drivning av två tunnlar på Botniabanen, entreprenaden E3541, etapp Offersjön-Bjällstaån, och har bestått i uppföljningar av data från injekteringsarbetet och försök att i praktiken tillämpa analysmetoder som tagits fram under de senaste årens forskning vid Chalmers och KTH.

Den ursprungliga organisationen av forskningsprojektet fick i inledningsskedet modifieras till följd av personförändringar både hos tänkta projektmedarbetare och hos entreprenören. Arbetet har därefter genomförts till sin huvuddel av Björn Stille, Skanska Teknik, med stöd från arbetsplatsen av Helena Söderberg och Björn Stuge, samt vid Skanska Teknik av Fredrik Andersson. Under uppföljningsarbetets gång har tvist mellan beställare och entreprenör uppstått, vilket har begränsat möjligheterna att följa arbetet med en referensgrupp, vilket annars alltid görs i SveBeFo-projekt. Bland personer som bidragit i olika skeden bör särskilt nämnas Thomas Dalmalm, (2004-2005 vid SveBeFo, författare av första rapportutkast), Magnus Eriksson, (2004 vid KTH, inledande projektplanering), och Rocio Batres-Estada, (2005 vid Vägverket Konsult, datainsamling i fält), samt Ulf Håkansson, Skanska, Gunnar Gustafson, Chalmers, och Håkan Stille, KTH.

Trots att entreprenaden har gått till tvist måste här noteras den positiva inställningen till projektet från Botniabanans och Skanskas platsledningar (i inledningsskedet Jan Stattin, Skanska, därefter Jens Dahlberg) och deras stöd för att genomföra uppföljningen, som är av stort värde för fortsatt forsknings- och utvecklingsarbete inom området. Projektet har finansierats av Banverket, SKB och SBUF, vilket också tacksamt noteras.

Stockholm i oktober 2006

Tomas Franzén

Sammanfattning

Projekt ”Injekttering – tillämpning av injekteringsforskning i fält” har syftat till att föra teoretisk kunskap om berg och tätning närmare praktiskt injekteringsutförande. Denna rapport behandlar fysiska förhållanden (produktionsuppföljning) och teoretiska samband tillämpade på en uppföljd tunnelsträcka. Inom ramen för projektet planeras ytterliggare en etapp baserad på resultaten från denna rapport. Information och material har inhämtats från totalentreprenad E3541 (Botniabanan etapp Offersjön – Bjällstaån).

Bergtunnlarna inom entreprenaden är 5 och 6 km långa (Björnböletunneln respektive Namntalltunneln). Bergtäckningen är i medeltal 60 respektive 100 m. Tunnlarna har till största delen drivits i en gråvacka som omvandlats i mindre omfattning till sedimentgnejs eller migmatit. Gråvackan har en karakteristisk småsprickighet med tydliga foliationsplan.

Injektteringen har utförts med ett ”klassiskt” injekteringsutförande. Det vill säga, injektteringen har inledningsvis utförts med ett högre vct (1,0) och gradvis sänkts vct (0,8 och 0,5) tills ett specificerats sluttryck erhållits. Injektteringsstrycken har inledningsvis vanligtvis hållits måttliga och höjts successivt. Injektteringsinsatsen bestämdes efter vattenförlustmätningar i sonderingshål. Injektteringsklasserna betecknades inledningsvis som 1, 1.5, 2 och 3 men definieras i rapporten efter den uppdaterade klassningen till A ($V_{fl} < 0.5 \text{ Lu}$), B ($0.5 < V_{fl} < 2 \text{ Lu}$) och C ($V_{fl} > 2 \text{ Lu}$).

Uppföljning av injekteringsarbeten har utförts med droppkartering, vattenförlustmätning och bruksmängd för totalt ca 2000 m på mellanpåslagen i Björnböle- och Namntalltunneln. Intressant är att antal dropp generellt är lågt för injekteringsklass A (resp. 1). I injekteringsklasser B och C (mer hydrauliskt konduktivt) är mängden dropp större vilket skulle kunna förklaras med att antalet sprickor med små, icke injekteringsbara, sprickvidder också ökar med ökad uppsprickningsgrad.

Vattenförlustmätningarna visar att flertalet injektteringshål har låga Lugeon-värden oavsett injektteringsklass. Injektteringsklasserna fördelar sig ungefär A:35%, B:25% och C:40%. I rapporten redovisas bruksmängdsfördelning per injektteringsklass. Intressant är den markanta skillnaden i bruksmängdsfördelning mellan de olika klasserna även om medianvärdet inte skiljer sig lika mycket. Korrelationen mellan bruksmängd och injektteringsklass (lugeonvärde) kan här ses tydligt.

Bergmassan och bruksspridningen har analyserats enligt Gustafson et al 2004, och Gustafson och Stille 2005. Beskrivning av bergmassan har i projektet utförts baserat på kärnborrhål och sonderingsborrhål. Analysprocessen har identifierat olika hydrauliska regimer i bergmassan. Intressant är att sonderingsborrhålen och en sammanslagning av kärnborrhålen ger snarlika resultat. Dock tycks inläckageberäkningen ge för stora inläckage.

Teoretisk analys av dimensionalitet har utförts på dataloggar av tryck och flöde från injektteringsriggen. Dimensionalitet är i sammanhanget ett centralt begrepp och beskriver huruvida flödet är kanalströmning (1D) eller strömning i plan (2D). Analysen visar att relativt stor andel (30-50%) av borrhålen (av analyserade klass C skärmar) indikerar strömning med högre dimensionalitet än 2D. Analys av hur injektteringsbruket sprids i bergmassan bedöms kunna ge ett bra beslutsunderlag för en bedömning av resultat och en informationsbaserad styrning av injektteringsprocessen.

Abstract

The Project "Pre-grouting – application of grouting research in the field" has aimed to bring the theoretical knowledge on sealing of fractured rock closer to practical experience and practise. This report treats the physical aspects (production follow-up) and the theoretical analysis on a selected part of the tunnel. A second stage is planned to be performed (within the framework of this project) based in the results presented in this report. Information and materials have been collected from the design-build contract E3541 (Botniabanan the stage Offersjön – Bjällstaån).

The rock tunnels in the E3541 are 5 and 6 km long (Björnböletunnel and Namntalltunnel). The average rock cover is 60 and 100 m respectively. The tunnels have for the most part been excavated in greywacke. For shorter distances the greywacke has been metamorphosed into sedimentary gneiss or migmatite. The Greywacke are characteristically densely fractured with distinct foliation joints.

The pre-grouting has been performed with a classic grouting procedure (within the follow-up time frame). I.e. the pre-grouting has been carried out with an initially higher w/c r. (1.0) and gradually lowered w/c r. to 0.8 and 0.5 until a specified maximum pressure. The grouting pressures have initially been moderate but have gradually been increased. The number of grout holes and hole configuration was decided after water loss measurements in the probe holes. Initially the grout classes were defined as 1, 1.5, 2 and 3 but have in the report been redefined in accordance with the updated classification to A (water loss < 0.5 Lu), B (0.5 < water loss < 2 Lu) and C (water loss > 2Lu).

The follow-up of the grouting works has been performed with drip leakage mapping, water loss and grout volume measurements for a total of approximately 2000 m tunnel at the mid adits of Björnböle and Namntall tunnels. The drip mapping shows that the numbers of drip are generally low for grout class A (and 1). In grouting classes B and C (more hydraulic conductive) the amount of drips is greater which can be explained by the fact that the number of small fractures with non-groutable fracture widths also increases with an increased degree of fracturing.

The water loss measurements show that the number of holes with low water loss values is large even for grouting classes B and C. The grout classes are distributed approximately as A:35%, B:25% and C:40%. In the report the grouted volume is presented per grout class. It is interesting to note the marked difference in grout volume distribution between the different classes even if the median does not differ as much. The correlation between grouted volume and grout class (lugeon value) can here be visibly seen. The rock mass and the spread of the grout have been analysed according to Gustafson et al 2004 and Gustafson and Stille 2005. The analysis of the rock mass has in the project been carried out for the core holes and for the probe drill holes. The analysis process has identified different hydro-geological regimes in the rock mass. It is interesting that the probe holes and the combined core holes give about equal results. This indicates that the analysis process can provide a good description of the rock mass. However, the leakage calculation seems to give too great inflow.

The theoretical analysis of the dimensionality has been performed on data logs of pressure and grout flow from the grout rig. The analysis show that a relative large part of the holes in grout class C (30 – 50%) shows larger than 2D-flow. The analysis of how the grout spreads in the rock mass is judged to provide a good basis for a sound judgment of the results as well as a basis for an information based control of the grouting process.

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte.....	1
1.3	Avgränsningar.....	2
1.4	Metodik.....	2
1.5	Projekt E3541.....	3
2	Förutsättningar.....	7
2.1	Geologi.....	7
2.1.1	Allmänt.....	7
2.1.2	Geologisk bakgrund.....	7
2.1.3	Bergarter.....	8
2.1.4	Strukturgeologi.....	8
2.2	Injekteringsprocedur.....	10
2.2.1	Injekteringsklasser.....	10
2.2.2	Injekteringsutförande/stoppkriterier.....	13
2.2.3	Borrning för injektering.....	15
2.2.4	Injekteringsbruk.....	16
3	Datainsamling och injekteringsuppföljning.....	19
3.1	Metodik.....	19
3.2	Uppföljningssträcka Björnböle Mellan (516+640 – 517+820).....	20
3.2.1	Droppkartering.....	20
3.2.2	Vattenförlustmätning (vf).....	21
3.2.3	Bruksmängd.....	24
3.2.4	Förbindelse mellan hål.....	28
3.3	Uppföljningssträcka Namntall Mellan (505+900 – 506+840).....	29
3.3.1	Droppkartering.....	29
3.3.2	Vattenförlustmätning.....	31
3.3.3	Bruksmängd.....	33
3.3.4	Förbindelse mellan hål.....	39
3.4	Slutsatser av inledande injekteringsuppföljning.....	40
4	Teori.....	41
4.1	Allmänt.....	41
4.2	Geohydrologisk beskrivning av bergmassan.....	41
4.3	Dimensionalitet och inträngningslängd.....	44
4.3.1	Analytisk lösning av funktioner för inträngningslängd.....	46
4.3.2	Funktioner för injekterad volym.....	47
4.3.3	Utvärdering av dimensionalitet med diagnoskurvor.....	48
4.3.4	Stoppkriterium.....	49
5	Beräkningar.....	51
5.1	Kämborrhål – Sprickfördelning (Pareto).....	51
5.2	Injekterings- sonderingsborrhål – Sprickfördelning (Pareto).....	57
5.2.1	Hydraulisk sprickviddsfördelning.....	58
5.2.2	Beräkning av inläckage och behov av tätningssats.....	60
5.3	Dimensionalitet och inträngningslängd.....	63
5.3.1	Dimensionalitetsanalys.....	63
5.3.2	Inträngningslängd, känslighetsanalys.....	69

5.4	Dimensionalitet och inträngningslängd som underlag för projektering.....	72
5.4.1	Injekteringsdesign med avseende på dimensionalitet	72
5.4.2	Bestämning av designparametrar utifrån samband mellan inträngningslängd och injekteringstid	72
6	Slutsats	79
6.1	Direkta observationer och slutsatser	79
6.2	Teoretiska analyser och slutsatser	79
6.3	Förslag till vidare studier (alternativt i etapp 2).....	80
7	Referenser.....	83

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Trots betydande forskningsinsatser finns alltså ett glapp mellan teoretiska forskningsresultat och kunskap om hur dessa nyttjas vid praktisk tunneldrivning. Även vid utformandet av bygghandlingar och kraven i dessa verkar det som om ett betydande avstånd finns mellan tillämpning av forskningsresultat och förståelse för produktionsprocessens styrkor och begränsningar. Motstridiga krav och krav som enbart baseras på laboratorieresultat försvårar hanteringen av injekteringsfrågor i byggprocessen och relationen mellan beställare och entreprenör. Med de höga täthetskrav som ställs idag (och framförallt för framtidens urbana tunnlar) måste produktionsprocessen anpassas ytterligare för att uppfylla de höjda kraven och även anpassa sina insatser avseende utrustning och organisation. Forskningsresultatets införande i praktiken är alltså inte okomplicerat vare sig för beställare, entreprenörer eller konsulter. Några frågor som ställs och som diskuteras i rapporten är:

- Vad betyder täthetskravet för val av injekteringsmedel (samt dess egenskaper)
- Vad betyder injekteringsmedlets egenskaper för inträngningslängden och val av stoppkriterier
- Vilken utrustning krävs för att nå avsedda bruksegenskaper.

Projektet är baserat på diskussioner i en arbetsgrupp där representanter från industri och högskolor deltagit. Rådande kontraktsformer har tidigare visat sig kunna vara ett hinder för denna typ av fältanknutet forskningsprojekt. Inom totalentreprenad E3541 (Botniabanan etapp Offersjön – Bjällstaån) har dock konstruktör, entreprenör och beställare samverkat till att forskningsprojektet blivit möjligt att genomföra.

1.2 Syfte

Projektets övergripande syfte var att aktivt bidra till kunskapsöverföring av injekteringsforskningsresultat i nära samverkan och dialog med arbetsorganisationen i ett tunnelprojekt under pågående produktion.

Projektet syftade även till att pröva användbarheten av utförd forskning som ett verktyg för att tolka injekteringsprocessen och tätningsresultaten till nytta främst för fortsatt injekteringsarbete men också för fortsatt forskning.

Projektets mål var därmed att minska avståndet mellan forskning och produktion och att pröva om förbättringar av injekteringsarbetena som teoretiskt kan motiveras också kan tillgodogöras i produktionen.

1.3 Avgränsningar

Rapporten behandlar ej kravställning i sig avseende exempelvis täthetskravs relevans. Ej heller behandlas kontraktsmässiga avvikelser vare sig ur geologiskt eller entreprenörens/beställarens perspektiv.

Uppföljning har i denna rapport utförts för mellanpåslagen där rimligt likartade förutsättningar finns avseende exempelvis bergtäckning, grundvattennivå etc.

Teoretiska analyser är utförda enligt Gustafson et al, ref.[1], samt enligt Gustafson och Stille, ref.[2].

I de teoretiska beräkningarna används injekteringsbrukens reologiska egenskaper bestämda på laboratorium.

I denna rapport har inte filtreringstabilitet som ett mått på inträngningsförmåga analyserats. I de fall där minsta injekterbara sprickvidd eller där erforderlig $b_{kritisk}$ nämns, har tumregler nyttjats.

Produktionsuppföljning har utförts för Namntall Mellanpåslag sektion 505+887-506+788 och Björnböle Mellanpåslag sektion 516+644 – 517+814.

1.4 Metodik

Detta projekt var ursprungligen uppdelat i två etapper där etapp 1 motsvarade denna rapport. Etapp 2 planerades som ett injekteringsförsök baserat på resultaten och analyserna från denna rapport.

Nedan behandlas enbart metodik för innehållet i denna rapport (etapp 1).

Projektet (etapp 1) är uppdelat i två delar:

1. I den första delen redovisas en produktionsuppföljning med
 - a. droppkartering
 - b. vattenförlustmätning
 - c. bruksåtgång

2. I den andra delen är en teoretisk fördjupning utförd med
 - a. beräkning av sprickfördelning och teoretisk tätningseffekt
 - b. beräkning av dimensionalitet (bruksflödesväg 1D och 2D) samt inträngningslängd

För del 1 har indata från injekterings- och vattenförlustsprotokoll sammanställts. För del 2 tillkom indata från produktionsuppföljningen, kärnborrhål samt från Logac-filer (digital injekteringsdata obehandlad från injekteringsriggen).

Rapporten har följande kapitelindelning:

1. Inledning (Beskrivning av bakgrund, mål och projektförutsättningar)
2. Förutsättningar (Beskrivning av geologi och tillämpad injekteringsmetodik)
3. Produktionsuppföljning (Del 1 i projektet)
4. Teori (Del 2 i projektet)
5. Beräkningar (Del 2 i projektet)
6. Slutsatser

1.5 Projekt E3541

Den 27 november 1997 träffades genom huvudavtal mellan Svenska staten, kommunerna längs Botniabanan samt Västernorrlands- och Västerbottens läns landsting en överenskommelse om att gemensamt bilda Botniabanan AB för att ansvara för projektering och byggande av projektet Botniabanan som omfattar en ny enkelspårig järnväg mellan Nyland i Kramfors kommun och Umeå i Umeå kommun. Banverket svarar för planering av järnvägen fram till järnvägsplan, anskaffning mark och inhämtande av erforderliga tillstånd.

Den aktuella entreprenaden mellan Offersjön och Bjällstaån (E3541) omfattar kompletta anläggningsarbeten för ca 32 km järnväg. Entreprenaden ansluter i söder till bro över Offersjön och avslutas i norr med bro över Bjällstaån. I Tabell 1 presenteras allmän information om projektet.

Tabell 1. E3541, Allmän kontraktsinformation.

Entreprenör	Skanska Sverige AB
Entreprenadform	Totalentreprenad
Kontraktsumma	1,3 miljarder
Byggtid	November 2003 – hösten 2007
Avsnitt totalt	497+400 – 529+240 (totalt 32 km höghastighetsjärnväg inklusive 2 st järnvägstunnlar med en sammanlagd längd av 11 km och 8 st järnvägsbroar med en sammanlagd längd av 300 m)
Jordschakt	ca 1 800 000 m ³
Bergschakt	ca 300 000 m ³
Bankfyllnad	ca 850 000 m ³
Underballast	ca 750 000 m ³

Projekt E3541 består av 6 anläggningsdelar, Tabell 2, där anläggningsdel 2 och 4 är undermarksdelar här betecknade Namntallstunneln och Björnböletunneln.

Tabell 2. Anläggningsdelar

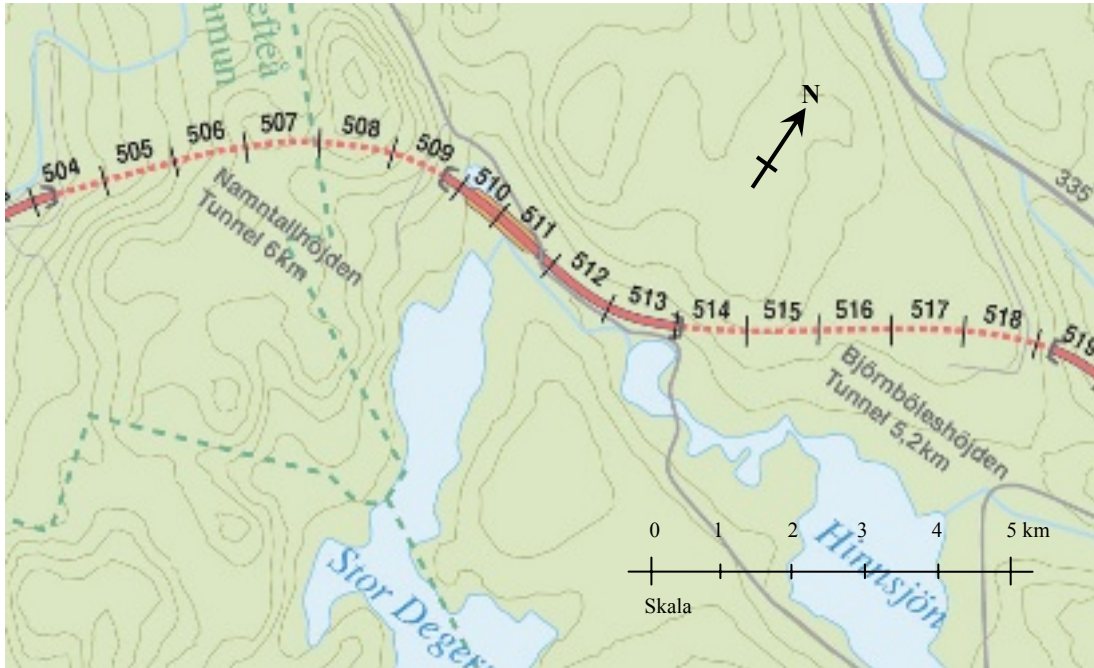
1	Terrass från Offersjön till skärning för tunnelpåslag Namntallstunneln
2	Namntallstunneln inklusive tunnelpåslag och skärningar
3	Terrass från skärning för tunnelpåslag Namntallstunneln till skärning för tunnelpåslag Björnböletunneln
4	Björnböletunneln inklusive tunnelpåslag och skärningar
5	Terrass från skärning för tunnelpåslag Björnböletunneln till och med bro över Hinnsjöån
6	Terrass från bro över Hinnsjöån till och med bro över Bjällstaån

Vardera tunnel består av en huvudtunnel på (65 m²) och en parallell service tunnel (35 m²). Namntallstunneln är 6000 m lång och har en bergtäckning om som mest 172 m. Björnböletunneln är 5000 m lång och har en bergtäckning om som mest 84 m.

I Figur 1 och Figur 2 visas kartutdrag över tunnelarna. Tunnelarna går mellan sektion 503+985 och 509+986 (Namntallstunneln) samt 514+085 och 519+085 (Björnböletunneln).



Figur 1. Nordost om Kramfors flygplats återfinns först Namntallstunnel sedan Björnböletunneln.



Figur 2. Namntallstunnel sektion 504-509 och Björnböle 514-518

2 Förutsättningar

2.1 Geologi

2.1.1 Allmänt

Området mellan Offersjön och Bjällstaån kan karaktäriseras som bergkullterräng. Denna terräng bildar ett storkuperat landskap med tätt liggande bergshöjder. De tektoniska linjerna kan på många ställen i bergkullterrängen observeras som bergpartier med raka sidor, åtskiljda av djupa sänkor. Bergarten består huvudsakligen av en metagråvacka. Inslag av pegmatit, diorit och granit kan förväntas. Huvudsprickriktningen är tolkad till N60V och brant stående. I de sprickarteringarna finns även ett system (brant stående lagrings- eller förskiffringsplan) som sammanfaller med tunnelns huvudriktning.

Generellt antas metagråvackan ha en E-modul på 10-34 GPa samt en tryckhållfasthet på 8-15 MPa. Bergmaterialets enaxiella tryckhållfasthet har utvärderats till 100 MPa.

Bergmassans ostörda spänningsnivå längs tunnelinjen antas som högst ligga på cirka 10-15 MPa för Namntallhöjden och 5-7,5 MPa för Björnböleshöjden.

Bergmassan i projektområdet beräknas generellt ha en täthet (hydraulisk konduktivitet) på $1 \cdot 10^{-7}$ m/s eller mindre. Beräkningarna är baserade på de sonderingshål som utförs i samband med injektering och redovisas i kapitel 5.2. Ytberget har vid provpumpningar utvärderats som mer genomsläppligt i storleksordningen $5 \cdot 10^{-7}$ m/s (hydraulisk konduktivitet).

2.1.2 Geologisk bakgrund

Material till den geologiska beskrivningen är i huvudsak hämtat från ”Beskrivning till Berggrundskartan över Västernorrlands Län”, Lundqvist (1990), samt från observationer i fält.

Berggrunden tillhör det prekambriiska urberget och bildades mellan 900 och 2500 miljoner år sedan (proterozoikum). Urberget har till övervägande del uppkommit i samband med den svekokarelska bergskedjebildningen för ca 1820-1850 miljoner år sedan. Före bergskedjeveckningen avsattes stora mängder sedimentmaterial i det dåtida havet. Under sedimentationen skedde i vissa områden vulkanutbrott, som till övervägande del givit lavar och tuffer. I de så bildade sedimentära och vulkaniska bergarterna trängde stora volymer magma in och stelnade till de primorogena urgraniterna.

Berggrunden sammanpressades därefter och veckades. De ursprungliga skikten i ytbergarterna kom därvid att inta mer eller mindre brant uppresta lägen. Under veckningen utsattes bergarterna för höga tryck och temperaturer, så att de omvandlades (metamorfoserades). Delar av berggrunden förgnejsades och utsattes för så höga temperaturer och tryck att sedimenten började smälta och gav upphov till blandbergarter mellan gnejs och granit, s.k. migmatiter. På större djup alstrades stora mängder granitiska smältor, som sedermera rörde sig uppåt och kristalliserades till de serorogena graniterna med åtföljande pegmatiter. Efter detta rådde tämligen lugna förhållanden i berggrunden, med sprickbildningar, förkastningar och sedimentär avsättning. I ett sent skede, för ca 1200 miljoner år sedan, trängde stora mängder diabasmagma in i jordskorpan och bildade dels flacka täcken av upp till några

hundra meters mäktighet, dels smala, branta sprickfyllnader (gångar). Såvitt man nu vet saknas bergarter bildade under de nästföljande tidsavsnitten, för 1200-800 miljoner år sedan, då följaktligen inga mer dramatiska omvälvningar tycks ha skett i berggrunden i denna del av Sverige. Efter några hundra miljoner år inleddes så den utveckling som så småningom ledde fram till vår skandinaviska fjällkedja. En kontinentalkollision med åtföljande stark hopskjutning av sedimentpackarna resulterade (under silur) i de stora vecknings- och överskjutningsprocesser som utgjorde huvudfasen i den kaledoniska fjällkedjans bildning.

2.1.3 Bergarter

Gråvacka

I Västernorrlands län är den helt övervägande ytbergarten en, i olika stadier, omvandlad *gråvacka* (metagråvacka), dvs en sedimentbergart som bildats genom avlagring av sand uppblandad med relativt stor mängd lera. Med termen *gråvacka* avses en sandsten med mer än 15% lerig matrix. En karakteristisk småsprickighet är allmänt förekommande i gråvackorna. I området kring Stor-Degersjön (strax öster om Namntallhöjden) finns exempel på gråvackor, där ursprungliga sedimentära drag är välbevarade trots veckning och metamorfos. De välbevarade gråvackorna är finkorniga och till färgen gråsvarta till grå med en lätt blågrå anstrykning. De leriga skikten har pga sin högre glimmerhalt en mörkare gråsvart färg. De har av samma anledning en betydligt mer utpräglad skiffrihet, normalt parallell med lagringen, än sandstensskikten. Allmänt förekommande är sk graderad skiktning, i vilken en från botten och uppåt i ett skikt systematiskt avtagande kornstorlek kan ses. Ett karakteristiskt drag hos gråvackorna är förekomsten av skarlinser (metamorfoserade karbonatkonkretioner), som alltid uppträder i de sandiga skikten. Vissa av de leriga skikten kan vara rika på grafit ("svartskiffrar") och sulfider, främst magnetkis och svavelkis men även kopparkis.

Sedimentgnejs och Migmatit

De välbevarade metasedimenten av gråvackeursprung kan i många områden i länet ses övergå i starkare omvandlade, förgnejsade och migmatiserade motsvarigheter. Övergångarna från välbevarade till migmatiserade metasediment är gradvisa och sker på avstånd varierande från några hundra meter till kilometer. Förgnejsningen av gråvackor innebär en förgrovning till kornstorlekar som vanligtvis ligger mellan 0,5 och 1 mm, samt att olika mineralkomponenter ofta är segregerade i band eller strimmor. Den i skiffrar, fylliter och glimmerskiffrar normalt regelbundna klyvbarheten till relativt jämna skivor försämras också. Gnejserna ger därför vanligen mer oregelbundet begränsade plattor med skrovligare ytor. De saknar också den för de välbevarade gråvackorna karakteristiska småsprickigheten.

Intrusivbergarter

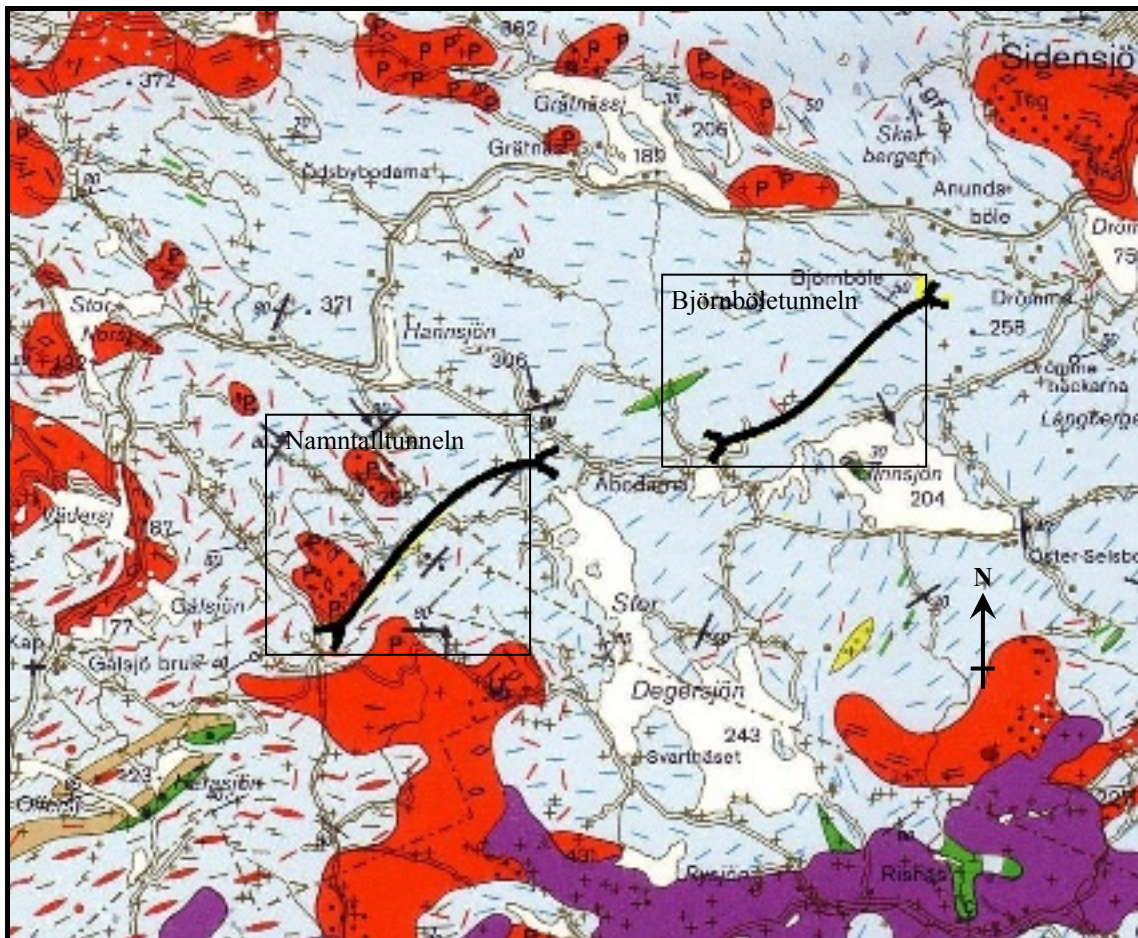
Vissa intrusivbergarter, graniter och pegmatiter, har bildats i tiden efter de stora veckningarna och den regionala metamorfosen. För gråvackornas del har dessa intrusioner i många fall bara inneburit en relativt lokal omkristallisation nära kontakterna. De yngre graniterna har motstått erosion bättre än framförallt de välbevarade gråvackorna, varigenom de blivit överrepresenterade i håll och därför också får stor dominans på de geologiska kartorna.

2.1.4 Strukturgeologi

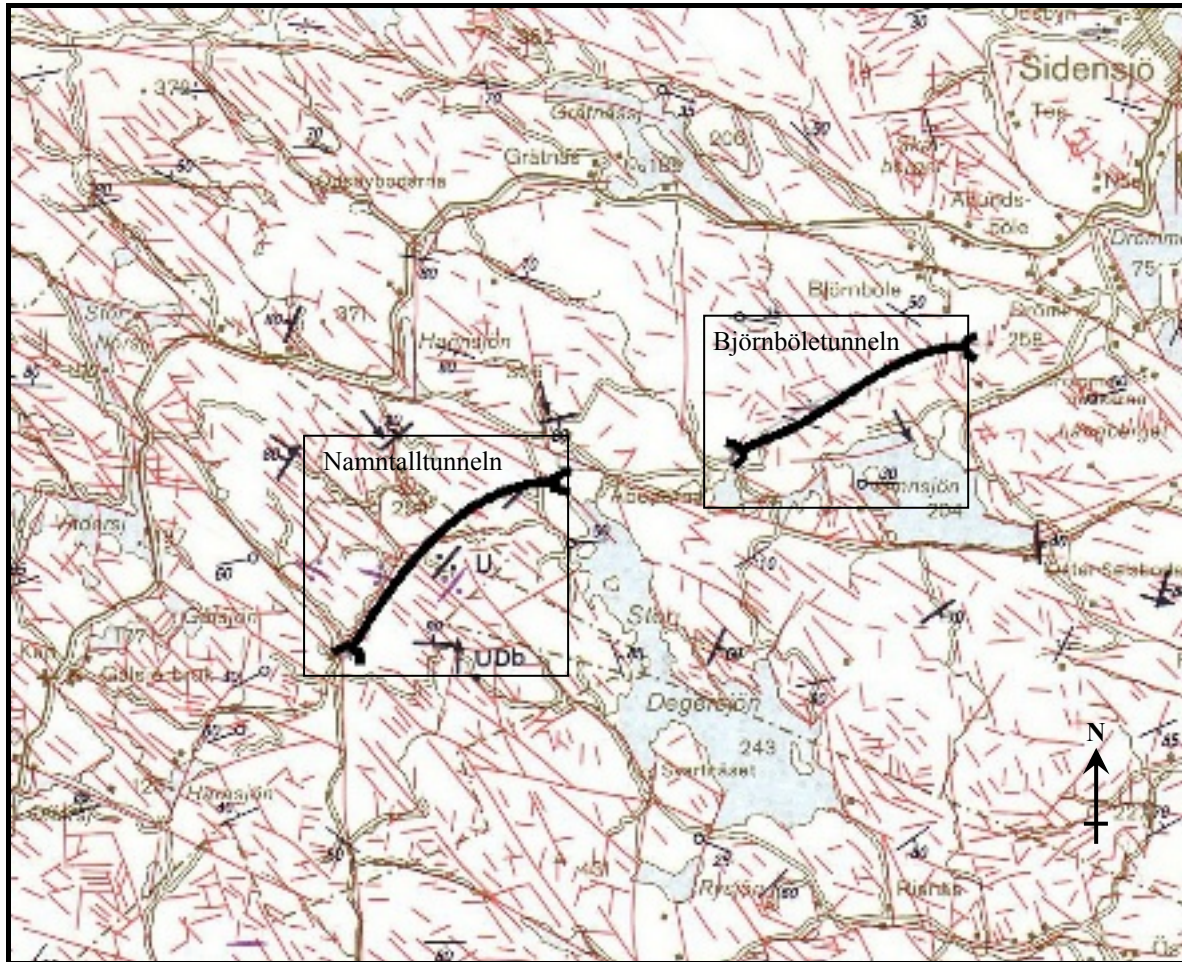
Lineament, dvs raka linjer i landskapet, framgår av den strukturgeologiska kartan (Figur 4), och av denna framgår att övervägande NV-SO strukturer finns i området. Man bör dock

beakta att detta överensstämmer med isrörelseriktningen under den kvartära nedisningen vilket kan ge en överrepresentation för denna riktning.

Flertalet sprickor och förkastningar är mycket gamla och man kan på goda grunder förmoda att rörelser i senare tid ofta följt existerande strukturer. Längs vissa sprickor har en bildning av lermineral skett. Leromvandlingen är vanligt förekommande i hela projektområdet (möjligen med undantag av Namntalltunnelns norra påslag). För Namntalltunnelns södra påslag har svällande lermineral upptäckts.



Figur 3. Geologisk karta över projektområdet. Den ljusblå färgen är gråvacka och den röda pegmatit eller migmatit/sedimentgnejs. De blå strecken i gråvackan motsvarar riktningen på förskiffringsplanen.



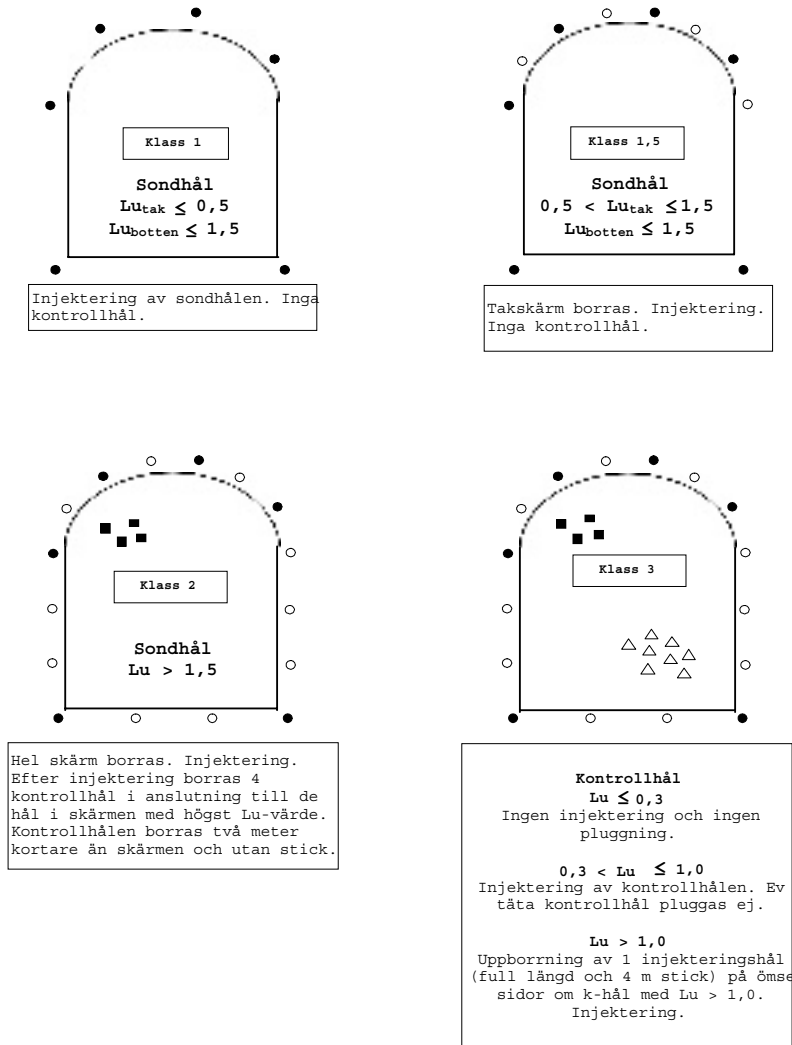
Figur 4. Strukturgeologisk karta över området. Huvudsprickriktningen i området är NV-SO.

2.2 Injekteringsprocedur

2.2.1 Injekteringsklasser

Injekteringsutförandet i entreprenaden har definierats (ursprungligen i kontraktshandlingen och därefter inom ramen för totalentreprenaden) utifrån en klassificering av bergmassan. Denna baseras på vattenförlustmätningar i ett antal sonderingshål. Den ursprungliga indelningen i injekteringsklasser från 2004-12-09 redovisas i Figur 5. Anpassning av antal injekterings- och sonderingshål har successivt utförts under projektets gång. Från 2005-04-26, se Figur 6, genomfördes en större förändring av injekteringsförfarandet och injekteringsklasser A, B och C infördes. Kortfattat ersattes tidigare injekteringsklasser 1 och 1,5 med A; 2 med B; och 3 med C. Dessutom sänktes gränsvärden (vattenförlustmätning) för respektive klass. Under januari månad 2006 infördes ytterliggare fler injekteringshål och byte av injekteringscement. Denna förändring berörs dock ej i denna uppföljning.

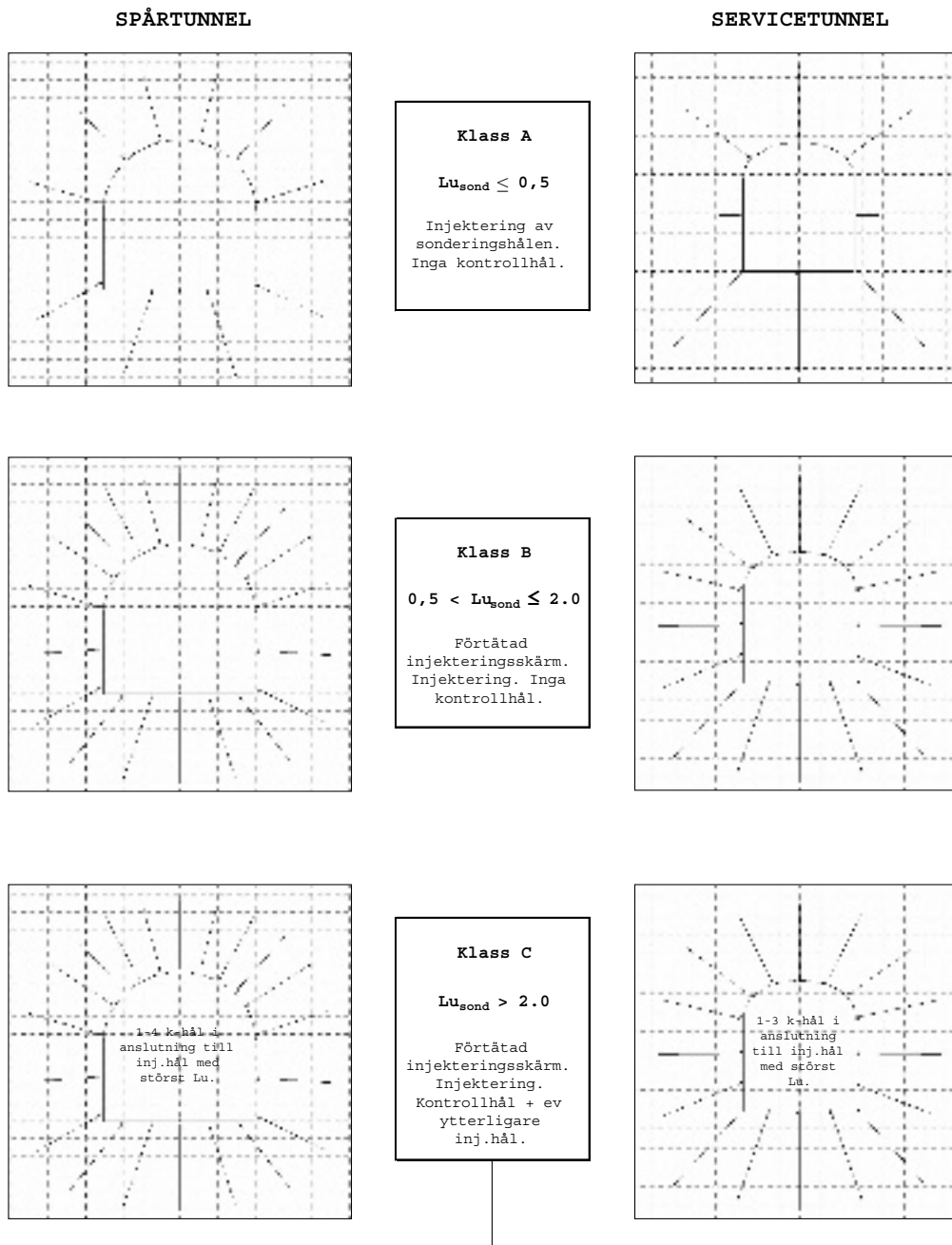
INJEKTERINGSKLASSER SPÅRTUNNEL



Figur 5. Injekteringsklass från och med 2004-12-09

Om Lugeonvärdet i något hål är större än angivet maxvärde för klassen, väljs en högre klass. Kontrollhål görs endast i klass 2. Om vattenförlust i kontrollhål är större än angivet gränsvärde så utförs injektering enligt klass 3.

INJEKTERINGSKLASSER -



Figur 6. Injektteringsklass från och med 2005-04-26

Injektteringsklasser uppdaterades efter att inläckaget i framförallt Björnböletunnlarna generellt var större än krav enligt handling. Injektteringsklasser 1, 1,5, 2 och 3 byttes från och med 2005-04-26 mot A, B och C klasser.

Sammanfattningsvis innebar förändringen att:

- Antalet injekteringsklasser minskades från 4 till 3.
- Antalet sonderingshål ökades från 6 till 10.
- Antalet injekteringshål ökades från 6, 10 respektive 16 beroende på injekteringsklass till 10 eller 20.
- Enligt det gamla utförandet så valdes injekteringsklass beroende av om högt Lugeonvärde erhöles i tak respektive botten av stoffen. Injekteringsklass A, B eller C väljs oberoende av om vattenförlusten registrerats i tak eller botten.
- Om Lugeonvärdet är över 2.0 i något av sonderingshålen följs injekteringsresultatet i spårutlarna upp med 4 stycken kontrollhål (klass C). Ger dessa $Lu > 0,5$ så skall injekteringen kompletteras, omfattning bestäms på plats. Kontrollhål borras med halvt stick (klass C).

Under entreprenad tiden genomfördes ett stort antal justeringar av borrhållplaner och gränsvärden för injekteringsklasser. I detta forskningsprojekt har endast de redovisats som varit aktuella under uppföljningstiden. Såväl sonderingshål som injekteringshål injekterades

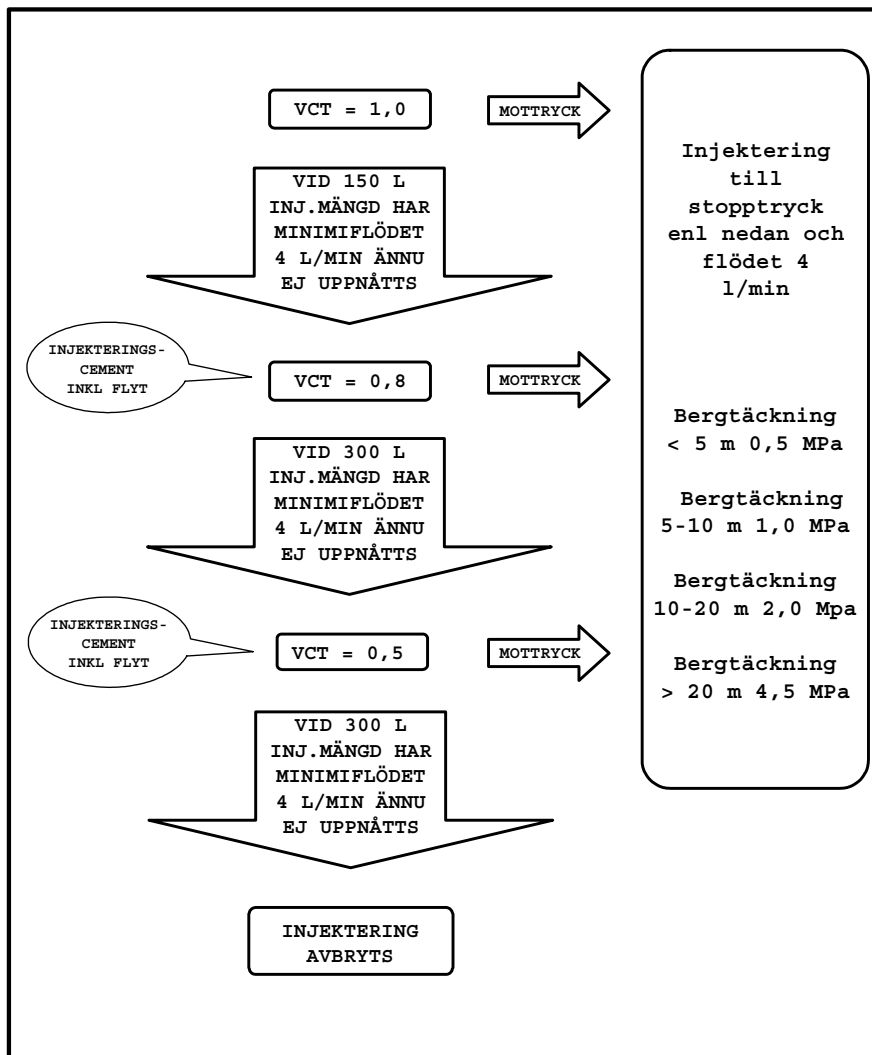
2.2.2 Injekteringsutförande/stoppkriterier

Injekteringsutförandet redovisas i Figur 7 och baserades på entreprenörens erfarenhet. Med injekteringsutförande avses här angiven bruksblandning, vct, och gränsvärden för byte av vct. Gränsvärden baserades på injekterad volym och flöde.

Maximalt injekteringsstryck, $P_{g \max}$, definierades normalt som 4,5 MPa totaltryck. Vid mindre bergtäckning, H, anpassades trycket enligt Figur 7.

Injekteringen avslutades när något av stoppkriterierna uppfyllts: Maxtryck och minimiflödet 4 l/min, alternativt efter att 300 liter vct 0,5-bruk pumpats in i borrhålet.

INJEKTERINGSUTFÖRANDE



Detta är grundprincipen för hur injektering skall utföras. Vid onormala bergförhållanden får injekteraren tillsammans med ansvarig arbetsledare fatta beslut om förändringar. Det skall alltid framgå av injekteringsprotokollet hur injekteringen utförts.

Figur 7. Injekteringsutförande daterat 2004-10-20.

2.2.3 Borrning för injektering

Injekteringshålen borrades med en diameter om 64 mm. Hållängden varierades generellt mellan 21 meter och 24 meter. Borrhålets avstånd (vid fullt håldjup) från teoretisk tunnelkontur var från 2005-04-26 satt till 4 meter i tak och 5 meter i botten.

Borrning av salv- och kontrollhål fick inledningsvis påbörjas tidigast då injekteringsbruket uppnått en skjuvhållfasthet på 5 kPa mätt med fallkon enligt SS 02 71 25. Kortare väntetid kunde accepteras om det kunde påvisas att borrningen inte negativt påverkade den utförda injekteringen. Fallkonsprover utfördes i samband med förprovningen. Med bland annat tunnarna vid Åskottsberget som referens accepterade Beställaren en minsta väntetid på 2 h efter avslutad injektering.

Vid borrning användes MWD, Measurement While Drilling för att logga borrarparametrar som borrsjunkning, rotationstryck, vridmoment, matningstryck, spolvattentryck och spolvattenmängd.

Innan injekteringen påbörjades renspolade hålen med högtryck 1,2 MPa före vattenförlustmätning till dess att spolvattnet var rent från borkax. Renspolning utfördes med borrhjulen.

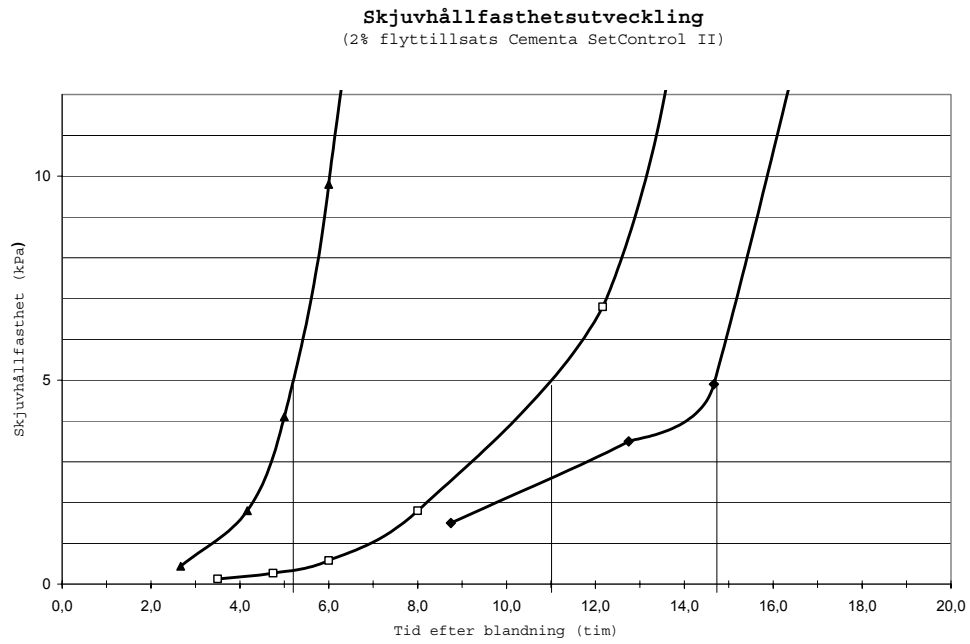
2.2.4 Injekteringsbruk

Tätningen utfördes med ett cementbruk baserat på Injektering 30 som har kornstorleksfördelning där minst 95 % är mindre än 30 μm . Ett antal riktvärden för bruket från förprovnigen specificerades enligt Tabell 3.

Tabell 3. Riktvärden för bruksegenskaper

Egenskaper	Bruk baserat på Injektering 30 vct 0,5	Bruk baserat på Injektering 30 vct 0,8	Bruk baserat på Injektering 30 vct 1,0
Tillsats	2% Setcontrol II	2% Setcontrol II	2% Setcontrol II
Densitet [kg/m^3]	1780	1580	1500
Marschtid [s]	42	32	32
Filtreringsstabilitet maskvidd 125 μm [ml]	---	300	300
Vattenseparation [%]	---	1,4	1,3
Enaxlig tryckhållfasthet efter 28 dygn (SS 137220)	30	18	14
Tid för att uppnå Skjuvhållfasthet 5 kPa [timmar]	5	11	15
Skjuvhållfasthet vid 24 h [kPa]	≥ 155	130	48

I Figur 8 redovisas de från förprovnigen uppmätta skjuvhållfasthetstillväxterna för 3 olika blandningar av Injektering 30 med vct 0,5 vct 0,8 och vct 1,0. Som framgår är det stor skillnad i hållfasthetsutvecklingen beroende på vct. För vct 0,5 tar det ca 5 timmar att uppnå 5 kPa medan det för ett bruk med vct 1,0 tar 15 timmar för att uppnå 5 kPa. De nedan redovisade hållfasthetsutvecklingarna gäller med en tillsats av 2 % Cementa Set Control II.



Figur 8. Skjuvhållfasthets tillväxt för bruk med Set Control II.

3 Datainsamling och injekteringsuppföljning

3.1 Metodik

Datainsamling och en inledande injekteringsuppföljning utfördes på två delsträckor om ca 1000 m vardera i tunneldelarna Björnböle Mellan och Namntall Mellan.

De mätparametrar som omfattas av denna inledande uppföljning är:

- Dropp (karterat antal dropp per 10 m tunnelsträcka efter injektering)
- Vattenförlust, vf (Lugeon, 1 LU=1 l/(min·m·MPa))
- Bruksmängd per bormeter inklusive hålfyllnad (ca 3 l/bm)

På basis av den inledande uppföljningen valdes en kortare delsträcka (100 m) för en mer detaljerad uppföljning, se nedan.

Som framgår av föregående kapitel så är injekteringsutförandet indelat i tre injekteringsklasser som valdes utifrån uppmätta värden på vattenförlust i borrhål.

Med utgångspunkt från vald injekteringsmetodik och kriterier för val av injekteringsklass har uppföljda mätparametrar sammanställts och presenterats i diagram. Diagrammen analyserades i syfte att utreda:

- a) om det finns något samband mellan uppmätt vattenförlust och mängd injekterat bruk (bruksmängd)
- b) om det är någon skillnad mellan tillämpade injekteringsklasser avseende bruksmängd och karterade antal dropp
- c) om det går att identifiera problem vid utförd injektering som kan vara orsak till minskad tätningseffektivitet.

Analyserna är utförda i excel och tillämpade statistiska metoder är bland annat histogram och spridningsdiagram.

En detaljerad uppföljning av en kortare delsträcka innehållande geologisk kartering, bergklassificering, droppkartering och bruksmängd redovisas i appendix 01. Denna uppföljning omfattar ca 200 m och har använts som diskussionsunderlag vid övriga utvärderingar. Vid val av tunnelsträcka för detaljerad uppföljning har följande beaktats:

- Uppföljningssträcka skall vara minst 100 m
- Förinjektering skall vara utförd efter 2005-04-26 (injekteringsklasser A-C)
- Sträckan skall omfatta samtliga injekteringsklasser

Den sträcka som valts för detaljerad uppföljning är Björnböletunneln sektion 517+700 – 517+800.

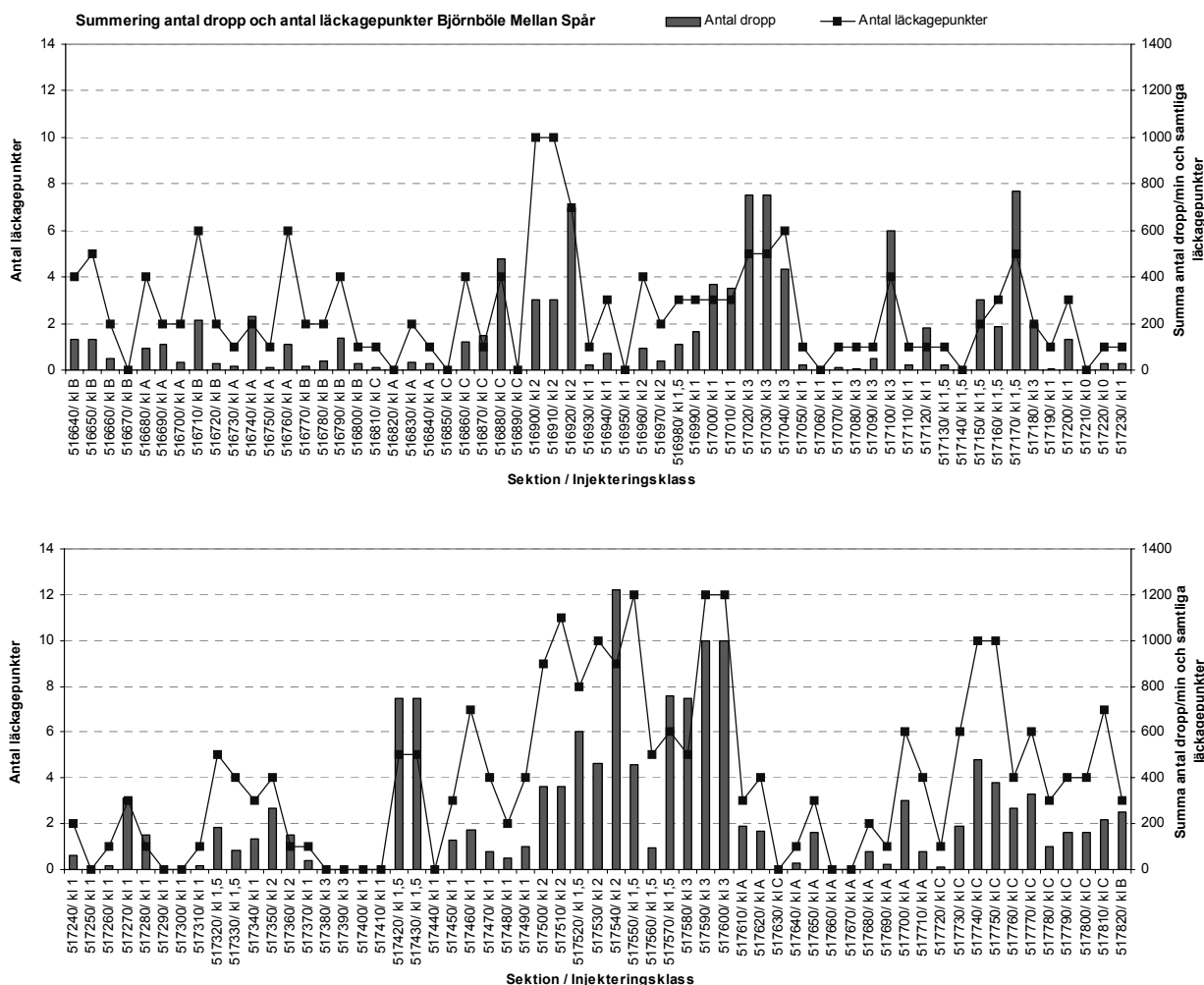
I kapitel 5 (del 2) utvärderas dimensionalitet och inträngningslängd baserat på loggat injekteringstryck och flöde från den detaljerade uppföljningssträckan.

3.2 Uppföljningssträcka Björnböle Mellan (516+640 – 517+820)

3.2.1 Droppkartering

Droppkartering har utförts i spårtunnelns tak och omfattar läckagepunkter, dropp från berg, rinnande läckage från berg, dropp från läckande bult eller bulthål, droppande bult eller bulthål, och rinnande bult eller bulthål. Vid tolkning av dessa data har summan av antalet droppar per minut beräknats med gruppering på varje tiometerssektion. Vid summering har approximationer (antaganden) använts för:

- a) rinnande läckagepunkt, bult eller bulthål: 150 droppar per minut,
- b) droppande bult eller bulthål: 30 droppar per minut, och
- c) läckande bult eller bulthål: en droppe per minut.



Figur 9. Droppkartering Björnböle Mellan. Läckagepunkter kan utgöras av droppande eller rinnande berg och läckande eller rinnande bult/bulthål.

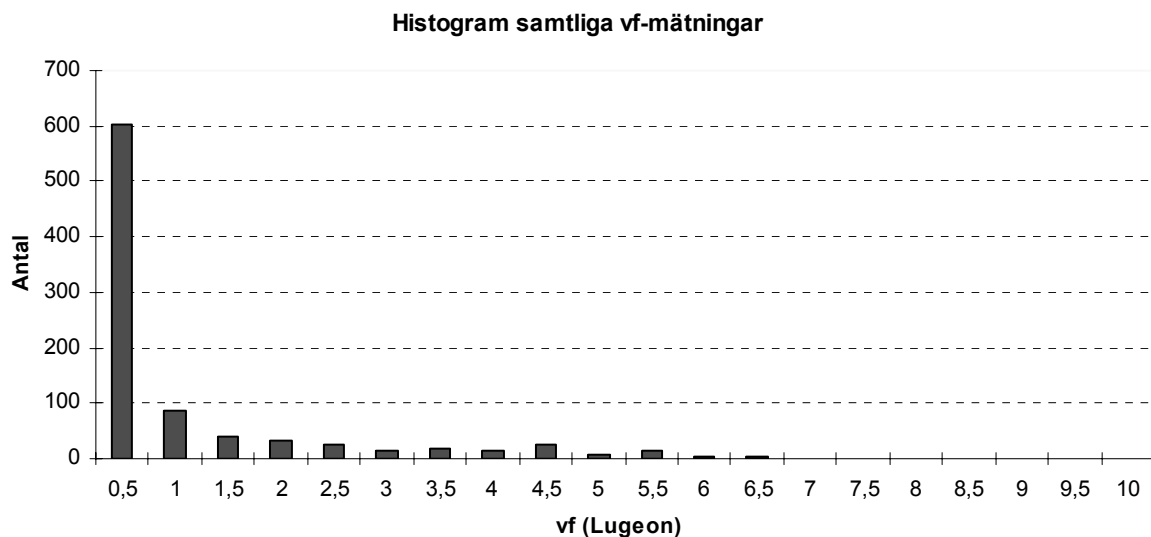
Diagrammet i Figur 9 visar summering av antal dropp och antal läckagepunkter per tiometerssektion med ovanstående approximationer (antaganden) och angivande av vilken injekteringsklass som injekteringen i aktuell sektion utförts i. Det finns ett visst samband mellan låg injekteringsklass och få antal karterade dropp, vilket förefaller ganska naturligt eftersom de lägre klasserna använts i sektioner med initieilt låga vattenförluster och därmed små inläckage. Områden med ett stort antal karterade dropp och läckagepunkter förekommer i zoner från 10m upp till 100m.

3.2.2 Vattenförlustmätning (vf)

Vattenförlustmätning utfördes med vatten från borrarad brunn ovan jord som leddes genom självtryck till tunnelfront. Mätutrustningen bestod vanligen av digital vattenflödesmätare och analog manometer. Möjligt mätintervall i den digitala vattenflödesmätaren var 2 till 38 l/min.

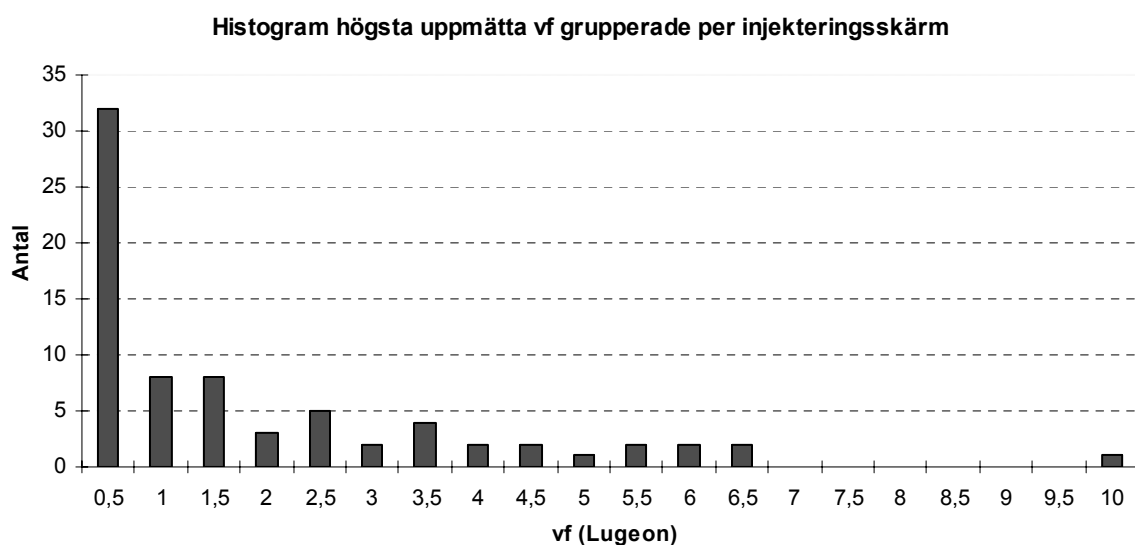
Exempelvis för ett 20 m långt borrhål och med 0,5 MPa övertryck motsvaras detta av 0,2 – ca 4 Lugeon (l/(min·m·MPa)).

Mätprotokoll fördes manuellt med avlästa värden vid stationära flöden.



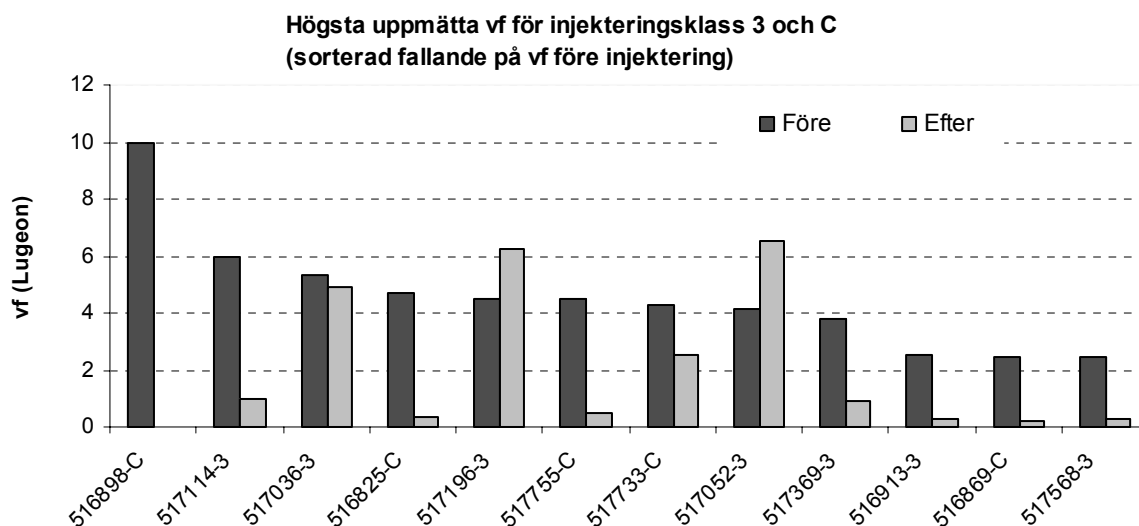
Figur 10. Histogram över samtliga vattenförlustmätningar

Histogram i Figur 10 visar att vattenförlusten varierar mellan 0 och 10 Lugeon (mätningar har i praktiken utförts med något olika metodik ex. kortare borrlängd vilket påverkat mätgränserna ref. exemplet ovan). Av totalt 889 mätvärden är 601 (68 %) mindre än eller lika med 0,5 Lugeon, 129 (15 %) mätvärden ligger i intervallet 0,5 till 2 Lugeon och 159 (18 %) mätvärden är större än 2 Lugeon.



Figur 11. Vattenförlust, grupperad efter högsta mätning i varje injekteringskärm

I Figur 11 är mätvärdena grupperade per injekteringskärm och histogrammet redovisar högsta uppmätta vattenförlust för respektive injekteringskärm. Av totalt 74 injekteringskärm har 32 (43 %) skärmar högsta vattenförlust som är mindre än eller lika med 0,5 Lugeon, 16 (22 %) skärmar ligger i intervallet 0,5 till 2 Lugeon och i 26 (35 %) skärmar är högsta uppmätta vattenförlust större än 2 Lugeon.



Figur 12. Vattenförlust, högsta mätning före och efter injektering i respektive skärm

I Figur 12 redovisas den högsta uppmätta vattenförlusten före och efter injektering i injekteringsklasserna 3 och C. Observera att endast de skärmar där vattenförlustmätning är utförd både före och efter injektering redovisas. Högsta vattenförlust före injektering motsvaras alltså av det sonderingshål där man mätt den högsta vattenförlusten och högsta vattenförlust efter injektering motsvaras av det kontrollhål eller extra injekteringshål där man mätt den högsta vattenförlusten. Observera därför att resultatet av vattenförlustmätningen efter injektering inte är representativt för skärmens slutliga täthet då även kontrollhålen injekteras i dessa injekteringsklasser.

I två skärmar av de tolv som är redovisade är högsta uppmätta vattenförlust högre efter injektering och i en av skärmarna är vattenförlusten endast marginellt lägre efter injektering. I samtliga av dessa tre skärmar har förbindelse mellan injekteringshål identifierats före injektering. Även efter injektering har förbindelse mellan kontrollhål och extra injekteringshål identifierats. Droppkarteringsprotokoll påvisar ett relativt stort antal dropp för motsvarande sektioner.

I ytterligare tre injekteringskärm skulle man kunna misstänka hög vattenförlust efter injektering eftersom man vid borring av kontrollhål i dessa har identifierat läckage mellan hål och ytläckage. Mätning av vattenförlust för dessa kontrollhål saknas. Droppkartering visar dock att injekteringskärmarna är relativt täta.

3.2.3 Bruksmängd

Uppföljning av bruksåtgång är sammanställd baserad på data från injekteringsriggens Logac-filer.

Uppföljningen har utförts för samtliga hål och grupperats/sorterats inom vissa vattenförlustintervall och för respektive injekteringsklass.

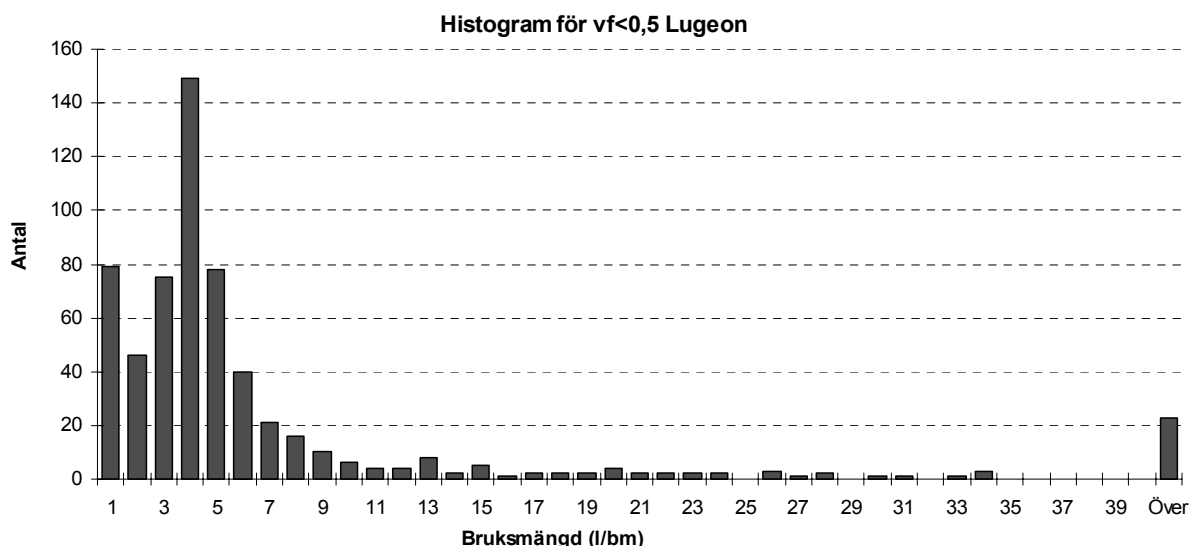
I Figur 13 – Figur 15 visas i histogram antal borrhål med en viss bruksåtgång (l/borrmeter) oberoende av skärm. Borrhålen är sorterade och redovisade i intervall I-III utgående från resultatet av vattenförlustmätningen i respektive hål. I Figur 13 (I) redovisas borrhål med $vf \leq 0,5$ Lugeon, i Figur 14 (II) borrhål med $0,5 < vf \leq 2$ Lugeon och i Figur 15 (III) borrhål med $vf > 2$ Lugeon.

Intervall I (Figur 13): histogrammet visar en fördelning med beräknad median på 3,7 l/bm och en ganska snabbt avtagande svans till höger i diagrammet. Vid dessa små bruksmängder bör man dock ha i åtanke att den bruksmängd som fyller upp injekteringshålet är ca 3 l/bm.

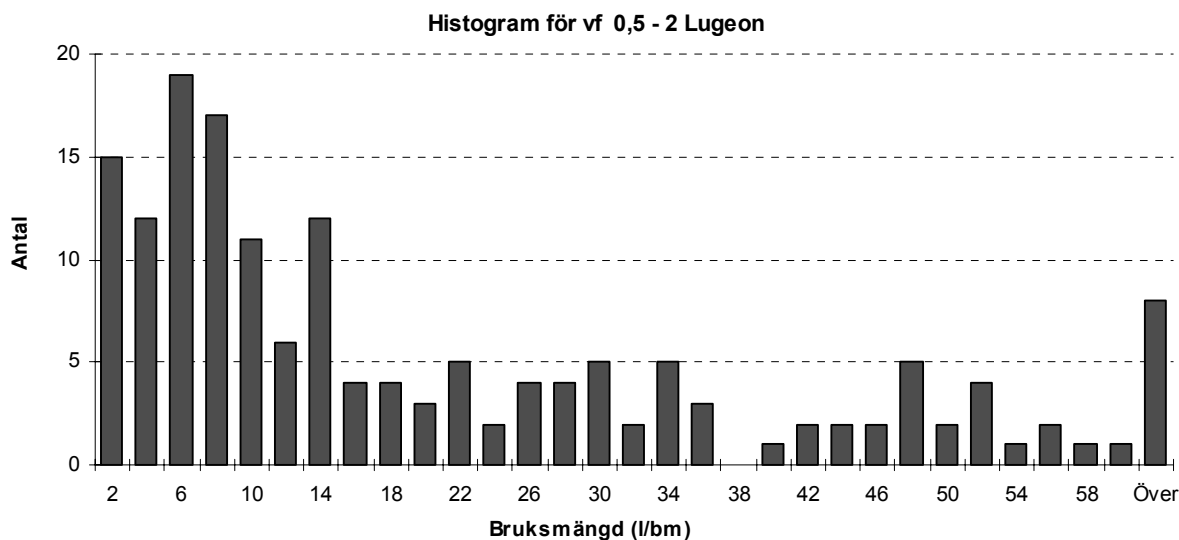
Intervall II (Figur 14): Fördelningen av bruksmängd är mer utbredd. Medianvärdet 12,3 l/bm och svansen sträcker sig upp till över 60 l/bm.

Intervall III (Figur 15): Fördelningen av bruksmängd är följaktligen ännu mer utbredd jmf med I och II. Medianvärdet är 25,5 l/bm och svansen sträcker sig ända upp till över 140 l/bm.

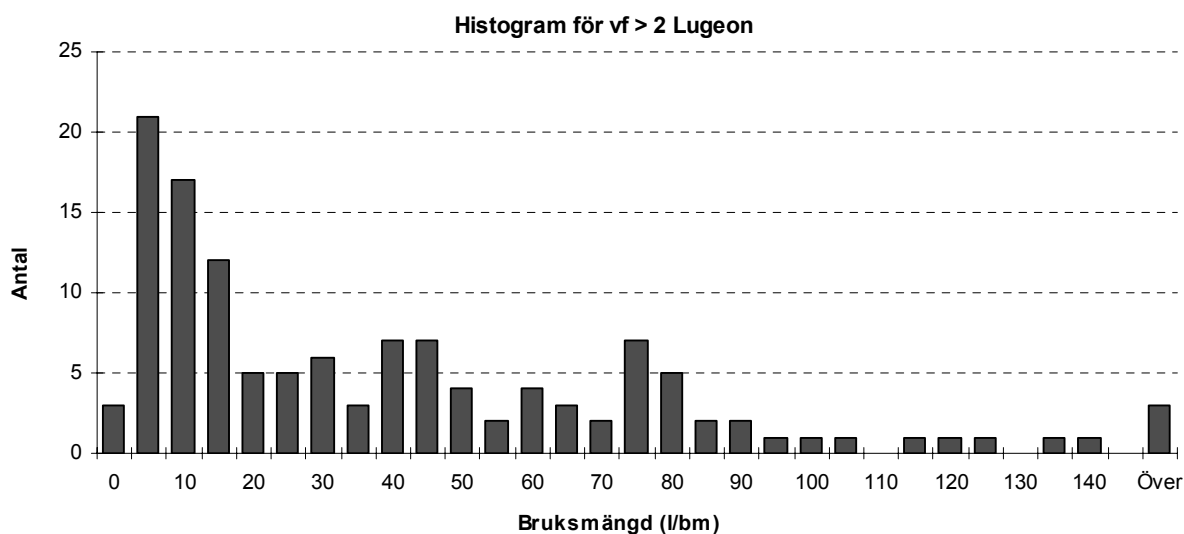
All data inkluderar hålfyllnad.



Figur 13. *Bruksmängd för samtliga hål med vf lägre än 0,5 Lugeon. Medianvärde 3,7 l/bm. Hålfyllnad är 3 l/bm.*



Figur 14. Bruksåtgång för samtliga hål med vf 0,5-2 Lugeon. Medianvärde 12,3 l/bm.



Figur 15. Bruksåtgång för samtliga hål med vf högre än 2 Lugeon. Medianvärde 25,5 l/bm.

Figur 16 – Figur 18 visar histogram över bruksmängd (liter per bormeter) per injekteringshål för varje skärmtyp A-C. Skärmtyperna motsvaras av injekteringsklasser enligt det reviderade injekteringsutförandet 2005-04-26 där injekteringsklass valts för högsta uppmätta vattenförlust:

Klass A: $vf \leq 0,5$ Lugeon,

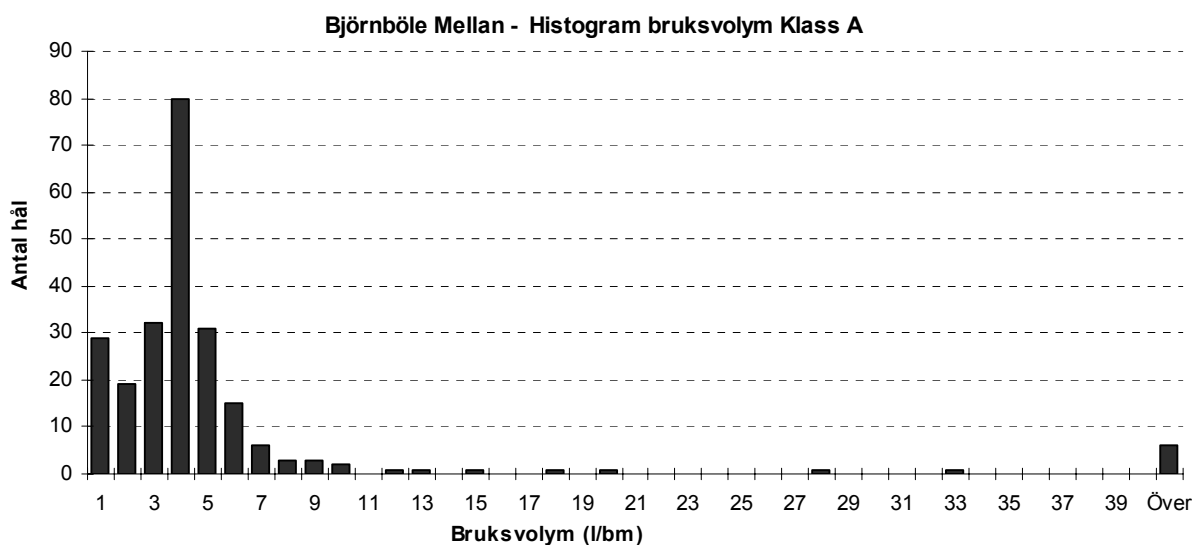
Klass B: $0,5 < vf \leq 2$ Lugeon och

Klass C: $vf > 2$ Lugeon.

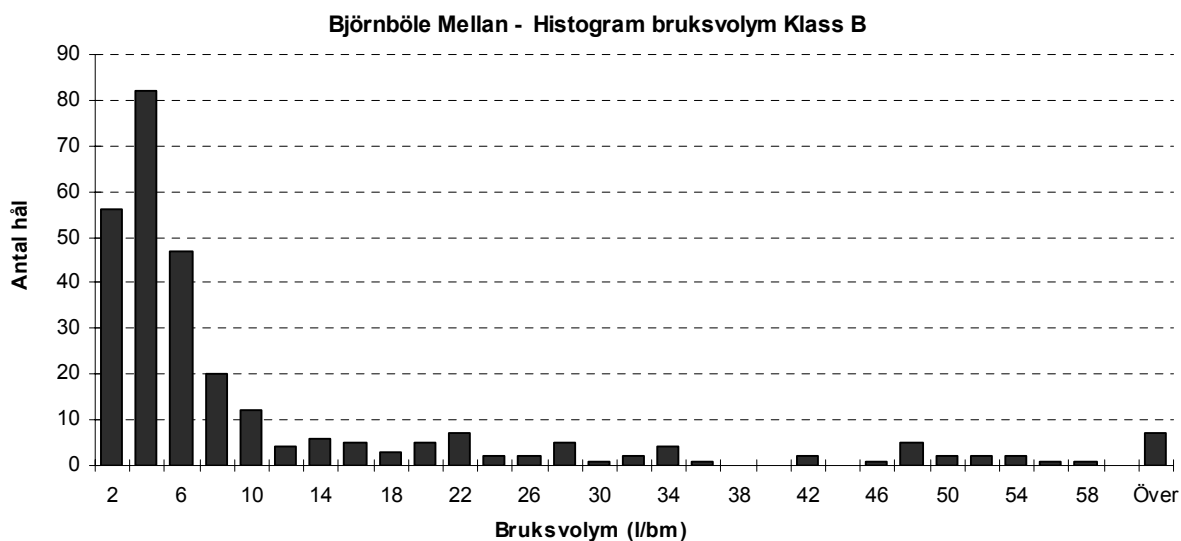
För Klass A (Figur 16) visar histogrammet en fördelning med beräknad median på 3,5 l/bm och en ganska snabbt avtagande svans till höger i diagrammet.

I Klass B (Figur 17) har bruksmängden en fördelning med median 4,3 l/bm och en svans som sträcker sig upp till över 60 l/bm.

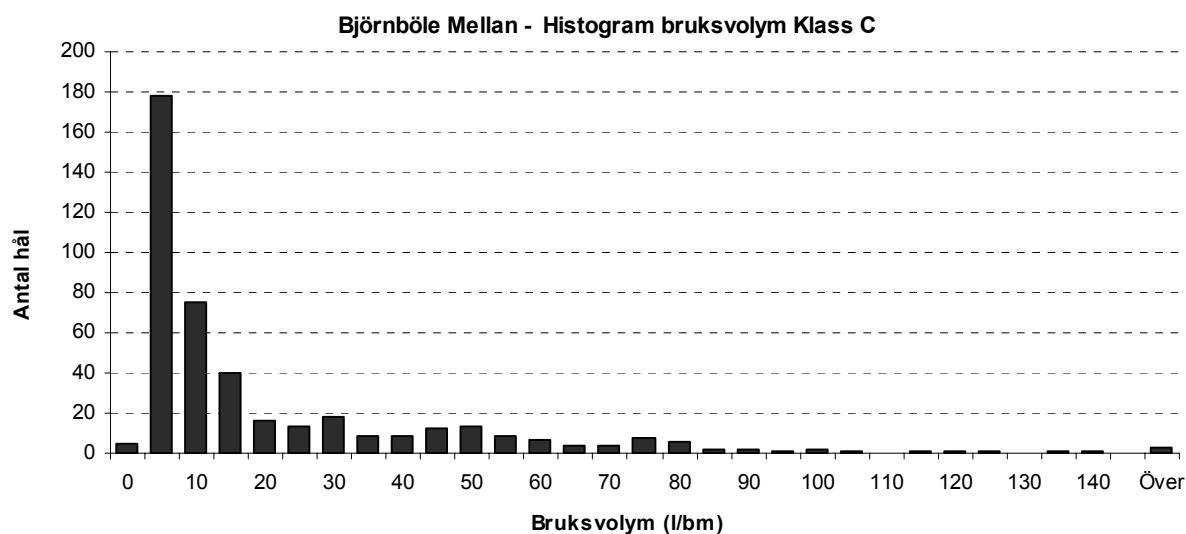
I Klass C (Figur 18) har bruksmängden en fördelning med median 6,9 l/bm och svansen sträcker sig ända upp till över 140 l/bm.



Figur 16. Bruksmängd för hål i skärmar med högsta $v_f \leq 0,5$ Lugeon Klass A. Medianvärde 3,5 l/bm.

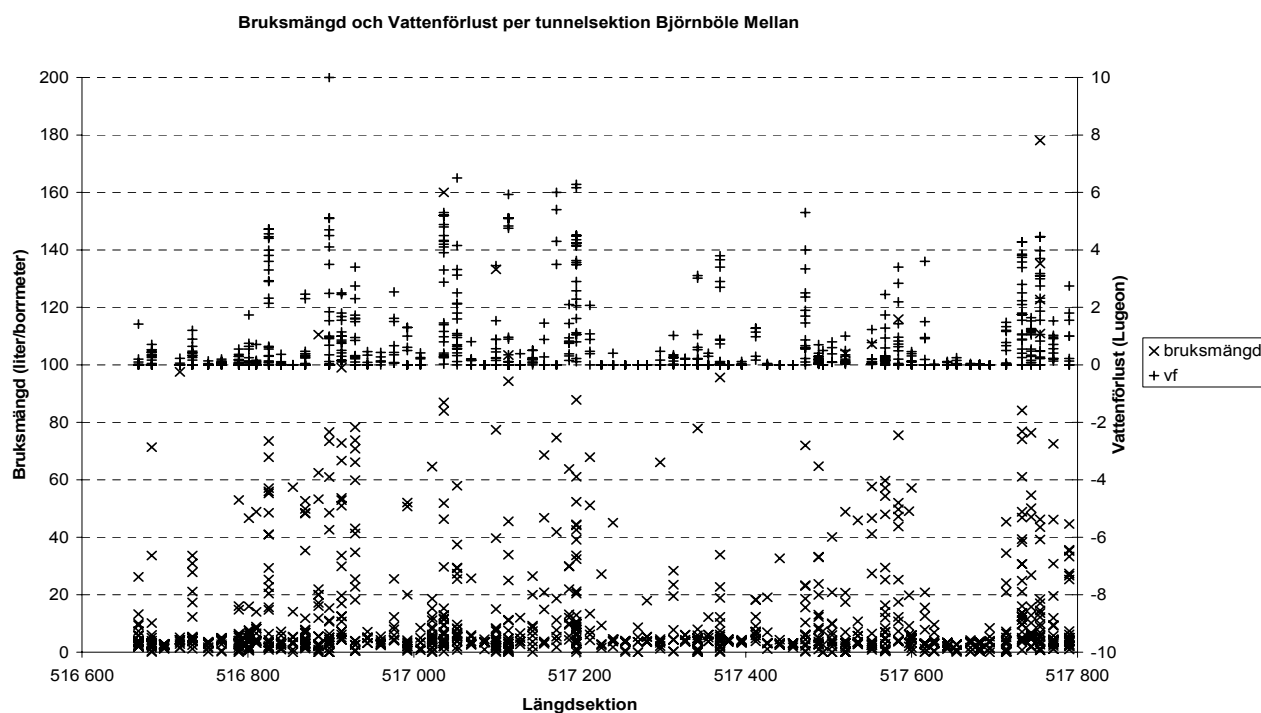


Figur 17. Bruksmängd för hål i skärmar med högsta $v_f 0,5 - 2$ Lugeon Klass B. Medianvärde 4,3 l/bm

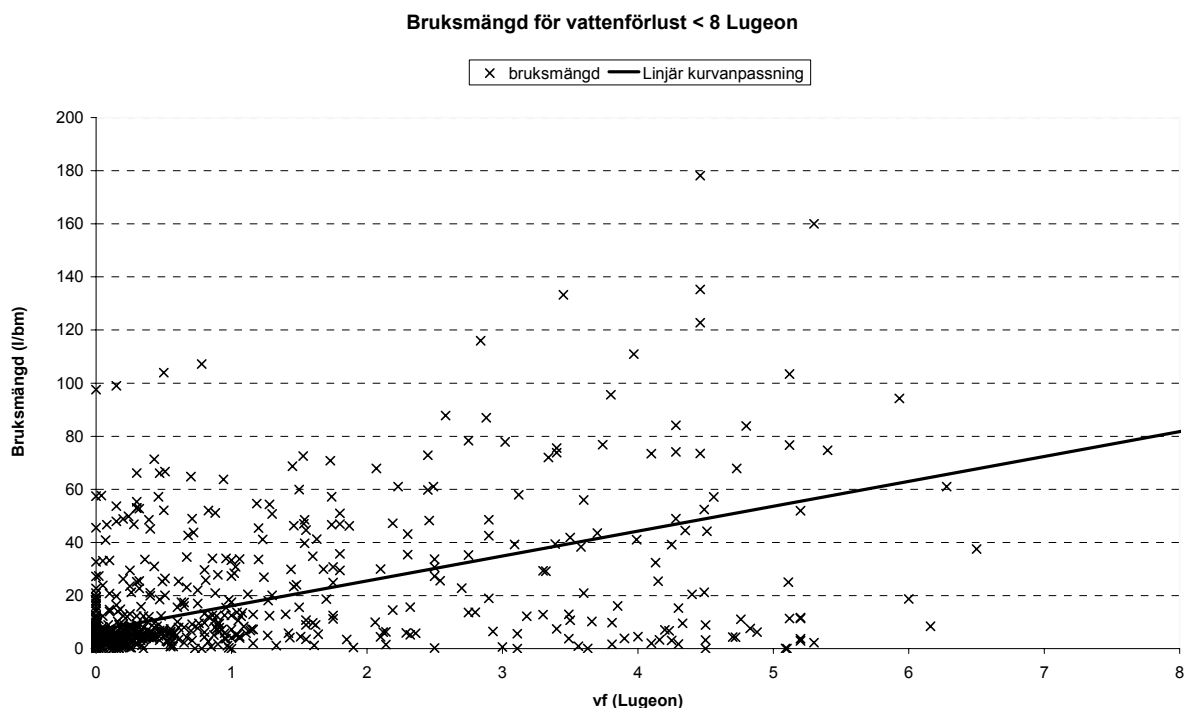


Figur 18. Bruksmängd för hål i skärmar med högsta vf > 2 Lugeon Klass C.
Medianvärde 6,9 l/bm

Diagrammet i Figur 19 visar mätning av vattenförlust och bruksmängd per bormeter uppdelat per injekteringsskärm. Diagrammet visar att det finns ett visst samband mellan vattenförlust och bruksåtgång. Diagrammet i Figur 20 visar ovanstående samband, men att det är stor spridning och därför inte särskilt starkt samband.



Figur 19. Bruksmängd och vattenförlust per tunnelsektion



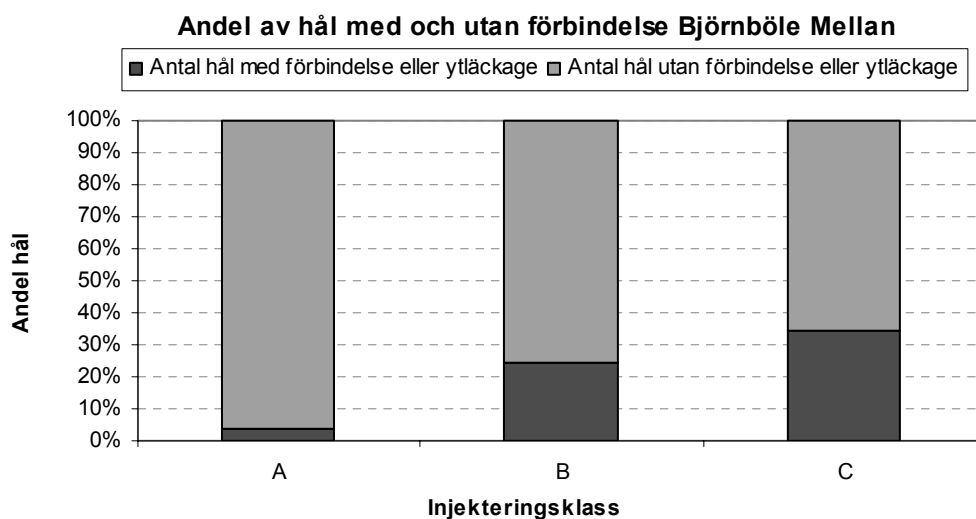
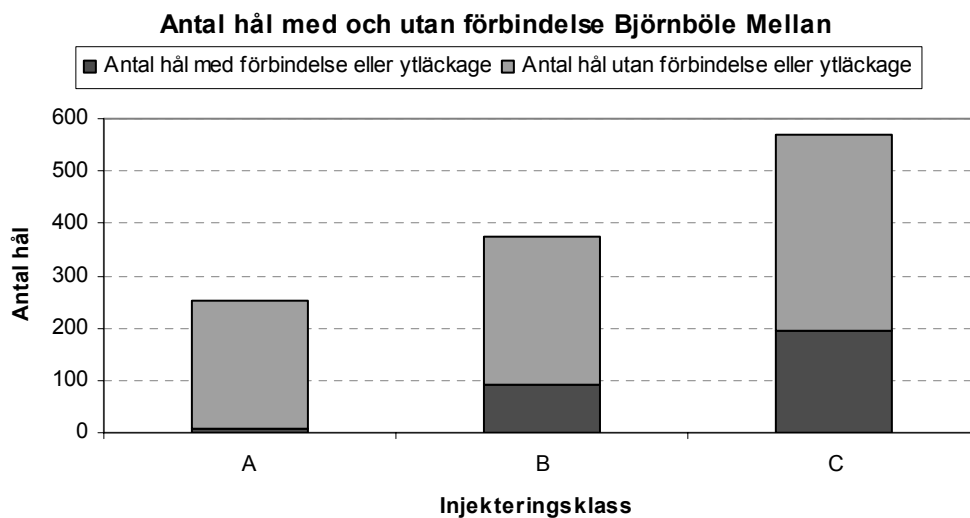
Figur 20. Bruksmängd för injekteringshål med vattenförlust lägre än 8 Lugeon

I skärmar med större vattenförlust finns i allmänhet hål med större bruksmängd. Däremot tycks sambandet för enskilda hål inte gälla, d v s vattenförlusten är inget säkert mått på injekterad bruksmängd.

3.2.4 Förbindelse mellan hål

I de injekteringsprotokoll som upprättas för varje injekteringskärm noteras kommentarer för injekteringshålen som observerats av operatören under pågående injektering. Dessa kan vara till exempel förbindelse mellan hål, ytläckage (läckage till stuff), igenrasat hål eller eventuella fel på injekteringsutrustning. Stapeldiagram i Figur 21 redovisar sammanställning av antal hål och andel hål som har noteringar om förbindelse med andra hål eller ytläckage för respektive injekteringsklass. Av dessa framgår att förbindelse mellan hål eller ytläckage är relativt vanligt i injekteringsklass B och C, men ej i injekteringsklass A.

Konsekvenser av förbindelse mellan hål kan vara att inträngningslängden vid injektering av hål som blivit fyllda av intilliggande hål begränsas på grund av att injekteringsbrukets tidsberoende egenskaper hinner förändras. En följd av att tillräcklig inträngningslängd ej erhålls är att injekteringskärmen ej blir tillräckligt tät.



Figur 21. Antal och andel hål med förbindelse till andra injekteringshål eller till stuff inom uppföljningssträcka Björnböle Mellan

3.3 Uppföljningssträcka Namntall Mellan (505+900 – 506+840)

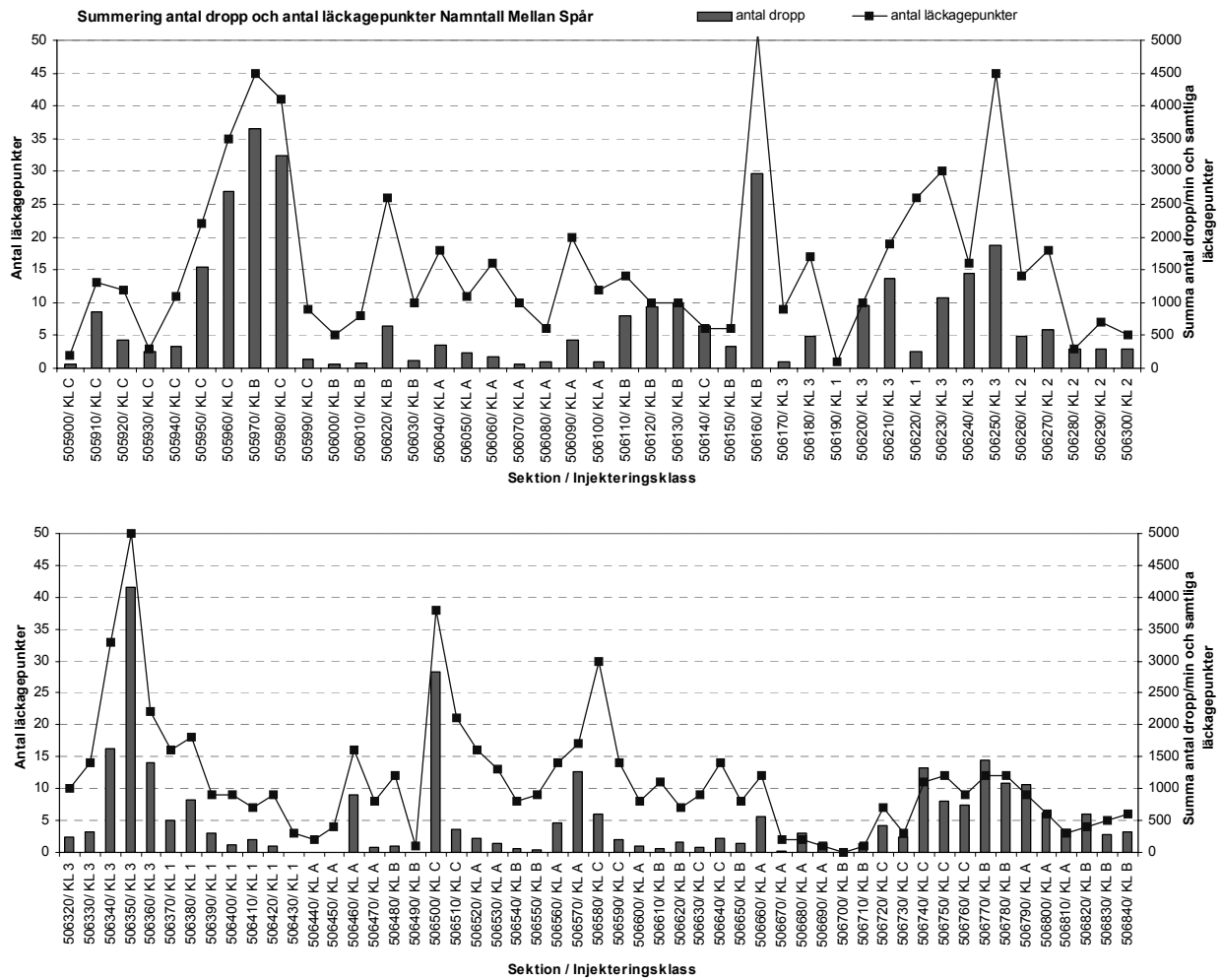
Följande kapitel redovisar resultat av injekteringsuppföljning vid Namntallstunneln, redovisningen presenteras med samma upplägg som föregående kapitel 3.2.

3.3.1 Droppkartering

I sammanställning av droppkartering i Figur 22 framgår att antal karterade dropp och läckagepunkter är generellt högre i Namntallstunneln än i Björnbölestunneln. En del av denna

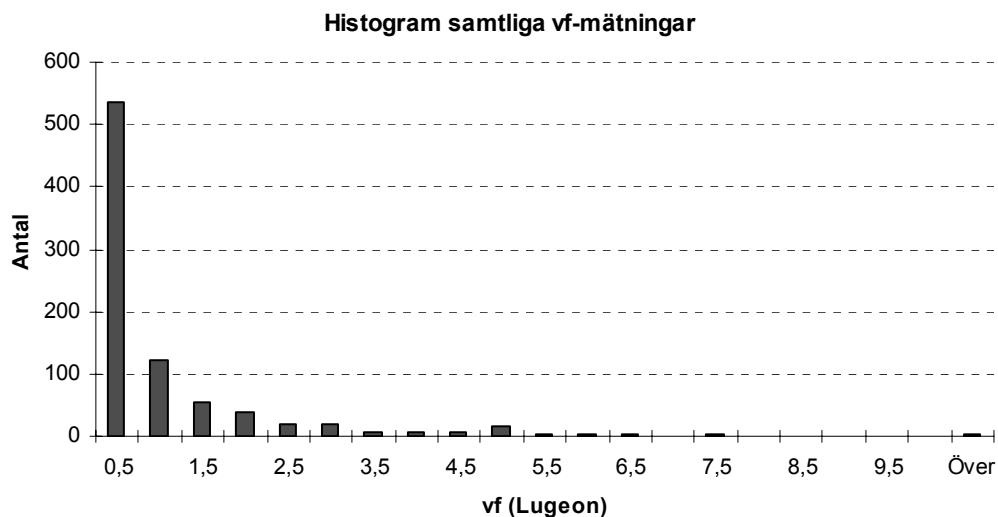
skillnad förklaras av att karteringen är utförd av olika personer i de två tunnarna varav en av kartörerna har varit betydligt noggrannare.

Det förekommer en viss korrelation mellan karterade antal dropp och injekteringsklass (färre dropp för injekteringsklass A jämfört med B och C där det synbart förekommer fler dropp) . Det är dock ej entydigt. Större antal dropp förekommer i intervall om 10 – 100 m.



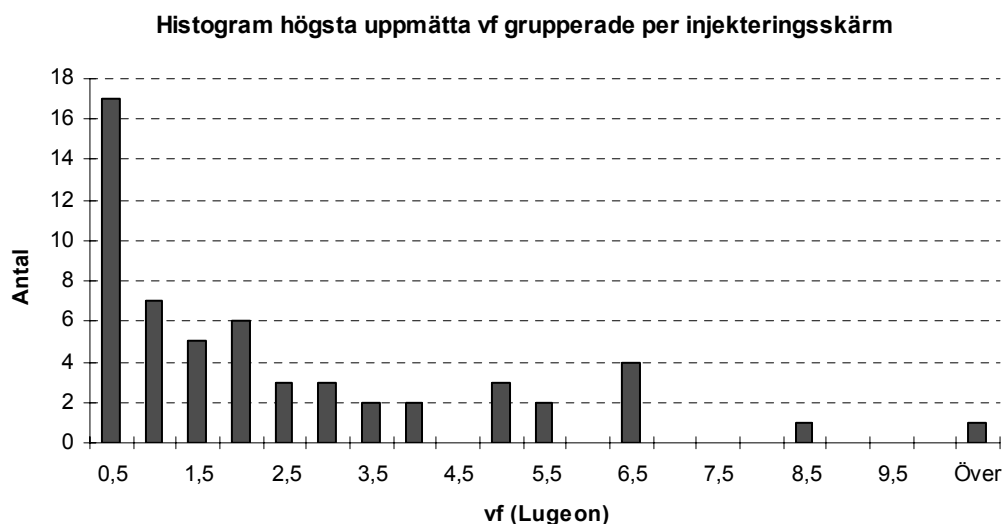
Figur 22. Droppkartering Namntall Mellan. Läckagepunkter kan utgöras av droppande eller rinnande berg och läckande eller rinnande bult/bulthål.

3.3.2 Vattenförlustmätning



Figur 23. Histogram över samtliga vattenförlustmätningar

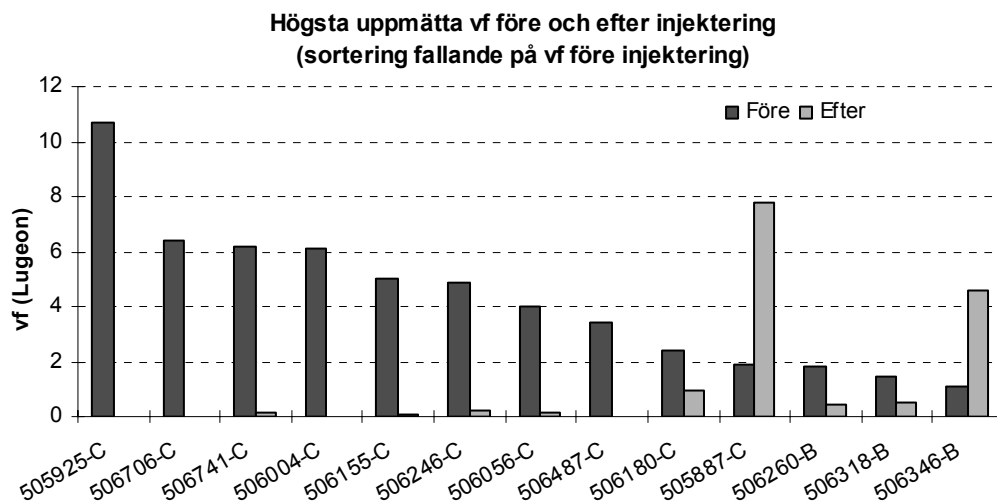
Vattenförlustmätningen varierade mellan 0 och 10,7 Lugeon. Av totalt 849 mätvärden var 535 (63 %) mindre än eller lika med 0,5 Lugeon, 216 (25 %) mätvärden låg i intervallet 0,5 till 2 Lugeon och 98 (11,5 %) mätvärden var större än 2 Lugeon.



Figur 24. Vattenförlust, grupperat efter högsta mätning i varje injekteringskärm.

I Figur 24 är mätvärdena grupperade per injekteringskärm och histogrammet redovisar högsta uppmätta vattenförlust för respektive injekteringskärm. Av totalt 56 injekteringskärm har 17 (30 %) skärmar högsta vattenförlust som är mindre än eller lika

med 0,5 Lugeon, 18 (32 %) skärmar ligger i intervallet 0,5 till 2 Lugeon och i 21 (38 %) skärmar är högsta uppmätta vattenförlust större än 2 Lugeon.



Figur 25. Vattenförlustmätning före och efter injektering i respektive skärm

I Figur 25 redovisas den högsta uppmätta vattenförlusten före och efter injektering. Observera att endast de skärmar där data erhållits för vattenförlustmätning både före och efter injektering redovisas. Högsta vattenförlust före injektering motsvaras alltså av det sonderingshål där man mätt den högsta vattenförlusten och högsta vattenförlust efter injektering motsvaras av det kontrollhål eller extra injekteringshål där man mätt den högsta vattenförlusten. Observera därför att resultatet av vattenförlustmätningen efter injektering inte är representativt för skärmens slutliga täthet eftersom även kontrollhålen injekteras.

I två av de tretton injekteringskärmarna som är redovisade är högsta uppmätta vattenförlust högre efter injektering och i ytterligare en skärm är vattenförlusten efter injektering relativt hög (sektion 505887-C, 506346-B, 506180-C). Dessa skärmar diskuteras kortfattat nedan.

Injekteringskärm sektion 505887-C

I den injekteringskärm som är borrade från sektion 505887 har en vattenförlust på över 7 Lugeon uppmätts i kontrollhål/extra injekteringshål. I stort sett alla kontrollhål har förbindelse med andra kontrollhål. Flertalet hål har rasat igen på grund av dåligt berg. Den geologiska karteringen redovisade kross- och lerzon i tunnelns högra vägg och lågt Q-värde.

Injekteringskärm sektion 506346-B

I denna skärm har 13 kontrollhål/extra injekteringshål borrats. Ungefär hälften av dem har förbindelse med andra kontrollhål, dock ej det som har den högsta uppmätta vattenförlusten.

Den geologiska karteringen redovisade bra berg i väggar och en lerzon ovanför höger anfang/tak.

Injekteringsskärm sektion 506180-C

Förbindelse mellan 5 av 13 kontrollhål har identifierats. Berget som skärmen har borrats i övergår från bra till sämre berg med en krosszon i kontakt mellan pegmatit och gråvacka.

3.3.3 Bruksmängd

Uppföljningen har utförts för samtliga hål och grupperats/sorterats inom vissa vattenförlustintervall och för respektive injekteringsklass.

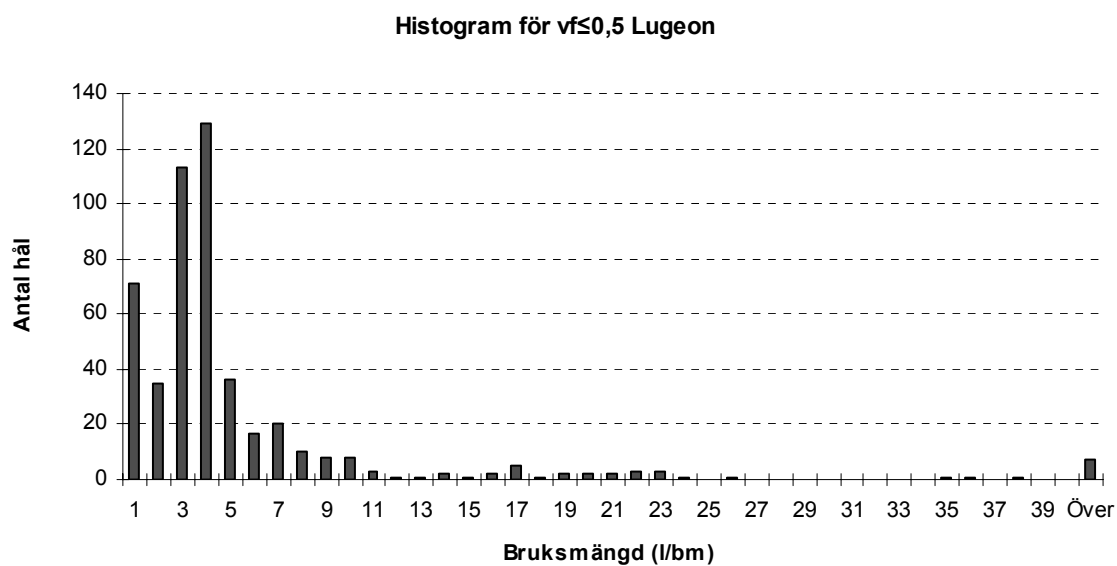
Figur 26 – Figur 28 visas i histogram antal borrhål med en viss bruksåtgång (l/borrmeter) oberoende av skärm. Borrhålen är sorterade och redovisade i intervall I-III utgående från resultatet av vattenförlustmätningen i respektive hål. I Figur 26 (I) redovisas borrhål med $vf \leq 0,5$ Lugeon, i Figur 27 (II) borrhål med $0,5 < vf \leq 2$ Lugeon och i Figur 28 (III) borrhål med $vf > 2$ Lugeon.

I intervall I (Figur 26) har bruksmängden en fördelning med beräknad median på 3,1 l/bm och en ganska snabbt avtagande svans till höger i diagrammet. Observera att bruksåtgången för att fylla injekteringshålet är ca 3 l/min vilket innebär att många av dessa hål förmodligen är täta.

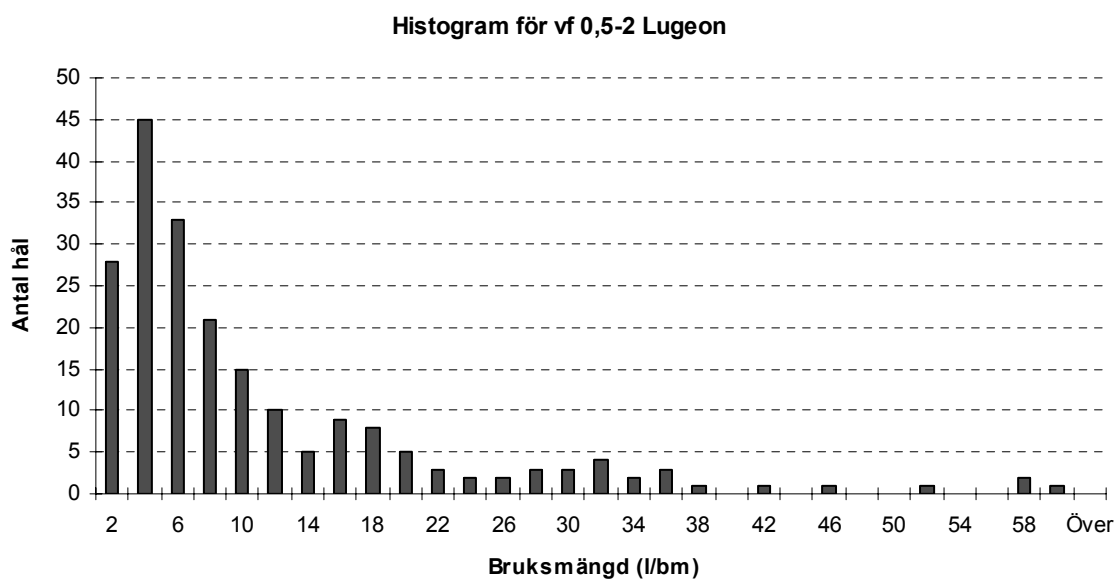
I intervall II (Figur 27) fås en mer utbredd fördelning av bruksmängden. Medianvärdet 5,9 l/bm och svansen sträcker sig upp till över 60 l/bm.

Intervall III (Figur 28) ger följaktligen en ännu mer utbredd fördelning av bruksmängden. Medianvärdet är 14,1 l/bm och svansen sträcker sig ända upp till över 140 l/bm.

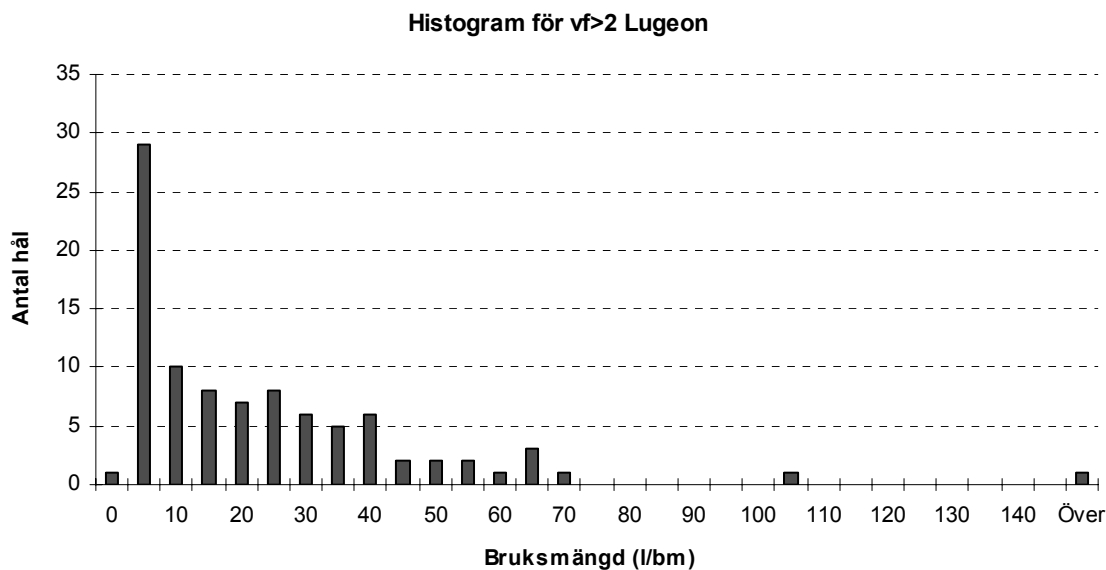
All data inkluderar hålfyllnad.



Figur 26. Bruksåtgång för hål med $vf \leq 0,5$ Lugeon (intervall I). Medianvärde 3,1 l/bm



Figur 27. Bruksåtgång för hål med $vf 0,5-2$ Lugeon (intervall II). Medianvärde 5,9 l/bm



Figur 28. Bruksåtgång för hål med $vf > 2$ Lugeon (intervall III). Medianvärde 14,1 l/bm

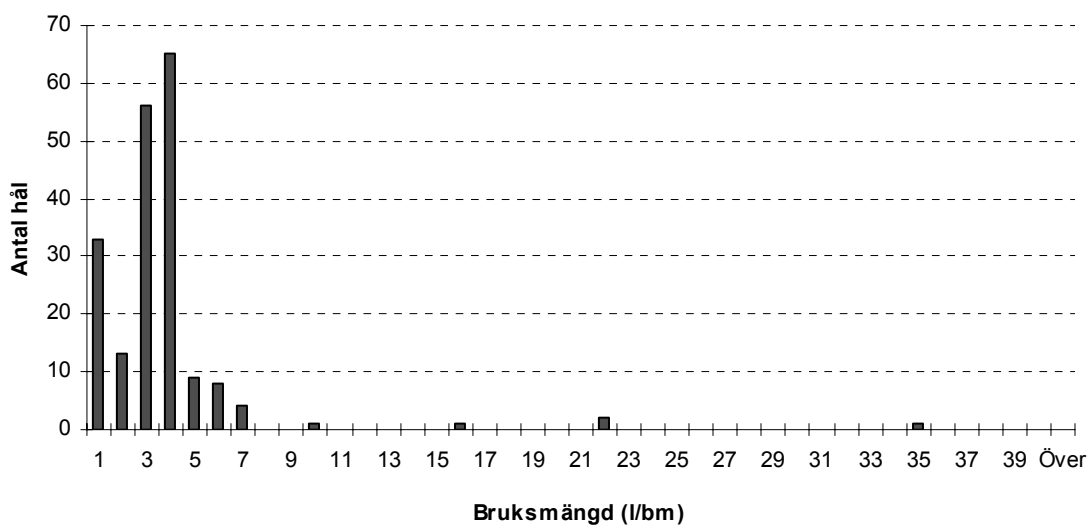
Figur 29 – Figur 31 visar histogram över bruksåtgång i varje injekteringshål för de tre injekteringsklasserna A, B och C.

För Injekteringsklass A (Figur 29) visar histogrammet en fördelning med beräknad median på 3,0 l/bm och en ganska snabbt avtagande svans till höger i diagrammet.

I Injekteringsklass B (Figur 30) har bruksmängden en fördelning med median 3,4 l/bm och en svans som sträcker sig upp till 58 l/bm.

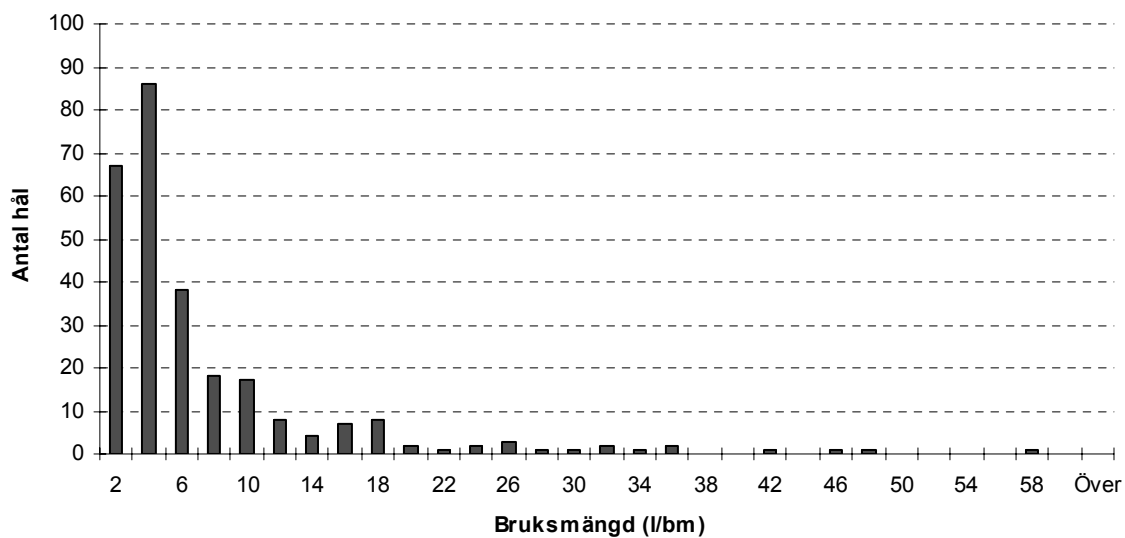
I Injekteringsklass C (Figur 31) har bruksmängden en fördelning med median 4,4 l/bm och svansen sträcker sig ända upp till över 140 l/bm.

Bruksmängd för hål i Klass A skärmar

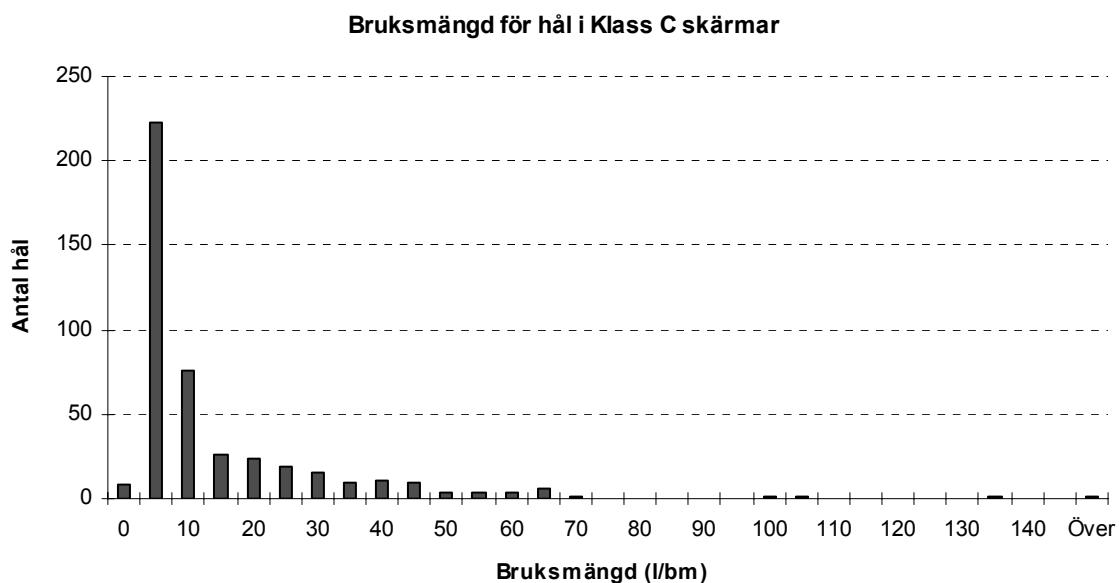


Figur 29. Bruksmängd för hål i injekteringsskärmar Klass A. Medianvärde 3,0 l/bm

Bruksmängd för hål i Klass B skärmar



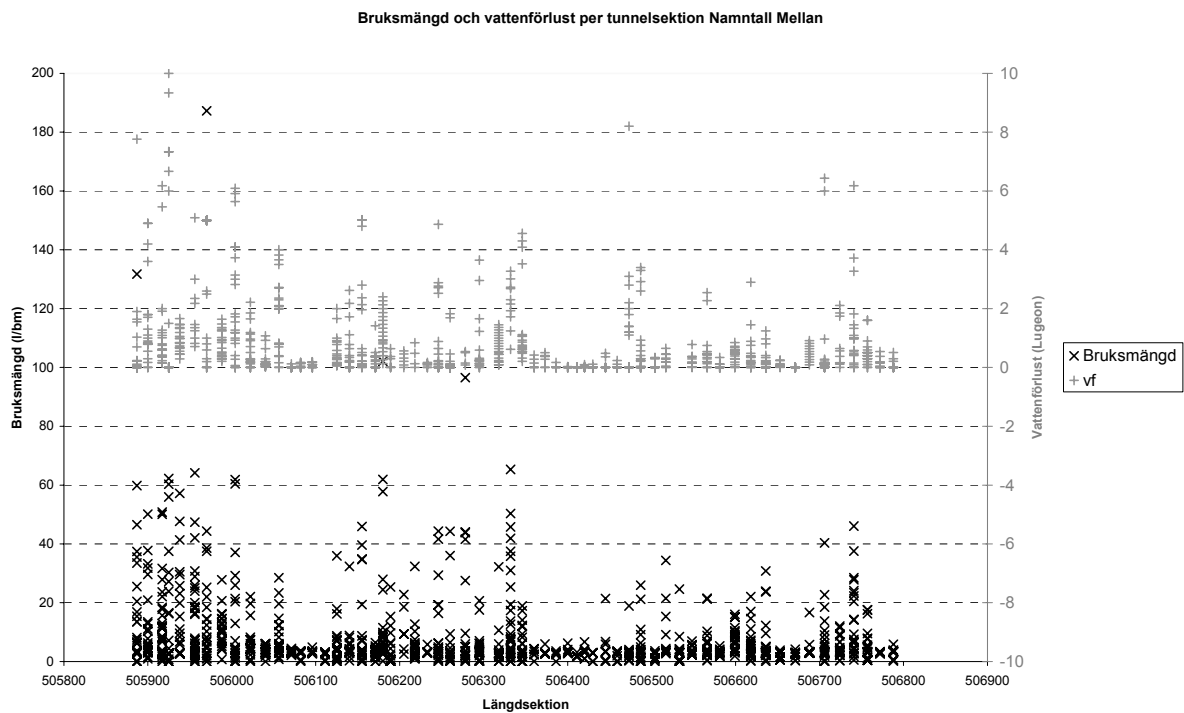
Figur 30. Bruksmängd för hål i injekteringsskärmar Klass B. Medianvärde 3,4 l/bm



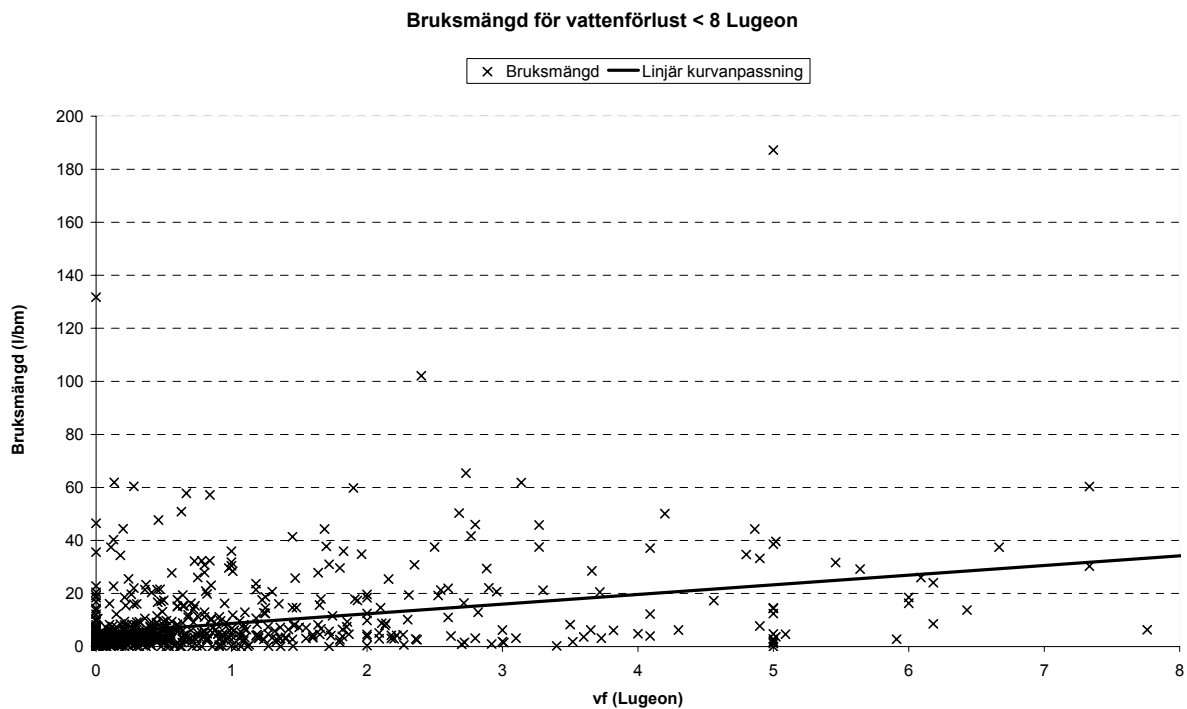
Figur 31. Bruksmängd för hål i injekteringskärrmar Klass C. Medianvärde 4,4 l/bm

Figur 32 visar diagram av mätning av vattenförlust och bruksmängd per bormeter uppdelat per injekteringskärr. Diagrammet visar att det finns ett visst samband mellan vattenförlust och bruksåtgång. Diagrammet i Figur 33 bekräftar ovanstående samband, men att det är stor spridning.

I skärmar med större vattenförlust finns i allmänhet hål med större bruksmängd. Däremot tycks sambandet för enskilda hål inte gälla, d v s vattenförlusten är inget säkert mått på injekterad bruksmängd.



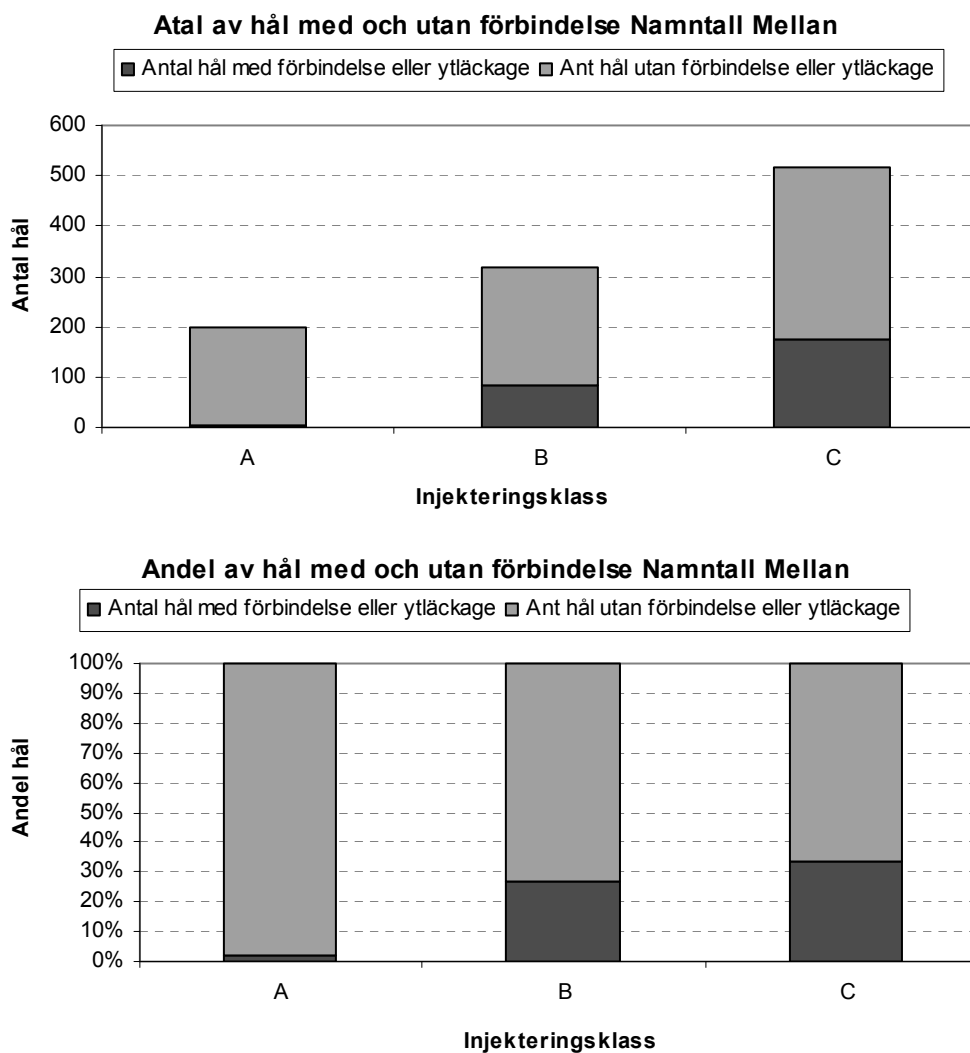
Figur 32. Bruksmängd och vattenförlust per tunnelsektion



Figur 33. Bruksmängd för injekteringshål med vattenförlust lägre än 8 Lugeon

3.3.4 Förbindelse mellan hål

Sammanställning av antal hål med förbindelse till andra injekteringshål eller till stuff för uppföljningssträcka Namntall Mellan visar på liknande resultat som motsvarande uppföljningssträcka Björnböle Mellan, det vill säga att förbindelse mellan hål eller ytläckage är relativt vanligt i injekteringsklass B och C, men ej i injekteringsklass A.



Figur 34. *Antal och andel hål med förbindelse till andra injekteringshål eller till stuff inom uppföljningssträcka Namntall Mellan*

3.4 Slutsatser av inledande injekteringsuppföljning

Det finns inte någon stark korrelation mellan uppmätt vattenförlust och bruksmängd i enskilda injekteringshål. Däremot finns det samband mellan vattenförlust och bruksmängd såtillvida att andelen hål med hög bruksåtgång blir gradvis större vid injekteringsklasser B och C vars val baseras på den högsta uppmätta vattenförlusten i hela injekterings-skärmen. Den större vattenförlusten är således en indikation på en bergmassa med fler och eller större sprickor (eller zoner) och bruksåtgången kan förväntas vara större i en sådan bergmassa. Injektering utförs dock sekventiellt (ofta ett hål i taget) och bergmassan tätas sannolikt även för angränsande hål varför enskilda hål med likartad vattenförlust kan uppvisa mycket olika bruksåtgång. Sannolikt finns även ett tryckberoende där sprickor som varit täta vid de relativt låga tryck som vattenförlustmätningen utförts vid, deformeras lokalt i samband med injektering.

Vid injektering av skärmar i klass 3 och klass C förekommer det att man mäter en högre vattenförlust i kontrollhål borrade efter första omgångens injektering. Signifikant för flera av dessa injekterings-skärmar är att den geologiska karteringen visar på dålig bergkvalitet och att man vid injektering noterat förbindelse mellan hål eller stuff.

Uppföljningen av antal hål med förbindelse till andra hål eller till stuff visar att denna förekomst är vanlig i framförallt injekteringsklass C där över 30 % av injekteringshålerna har observerad förbindelse. Detta bedöms orsaka en begränsning av inträngningslängden och att bruket hinner styvna i hål som blivit fyllda av intilliggande hål genom förbindelse.

Droppkarteringen visar att det generellt förekommer mer dropp vid högre injekteringsklass vilket har sin naturliga förklaring i att de mer vattenförande zonerna förekommer i mer uppsprucket berg med fler (och större) sprickor, ökad mängd sprickfyllnadsgrad etc. Det större antalet sprickor omfattar även fler små sprickor och/eller sprickor som delvis är fyllda med sprickmineral (ex. ler) vilka är svårare att täta genom vanlig cementinjektering.

4 Teori

4.1 Allmänt

I kapitel 4 beskrivs bakgrundsteorier för karakterisering av bergmassans sprickfördelning samt för beräkning av dimensionalitet (1D – kanalströmning, eller 2D – strömning i plan) och inträngningslängd. I kapitel 5 redovisas resultaten av utförda beräkningar.

4.2 Geohydrologisk beskrivning av bergmassan

För att beskriva bergmassan ur ett geohydrologiskt perspektiv har ett nytt angreppssätt och en ny analysprocess för injektering introducerats [Gustafson et al, Väg och Vattenbyggaren 4, 2004]. Föreliggande avsnitt 4.2 sammanfattar Gustafson et als artikel. Modellen ger ett resultat som kan användas för bedömning av sprickfördelning och sprickvidd samt sprickornas enskilda transmissiviteter. Modellen kan därigenom också användas för bedömning av vilken minsta sprickvidd som måste injekteras för att nå erforderlig täthet.

Beräkningsgång:

- | | |
|---|--|
| 0 | Indata: vattenförlustmätning, kärnkartering |
| 1 | Bestämning av sprickantal och transmissivitet/intervall (sektion) |
| 2 | Beräkning av sannolikhet för att intervallet skall ha viss transmissivitet |
| 3 | Plottning i dubbellogaritmiskt diagram |
| 4 | Bestämning av fördelningsparametrar |
| 5 | Beräkning av hydraulisk sprickvidd |
| 6 | Beräkning av resterande transmissivitet efter injektering |

En bergspricka karakteriseras i modellen som en spalt mellan två planparallella ytor. I verkligheten är sprickans geometri mycket mer komplicerad med kontaktytor, sprickfyllnad av olika mineral etc. Erfarenheter från Äspö (SKB, TRUE 1 experiment) visar att vatten och injekteringsbruk i stort sett följer samma flödesvägar. Sprickvidden kan inte mätas direkt utan i beräkningarna används en hydraulisk sprickvidd som är kopplad till sprickans transmissivitet. Sambandet betecknas vanligen som ”kubiklagen”:

$$T = \frac{b_{hyd}^3}{12} \cdot \frac{\rho_w g}{\mu_w} \quad [4.1]$$

där

- b_{hyd} = hydraulisk sprickvidd
- T = sprickans transmissivitet
- μ_w = vattnets viskositet
- ρ_w = vattnets densitet
- g = gravitationskonstant

Den verkliga sprickvidden varierar över tvärsnittet men det är för närvarande osäkert om den hydrauliska sprickvidden motsvarar median/medel eller någon annan andel av sprickans verkliga vidd. Den hydrauliska sprickvidden anges dock vara en god approximation för att beräkna sprickans transmissivitet.

I kärnbrorrhål och i sonderingshål utförs vanligen vattenförlustmätningar. För varje sektion kan transmissivitet och sprickantal bestämmas. Transmissiviteten för de enskilda sprickorna är mycket olika varför det är rimligt att anta att det är den största sprickan i varje intervall som bestämmer intervallens transmissivitet. Om sprickornas transmissivitet i ett intervall (sektion) antas vara oberoende av varandra kan sannolikheten, P_i , att alla sprickorna i intervallet har en transmissivitet mindre än T_i beräknas med multiplikationsprincipen.

$$P_i = P(T_i)^{N_i} \quad [4.2]$$

där

P_i = Sannolikheten att alla sprickor i ett intervall har transmissivitet mindre än T_i

$P(T_i)$ = Sannolikheten att en enskild spricka i intervallet har transmissivitet mindre än T_i

N_i = Antal sprickor i ett intervall

Om intervallen storleksorteras efter deras transmissivitet kan det antal intervall, I_t , av totala antalet intervall, I , som har en transmissivitet mindre än T_{It} beräknas som

$$I_t \approx \sum_{i=1}^I P(T < T_{It})^{N_i} \quad [4.3]$$

Där

I_t = Intervall t (storleksorterat)

I = Totala antalet intervall

$P(T < T_{It})$ = Sannolikheten att intervalltransmissiviteten är mindre än transmissiviteten för

Intervall I_t

Nu kan en fördelningsfunktion plottas. Fördelningen skall i teorin visa en rät linje i ett logaritmen av X (transmissiviteten), logaritmen av Y ($1 - P(T < T_n)$) diagram.

Fördelningsfunktionen kan tolkas med en Paretofördelning vilken beskriver en population av många små värden och några få större.

Paretofördelningen ser ut som följer:

$$P(X) = P[X < x] = 1 - (m/x)^k \quad [4.4]$$

där

m = minsta värde i populationen

k = fördelningens formparameter

Fördelningen kan definieras utifrån den största transmissiviteten, T_{\max} , och totala antalet sprickor N (vilket inte skall blandas ihop med totala antalet intervall eller totala antalet sprickor i ett intervall enligt ekvation [4.2 och 4.3]). Om sannolikheten att T_{\max} skall inträffa är lika med $1/N+1$ (Weibull) kan konstanten m skrivas om till:

$$[1 - P(X)] = \frac{1}{N + 1} = \left(\frac{m}{T_{\max}} \right)^k = \left(\frac{m^k}{T_{\max}^k} \right) \quad [4.5]$$

$$\frac{T_{\max}^k}{N + 1} = m^k \quad [4.6]$$

Sätts m^k in i ekvation [4.4] erhålls:

$$P(T) = P[T < T_n] = 1 - \frac{(T_{\max} / T_n)^k}{N + 1} \quad [4.7]$$

Fördelningsparametrarna kan bestämmas genom att plotta värdena ($1-P(T)$ och T_n) i ett dubbellogaritmiskt diagram och göra en kurvanpassning. Fördelningsparametrarna kan då skrivas på formen:

$$\log[1 - P(T)] = \log\left[\frac{T_{\max}^k}{N + 1}\right] - k \log(T_n) \quad [4.8]$$

där (räta linjens ekvation $y=B+kx$)

$$\begin{aligned} \log[1 - P(T)] &= y \\ \log\left[\frac{T_{\max}^k}{N + 1}\right] &= B \\ k &= k \\ \log(T_n) &= x \end{aligned}$$

Alternativt kan fördelningsparametrarna skrivas på formen:

$$[1 - P(T)] = \left[\frac{T_{\max}^k}{N + 1}\right] T_n^{-k} \quad [4.9]$$

Där (en rät linje i ett log diagram har ekvationen $y=Ax^{-k}$)

$$\begin{aligned} [1 - P(T)] &= y \\ \left[\frac{T_{\max}^k}{N + 1}\right] &= A \\ T_n &= x \\ k &= k \end{aligned}$$

Transmissiviteten för hela borrhålet motsvaras av summan av de enskilda sprickornas transmissiviteter. Vi inför rangen r , där den största sprickan har $r = 1$ och den minsta sprickan har rangen $r = N$. Sannolikheten att en spricka med rangen r har en transmissivitet T_r kan då skrivas:

$$[1 - P(X)] = \left(\frac{m}{x}\right)^k \quad [4.4]$$

$$\begin{aligned} \frac{r}{N+1} &= \left(\frac{m}{T_r} \right)^k \\ \frac{r}{N+1} &= \frac{T_{\max}^k}{N+1} \cdot \frac{1}{T_r^k} \\ T_r^k &= \frac{T_{\max}^k}{r} \\ T_r &= \frac{T_{\max}}{r^{1/k}} \end{aligned} \quad [4.10]$$

Den totala transmissiviteten för borrhålet kan nu beräknas som en summa av samtliga sprickors transmissivitet:

$$\begin{aligned} T_{tot} &= T_{\max} \cdot \left[\frac{1}{1^{1/k}} + \frac{1}{2^{1/k}} + \frac{1}{3^{1/k}} + \dots + \frac{1}{N^{1/k}} \right] = T_{\max} \cdot S(k, N) \quad [4.11] \\ S(k, N) &= \sum_{r=1}^N \frac{1}{r^{1/k}} \end{aligned}$$

Med ”kubiklagen”, ekvation 4.1, kan sprickans hydrauliska vidd beräknas utifrån sprickans transmissivitet enligt 4.10.

$$b_r = \sqrt[3]{\frac{12\mu_w}{\rho_w g} \cdot T_r^{1/3}} = C \cdot \left[\frac{T_{\max}}{r^{1/k}} \right]^{1/3} \quad [4.12]$$

Om det antas att minsta injekterbara sprickvidd är, b_{inj} , med motsvarande rang, r_{inj} , kan transmissiviteten efter injektering beräknas:

$$T_{inj} = T_{tot} - T_{\max} \cdot \sum_{r=1}^{r_{inj}} \frac{1}{r^{1/k}} = T_{\max} \cdot [S(k, N) - S(k, r_{inj})] \quad [4.13]$$

Där

T_{inj} = resterande transmissivitet efter injektering

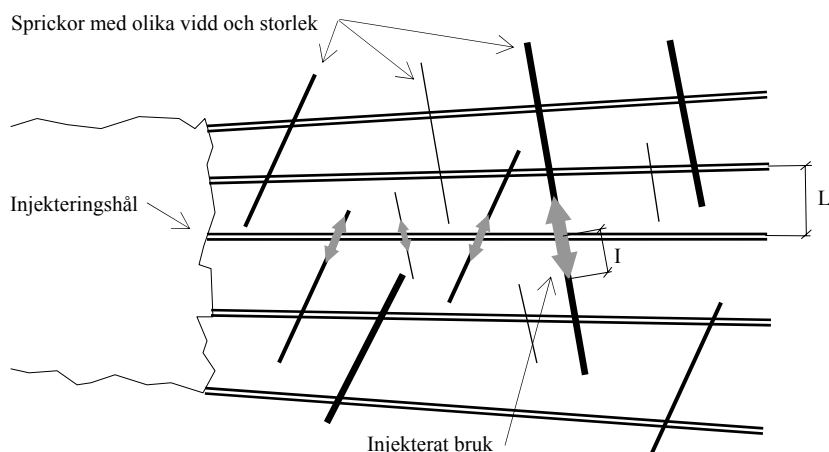
r_{inj} = antal injekterbara sprickor

Med utgångspunkt från transmissivitets- och sprickviddsfördelningen kan alltså transmissiviteten efter injektering beräknas och resultaten användas för att prognostisera inläckage. Teorin kan således användas i designarbetet som underlag för olika injekteringsstrategier.

4.3 Dimensionalitet och inträngningslängd

Föreliggande avsnitt 4.3 sammanfattar artikeln ”Stop Criteria for Cement Grouting” av Gunnar Gustafson och Håkan Stille, publicerad i Felsbau 23 (2005) nr 3. Sammanfattningen avser främst de beräkningsformler som tillämpas i efterföljande kapitel i denna rapport.

Artikeln beskriver hur samband mellan inträngningslängd och injekteringstid kan tillämpas för att fastställa stoppkriterium för cementinjektering som underlag för injekteringsdesign. Detta samband kan användas för att med underlag av mätdata avseende injekteringstryck och flöde bestämma vilken dimensionalitet på flödet som uppkommer då injekteringsbruket tränger in i tillgängliga flödesvägar i bergmassan.



Följande beräkningsgång används:

- | | |
|---|---|
| 0 | Indata; bruksegenskaper, injekteringstryck, sprickvidd etc |
| 1 | Beräkning av maximal inträngningslängd och karakteristisk injekteringstid |
| 2 | Beräkning av inträngning som funktion av tid, tryck etc |
| 3 | Bedömning av stoppkriterier |

Under/efter injektering kan flödesdimensionen (kanal- eller planströmning) beräknas och teoretiskt användas för bedömning av stop:

- | | |
|---|---|
| 4 | Indata; Injekterat flöde(volym), injekteringstid |
| 5 | Beräkning av flödesdimension (dimensionalitet) |
| 6 | Bedömning av vilka stoppkriterier som skall gälla (1D, 2D etc.) |

Teorin visar att flödesdimensionen kan bestämmas relativt enkelt. Vidare kan inträngningslängden beräknas vilket kan användas i design givet en bedömning av nödvändig inträngningslängd.

De dimensionslösa uttryck av inträngning och som används är oberoende av ex sprickvidd och är därför giltig för alla injekterade sprickvidder vilket är användbart vid aktiv injekteringsprocessanalys.

4.3.1 Analytisk lösning av funktioner för inträngningslängd

Grundläggande ekvationer

Den maximala inträngningslängden i en plan spricka beräknas vid kraftjämvikt med ekvationen:

$$I_{\max} = \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot b \quad [4.14]$$

Där I_{\max} = maximal inträngningslängd
 Δp = $p_g - p_w$ Injekteringstryck - grundvattentryck
 τ_0 = Injekteringsbrukets flytgräns
 b = Hydraulisk sprickvid

Karakteristisk injekteringstid, t_0 , och relativ injekteringstid, t_D , beräknas som:

$$t_0 = \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2} \quad [4.15a]$$

$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad [4.15b]$$

Där μ_g = Bingham viskositet
 t = injekteringstid

Approximation av analytiska funktioner för inträngningslängd.

$$t_D = \frac{I_D}{3(1-I_D)} + \frac{2}{9} \cdot \ln \left[\frac{2(1-I_D)}{2+I_D} \right] \quad [4.16]$$

För att lösa I_D ur ovanstående ekvation görs följande approximativa lösning:

$$I_D \approx \sqrt{\frac{t_D^2}{4(1+t_D)} + \frac{2t_D}{1+t_D}} - \frac{t_D}{2(1+t_D)} \quad [4.17]$$

Med variabelsubstitutionen:

$$\Theta = \frac{t_D}{2(1+t_D)} \quad [4.18a]$$

erhålls följande uttryck för relativ inträngningslängd:

$$I_D \approx \sqrt{\Theta^2 + 4\Theta} - \Theta \quad [4.18b]$$

Denna approximation, ekvation 4.17, har dock dålig noggrannhet vid liten relativ injekteringstid, t_D . Därför har ekvation 4.18a optimerats med hänsyn till normala injekteringstider. Vid injekteringstider som är representativa för de flesta injekteringar tillämpas ekvationer 4.18c och 4.18d för endimensionell respektive tvådimensionell strömning.

$$\Theta_{1D} = \frac{t_D}{2(0,6 + t_D)} \quad [4.18c]$$

$$\Theta_{2D} = \frac{t_D}{2(3 + t_D)} \quad [4.18d]$$

4.3.2 Funktioner för injekterad volym

Med utgångspunkt från funktioner för inträngningslängd kan funktioner för injekterad volym formuleras för respektive endimensionella eller tvådimensionella system.

För det endimensionella fallet tecknas volymen (V) som :

$$V = I \cdot w \cdot b \quad [4.19]$$

Där w är bredden och b är vidden för en endimensionell kanal.

Maximala injekteringsvolymen kan skrivas som:

$$V_{\max} = I_{\max} \cdot w \cdot b \quad [4.20]$$

och den relativa volymen som:

$$V_D(1D) = \frac{V}{V_{\max}} = \frac{I \cdot w \cdot b}{I_{\max} \cdot w \cdot b} = I_D(1D) \quad [4.21]$$

För det tvådimensionella fallet kan den injekterade volymen skrivas som:

$$V = \pi \cdot I^2 \cdot b \quad [4.22]$$

Där b är vidden för en spricka som korsas av injekteringshålet.

Maximala injekteringsvolymen kan skrivas som:

$$V_{\max} = \pi \cdot I_{\max}^2 \cdot b \quad [4.23]$$

och den relativa volymen som:

$$V_D(2D) = \frac{V}{V_{\max}} = \frac{\pi \cdot I^2 \cdot b}{\pi \cdot I_{\max}^2 \cdot b} = I_D^2(2D) \quad [4.24]$$

4.3.3 Utvärdering av dimensionalitet med diagnoskurvor

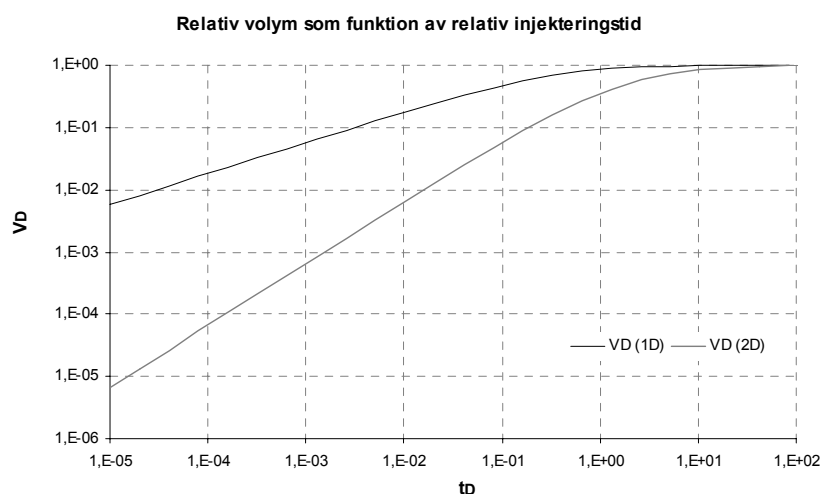
Diagrammet i Figur 35 visar förhållandet mellan injekterad volym och injekteringstid för det endimensionella fallet och det tvådimensionella fallet. Den mest markanta skillnaden mellan 1D fallet och 2D fallet är lutningen på kurvorna. Denna skillnad kan användas för att utvärdera huruvida flödet i bergmassan är endimensionellt eller tvådimensionellt genom att uttrycka lutningen på kurvan som:

$$\frac{d \log V}{d \log t} = \frac{d \ln V}{d \ln t} = \frac{dV}{V} \cdot \frac{t}{dT} \quad [4.25]$$

Eftersom att $\frac{dV}{dt} = Q$ fås:

$$\frac{d \log V}{d \log t} = \frac{Q \cdot t}{V} \quad [4.26]$$

Eftersom lutningen på volymkurvorna är mer eller mindre konstant inom det tidsintervall som är typisk för normal injektering så kan beräknade värden på $d \log V / d \log t$ användas för att utvärdera om flödet vid injektering av bergmassan är endimensionellt eller tvådimensionellt. Dessa värden är 0,8 för det tvådimensionella fallet och 0,45 för det endimensionella fallet.



Figur 35. Relativ injekterad volym som funktion av relativ injekteringstid

4.3.4 Stoppkriterium

För att bestämma minsta erforderliga injekteringstid kan tidsåtgången beräknas för att inträngningslängden skall nå till minst halva avståndet mellan två injekteringshål. Detta är den teoretiskt minsta erforderliga inträngningslängden och vid praktisk tillämpning bör hänsyn tas till injekteringens komplexitet och det faktum att injekteringsbruket följer sprickstrukturen vilket inte nödvändigtvis motsvarar det kortaste avståndet mellan två injekteringshål.

Med en faktor k uttryckt som förhållandet mellan teoretisk inträngningslängd, I , och geometriskt hålavstånd, L , ges:

$$I_D = \frac{I}{I_{\max}} \geq \frac{kL}{I_{\max}} = \frac{2kL \cdot \tau_0}{\Delta p \cdot b_{\min}} \quad [4.27a]$$

Ur ekvationerna 4.18b – 4.18d erhålls:

$$\Theta_D = \frac{I_D^2}{4 - 2I_D} \quad [4.27b]$$

$$t_{1D} = \frac{1,2\Theta_D}{1 - 2\Theta_D} \quad [4.27c]$$

$$t_{2D} = \frac{6\Theta_D}{1 - 3\Theta_D} \quad [4.27d]$$

och ur ekvation 4.15a erhålls:

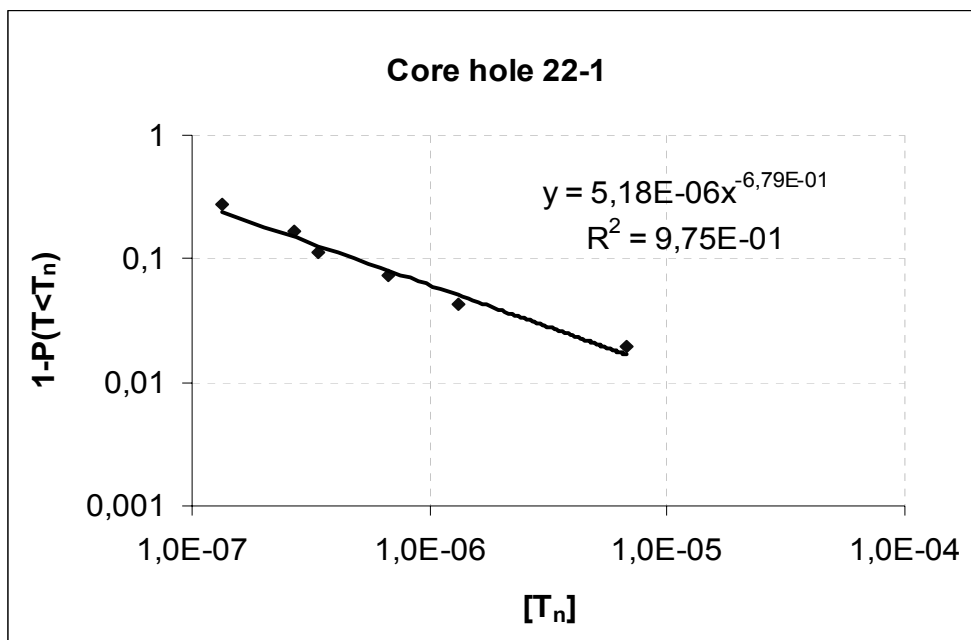
$$t_{\min} \geq t_D \cdot t_0 = t_D \cdot \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2} \quad [4.27e]$$

5 Beräkningar

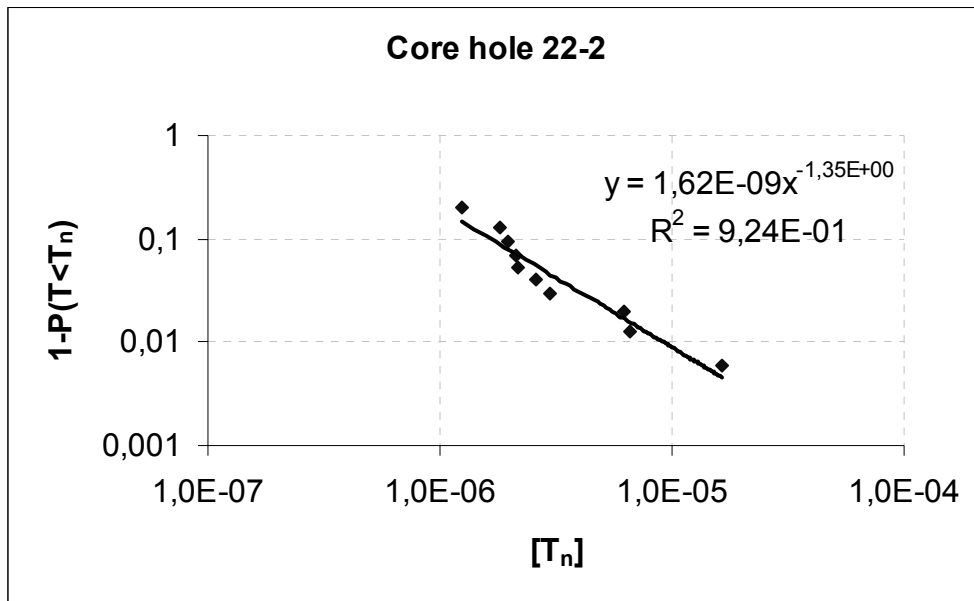
5.1 Kärnborrhål – Sprickfördelning (Pareto)

Av totalt 11 kärnborrhål som utfördes i förundersökningsskedet har kärnborrhål 22-1 till 22-6 (Namntall, 6st) analyserats. Kärnborrhål 31-1 till 31-5 (Björnböle, 5st) har en likvärdig fördelning av vattenförluster och har därför inte analyserats vidare. Kärnborrhål 22-1 till 22-6 från Namntalltunneln har således analyserats med utgångspunkt från presenterad sprickfördelningsteori. Syftet med analysen är att pröva teorin för att tolka bergmassans sprickfördelning samt som en jämförelse med motsvarande analys av de vattenförlustmätningar som utförts i samband med injekteringsborrning, se Figur 45 och Figur 46. Resultaten från kärnborrhålsanalysen presenteras i Figur 36 till Figur 44 och sammanfattas i Tabell 4.

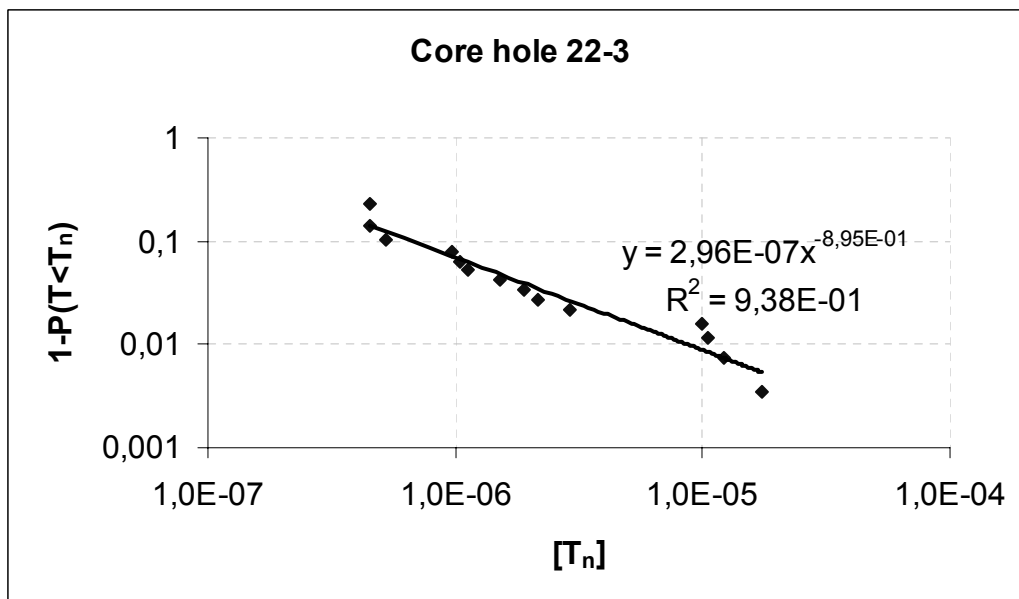
Analysen av spricktransmissivitetfördelningen visar sannolikheten att en enskild spricka har en viss transmissivitet. Exempelvis visas i Figur 36 sannolikheten att en enskild spricka har transmissivitet mindre än $1 \cdot 10^{-6}$ är 94%.



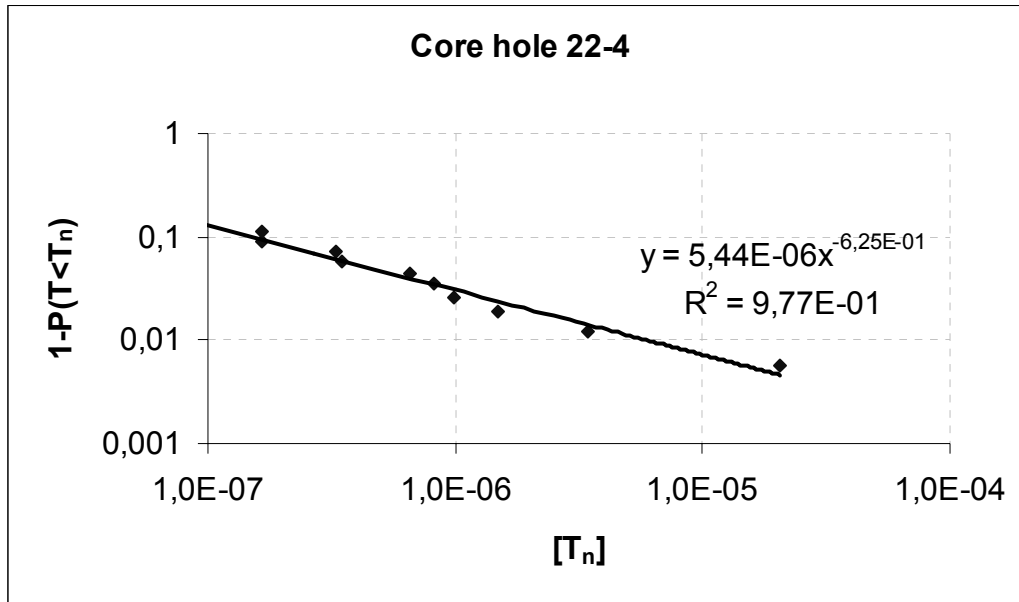
Figur 36. Kärnborrhål 22-1



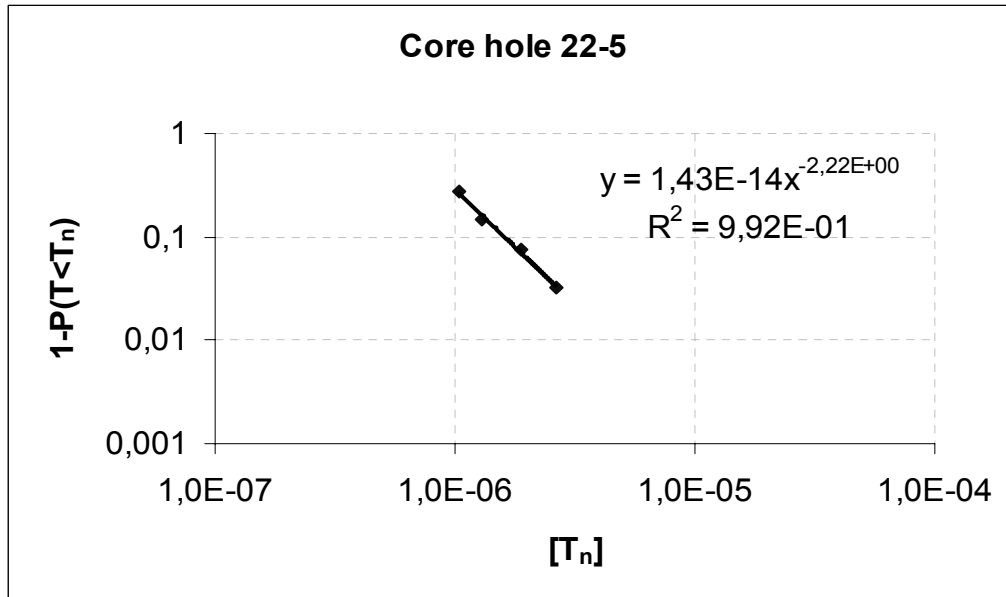
Figur 37. Kärnbrorrhål 22-2



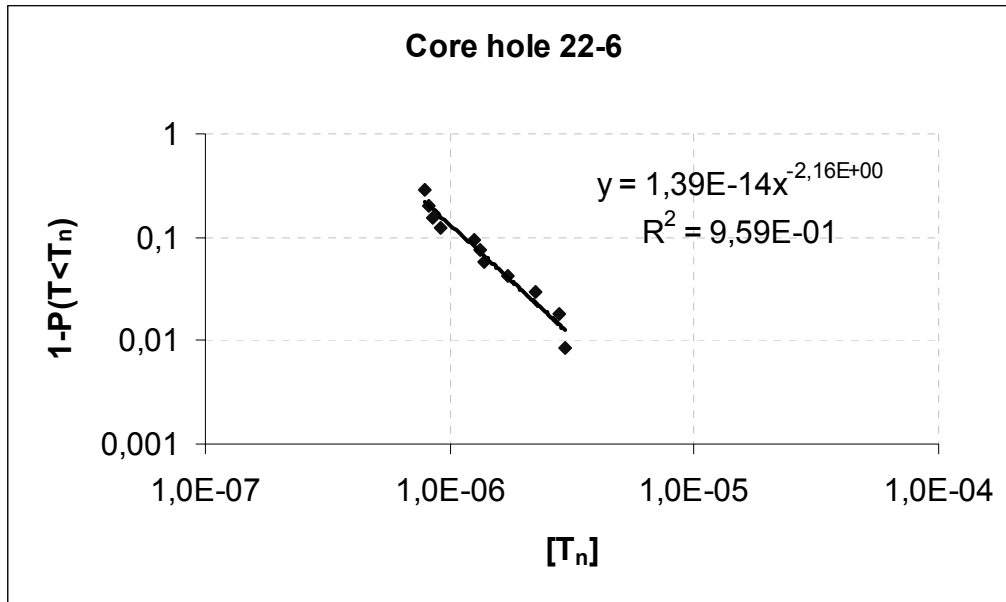
Figur 38. Kärnbrorrhål 22-3



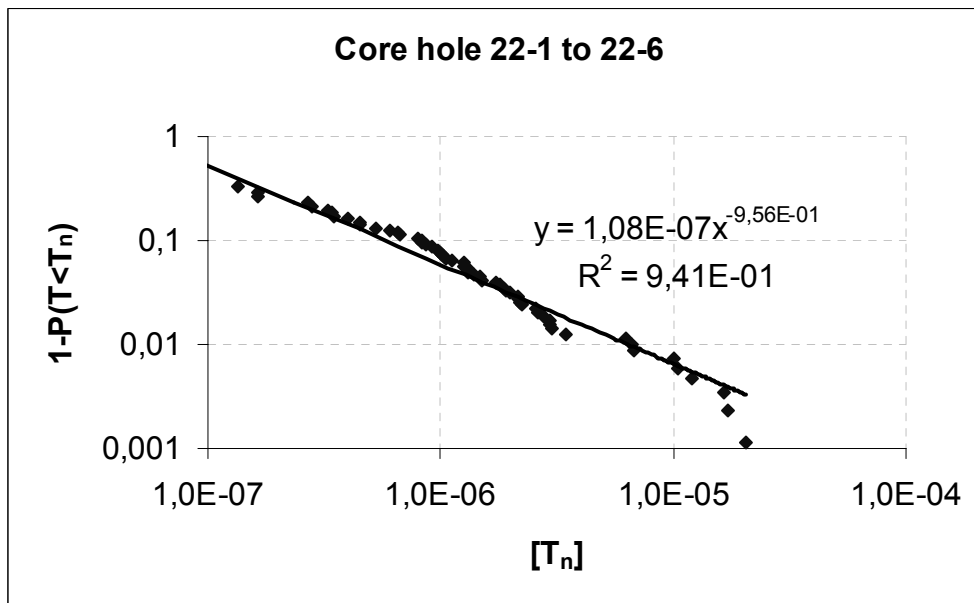
Figur 39. Kärnbråhåå 22-4



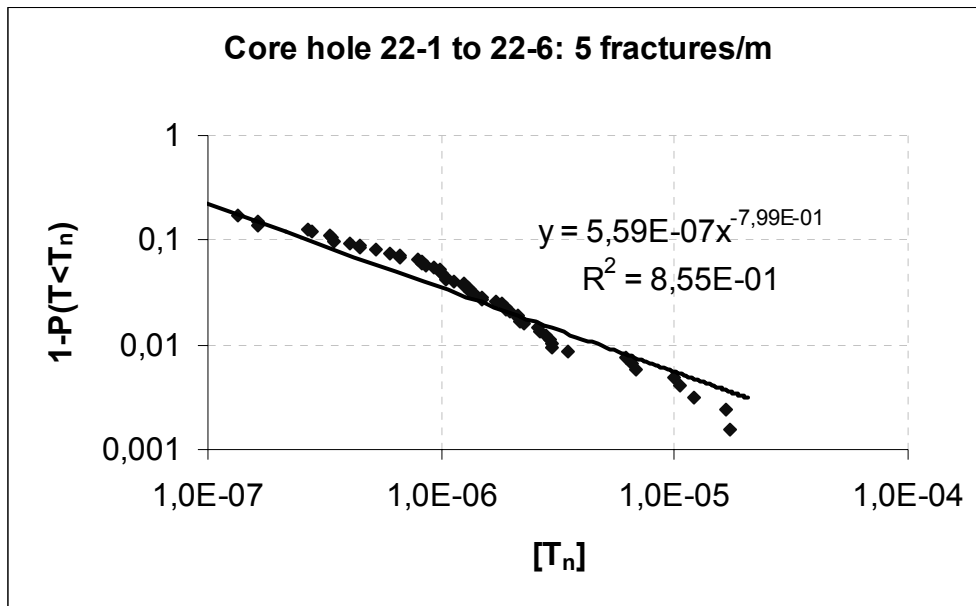
Figur 40. Kärnbråhåå 22-5



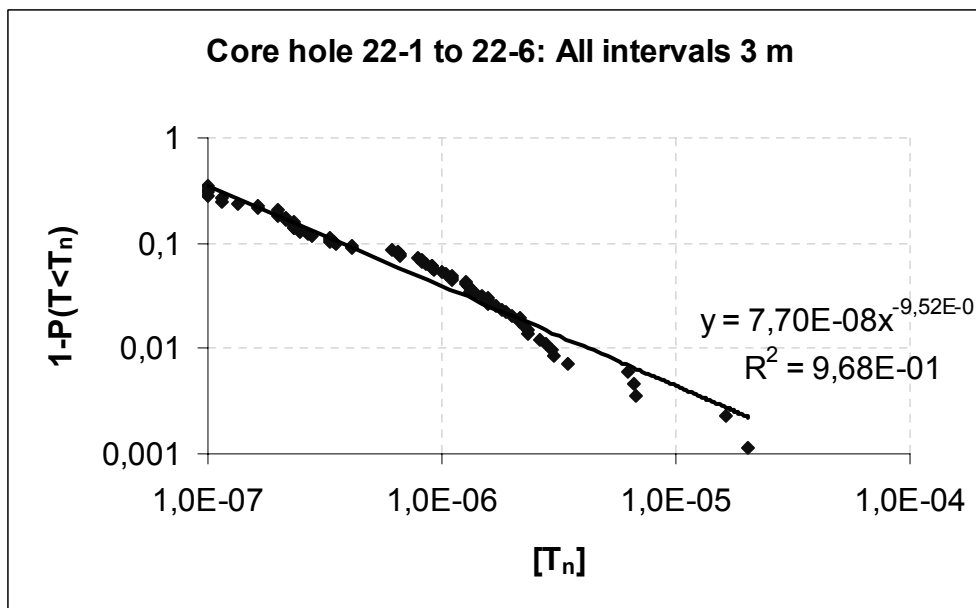
Figur 41. Kärnbrorrhål 22-6



Figur 42. Kärnbrorrhål 22-1 till 22-6 (samtliga hål).



Figur 43. Kärnbrörhål 22-1 till 22-6 (samtliga hål, antagen sprickfrekvens 5 sprickor/m)



Figur 44. Kärnbrörhål 22-1 till 22-6 (alla intervall 3 m)

Parametrarna k och A visar formen på den räta linjen. K -värdet visar på lutningen på kurvan och A -värdet visar för vilken sannolikhet y ($1-P(T < T_n)$), x (T_n) är lika med 1. Vid jämförelser tycks k värdet vara det som bäst beskriver genomsläppligheten på bergmassan. Där ett större k -värde visar en brantare kurva och därmed fler värden med ungefär samma transmissivitet. Beräknade max transmissiviteter (T_{max}) visar inte alls samma skillnader som beräknade A -värden. Men man skall komma ihåg att T_{max} värdet även är beroende av totala antalet sprickor (för hela kärnbrörhålet), se avsnitt 4.2. Som exempel har kärnbrörhål 22-1 till 22-5 jämförbara T_{max} -värden om man tar hänsyn till sprickantalet, se Tabell 4.

Resultaten från beräkningarna visar att kärnborrhål 22-1 och 22-4 har snarlika konstanter k och A ($k=0,62-0,68$ $A=5,2 - 5,4 \cdot 10^{-6}$). Vidare kan en intressant jämförelse göras med 22-5 och 22-6 som sinsemellan har likartade k och A värden ($k=2,2$ $A=1,4 \cdot 10^{-14}$) dock är det en betydande skillnad mellan dessa olika grupper av data. En möjlig tolkning av detta är att 22-5 och 22-6 går i ett område med större och mer vattengenomsläppliga sprickor jämfört med 22-1 och 22-4. 22-2 och 22-3 verkar ligga mitt emellan dessa grupper tolkat från sprickfördelnings- parametrarna. Geologiskt skulle tolkningen kunna vara att 22-1 och 22-4 representerar ett tätare berg och där 22-5 och 22-6 representerar ett berg som är av mer hydraulisk genomsläpplig karaktär.

Analyseras samtliga kärnborrhål 22-1 till 22-6, se Figur 42, bedöms en sorts medelvärde för kärnborrhålen erhållas vilket också kan ses på k och A värdena ($k=0,96$ $A=1 \cdot 10^{-7}$). Vidare kan konstateras, Figur 43, att beräkningen är måttligt känslig för förändring av sprickantal ($k=0,74$ $A=2,4 \cdot 10^{-6}$). En anpassning av intervalllängderna till 3 m längd verkar inte påverka helheten. Dock påpekas att nästan samtliga intervall med 6 och 9 m längd återfinns i 22-3. I samband med utförandet av beräkningarna gjordes motsvarande intervall anpassning för 22-3. k och A värden för denna beräkning skilde sig i denna analys mer påtagligt.

R^2 -värdet visar hur nära mätpunkterna ligger kurvanpassningen. Nästan all data ligger över 0,9 och fyra av sex kärnborrhål har R^2 -värden över 0,95. Som kan ses beskriver fördelningen ganska väl mätpunkterna.

I kapitel 5.2 har motsvarande teoretiska beskrivning av bergmassan utförts baserat på vattenförlustmätningarna i sonderingshålen. Tabell 4 har kompletterats med dessa resultat.

Tabell 4. *Utvärderade fördelningsparametrar för kärnborrhål 22-1 till 22-6 och uppföljda sonderingshål från Namntall Mellan och Björnböle Mellan.*

Borrhål	Antal intervall (-)	Intervall längd (m)	Sprickantal N(-)	K (-)	T_{\max} (m^2/s)	R^2 (-)
22-1	7	3	56	0,679	$6,4 \cdot 10^{-6}$	0,975
22-2	11	3,9	180	1,35	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,924
22-3	15	3,6,9	300	0,895	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,938
22-4	12	3	184	0,625	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,977
22-5	5	3	36	2,22	$3,0 \cdot 10^{-6}$	0,992
22-6	12	3	124	2,16	$3,6 \cdot 10^{-6}$	0,959
22-1 till 22-6	62	3,6,9	880	0,956	$6,2 \cdot 10^{-5}$	0,941

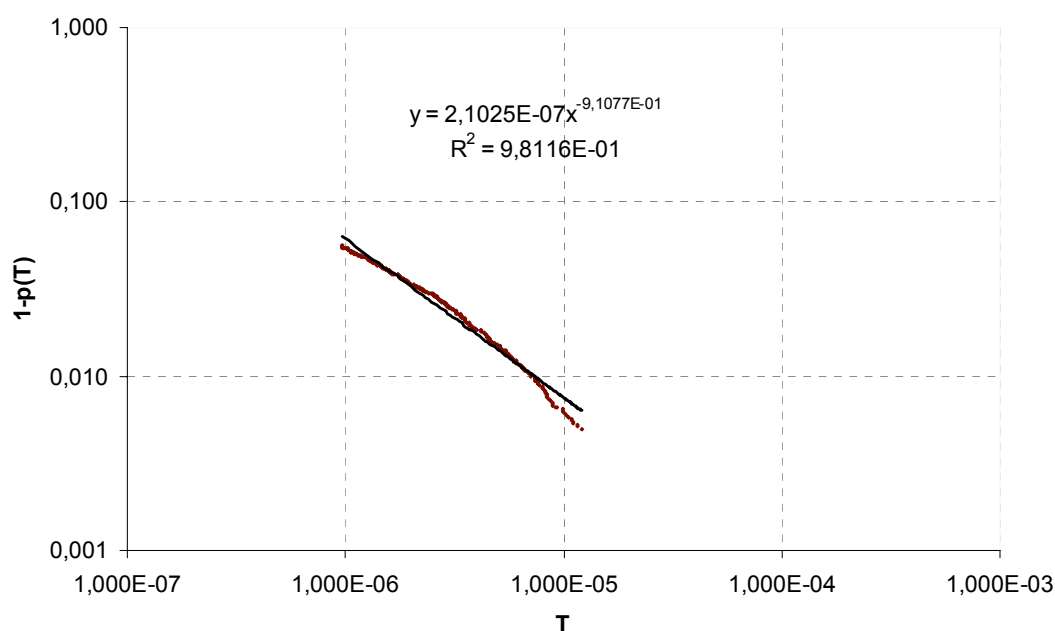
22-1 till 22-6 spr/m	5	62	3,6,9	1308	0,799	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,855
22-1 till 22-6 intervall längd 3 m		86	3	881	0,952	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0,968
Namntall Mellan (sonderingshål)		906	24	9293	0,911	$1,06 \cdot 10^{-3}$	0,981
Björnböle Mellan (sonderingshål)		907	24	9313	0,67	$8,9 \cdot 10^{-3}$	0,981

5.2 Injekterings- sonderingsborrhål – Sprickfördelning (Pareto)

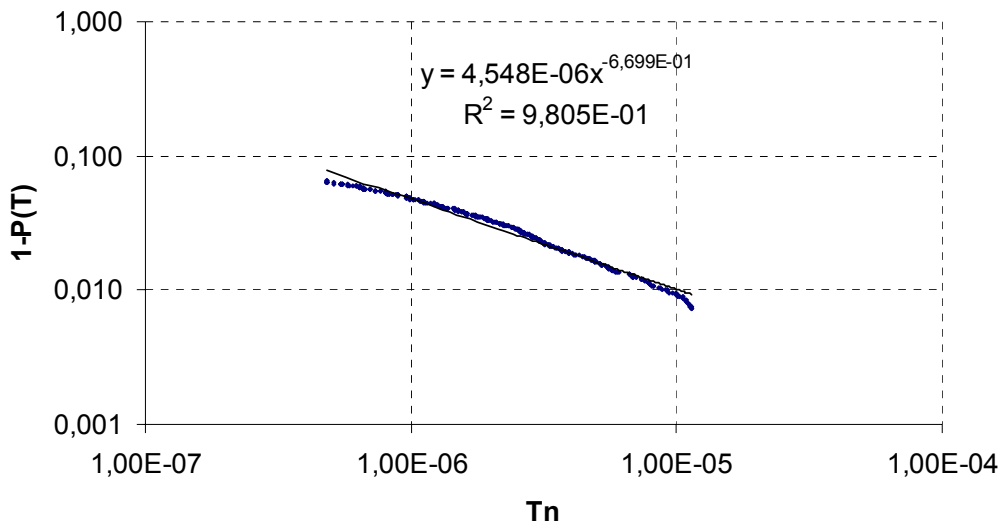
Analysprocessen utgår från utförda vattenförlustmätningar i sonderings/injekteringsborrhål vid Björnböle Mellan och Namntall Mellan. Genom att bestämma varje testsektions transmissivitet och genom att anta ett sprickantal kan sprickornas transmissivitetsfördelning och en sprickviddsfördelning beräknas (kap 5.2.1)

I analysen har samtliga vattenförlustmätningar använts initialt. Därefter har datan trunkerats motsvarande mätintervallet i vattenflödesmätaren 2 – 38 l/min (detta motsvarar ett Lugeonvärde på ca 0,2 – 4 Lu, beräknat för ett 20m borrhål och 0,5 MPa övertryck) och sedan görs kurvanpassningen och beräkning av konstanter A och k.

Transmissivitetsfördelning och kurvanpassning visas i Figur 45 och Figur 46 .



Figur 45. Namntall Mellan. Transmissivitetsfördelning och kurvanpassning.



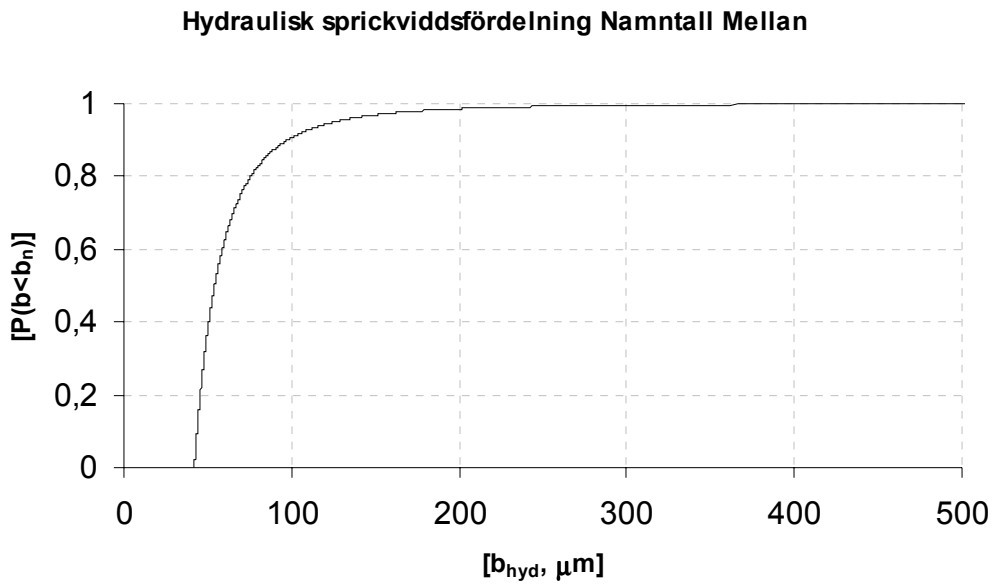
Figur 46. Björnböle Mellan. Tranmissivitetsfördelning och kurvanpassning.

Kurvanpassningen i Figur 45 och Figur 46 används vid beräkning av den hydrauliska sprickviddsfördelningen i kap 5.2.1.

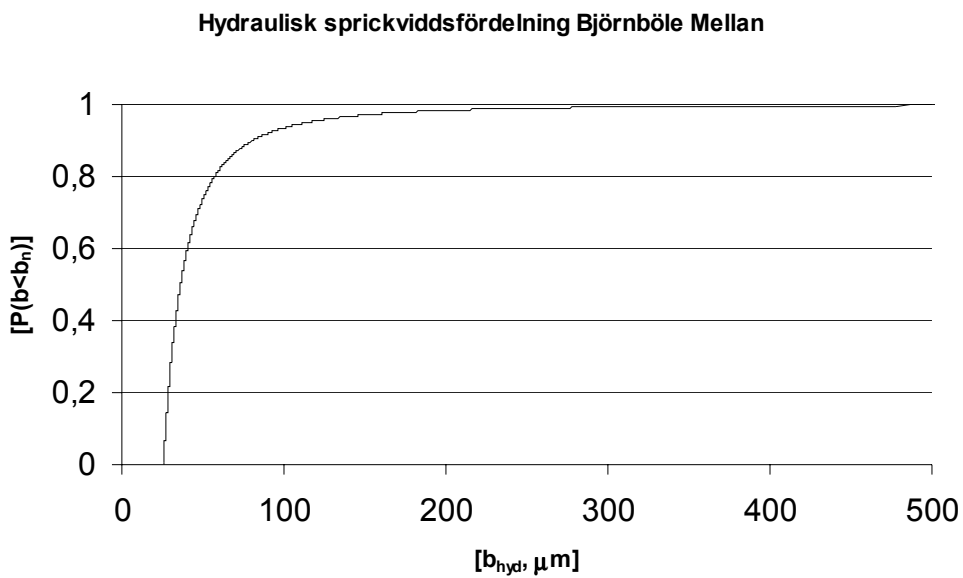
5.2.1 Hydraulisk sprickviddsfördelning

För att kunna bestämma krav på injekteringsbruk och inträngningslängder bör bergmassans sprickviddsfördelning beskrivas. En bergspricka har varierande vidd, innehåller olika fyllningsprodukter och bergfragment samt är förbundna med varandra i ett nät av sprickkorsningar. Vatten och injekteringsbruk väljer i stort samma vägar och då sprickvidden inte kan mätas direkt generaliseras sprickornas hydrauliska egenskaper till att definiera en hydraulisk sprickvidd (enligt kubiklagen ekvation 4.1).

Baserat på transmissivitetsfördelningen i kap 5.2 har den hydrauliska sprickviddsfördelningen beräknats. Baserat på tunnelkarteringen och en uppskattad spricklängd på 10-20 m bedöms ett medelsprickantal till ca 10 sprickor per tunnelmeter för uppföljningssträckan. Vanligen borrar ca 20 st sonderings- injekteringshål vilket (för att inte räkna sprickorna dubbelt) ger en spricktäthet på 0,5 vattenförande sprickor per meter sonderings- injekteringshål. För uppföljningssträckan (1000 m) kan totala antalet sprickor uppskattas till ca 10000.



Figur 47. Namntall Mellan. Hydraulisk sprickviddsfördelning.



Figur 48. Björnböle Mellan. Hydraulisk sprickviddsfördelning.

Beräkningarna visar att bergmassan i Björnböle Mellan består av en större del finare sprickor jämfört med Namntall Mellan (ner till ca 20 μm och ca 40 μm respektive). För Björnböle

Mellan utgör de finare sprickorna en mindre andel av den totala transmissiviteten än för Namntall Mellan.

Den beräknade sprickviddsfördelningen ger en anvisning om vilken sprickvidd som måste injekteras.

5.2.2 Beräkning av inläckage och behov av tätningsinsats

Behovet av tätningsinsatsen beror av inläckagekravet och bergmassans genomsläpplighet. Teoretiskt kan denna beräknas baserat på det teoretiska inläckaget och den analyserade sprickviddsfördelningen enligt ovan.

I Tabell 5 (Björnböle Mellan) och Tabell 6 (Namntall Mellan) visas beräknade inläckage för olika tryckhöjd, ekvation 5.1, beroende på injekterad sprickvidd, ekvation 4.11 – 4.13.

$$q = \frac{2\pi K_0 H}{\ln\left(\frac{2H}{r}\right) + \left(\frac{K_0}{K_{inj}} - 1\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{r}\right) + \zeta} \quad [5.1]$$

Där

q = inläckage [$\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$]

K_0 = Bergmassans medelkonduktivitet

K_{inj} = Den injekterade zonens konduktivitet

H = Tryckhöjden (grundvattentrycket)

r = ekvivalent tunnelradie (Area spår tunnel + Area service tunnel)

t = den injekterade zonens tjocklek

ζ = skin faktor satt till 3 (normalt mellan 3-10)

Tabell 5. Björnböle Mellan. Inläckage efter injektering (beräknat efter transmissivitetsfördelningen).

Injekterad sprickvidd	Medel konduktivitet	T_{tot}/T_{inj}	H=100 m [l/min.100 m]	H=75 m [l/min.100 m]	H=50 m [l/min.100 m]	H=25 m [l/min.100 m]
100 μm	$1,7 \cdot 10^{-7}$	42	19,5	15	10	5
50 μm	$1,7 \cdot 10^{-7}$	129	7	5,5	4	2

Medelkonduktiviteten är beräknad på hela transmissivitetsfördelningen d v s den kan anses utgöra ett medelvärde för bergmassan i sin helhet innan injektering. Tätningstalet, T_{tot}/T_{inj} ger information om hur stor del av hela transmissivitetsfördelningen som tätas givet en viss hydraulisk sprickvidd efter injektering. Ett värde på 1 anger att bergmassan är i stort otätad och ett värde på 100 anger att bergmassan tätats till 99 % (som ett mått på reduktion av transmissivitet).

Tabell 6. Namntall Mellan. Inläckage efter injektering (beräknat efter

transmissivitetsfördelningen).

Injekterad sprickvidd	Medel konduktivitet	$T_{\text{tot}}/ T_{\text{inj}}$	H=100 m [l/min.100 m]	H=75 m [l/min.100 m]	H=50 m [l/min.100 m]	H=25 m [l/min.100 m]
100 μm	$1,5 \cdot 10^{-7}$	6	57	44	31	17
50 μm	$1,5 \cdot 10^{-7}$	34	21	16	11	5

Som kan ses skiljer sig beräknade inläckage och tätningstal mellan tunnlarna. Verkliga uppmätta inläckage skiljer sig däremot ej på samma sätt (ca 20 l/min.100m för Björnböle Mellan och Namntall Mellan). Vilket leder till att viss försiktighet bör iaktas i tillämpningen av teorin.

För att vidare studera inläckagen från Björnböle Mellan och Namntall Mellan har först medelkonduktiviteten för respektive injekteringsklass beräknats, Tabell 7. Det bör påpekas att medelkonduktiviteten är beräknad med en extrapolering av värdena mellan mätgränserna (2 l/min – 38 l/min). Extrapoleringen har utförts dels efter teoretisk sprickfördelning (Gustafson et al 2004) och dels med antagandet att samtliga värden mindre än 0,2 Lu har ett värde på 0,1 Lu $(0 + 0,2)/2$. För injekteringsklass C har ett relativt stort antal hål förbindelse varför en viss korrelation av mätvärden antas. Därför anges ett intervall inom vilket medelkonduktiviteten för klass C berg bedöms ligga. Approximativt värde är beräknat utan extrapolerade värden.

Tabell 7. Beräkning av medelkonduktivitet.

Björnböle Mellan (ca 1000 m):	Medelkonduktivitet [m/s]
Klass A: 40%	$1,8 - 2 \cdot 10^{-8}$
Klass B: 28%	$5,7 - 5,9 \cdot 10^{-8}$
Klass C: 32%	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$ (approx. värde $4,6 \cdot 10^{-7}$)
Namntall Mellan (ca 900 m):	
Klass A: 30%	$2,3 - 2,9 \cdot 10^{-8}$
Klass B: 32%	$8,4 - 8,6 \cdot 10^{-8}$
Klass C: 38%	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$ (approx. värde $3,1 \cdot 10^{-7}$)

För medelkonduktiviteter enligt Tabell 7 har inläckaget beräknats enligt ekvation 5.1.

Tabell 8. Beräkning av inläckage efter injektering.

Björnböle Mellan	K_0	K_{inj}	H=100 m	H=75 m	H=50 m	H=25 m
Klass A: 40%	$2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	4,2	3,3	2,4	1,3
Klass B: 28%	$5,9 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	6,4	4,9	3,4	1,9
Klass C: 32%	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	15,6	11,8	8,0	4,0
Totalt l/min.100m			26,2	20,0	13,7	7,2

Tabell 9. Beräkning av inläckage efter injektering.

Namntall Mellan	K_0	K_{inj}	H=100 m	H=75 m	H=50 m	H=25 m
Klass A: 30%	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	4,2	3,3	2,3	1,3
Klass B: 32%	$8,6 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	9,1	7	4,9	2,6
Klass C: 38%	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	17,3	13,2	8,9	4,6
Totalt l/min.100m			30,7	23,4	16,1	8,5

För att göra en bedömning av behovet av tätningsinsatser jämförs inläckageberäkningen med täthetskravet, vilket är 7 l/min.100m för Björnböle och 12 l/min.100 m för Namntalltunneln. Bedömningen görs baserat på beräkningsresultaten i Tabell 5 och Tabell 6. Behovet, för att nå täthetskravet, är att bergmassan måste tätas ner sprickvidder ner till 50-75 μm enligt

sprickviddsfördelningen. Givet detta, görs bedömningen att inläckagen kommer att ligga mellan 4 – 10 l/min.100 m.

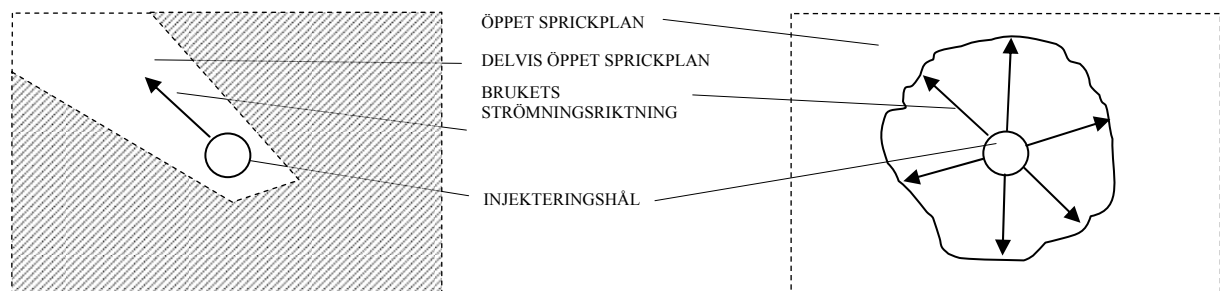
Jämförs de olika beräkningarna; Tabell 5 och Tabell 6 jämförs med Tabell 8 och Tabell 9 och verkligt inläckage; bedöms sprickfördelningen i verkligheten ge största inläckage (för Namntall Mellan). Skillnaden för inläckage beräkningen är markant mellan tunnlarna, Tabell 5 och Tabell 6. För en konventionell beräkning av inläckagen, Tabell 8 och Tabell 9, med en tryckhöjd på 50 m över tunnlarna beräknas inläckaget till 14 och 16 l/min.100m om bergmassan tätas till en hydraulisk konduktivitet av $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Sannolikt överskattar beräkningarna inläckaget.

5.3 Dimensionalitet och inträngningslängd

Följande kapitel redovisar resultat från uppföljning av information avseende injekteringstryck, bruksflöde och injekterad volym. Informationen är insamlad genom automatisk registrering av parametrarna under pågående injektering med tidsintervall om ca 10 sekunder. Utvärderad information avser sex stycken injekteringskärrmar i olika injekteringsklasser inom tidigare beskriven uppföljningssträcka för detaljerad uppföljning (517+700 – 517+800).

5.3.1 Dimensionalitätsanalys

Med dimensionalitet avses på vilket sätt som injekteringsbruket strömmar i de sprickplan som korsar det injekteringshål som bruket pumpas in i, det vill säga om det är endimensionell strömning (kanalströmning) eller tvådimensionell strömning. Detta beror bland annat av hur sprickplanen är orienterade i förhållande till injekteringshålet, och hur sprickvidden varierar. Se Figur 49.



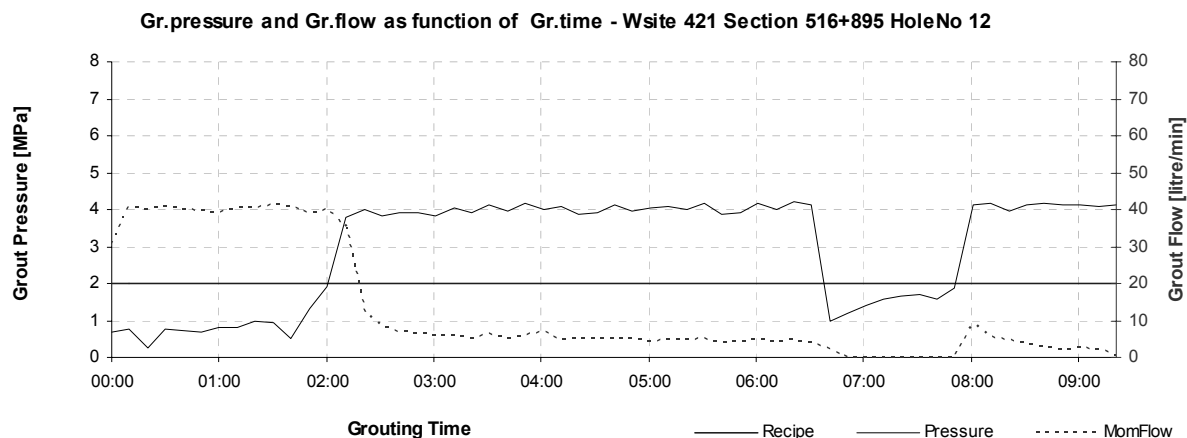
Figur 49. Princip endimensionell och tvådimensionell strömning

Med underlag av insamlade data ritas diagram över bruksflöde som funktion av tid. Bruksflödet representeras av ett dimensionslöst flöde beräknat som $Q \cdot t / V$, dvs momentant bruksflöde \cdot ackumulerad tid / ackumulerad volym. Dessa värden jämförs sedan med diagnoskurvor för endimensionell respektive tvådimensionell strömning i bergmassan.

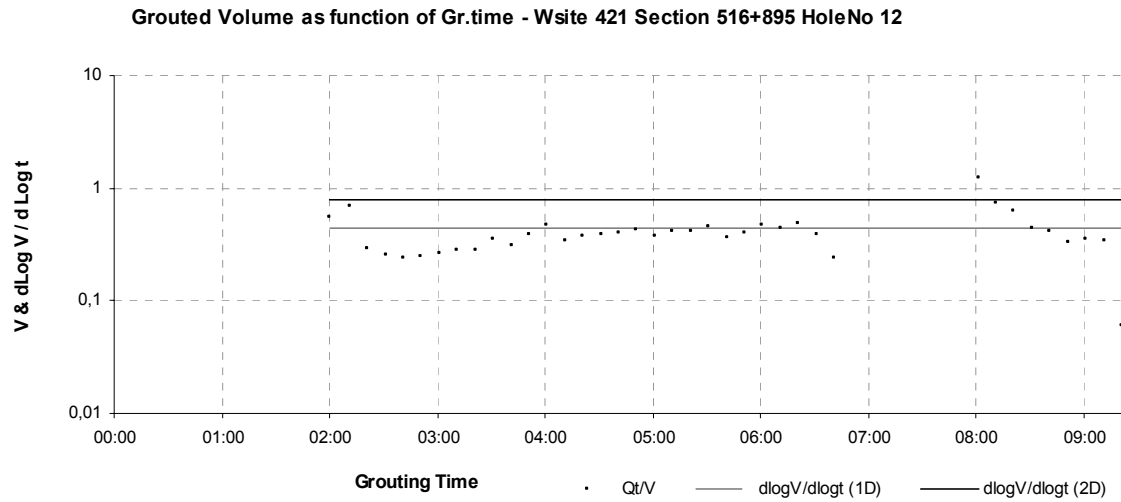
Figur 50 till Figur 57 visar typexempel på injekteringar som analyserats med avseende på dimensionalitet. Vid analys av totalt sex injekterings-skärmar inom uppföljningssträckan så är det endast ett fåtal injekteringshål som med bestämdhet uppvisar ett idealiskt endimensionellt eller tvådimensionellt flöde. Utöver dessa enstaka fall förekommer det att dimensionaliteten successivt övergår från tvådimensionell strömning till endimensionell strömning enligt Figur 55, men vanligast förekommande bland de undersökta injekterings-skärmarna är att strömningsförhållandet i bergmassan tycks vara ”tredimensionellt” (Figur 57).

En möjlig orsak till att strömningen varierar från tvådimensionell till endimensionell strömning kan vara att injekteringsbruket till en början tillåts att spridas i två dimensioner genom öppna sprickplan för att sedan övergå till endimensionell strömning då den tvådimensionella strömningsvägen blockerats eller strypts av delar av sprickplan med mindre vidd eller att injekteringsbruket tränger in i håligheter som endast har utsträckning i en dimension. En möjlig illustration av denna typ av bruksspridning kan vara en handske eller en hand där bruket först strömmar i handflatans 2-dimensioner för att sedan minska i fingrarna till 1-dimensionellt flöde.

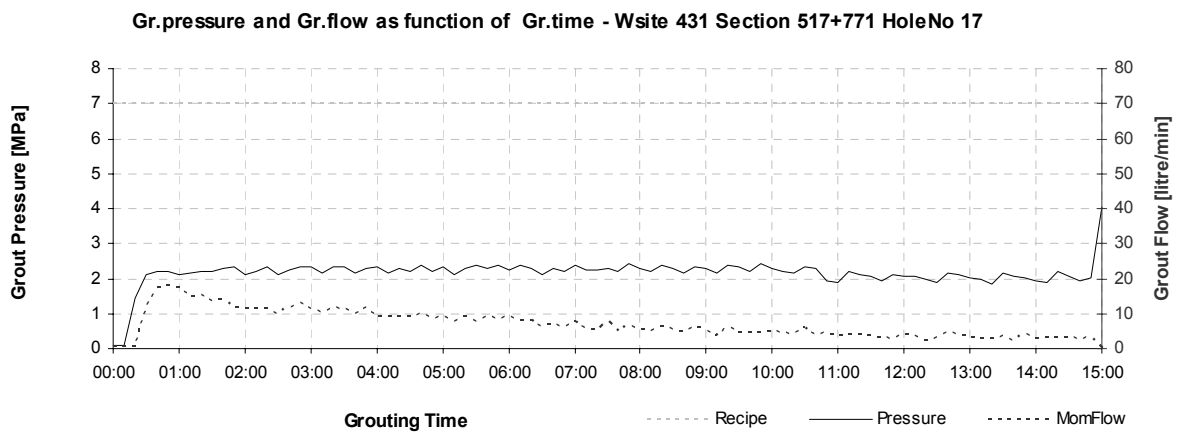
I det fall som flödeskurvan tycks påvisa ”tredimensionell” strömning antas möjlig orsak till detta vara att bergmassan är så pass uppsprucken att stora håligheter fylls med bruk eller att intilliggande injekteringshål fylls genom förbindelse eller bäggedera. Detta beteende verkar uppkomma regelbundet vid injektering i injekteringsklass C och relativt vanligt även i injekteringsklass B se Figur 58.



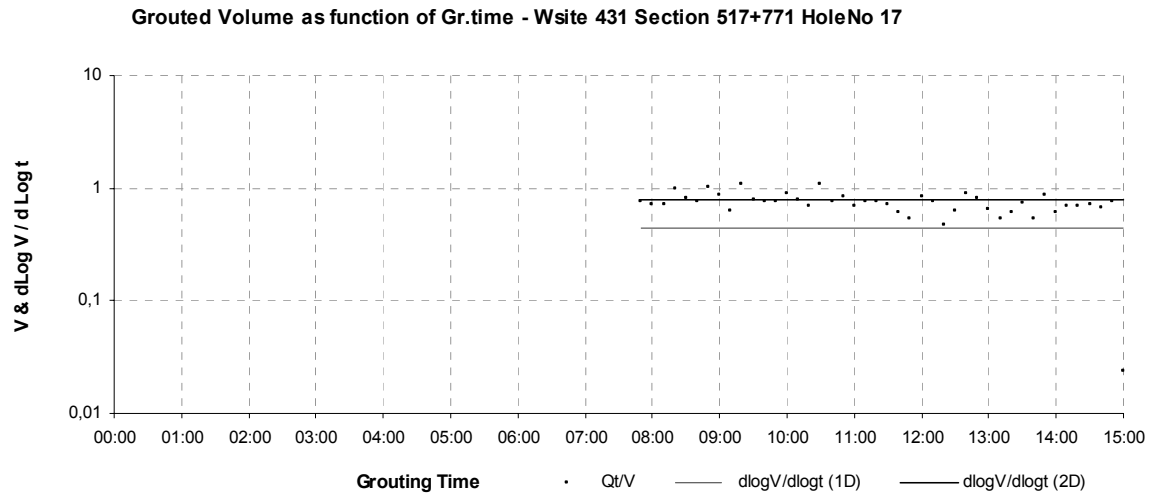
Figur 50. Tryck och flödesdiagram, typexempel endimensionellt flöde



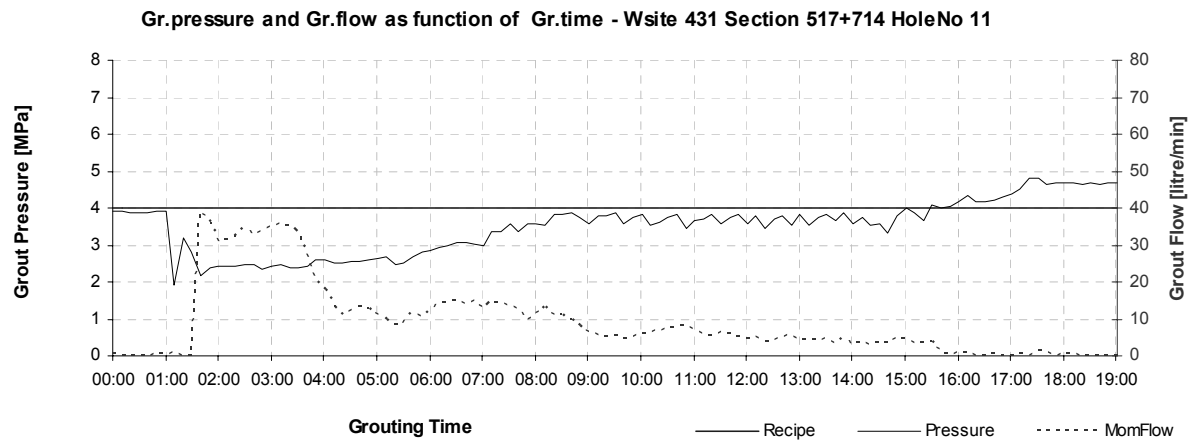
Figur 51. *Dimensionslöst flöde och diagnoskurvor, typexempel endimensionellt flöde*



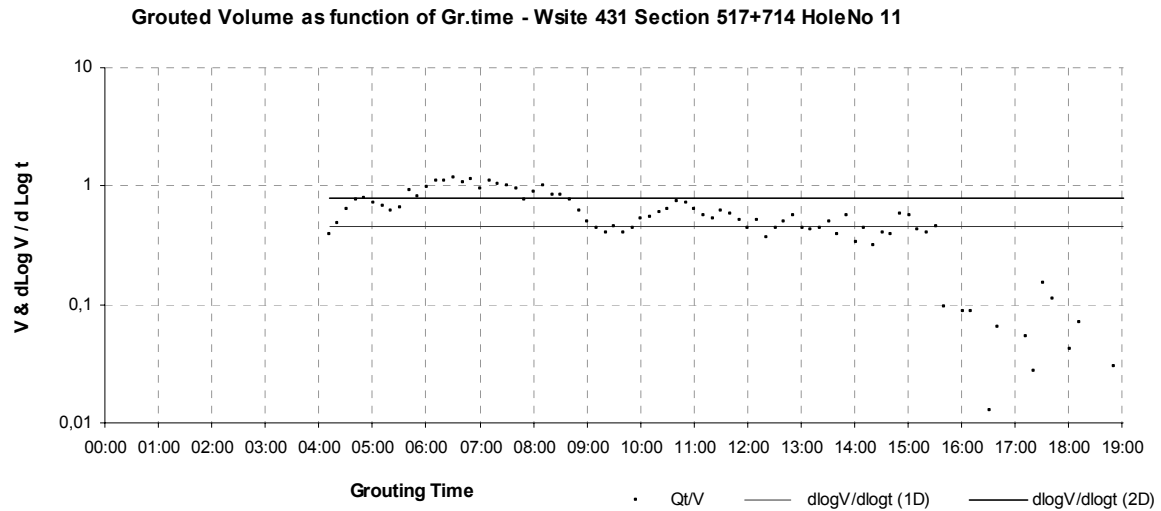
Figur 52. *Tryck och flödesdiagram, typexempel tvådimensionellt flöde*



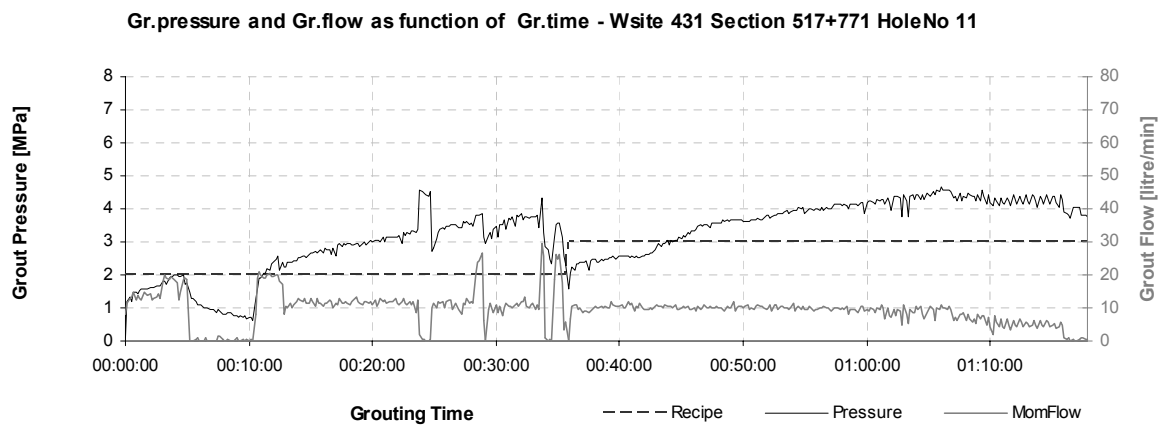
Figur 53. *Dimensionslöst flöde och diagnoskurvor, typexempel tvådimensionellt flöde*



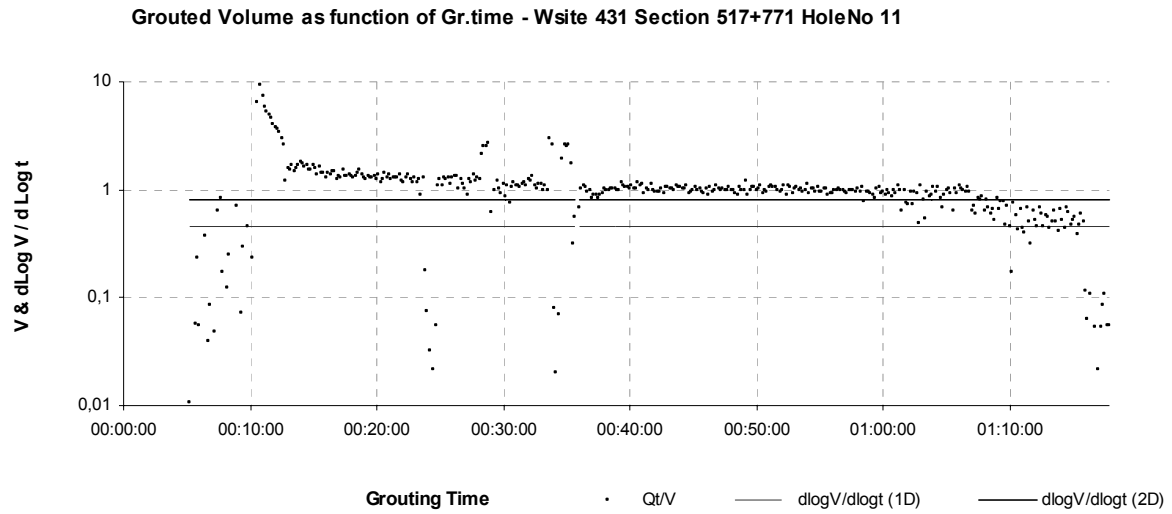
Figur 54. *Tryck och flödesdiagram, typexempel flöde i varierande dimension*



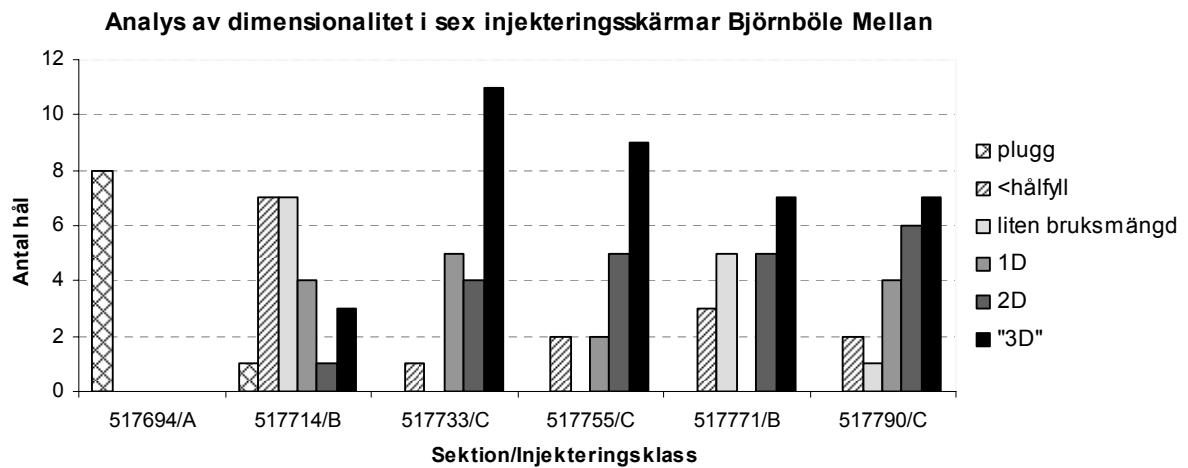
Figur 55. Dimensionslöst flöde och diagnoskurvor, typexempel flöde i varierande dimension



Figur 56. Tryck och flödesdiagram, typexempel "tredimensionellt" flöde



Figur 57. Dimensionslöst flöde och diagnoskurvor, typexempel "tredimensionellt" flöde



Figur 58. Analys av flödesdimensionalitet i sex injekteringsskärmar inom uppföljningssträckan

Tabell 10. Förklaring till benämningar i Figur 58

Benämning	Förklaring
Plugg	Tätt hål som pluggats med VCT 0.5
<hålfyll	Injekterad volym är mindre än teoretisk hålfyllnad pga att hålet är vattenfyllt eller fyllt genom förbindelse med tidigare injekterat hål.
Liten bruksmängd	Liten mängd bruk har kunnat injekteras i hålet
1D	Endimensionell strömning
2D	Tvådimensionell strömning
”3D”	Stor mängd bruk som injekterats med relativt lågt injekteringstryck

Av ovanstående analyser framgår att det framförallt i injekteringsklass C men även i injekteringsklass B sällan observerats (beräknats) ett endimensionellt eller tvådimensionellt flöde. En orsak till detta kan vara att injekteringsbruket tränger in i närliggande injekteringshål genom förbindelser via håligheter och kraftigt uppsprucken bergmassa.

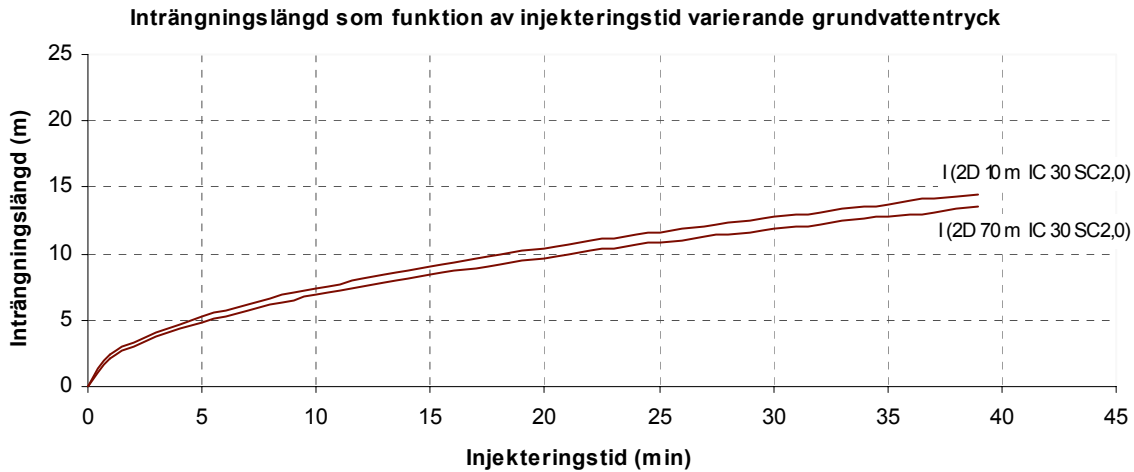
Kunskap om hur injekteringsbruket sprids i bergmassan enligt ovanstående analys bör generellt vara en bra förutsättning för projektering av injekteringsutförande. Dessutom så utgör den sannolikt ett bra verktyg för uppföljning och återkoppling vid produktion. Med detta menas att man under pågående projekt bör kunna detaljstyra injekteringen med högre noggrannhet genom att öka förståelsen för hur injekteringsbruket sprids i bergmassan. Injekteringsens effektivitet bör också kunna bedömas genom att studera injekteringstid relativt injekteringstrycken. En aktiv detaljstyrning/uppföljning baserat på ovanstående teori kan troligen förebygga/förklara inläckage.

5.3.2 Inträngningslängd, känslighetsanalys

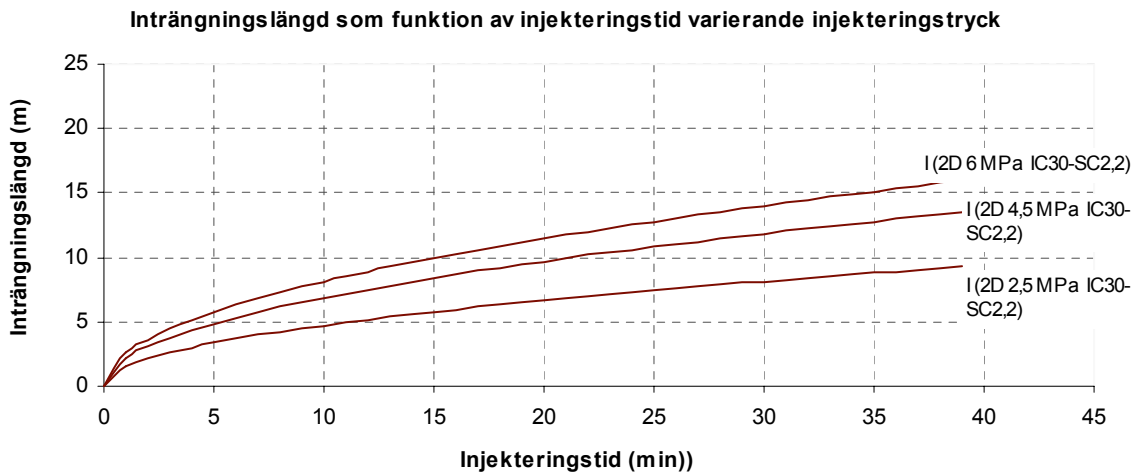
I nedanstående analys betraktas beräknad teoretisk inträngningslängd för det tvådimensionella fallet som funktion av injekteringstiden. Testade variabler är grundvattentryck, injekteringstryck och bruksegenskaper som redovisas i diagrammen i Figur 59 – Figur 61. Sprickvidd har valts till 100 µm med hänsyn till filterstabilitet för aktuella bruksblandningar.

- Grundvattentryckets inverkan har testats med två olika nivåer på grundvattenytans läge, 70m respektive 10m ovanför tunneln. Detta visar att grundvattentrycket har en relativt liten inverkan på beräknad inträngningslängd som funktion av tiden.
- Injekteringstryckets inverkan har testats med tre olika nivåer, 2,5 MPa, 4,5 MPa och 6,5 MPa. Detta visar att injekteringstrycket har en relativt stor inverkan på beräknad inträngningslängd som funktion av tiden.
- Bruksegenskapernas betydelse har testats genom beräkning för tre olika typer av injekteringsbruk Rheocem 650 med 2% Rheobuild 1000, IC30 med 2,2% Setcontrol och IC30 med 10% Groutaid. Kurvorna visar att bruksegenskaperna har en relativt stor

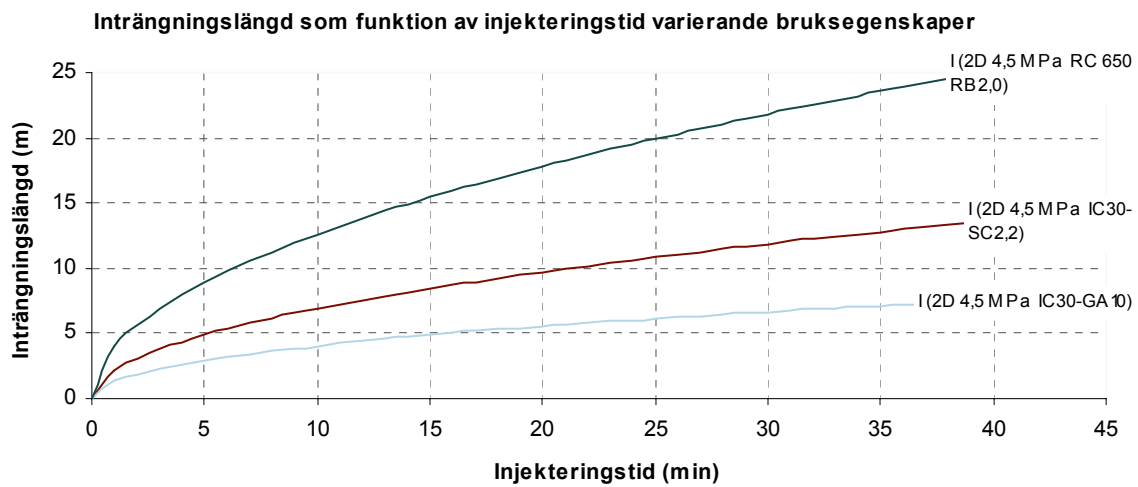
inverkan på beräknad inträngningslängd som funktion av tiden. I detta avseende är det de reologiska egenskaperna flytgräns och viskositet som har betydelse för inträngningslängden.



Figur 59. Inträngningslängd som funktion av injekteringstid med varierande grundvattentryck, 4,5MPa injekteringstryck



Figur 60. Inträngningslängd som funktion av injekteringstid med varierande injekteringstryck, 70 m grundvattentryck



Figur 61. Inträngningslängd som funktion av injekteringstid med varierande bruksegenskaper, 70 m grundvattentryck

5.4 Dimensionalitet och inträngningslängd som underlag för projektering

Teorin som tillämpas beskriver (a) hur bruksspridningens dimensionalitet kan bestämmas med hjälp av diagnoskurvor för endimensionell och tvådimensionell strömning, och (b) förhållandet mellan inträngningslängd och injekteringstid.

Nedan redovisas en metod för att använda dessa samband och utförda analyser för att bestämma parametrar vid injekteringsdesign. Eftersom denna typ av information inte finns tillgänglig innan förinjekteringen påbörjats så är det snarare frågan om att nyttja informationen för revidering av ursprunglig injekteringsdesign (aktiv design). Detta exemplifierar alltså en ansats till hur en förändring av injekteringsdesign utifrån analys av dimensionalitet och inträngningslängd kan göras i detta specifika fall.

5.4.1 Injekteringsdesign med avseende på dimensionalitet

Av dimensionalitetsanalys enligt kapitel 5.3.1 framgår att det i framförallt injekteringsklass C varit vanligt att brukets flöde i bergmassan tycks vara ”tredimensionellt”, vilket tros vara orsakat av att bruket sprids till stora sprickor och till andra injekteringshål. Vilket resulterar i långa injekteringstider och låga injekteringstryck (och därmed liten inträngningslängd i mindre sprickor). Alternativa designmässiga lösningar på denna typ av problem är

- a) samtidig injektering av hål med förbindelse, eller
- b) ändring av skärmgeometrin med färre injekteringshål (flera injekteringsomgångar)

Dessa lösningar är rent logiska och verkligheten är naturligtvis inte lika enkel. Det första alternativet kräver hög kapacitet på utrustning för blandning och pumpning av injekteringsbruk, och det andra alternativet medför att avståndet mellan injekteringshålen blir för stort för att sprickor med liten sprickvidd skall tätas. Alternativ B kräver alltså att förinjektering utför i två omgångar där den första omgången med glest borrade injekteringsskärmar syftar till att erhålla en tätning av större sprickor, och den andra omgången med kortare hålavstånd avser att täta mindre sprickor.

5.4.2 Bestämning av designparametrar utifrån samband mellan inträngningslängd och injekteringstid

Nedan följer en beskrivning av ingående designparametrar och antagna kriterier för att välja parametrarnas värden som antingen givits av föregående analyser eller erfarenhet av förinjektering i allmänhet. Slutgiltig bestämning av parametervärden avgörs av dimensioneringsdiagram upprättade för värden på ingående parametrar.

Dimensionerande sprickvidd

Kriterium för dimensionerande sprickvidd, dvs till vilken minsta sprickvidd som bergmassan skall tätas, bestäms utifrån täthetskrav och bergmassans hydrogeologiska egenskaper. Dimensionerande sprickvidd kan till exempel bestämmas utifrån beräkning av erforderlig minsta resttransmissivitet som tidigare beskrivs i kapitel 5.2. I detta fall bedöms injektering av sprickvidder ned till ca 50 µm erfordras för att erhålla en tillräckligt tät injekterad zon runt tunneln.

Injekteringstryck

Vid val av injekteringstryck beaktas bland annat bergmassans egenskaper, aktuell bergtäckning, vattentryck. I detta fall har injekteringstrycket valts med hänsyn till att analys av tryck-flödes diagram visar att det i viss mån förekommer ”jacking” av bergmassan, dvs att man vid höga injekteringstryck öppnar sprickor vilket kan orsaka läckage till intilliggande injekteringshål eller till stuff.

Vattentryck

Vid beräkning antas normalt att grundvattennivån är densamma som bergets överyta.

Bruksegenskaper

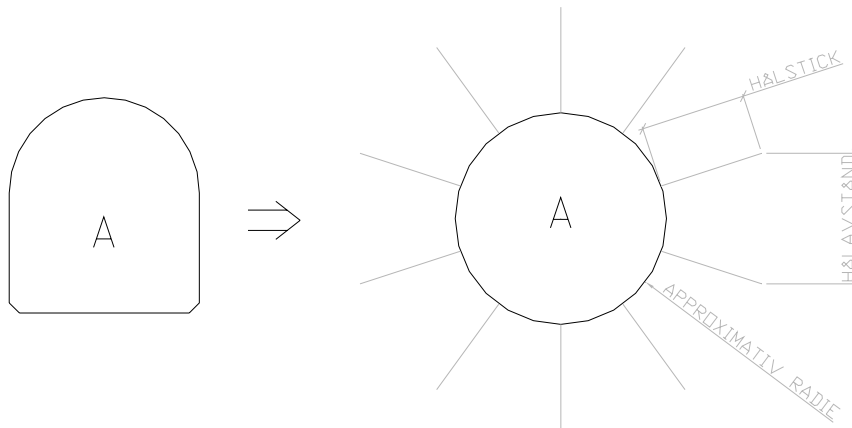
Tillämpade värden för injekteringsbrukets reologiska egenskaper framgår av laboratorieförsök där viskositet och flytgräns bestäms med viskosimeter för aktuell bruksblandning och VCT enligt Tabell 11.

Tabell 11. *Bruksegenskaper enligt provning vid laboratorium*

Cement	Tillsatemedel	VCT	Flytgräns (Pa)	Viskositet (mPas)	Källa
IC30	Setcontrol 2,2%	1.0	0,6	13	Provn inj.bruk VUC 05-06-03
IC30	Setcontrol 2,2%	0.8	1,6	22	Provn inj.bruk VUC 05-06-03
IC30	Setcontrol 2,2%	0.5	21,7	157	Provn inj.bruk VUC 05-06-03
IC30	Groutaid 10%	1.0	9,3	34	Provn KTH
UF16	Setcontrol 2,0%	2.0	0,06	9	Provn inj.bruk VUC 05-08-17 och 05-09-15
UF16	Setcontrol 2,0%	1.0	2,0	27	Provn inj.bruk VUC 05-08-17 och 05-09-15
UF16	Setcontrol 2,0%	0.8	5,5	50	Provn inj.bruk VUC 05-08-17 och 05-09-15
Reocem 650	Rheobuild 1000 2,0%	1.0	0,03	4	Provn inj.bruk VUC 00-04-12
Reocem 650	Rheobuild 1000 2,0%	0.8	0,2	8	Provn inj.bruk VUC 00-04-12

Antal hål - Hålavstånd

Hålavstånd beräknas som det största hålavståndet i änden av två intilliggande injekteringshål. I beräkningarna har tunnels verkliga tvärsnittsarea approximerats till ett cirkulärt tvärsnitt varpå teoretiskt hålavstånd beräknas utifrån approximativ tunnelradie, hålstick och antal hål.



Figur 62. Approximerat cirkulärt tunneltvärsnitt för beräkning av teoretiskt hålavstånd

Hålavståndet, L , för approximerat cirkulärt tunneltvärsnitt beräknas som

$$L = \frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot (r + s)$$

där

L = teoretiskt hålavstånd

n = antal hål

r = approximativ radie

s = hålstick

Kontroll av ovanstående approximation visar att ett hästskoformat tunneltvärsnitt kräver ett extra hål för att erhålla samma minsta hålavstånd som för det approximerade cirkulära tvärsnittet. Detta beror på att det hästskoformade tvärsnittet har en större omkrets i förhållande till tvärsnittsarean än motsvarande förhållande för det cirkulära tvärsnittet.

Hålavståndet i efterföljande beräkningar multiplicerats med en faktor 2 som säkerhet mot metodens tillförlitlighet och eventuell hålavvikelse, dvs erforderlig inträngningslängd = L .

Om borrhålsavvikelsen beaktas kan två kriterier för erforderlig inträngningslängd ställas upp (Stille&Holmberg, 2005, [ref 5]). Borrhålsavvikelse får ej få till följd att:

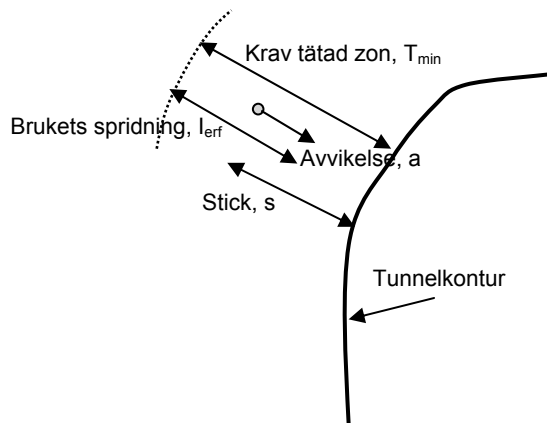
- den tätade zonen inte blir tillräckligt djup med avseende på avståndet mellan tunnelkontur och den tätade zonen yttre gräns
- den tätade zonen inte blir kontinuerlig runt tunneln, det vill säga avståndet mellan enskilda borrhål blir för stort.

Injekteringen uppfyller ställda krav när alla vattenförande sprickor som går att täta med vald cementsort är fyllda med injekteringsbruk inom det avstånd från tunneln som definierar minsta omfattning på den zon som ska tätas, se Figur 63. Under antagandet att borrhålets avvikelse i riktning mot tunneln är dimensionerande kan följande uttryck tecknas

$$T_{\min} \leq (s - a) + I_{erf}$$

Det betyder att största tillåtna avvikelse som funktion av injekteringsbrukets spridning, I_{erf} , kan tecknas

$$a \leq (s + I_{erf}) - T_{\min}$$

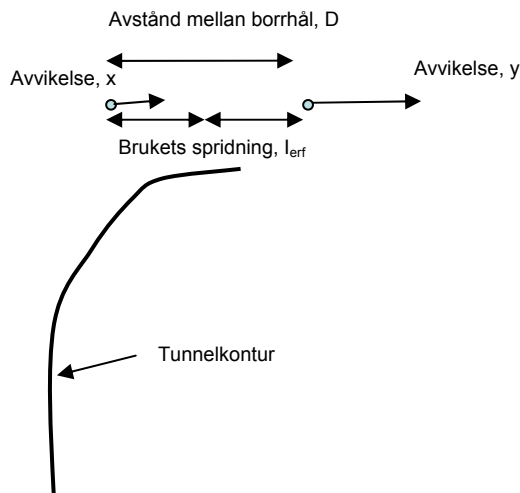


Figur 63. Beteckningar och principer för samband mellan borrhålsavvikelse och krav på omfattning av tätad zon relativt tunnelkonturen.

Vidare uppfylls ställda krav på injekteringen när alla vattenförande sprickor som går att täta med vald cementsort är fyllda med injekteringsbruk mellan borrhålen, se Figur 64. Ett uttryck som beskriver största tillåtna relativa avvikelse som funktion av injekteringsbrukets spridning kan tecknas

$$|x - y| \leq 2I_{erf} - D$$

Det betyder att det är den relativa avvikelsen som är av betydelse för kravet på borrhållsnoggrannhet. Injekteringsresultatet kan fortfarande vara likvärdigt trots avvikande borrhåll om fler hål avviker på liknande sätt kan borrhållningen fortfarande vara godkänd givet att båda borrhållsavvikelsekraven är uppfyllda.



Figur 64. Beteckningar och principer för samband mellan borrhålsavvikelse och krav på omfattning av tätad zon mellan enskilda borrhål.

Både dessa villkor måste vara uppfyllda dels för att den tätade zonen ska ha tillräcklig omfattning runt tunneln och dels för att säkerställa att den tätade zonen är kontinuerlig runt tunneln.

Injekteringstid

Injekteringstid definieras som tid efter att föreskrivet injekteringstryck uppnåtts. Maximal injekteringstid (t_{\max}) bestäms av genomförda bruksprovningar på filterstabilitet. Injektering av ett injekteringshål bör utföras på mindre tid än maximal injekteringstid eftersom att det efter denna tid skett sådana förändringar i brukets reologiska egenskaper att ytterligare inträngning är begränsad.

Erforderlig injekteringstid (t_{\min}) är beräknad tid för att teoretisk inträngningslängd skall uppgå till erforderlig inträngningslängd enligt följande ekvationer. I denna lösning har ekvationer för det tvådimensionella fallet tillämpats vilket ger en mer konservativ lösning.

$$I_D = \frac{I}{I_{\max}} \geq \frac{kL}{I_{\max}} = \frac{2kL \cdot \tau_0}{\Delta p \cdot b_{\min}}$$

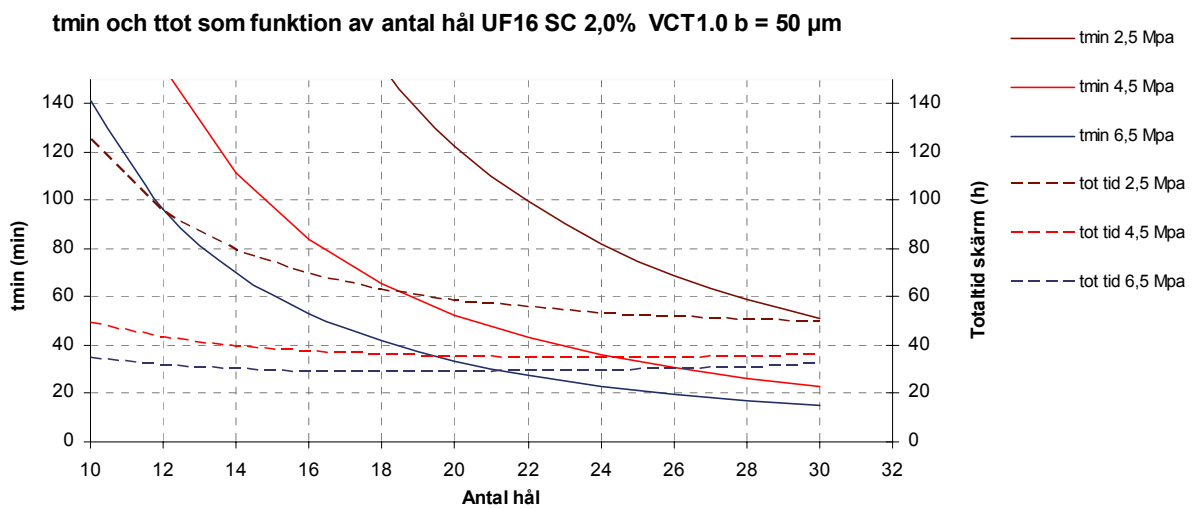
$$\Theta_D = \frac{I_D^2}{4 - 2I_D}$$

$$t_{2D} = \frac{6\Theta_D}{1 - 3\Theta_D}$$

$$t_{\min} \geq t_D \cdot t_0 = t_D \cdot \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2}$$

- I_D = relativ inträngningslängd
 K = förhållande mellan verklig inträngningslängd och geometriskt hålavstånd, L
 τ_0 = injekteringsbrukets flytgräns
 Δp = skillnad mellan injekteringsstryck och grundvattentryck
 b_{min} = dimensionerande sprickvidd
 Θ_D = variabelsubstitution
 t_D = relativ injekteringstid (beräknad för aktuell dimensionalitet i detta fall t_{2D})
 μ_g = injekteringsbrukets viskositet

För bestämning av lämplig bruksblandning och övriga designparametrar nyttjas dimensioneringsdiagram enligt exempel i Figur 65. Ett dimensioneringsdiagram är dimensionerande för specificerad bruksblandning, tunnelarea och dimensionerande sprickvidd. För ett antal valda injekteringsstryck ritas kurvor för minsta erforderliga injekteringstid (t_{min}) som funktion av antal hål i injekterings-skärmen. I samma diagram ritas även total produktionstid omfattande injekteringsborrning och injektering av en hel injekterings-skärm. Härvid nyttjas generella uppföljningsvärden på borrningskapacitet och etableringstid för tunneldrivningsaggregat och injekteringsrig vilket bör ge en fingervisning om det antal injekteringshål som ger en optimering av den totala produktionstiden. Produktionstiden bör i detta avseende enbart användas som stöd vid val av designparametrar. Dessa val bör principiellt styras av grundkriteriet att erhålla en tillräckligt tät injekterad zon runt tunneln, och med erfarenhet baserad på injekteringsuppföljning.



Figur 65. Exempel på dimensioneringsdiagram för bestämning av designparametrarna hålantals och erforderlig injekteringstid

6 Slutsats

6.1 Direkta observationer och slutsatser

För respektive injekteringsklass (A, B och C) finns ett tydligt samband mellan vattenförlust och injekterad bruksmängd. I enskilda injekteringshål däremot finns inte någon stark korrelation (vfl – bruksmängd). Detta beror troligen på osäkerheter i vattenförlustmätningen och injekteringsförfarandet. Det statistiska sambandet bygger på fördelningens utseende och inte enskilda mätningar. Resultaten visar att prognoser över injekteringsbehov kan göras om hänsyn tas till hela fördelningen. Analyser av olika typberg, baserade på liknande storskalig statistik, skulle därför kunna utgöra ett långt bättre underlag för prognoser av injekteringsbehov än dagens förfrågningsunderlag.

Droppkarteringen visar att det generellt förekommer mer dropp vid högre injekteringsklass. I detta fall beror det sannolikt på att det generellt finns både enstaka större och fler finare sprickor i dessa områden. Beräkningarna visar att inträngningslängden i finare sprickor är kortare (om de överhuvudtaget kan injekteras) och därför genererar fler läckagepunkter och mer dropp.

Av injekteringsuppföljningen (kapitel 3) framgår att det (framförallt) i injekteringsklass C varit svårt att få upp trycken i injekteringshålen. Detta kan leda till att inträngningslängden runt injekteringshålen blir för kort. En orsak till detta är att bruksflödet i den uppspruckna bergmassan varit större än mixerkapaciteten på injekteringsutrustningen. En annan viktig orsak bedöms vara att injekteringsbruket tränger in i närliggande injekteringshål (observationer som noterats av operatören under pågående injektering) genom förbindelse via den uppspruckna bergmassan. Detta leder i sin tur till större bruksflöden, lägre tryck och därmed kortare inträngningslängd i mindre sprickor.

För tätare berg med kortare injekteringstider (dimensionalitet tolkad som 1D eller 2D) bedöms b_{hyd} vara ett bra mått på den verkliga sprickvidden. För mer genomsläppligt berg bedöms b_{hyd} vara skiljt från den verkliga sprickvidden. Detta kan vara en förklaring till den stora mängd injekteringshål som haft dimensionalitet över diagnoskurvan för 2D.

6.2 Teoretiska analyser och slutsatser

Utvärdering i den redovisade analysen av bergmassans sprickfördelning baseras på vattenförlustmätningar i kärnborrhål och sonderingshål. Vattenförlustmätningen i sig har inbyggda svagheter ex. mätnoggrannhet vid små värden där felkällor får större inverkan. Ett lämpligt krav vid kontinuerlig förinjektering är att vattenförlustmätningarna skall utföras från injekteringsriggen och loggas digitalt. Det rekommenderas att utförande av vattenförlustmätningar utreds separat.

För att bedöma/optimera injekteringsresultat (som jämförelse mellan olika bruk, processer etc) krävs stort statistiskt underlag. I detta sammanhang kan injekteringsresultatet vara erhållen täthet men kan också brytas ner till exempelvis borgeometri eller önskad begränsning av inträngningslängd. Beräkningarna, Pareto – sprickfördelning och

dimensionalitetanalysen, kan utnyttjas för en sådan statistisk utvärdering men kräver att rätt verktyg används på rätt sätt. Metoden ger möjlighet att verifiera prognoser och utförande samt bedöms kunna användas inom ramen för observationsmetoden.

Beräknad sprickfördelning för kärnborrhål 22-1 till 22-6 (Namntall) bedöms i princip ekvivalent med motsvarande beräknad sprickfördelning för injekterings- sonderingshålen i Namntall Mellan. För detta fall skulle en sprickfördelningsanalys av kärnborrhålen kunnat ge en god uppskattning av injekteringsbehov och en bättre prognos.

De bruksegenskaper som normalt (referens [3]) bedöms styra inträngningsförmågan kan delas upp i

1. filterstabilitet
2. flytgräns, viskositet

Filterstabilitet bedöms vanligen ange ned till vilken sprickvidd som kan injekteras (referens [4]). Beräkningarna visar att flytgräns och viskositet är mycket viktiga parametrar för injekteringsresultatet (inträngningslängd ökar med minskande flytgräns och viskositet).

Vid bedömning av möjliga åtgärder tex. vid samband mellan hål måste hänsyn tas till verklig injekteringskapacitet. En begränsning är vanligen mixerkapaciteten (blandarens kapacitet).

6.3 Förslag till vidare studier (alternativt i etapp 2)

För etapp 2 rekommenderas att förändrade borrhplaner prövas och två injekteringsomgångar införs i injekteringsklass C (vf>2 Lugeon).

Analyser av inträngningslängd visar att denna är kraftigt beroende av de reologiska egenskaperna (se inträngningslängd, relativ jämförelse). Injektering med Rheocem 650 (vars egenskaper har verifierats vid provning i fält) bör prövas i etapp 2 för att studera inverkan av inträngningslängd på täthet efter injektering.

En analys av hålavvikelsens betydelse för injekteringsresultatet bör utföras i etapp 2.

Trolig spräckning av berg (hydraulisk jacking) har observerats i fält som en plötslig flödesökning vid en liten tryckökning. Flödesökningen är större än vad som teoretiskt kan förklaras (referens [2]). Det rekommenderas att risken för spräckning studeras i etapp 2.

Beräkningarna av sprickfördelning och analys av resterande transmissivitet efter injektering visar att en täthet (motsvarande hydraulisk konduktivitet i den injekterade zonen) på $1 \cdot 10^{-8}$ m/s kan erhållas i det studerade fallet om sprickor ned till 50 – 75 μm tätas. Med enkla tumregler bedöms att microcement, typ UF16 eller motsvarande, måste användas för att nå dessa sprickvidder. Om det i fält kan påvisas att microcementen har filtreregenskaper som erfordras rekommenderas att ett mikrocement prövas i etapp 2.

Praktisk tillämpning i fält av ex. ”the yield stick” CTH etc. för att mäta flytgränsen rekommenderas i nästa projekt.

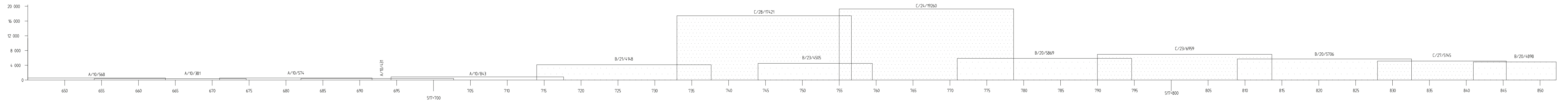
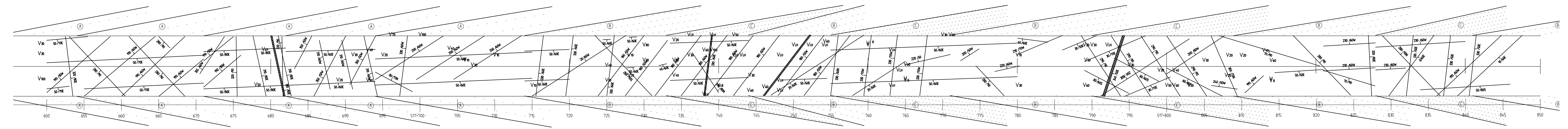
Vattenförlustmätningen i sig har inbyggda svagheter. Det rekommenderas att utförande av vattenförlustmätningar utreds separat.

Det rekommenderas att optimering/bedömning av injekteringsutförandet studeras separat. Ett sådant projekt bör utföras som en del av observationsmetoden.

7 Referenser

- [1] Gustafson.G., Fransson.Å., Funehag.J., Axelsson.M., ”Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering”, Väg och Vattenbyggaren nr 4, sidor 10 – 15, 2004.
- [2] Gustafson.G., Stille.H., ”Stop Criteria for Cement Grouting”, Felsbau 23 nr 3, sidor 62 – 68, 2005.
- [3] Eriksson.M., Stille.H., ”Cementinjektering i hårt berg”, SveBefo rapport K22, 2005.
- [4] Brantberger.M., Dalmalm.T., Eriksson.M., Stille.H., ”Separations- och filtreringstabilitet hos cementbaserade injekteringsmedel” Rapport 3065, KTH, 1999
- [5] Stille.H.,Holmberg.M., Personlig kommunikation, 2005
- [6] Winberg.A., Andersson.P., Hermansson.J., Byegård.J., Cvetkovic.V., Birgersson.L., ”Äspö Hard Rock Laboratory, Final report of the first stage of the Tracer Retention Understanding Experiments” SKB TR-00-07, 2000

RQD	90	95	90	90	85	95	85	85	80	80	80	85	90	95	85	85	100	95	100	90	95																			
Jn	9	6	9	9	9	9	9	9	12	12	12	12	9	9	9	12	6	9	9	9	9																			
Jr	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1																			
Ja	2	2	8	2	2	2	1	2	4	8	3	3	2	1	1	8	2	2	2	2	2																			
Q	5	7,9	13	5	4,7	5,3	9,4	5,2	17	0,83	2,2	2,4	5	10	1,2	3,5	8,3	5,3	5,6	5	5,5																			
	650	655	660	665	670	675	680	685	690	695	705	710	715	720	725	730	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780	785	790	795	517+800	805	810	815	820	825	830	835	840	845	850



TECKENFÖRKLARING

- SPRICKPLAN (STRYKNING/STUPNING)
- LERSLAG, GRAFITSLAG MM (STRYKNING/STUPNING)
- RQD** ROCK QUALITY DESIGNATION
- Jn** JOINT SET NUMBER
- Jr** JOINT ROUGHNESS NUMBER
- Ja** JOINT ALTERATION NUMBER
- Q** Q-VALUE
- INJEKTERINGSSKÄRM KLAS A
- INJEKTERINGSSKÄRM KLAS B
- INJEKTERINGSSKÄRM KLAS C
- VNN** LÄCKAGEPUNKT (ANT DROPP/MIN)
- VLH** LÄCKANDE BULTHÅL
- VR** LÄCKAGEPUNKT RINNANDE
- B/25/9999** INJEKTERINGSKLASS/ANT HÅL /BRUKSVOLYM (l)

SKANSKA Skanska Teknikn

SVEBEFO PROJEKT 221
 TILLÄMPNING AV INJEKTERINGSFORSKNINGSRESULTAT I FALT

KARTERING BJÖRNBÖLESTUNNELN
 SEKTION 517+650 - 517+850

RTAD AV: FA
 DATUM: 2005-11-07
 RITNINGSFÖRHAT: SKALA 1:250
 REV: -

SveBeFo

Box 47047
SE-100 74 Stockholm

Telefon 08-692 22 80 • info@svebefo.se
Besöksadress: Mejerivägen 4

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--79--SE

tblk.