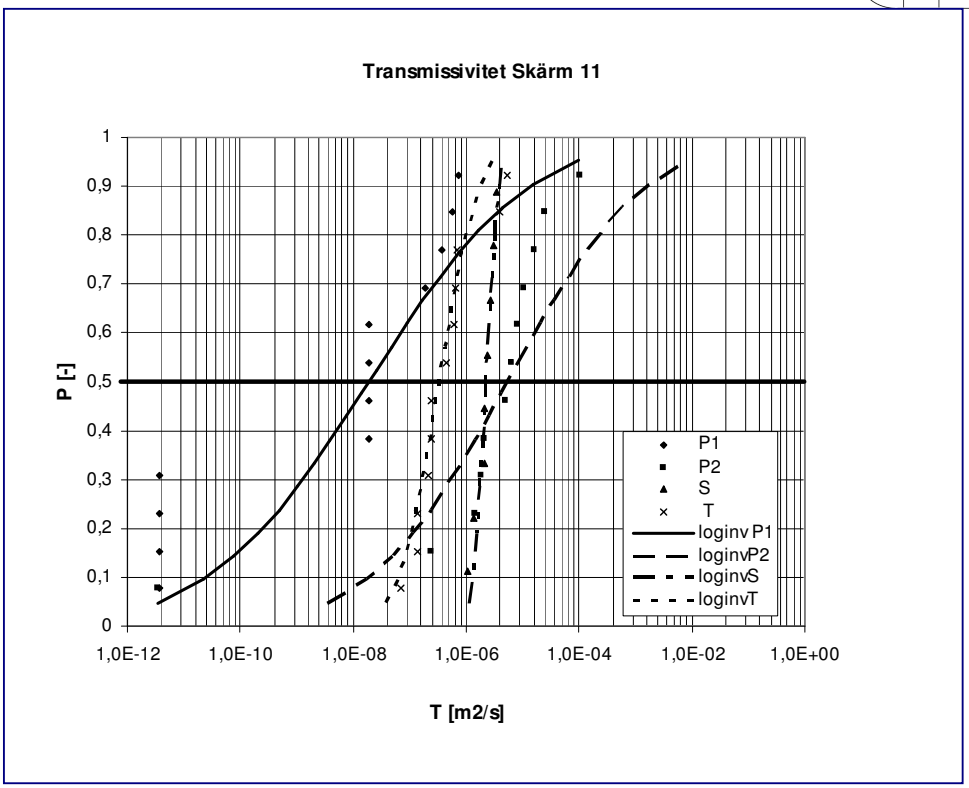
CHALMERS



Efterinjektering i Hallandsåstunneln

Analys av data från efterinjektering med cement och silica sol i den oinklädda delen av tunneln.

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

ÅSA BERGH & ANNA-JOHANNA EKSTRÖM

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Teknisk geologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2007
Examensarbete 2007:133

EXAMENSARBETE 2007:133

Efterinjektering i Hallandsåstunneln

Analys av data från efterinjektering med cement och silica sol i den oinklädda delen av tunneln.

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

ÅSA BERGH & ANNA-JOHANNA EKSTRÖM

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Teknisk geologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2007

Efterinjektering i Hallandsåstunneln
Analys av data från efterinjektering med cement och silica sol i den oinklädda delen av tunneln.
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad
ÅSA BERGH & ANNA-JOHANNA EKSTRÖM

© ÅSA BERGH & ANNA-JOHANNA EKSTRÖM, 2007

Examensarbete 2007:133
Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för *geologi och geoteknik*
Teknisk geologi
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Transmissivitetsgraf för skärm 11

Chalmers Reproservice
Göteborg 2007

Post Grouting in the tunnel of Hallandsås

An analysis of post grouting with cement and silica sol in the unlined part of the tunnel

Master's Thesis in Civil and Environmental Engineering

ÅSA BERGH & ANNA-JOHANNA EKSTRÖM

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of GeoEngineering

Engineering Geology Research Group

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The scope of this report is to evaluate the result of the systematic post-grouting in the north part of the tunnel through Hallandsås. The evaluation of the post-grouting has been done in the unlined part of the east pipe. The distance is 133 metres (190+850 – 190+983) and the post-grouting has been carried out 2006 March – 2007 April. The post-grouting has been carried out in four sets for each fan; one primary grouting, one deepen grouting and two sets for finer grouting. In the first two sets the cementitious grout, Rheocem, is used. In the last two sets a Silica Sol product, Cembinder, has been used as grout where the inflow is less than 10 l/min. In other cases Rheocem is used.

The evaluation is based on the post-grouting records and the methods which have been used in the evaluation are: effective grouting volume, control of flow dimension (of the grouting), penetration length and an inflow analysis.

By studying the result of the inflow it can be established that the post-grouting has been efficient. The carried out calculations shows that the primary sets didn't penetrate the pre-grouted zone and that the deepened set did, just according to the design. Measurements of groundwater leaking in to the tunnel made before and after the post-grouting show that the leaking did decrease.

The control of the dimension shows that the penetration is one-dimensional. The one-dimensional penetration influences how the grout spreads in the rock. It also explains why the inflow in the borehole varies between the sets.

Key words:

Post grouting, Silica sol, Hallandsås, Control of dimension, Transmissivity

Efterinjektering i Hallandsåstunneln
Analys av data från efterinjektering med cement och silica sol i den oinklädda delen av tunneln.
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad
ÅSA BERGH & ANNA-JOHANNA EKSTRÖM
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för *geologi och geoteknik*
Teknisk geologi
Chalmers Tekniska Högskola

SAMMANFATTNING

Syftet med detta arbete är att utvärdera resultatet av den systematiska efterinjektering som skett i Hallandsåstunnelns norra del. Utvärdering av efterinjektering har gjorts på den oinklädda delen av östra tunnelröret vid norra påslaget. Sträckan som studeras är 133 meter lång (190+850 – 190+983) och efterinjekteringen är utförd mellan mars 2006 och april 2007. Efterinjekteringen har utfört i fyra omgångar för varje skärm; en primär injekteringsomgång, en fördjupad injekteringsomgång samt två fininjekteringsomgångar. I de två första omgångarna har det cementbaserade injekteringsmedlet Rheocem använts. I de två sista omgångar har silica sol produkten Cembinder använts som injektering där inflödet i borrhålen understigit 10 l/min. I övriga fall har Rheocem använts.

Utvärderingen baseras på de efterinjekteringsprotokoll som finns att tillgå från den aktuella sträckan och de metoder som använts vid utvärderingen är: effektiv injekteringsvolym, dimensionalitetskontroll, inträngingslängd samt en inflödesanalys som ligger till grund för beräkning av transmissivitet och konduktivitet.

Genom att studera resultatet av inflödesanalysen kan det konstateras att efterinjekteringen fått effekt och att bergmassan blivit tätare. Beräkningarna visar att den primära injekteringsomgången inte gick utanför den förinjekterade zonen medan den fördjupade injekteringsomgången gick utanför den samma, helt enligt injekteringsdesignen. Mätningar av inläckande grundvatten i tunneln gjorda före efterinjekteringen och efter att samtliga fyra injekteringsomgångar slutförts visar också att inflödena minska efter efterinjekteringen.

Dimensionalitetskontrollen visar att det råder endimensionell inträngning för tunnelsträckan och vid alla injekteringsomgångar. Den endimensionella inträngningen påverkar hur injekteringsmedlet sprider sig i berget genom att det är svårare att träffa de vattenförande sprickorna. Detta förklarar också varför inflödet i borrhålen varierar kraftigt mellan omgångarna beroende på om en spricka träffas eller inte.

Nyckelord:

Efterinjektering, Silica Sol, Hallandsås, Dimensionalitetskontroll, Transmissivitet

Innehåll

ABSTRACT I

SAMMANFATTNING II

INNEHÅLL III

FÖRORD VI

BETECKNINGAR VIII

1 INLEDNING 1

1.1 Bakgrund 1

1.2 Mål och omfattning 2

2 TEORI 4

2.1 Injektering 4
2.1.1 Förinjektering 5
2.1.2 Efterinjektering 6

2.2 Injekteringsmedel 6
2.2.1 Cementbaserade injekteringsmedel 7
2.2.2 Silica sol 10

2.3 Bergets egenskaper 12
2.3.1 Vattenflöde 13
2.3.2 Mätmetoder 15

3 OBJEKTSBESKRIVNING 16

3.1 Geologisk beskrivning 16
3.1.1 Bergarterna – Gnejs och Amfibolit 17
3.1.2 Ingenjörsgeologiska tolkningar 18

3.2 Utformning av injekteringsskärm 19
3.2.1 Injekteringsdesign 19
3.2.2 Injekteringsgeometri 20

4 METODBESKRIVNING 23

4.1 Inflödesanalys 23
4.1.1 Transmissivitet 24
4.1.2 Konduktivitet 24
4.1.3 Hydraulisk sprickvidd 25

4.2 Effektiv injekteringsvolym 25

4.3 Dimensionalitetskontroll 26

4.4 Inträngningslängd 27
4.4.1 Binghamvätska – Cement 27
4.4.2 Newtonvätska – Silica sol 28

5 RESULTAT 29
5.1 Primär injekteringsomgång 29
5.2 Fördjupad injekteringsomgång 30
5.3 Sekundär injekteringsomgång 32
5.4 Tertiär injekteringsomgång 34
5.5 Djupanalyser av skärmar 35
5.5.1 Skärm 5 35
5.5.2 Skärm 11 38
5.5.3 Skärm 19 41

6 DISKUSSION 45
6.1 Primär injekteringsomgång 45
6.2 Fördjupad injekteringsomgång 45
6.3 Sekundär och Tertiär injekteringsomgång 46
6.4 Mätningar gjorda efter den tertiära omgången 46

7 SLUTSATS 47

8 REFERENSER 49
8.1 Artiklar: 49
8.2 Publikationer/Böcker: 49
8.3 Anteckningar/Möten: 49
8.4 Internetsidor: 50

Bilageförteckning

Bilaga A - Skånes berggrund
Bilaga B - RQD och Q-värden
Bilaga C - Kronologi för skärm 1-6 samt extra skärmar
Bilaga D - Log-normal diagram för Transmissivitet
Bilaga E - Vattentryck och använd mängd Silica sol i %
Bilaga F - Dimensionalitetskontroll
Bilaga G - Inträngningslängd
Bilaga H - Inträngningslängd - beräkningsgång

Examinators förord

Följande examensarbete är en studie av efterinjektering med cement och silica sol genomförd i Hallandsåstunneln. Studien har genomförts som en efteranalys av data från förinjektering och de injekteringsskärmar som systematiskt utfördes som efterinjektering för att täta tunneln. I arbetet har också bergets flödessystem analyserats med hjälp av data från hydrauliska tester och data från injekteringsförloppen. Arbetet visar att det är möjligt att åstadkomma en god tätning med efterinjektering även under svåra bergförhållanden.

Examensarbetet är väl genomfört, rapporten är lättläst och kan rekommenderas för den som vill övertyga sig om att efterinjektering går att genomföra med gott resultat.

Göteborg den 4 februari 2008.

Gunnar Gustafson

Professor

Förord

Detta examensarbete har genomförts vid institutionen för bygg- och miljöteknik, avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet har genomförts i samarbete med Banverket.

Vi vill tacka följande personer för ett bra samarbete, stöd och vägledning under arbetets gång:

Professor Gunnar Gustafson (handledare och examinator), Chalmers Tekniska Högskola

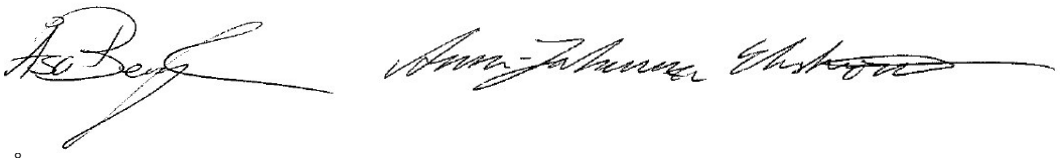
Doktor Åsa Fransson (handledare), Chalmers Tekniska Högskola

Kenneth Rosell, Banverket

Ola Karlsson, Skanska

Skanska, platskontoret i Båstad

Göteborg, december 2007



Åsa Bergh Anna-Johanna Ekström

Beteckningar

Latinska versaler

I_{max}	[m]	maximal inträngningslängd
K	[m/s]	hydraulisk konduktivitet
Q	[m^3/s]	flöde
Re	[-]	Reynolds tal
T	[m^2/s]	transmissivitet
L	[m]	borrhålslängd
V_h	[m^3]	borrhålsvolym

Latinska gemena

b	[m]	sprickvidd
d	[mm]	borrhålsdiametern
g	[m/s^2]	normalacceleration, 9,81
p	[-]	sannolikhet
t	[s]	injekteringstid
$\frac{dh}{dl}$	[-]	hydraulisk gradient

Grekiska tecken

μ_0	[Pas]	initialviskositet
μ_w	[Pas]	vattnets viskositet
ρ_w	[kg/m^3]	vattnets densitet
τ_0	[Pa]	flytgräns
Δp	[Pa]	övertryck
γ	[s^{-1}]	skjuvhastighet

Parametrar

RQD	Bergsklassificeringsparameter
Q	Bergsklassificeringsparameter

1 Inledning

Att bygga täta tunnlar genom urberg är byggtekniskt avancerat då en bergmassa inte är homogen och dess egenskaper inte alltid förutsägbara. De senaste 10 åren har kraven på inflöde i tunnlar skärpts och ligger nu på 1 – 4 l/min och 100 m (Stille 2001, se Funehag 2007). För att klara gränserna används i regel punktvis efterinjektering som komplement till förinjektering. Hallandsåstunneln är särskilt komplicerad ur tätningssynpunkt på grund av att berget är mycket uppsprucket och innehåller stora mängder vatten. För att lösa denna problematik används systematisk efterinjektering med både cement och silica sol som komplement till förinjekteringen. Systematisk efterinjektering är tidskrävande och kan ge höga omkostnader, därför är det önskvärt att utvärdera de gjorda insatserna.

Tidigare undersökningar av silica sol (Funehag 2007) och injekteringsdesign (Fransson 2006) ger värdefull information men behandlar inte injekteringsdata i sin helhet utan är djupstudier på delmoment.

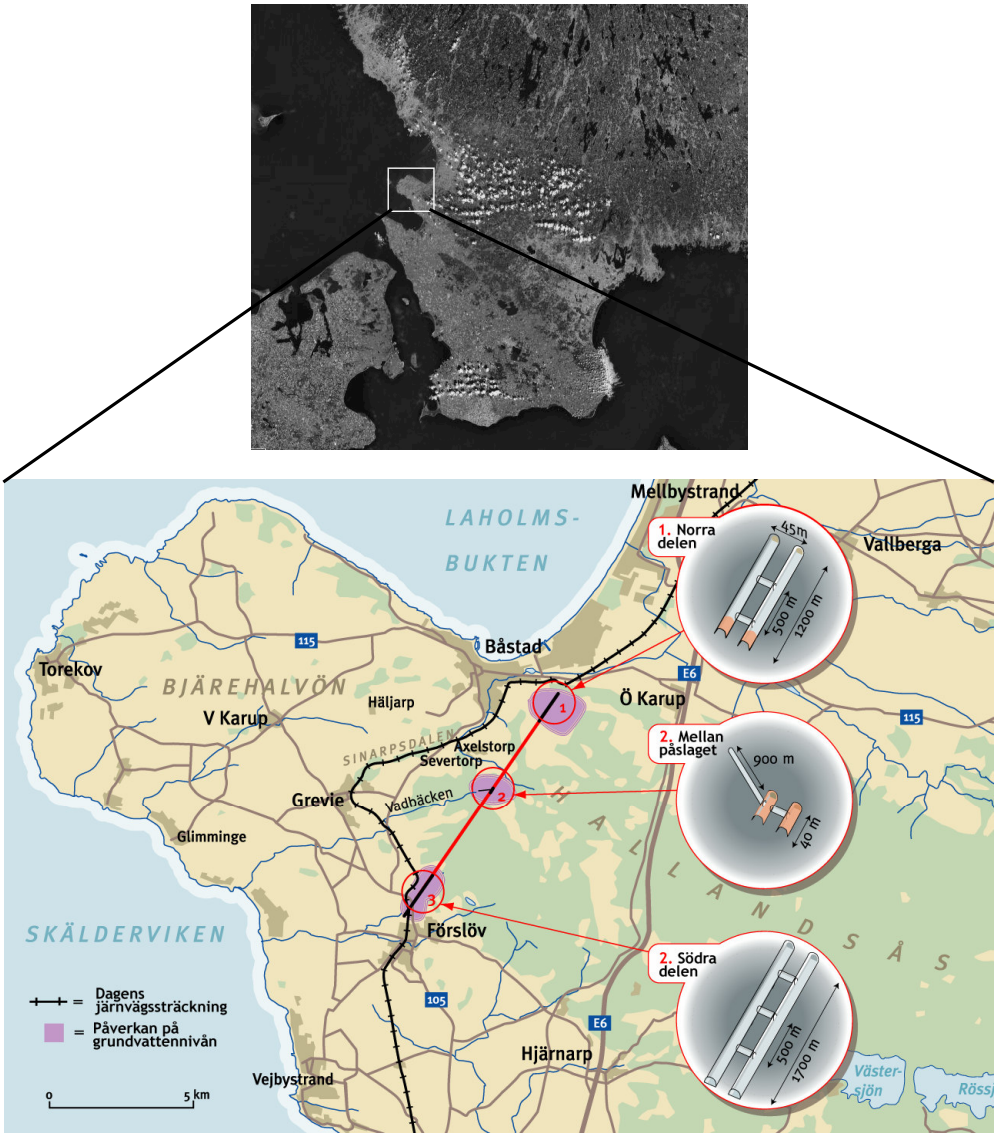
Förutom den projektspecifika nyttan av rapporten kan resultaten om möjligt appliceras på liknande framtida objekt, vilket innebär att man tidigt i projektet kan avgöra lönsamhet eller tidsåtgång vid utmanande geologi.

1.1 Bakgrund

Tunneln genom Hallandsås är en del av Västkustbanans utbyggnad till dubbelspår. Västkustbanan, som går mellan Göteborg och Malmö, är utbyggd med dubbelspår till cirka 80 %. Idag är järnvägen över Hallandsås enkelspårig, brant och kurvig vilket gör den till en flaskhals då tungt lastade tåg måste hålla låg hastighet. En tunnel ökar kapaciteten för person- och godstrafik eftersom hastigheten höjs, mängden gods kan öka och sträckan förkortas. Även ur miljö- och säkerhetssynpunkt är tunneln viktig. Flera farliga plankorsningar byggs bort så säkerheten på vägarna ökar och då godstransporterna från lastbilar överförs till tåg minskar utsläpp samt slitage på vägarna. (Banverket 2007)

Hallandsåsen sträcker sig från Hovs hallar på Bjärehalvön i nordväst till Örkelljunga i sydost. Tunneln kommer att korsa åsen mellan Båstad i norr och Förslöv i söder och den totala längden blir 8,6 km med två separata tunnelrör, se Figur 1.1. (Banverket 2007)

Olika former av tunneldrivning pågår i Hallandsåsen. Från söder arbetar en 240 meter lång tunnelborrmaskin, TBM, med att borra och klä tunneln bakom sig med betongelement, så kallad lining. I den norra delen sker och har även tidigare skett en tunneldrivning enligt konventionell metod och i denna rapport är det injekteringsförfarandet i denna del som är studerat.



Figur 1.1: Övre bilden visar sydligaste Sverige och Danmark för en översikt av Bjärehalvöns placering (www.maps.google.se). Nedre bilden visar tunnelns sträckning mellan Båstad och Förslöv. (Banverket 2007)

1.2 Mål och omfattning

Syftet med detta arbete är att utvärdera resultatet av den efterinjektering som skett i Hallandsåstunnelns norra del. Syftet är även att återkoppla till den ursprungliga designen samt ge förslag på förbättringar.

Frågor som ska besvaras

- Följdes injekteringsdesignen?
  - Fungerar den som det var tänkt med avseende på inträngning?
- Hur stort är inflödet/konduktiviteten?
  - Efter förinjektering?
  - Efter de olika omgångarna i efterinjekteringen (P1, P2, S)?
- Hur stor är den effektiva bruksmängden?

    - Vilket injekteringsmedel har använts (koppling till flöde)?
- Är det 1-D eller 2-D inträngning?
    - Hur ser inträngningen ut?
- Hur påverkar bergets egenskaper resultatet av injekteringen? (geologi, sprickor)

Utvärdering av efterinjektering har gjorts på den oinklädda delen av östra tunnelröret vid norra påslaget. Sträckan som studeras är 133 meter lång (190+850 – 190+983) och efterinjekteringen är utförd mellan mars 2006 och april 2007. Inga ytterligare fältstudier har gjorts.

Litteraturstudier ligger till grund för den teori som tillämpats. Litteraturen består främst av för ämnet relevanta rapporter och avhandlingar, men också av publikationer som allmänt behandlar ämnet bergteknik och injektering.

2 Teori

I kapitlet ges den teoretiska bakgrunden till den utvärdering som genomförts.

2.1 Injektering

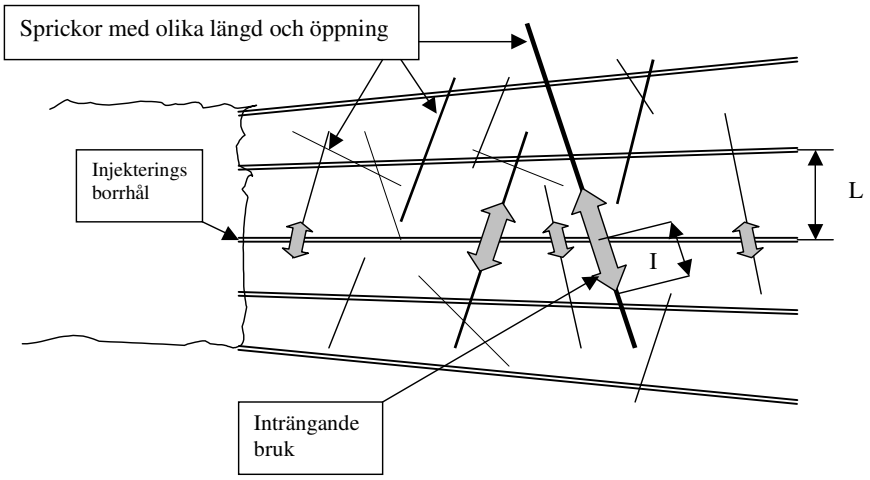
Injektering utförs främst av två skäl: tätning och förstärkning. Täthetskraven är till för att förhindra inläckage och därmed grundvattensänkning, samt att skydda installationer och öka säkerheten i tunneln. För att minimera grundvattenförorening och övrig påverkan på omgivningen finns det även miljörelaterade krav.

De styrande faktorerna i injekteringsprocessen är förutom geologin: injekteringsmedel, utrustning, skärmgeometri, sonderingsborrning, tryck, arbetsmetodik och organisation. De styrande faktorerna måste för varje enskilt projekt och tätningssituation optimeras utifrån rådande förhållanden och önskvärt resultat. (Vägverket 2000)

Injektering av tunnlar delas in i två huvudförfaranden: förinjektering och efterinjektering. De flesta tunnlar tätas genom förinjektering men om det inte ger ett tillfredsställande resultat måste efterinjektering genomföras. Eftersom efterinjektering både är dyrt och tidskrävande är det viktigt att förinjekteringen är så effektiv som möjligt.

I svenska bergförhållanden är injektering en vanlig metod för att förhindra inläckage och uppnå erforderlig täthet. De geologiska och hydrogeologiska förhållandena är de främst styrande för utformningen av injekteringsarbetet och för tätningsresultatet. För att få ett fullgott resultat behövs en detaljerad kunskap om bergmassans konduktivitet, sprickor och vattenförhållanden. Grundvattentrycket är av betydelse vid injekteringsdesign då detta påverkar inflödet av vatten och då injekteringstrycket måste vara tillräckligt för att få en inträngning av injekteringsmedel. Att designa en injekteringsskärm är en iterativ process där hänsyn måste tas till många faktorer för att det ska bli bra.

När skärmen ska dimensioneras väljer man tryck och medel för att bruket ska tränga in så långt, I, att man fyller avståndet mellan borrhålen, L, se Figur 2.1. Vatten och injektering tar samma väg i berggrunden men på grund av brukets kornstorlek kan inte cementen tränga in överallt. Alltså kan inte ett berg helt tätas med cement utan måste hjälpa till med kemisk injektering också, mer om detta i kapitel 2.2.

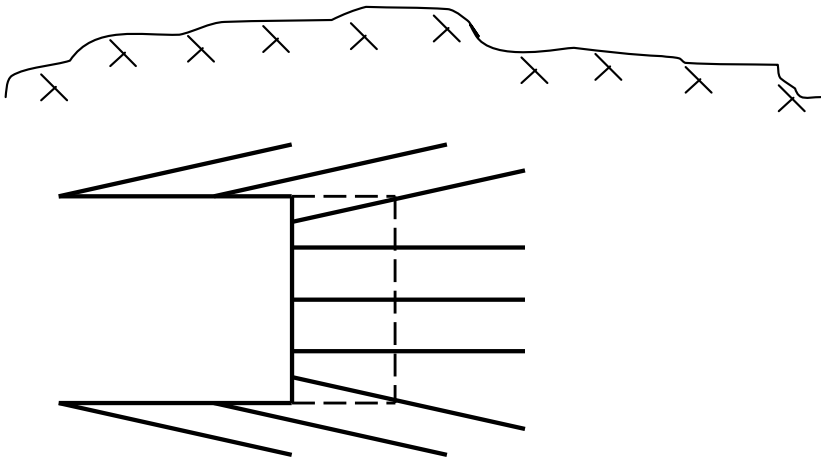


Figur 2.1: Principskiss för inträngning av injekteringsmedel. (Gustafson et al 2004)

2.1.1 Förinjektering

Förinjektering definieras som injektering i förväg av ett bergparti som till större eller mindre del skall sprängas ut. Vid injektering innan sprängning kan ett högt tryck användas vilket leder till en större spridning av injekteringsbruk i sprickorna. Ett högt tryck är dessutom nödvändigt då injekteringstrycket sjunker med 40-80 % den första metern (Barton 2004, se Axelsson, 2006).

En injekteringsomgång består av injekteringsborrning, vattenförlustmätning och injektering. Först borras ett antal borrhål i ett trumpetformat mönster i berget i vilka injekteringsmedel sedan under tryck pressas in i de öppna porerna (Lindblom 2001). Injekteringsmedlet tränger in radiellt i berget via sprickor och verkar tätande. Tunneln drivs sedan framåt i omgångar där skärmarna överlappar varandra, se Figur 2.2. Med överlapp och trumpetform eftersträvas en tät zon runt tunneln, en injekteringsskärm. Valet av bruk och injekteringstryck påverkar inträngningen. Enligt Gustafson och Stille (1996, se Axelsson 2006) bör injekteringstrycket vara dubbelt så högt som grundvattentrycket men lägre än den lägsta bergspänningen.



Figur 2.2: Principskiss för förinjektering av tunnel.

För att skapa en förinjekteringsskärm används data från kärnborrhål, vattenförlustmätningar och sprickkarteringar med mera. Med hjälp av detta och injekteringmedlets reologiska egenskaper kan en inträngningsfördelning och borrhålavstånd tas fram (Gustafson et al 2004).

Längd, lutning, hålavstånd och skärmöverlappning är borrhålsparametrar som måste bestämmas vid injektering. Den vanligaste metoden är att borra och injektera framåt i tunnelriktningen (Axelsson 2006). Vid en design av injekteringsskärmen är sprickvidd och sprickviddsfördelningen viktig. Men även att ta hänsyn till sprickriktningen är viktig eftersom man helst vill träffa dem så vinkelrätt som möjligt. Detta för att få en bra träffbild vilket leder till en effektivare spridning.

2.1.2 Efterinjektering

Efterinjektering definieras som injektering utförd efter utsprängning. Efterinjektering behövs då restläckage återstår efter att tunneln sprängts och för att uppfylla täthetskraven. Antingen sker injekteringen punktvis eller som en hel skärm. Vid punktvis injektering åtgärdas inläckage genom att enstaka hål borras in mot den vattenförande sprickan. När efterinjekteringsskärmen designas måste hänsyn tas till utformningen av förinjekteringen och resultatet av den. Vid injektering efter sprängning bör injekteringstrycket vara lägre eftersom återslag kan ske vilket innebär att injekteringsmedlet tränger tillbaka in i tunneln. Vid ytliga tunnlar kan det även vara risk att injekteringsmedlet pressas ut genom bergytan, detta kan ske både vid för- och efterinjektering. Om för högt tryck används vid injektering kan jacking uppstå. Jacking innebär att sprickor utvidgas och block faller ut.

2.2 Injekteringsmedel

Injekteringsmedel delas ofta upp i två huvudgrupper; suspensioner (vanligtvis cementbaserade) och lösningar (vanligtvis kemiska).

Vid val av injekteringsmedel bör, förutom bergmassans beskaffenhet, arbetbarheten hos injekteringsmedlet beaktas. För en god arbetbarhet bör bruket:

- Vara lätt att blanda
- Ge möjlighet att få samma blandning flera gånger
- Inte ha negativ miljöpåverkan
- Vara ett ekonomisk hållbart alternativ

Beroende på ett undermarksprojekts komplexitet väljs normalt ett eller flera cementbaserade injekteringsmedel. Då speciella krav eller omständigheter förekommer, kan cementbaserade medel kombineras med kemiska medel. Silica sol, polyurethane och akrylater är alla exempel på kemiska injekteringsmedel.

De viktigaste egenskaperna för injekteringsmedlets förmåga att täta sprickor är:

- Reologi
- Inträngningsförmåga
- Brukets permeabilitet
- Hållfasthetstillväxt
- Beständighet

Reologi

Reologi är ett viktigt redskap för att beskriva injekteringsmedlets flöde i sprickorna samt uppskatta injekteringens penetrationslängd (Funehag 2007). Reologin beskriver flytegenskaper hos injekteringsmedel där flytgräns, τ och viskositet, μ är två viktiga parametrar. Viskositet definieras som den inre flödesresistensen hos ett flödande medium och vätskor med lägre viskositet flödar alltså lättare. I de flesta fall är viskositeten temperaturberoende och en ökning av temperaturen medför en minskning av viskositet. Ett sätt att beskriva ett injekteringsmedels reologi är att beskriva dem enligt en Bingham- eller Newtonmodell (Fransson och Gustafson 2006). Vatten kan beskrivas som en Newtonvätska har endast viskositet $\mu_{w.}$ Suspensioner, som t.ex. cement, beskrivs som en Binghamvätska med både viskositet μ_g och flytgräns τ_0 (Fransson och Gustafson 2006). Exempel på Binghamvätska och Newtonvätska ges under kapitlen 2.2.1 och 2.2.2.

Inträngningsförmågan

Inträngningsförmågan är hos suspensioner beroende av partikelstorleken. Enskilda större korn i suspensionen kan täppa till sprickor och mindre korn kan aggregera och stoppa vidare inträngning. Dessa klumpar kan sedan filtrera suspensionen så att partiklar skiljs från vatten, vilket påverkar hållfastheten i bruket. En cementsuspensions motstånd mot filtrering kallas filtreringsstabilitet.

Brukets permeabilitet

Permeabiliteten hos ett injekteringsmedel bör vara lågt för att få en god tätningseffekt. Permeabiliteten anges som hydraulisk konduktivitet och mäts på hårdnat bruk. Hos cementbaserade injekteringsmedel ligger den hydrauliska konduktiviteten på 10^{-10} m/s och 10^{-14} m/s. Hos kemiska injekteringsmedel ligger den oftast lägre. (Axelsson 2006)

Hållfasthetstillväxt

Att kunna styra hållfasthetstillväxten är en viktig förutsättning för injekteringsmedlets användbarhet. Faktorer som kan påverka användbarheten, med tanke på hållfasthetstillväxt, är kopplade både till arbetsplatskrav som funktionella krav. De flesta bruks hållfasthetstillväxt kan delas in i en gelningsfas, där bruket är flytande och en härdande fas, där bruket tar fast form. Den gelande fasen är ofta kortare hos kemiska injekteringsmedel än hos cementbaserade sådana (Axelsson 2006) .

Beständighet

Beständighet är ett viktigt begrepp då det avgör hur motståndskraftigt injekteringsmedlet är mot nedbrytning. Enligt Banverket och Vägverket ska injekteringsmedel ha en livslängd på minst 110 år (Axelsson 2006).

2.2.1 Cementbaserade injekteringsmedel

Cementbaserade injekteringsmedel började användas redan på 1800-talet och är idag det vanligast förekommande injekteringsmedlet vid arbeten i svensk berggrund. Fördelarna med cementbaserade injekteringsmedel är att de är kompatibla med den omgivande bergmassan (dvs. att de i hårdnat tillstånd har egenskaper som liknar bergmassan i övrigt), har god beständighet, är ett ekonomiskt hållbart alternativ samt

är väl beprövat. Otillräckliga resultat förekommer när täthetskraven är höga, eller om bergmassans geologiska och hydrogeologiska egenskaper är ogynnsamma ur tätningssynpunkt. I de fall där det förekommer kraftig vattenströmning, exempelvis i sprick- och krosszoner, kan cementbaserade injekteringsmedel spädas ut vilket påverkar injekteringens resultat.

Cementbaserade injekteringsmedel består av cement och vatten och förhållandet mellan dessa kallas vattencementtal (vct). Ett vanligt vattencementtal hos cementbaserade injekteringsmedel är 0,6 – 2,0 (Axelsson 2006). Det är vanligt att blanda olika tillsatsämnen i cementbaserade injekteringsmedel. Tillsatsmedlen har till uppgift att på olika sätt påverka strömningsegenskaperna och hållfasthetstillväxten. De vanligaste tillsatsmedlen verkar superplasticerande, accelererande, retarderande eller luftporbildande.

Följande faktorer bör kunna beskrivas vid val av cementbaserade injekteringsmedel (Vägverket 2000):

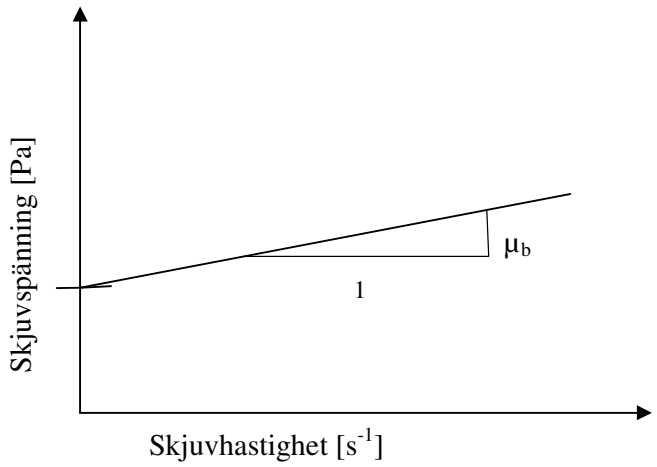
- cementsort (kornstorleksfördelning, specifik yta, C_3A-innehåll, material-tillsatser)
- tillsatser (typ och mängd av flytmedel, acceleratorer, stabilisatorer)
- vct
- hantering och blandningsordning av komponenterna

Reologi

Cement är en partikelsuspension som kan beskrivas som en Binghamvätska enligt ekvation 2.1, där μ_b är Binghamvätskans viskositet (Axelsson 2006)..

$$\tau = \tau_0 + \mu_b \cdot \dot{\gamma} \qquad (2.1)$$

En Binghammodell beskriver det linjära sambandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet då den ursprungliga skjuvspänningen är överskriden, se Figur 2.3. Att beskriva cement som en Binghamvätska är en förenkling av verkligheten och ju lägre vct ju mer avviker verkligheten från modellen. Flytgränsen bör ligga under 50 Pa vid injektering och viskositeten mellan 10 och 100 mPas (Kutzner 1996, se Axelsson 2006).



Figur 2.3: Flödeskurva för Binghamvätska.

Den maximala inträngningslängden I_{max}, för de cementbaserade injekteringsmedlen, är beroende på sprickbredd, b, injekteringsövertryck, Δp, och flytgräns, τ_0, se ekvation 2.2. I praktiken kommer man aldrig upp i den maximala inträngningslängden eftersom det fodrar väldigt långa injekteringstider. En realistisk inträngning med dagens förutsättningar är ungefär 80 % av den maximala. (Gustafson et al 2004)

$$I_{\max} = \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right) \cdot b \qquad (2.2)$$

Inträngningsförmåga

Cementbaserade injekteringsmedel har en begränsad inträngningsförmåga på grund av partikelstorleken i suspensionen (Axelsson 2006). En tumregel är att cementbaserade injekteringsmedel kan täta sprickor som är över tre gånger så stora som de enskilda cementkornen. 0,1 mm är en ungefärlig gräns för vad vanlig injekteringscement kan täta.

Hållfasthetstillväxt

Hållfasthetstillväxten hos cementbaserade injekteringsmedel sker i två faser; gelning och hårdnande. Under den första fasen, gelningsfasen, bildas bindningar mellan cementpartiklarna som ger bruket en måttlig skjuvhållfasthet. I denna fas kan injekteringsmedlet vara tixotropt, dvs. de uppkomna bindningarna kan brytas vid omrörning. Under den andra fasen, hårdnandet, ökar skjuv- och tryckhållfastheten kraftigt. Hållfastheten hos cementbaserade injekteringsmedel är beroende av vct (Axelsson 2006).

Beständighet

Beständigheten hos cementbaserade injekteringsmedel påverkas främst av

- att kalciumhydroxid löses ut ur cementen (eng. leaching)
- sulfatangrepp

Då vatten strömmar i eller över cementpastan löses kalciumhydroxid ut ur cementen. Kalciumhydroxiden transporteras bort av det strömmande vattnet och cementpastan bryts ned. Nedbrytning kan ske både inifrån cementen och utifrån. Om cementpastan är tät sker nedbrytningen långsamt och endast om ytorna är i kontakt med fritt vatten. Sulfatangrepp sker i sulfathaltigt grundvatten genom att kemiska reaktioner sker med komponenter i cementmassan, vilket orsakar nedbrytning (Axelsson 2006).

2.2.2 Silica sol

Silica sol har många användningsområden inom industrin, bl.a. som ytbehandlingsmedel och till klarning av vätskor. Inom geoteknik är silica sol använt som jordförstärkningmedel (främst i Nordamerika). Att injektera i berg med silica sol har i Sverige gjorts sedan år 2000 (Funehag 2007). Den form av silica sol som avses här benämns även kolloidal silica och är en suspension där mycket fina korn av kiseloxid, SiO_2, är lösta i vatten. Kolloidal betyder att det handlar om små, icke-lösliga, icke-diffusiva partiklar, större än en atom men små nog att vara suspenderade i ett flödande medium. Silica sol tillverkas genom att råglas (kiselsand) hettas upp och späds med vatten för att bilda vattenglas. Efter ytterligare processer uppnås den önskade partikelstorleken, mellan 1 och 500 nm.

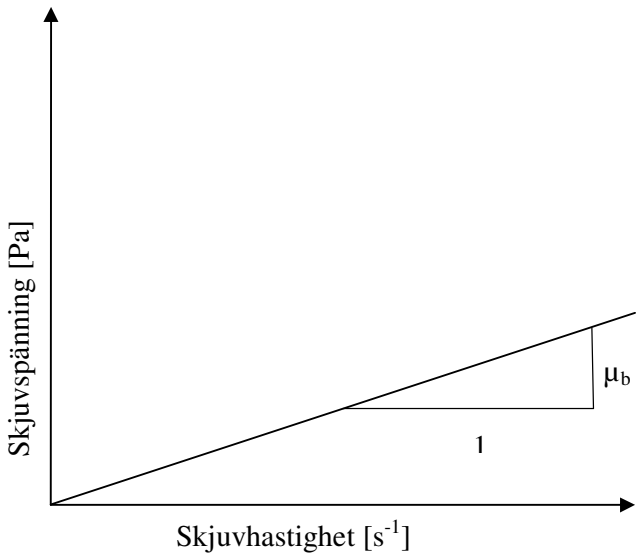
När täthetskraven inte är uppfyllda efter upprepad cementinjektering bör ett fininjekteringsmedel användas för att täta de finaste sprickorna. Silica sol är ett miljövänligt alternativ för fintätning till skillnad från andra kemiska medel, exempelvis polymerer och akrylater vars miljömässiga effekter har ifrågasatts.

Reologi

Silica sol kan beskrivas som en gelande Newtonvätska eller en Newtonvätska med gelningsprocess. Den enda parameter som behövs för att beskriva en Newtonvätska är viskositeten, se ekvation 2.3. När silica solen aggregerad ökar viskositeten avsevärt för att slutligen forma en gel. (Funehag 2007)

$$\tau = \mu_n \cdot \dot{\gamma} \tag{2.3}$$

Figur 2.4 visar en flödeskurva för Newtonvätska.



Figur 2.4: Flödeskurva för Newtonvätska.

De kemiska injekteringsmedlen saknar flytgräns och kan teoretiskt ha en oändlig inträngningslängd. I stället är det viskositeten, μ_0, och hur fort medlet gelar, t_G, som styr inträngninslängden tillsammans med injekteringsövertrycket, Δp och sprickvidden, b, se ekvation 2.4 (Funehag 2007).

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot t_G}{6 \cdot \mu_0}} \cdot b \qquad (2.4)$$

Inträngning

Studier i Hallandsåsen har visat att silica sol kan penetrera sprickor ner till 10 µm och sänka transmissiviteten med 99 % (Axelsson 2006). Ytterligare sänkning av transmissiviteten uppnåddes av kombinerad cement och silica sol injektering, 99.95%.

Hållfasthetstillväxt

För att silica sol skall gela och sedan härda tillsätts en saltlösning, vanligen NaCl eller $CaCl_2$. Denna saltlösning kallas accelerator och mängden avgör hur snabbt gelningen sker. När salt är närvarande i processen och *pH* ligger mellan 7 och 10 kommer partiklarna att aggregera och bilda en gel genom att bindningar bildas mellan silikatpartiklarna. Saltpartklarna deltar inte aktivt i processen utan lakas ur efterhand. Hållfastheten hos silica sol fortsätter att öka under lång tid (Funehag 2007). Hur lång tid det handlar om beror på den omgivande fuktigheten. Låg omgivande fuktighet leder till snabbare hållfasthetstillväxt men också till krympning. För prover förvarade vid 75 % luftfuktighet inträffade tidpunkten, för när hastigheten för hållfasthetstillväxten ökar, vid 40 dagar och för RH 95 % efter 80 dagar. För RH 100 % inträffade ingen sådan tidpunkt under de första sex månaderna (Axelsson 2006).

Beständighet

Silica sol har en förväntad livslängd på över 25 år om den är omgiven av vatten samt om *pH* inte är för högt (Axelsson 2006). Om silica inte är omgiven av vatten finns risk

för krympning och uppsprickning, därför är injektering med silica sol inte ett bra alternativ om den injekterade zonen tidvis ligger över grundvattenytan. Mätningar gjorda på prover som förvarats vid RH 75 % visade en krympning på omkring 25 % medan prover förvarade i nästan 100 % RH visade en krympning på omkring 2 % (Axelsson 2006).

2.3 Bergets egenskaper

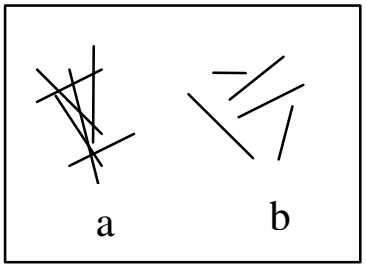
I kristallint berg rör sig grundvattnet huvudsakligen i sprickorna, dvs. samma väg som injekteringsmedlet, och därför är det sprickornas egenskaper som är intressanta för bergmassans genomsläpplighet. Sprickor kan delas in i tre grupper beroende på bildningssätt: (Aydan och Shimizu 1995, se Axelsson 2006)

- Primära sprickor som bildas vid bergmassans uppkomst
- Sekundära sprickor som bildas genom temperatur och annan påverkan
- Tertiära sprickor som bildas genom tektoniska rörelser

Störst apertur har de tertiära sprickorna vilka också är mest vattenförande.

Sprickighet är kopplat till bergartens mekaniska egenskaper. De mekaniska egenskaperna beror i sin tur på bergarten mineralsammansättning och bildningssätt. Sura bergarter, såsom granit och ryolit, har högre E-modul än basiska bergarter (t.ex. amfibolit och diabas) och är sprödare än dessa. Särskilt i kontakter med basiska bergarter uppkommer många sprickor på grund av spänningskoncentration i den sura bergarten.

Konnektivitet är ett begrepp som beskriver huruvida sprickor och sprickgrupper är kopplade till varandra (Domenico och Schwartz 1990). Vid injektering är detta intressant då injektering i en sprickgrupp inte når ut i den övriga bergmassan om sprickorna eller sprickgrupperna inte är kopplade till varandra. Samma sak gäller för grundvattenflöden.



Figur 2.5: a) Visar en grupp sprickor som är kopplade till varandra.
b) Visar en grupp sprickor som inte är kopplade till varandra.

Sprickor som ska tätas är sällan plana ytor utan har olika sprickvidd och sprickfyllnad samt är förbundna till varandra i ett spricknät. Att injekteringen inte lyckas kan även bero på de tre punkterna nedan. (Gustafson et al 2004)

- Vissa sprickor har för liten öppning för att bruket ska komma in – gäller främst cementbruk som kräver en sprickvidd på 100 µm.
- Bruket tränger inte in tillräckligt långt för att en överlappning ska ske.
- Vägen genom sprickorna är inte rak vilket gör att den nödvändiga inträngningen blir längre än räknat.

Det viktigaste som rör sprickor är vilken genomsläpplighet den största sprickan har, hur många sprickor man förmår att täta med valt tryck och hur många sprickor som är för smala för att bruket ska tränga in. (Gustafson - manuskript)

2.3.1 Vattenflöde

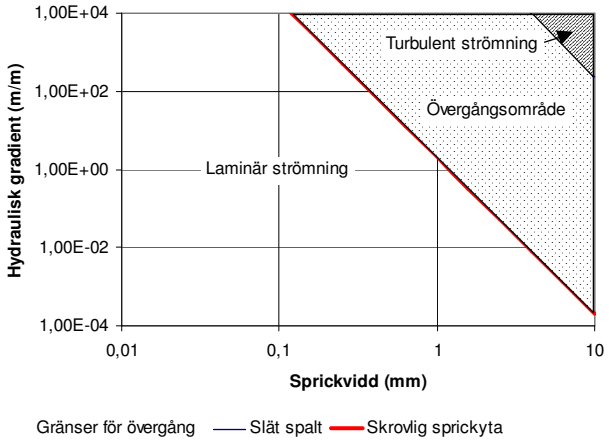
Som tidigare nämnts rör sig grundvatten i bergets sprickor och sprickornas egenskaper påverkar flödet. Ett viktigt samband inom hydrogeologin är Darcy's lag (ekvation 2.5) som beskriver det linjära sambandet mellan specifik flöde och den energi som krävs för att driva detta flöde genom ett por- eller sprick system. För att sambandet ska gälla måste ett antagande göras att flödet är laminärt och att de tröghetskrafter som uppstår när flödet ändrar riktning är försumbara.

$$q = \frac{Q}{A} = K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \rightarrow -\frac{dh}{dl} \cdot K \qquad (2.5)$$

Den hydrauliska gradienten, *dh/dl*, anger grundvattennivåns ändring per längdenhet längs grundvattnets flödesbana eller i annan angiven riktning (Carlsson och Gustafson 1997).

Tryckgradient är skillnaden i tryck mellan tunneln och berget. Inflödet till ett borrhål resulterar i en tryckminskning i flödesriktningen. Ju närmare tunnelperiferin, ju större gradient. På grund av den tryckgradient som uppkommer runt tunneln vid efterinjektering finns det risk för turbulent flöde och erosion av injekteringsmedel (Fransson och Gustafson, 2006). En ökande gradient gör att injekteringsbruket kan tryckas ut eller erodera innan det hinner härda. Vattenflödet följer alltid den väg där det är minst motstånd, detta är mot gradienten runt om tunneln.

Övergången mellan laminär och turbulent strömning styrs av Reynolds tal och relationen mellan sprickvidd och hydraulisk gradient se Figur 2.6.



Figur 2.6: Övergångsområdet mellan laminär och turbulent strömning som relationen mellan sprickvidd och hydraulisk gradient. (Gustafson, manuskript)

Proportionalitetskonstanten *K*, den hydrauliska konduktiviteten, är inte bara beroende utav bergmassans egenskaper utan också av vattnets egenskaper (ekvation 2.6) till skillnad från transmissiviteten *T*. Den hydrauliska konduktiviteten, *K*, beror på

vattnets densitet, ρ_w, normalaccelerationen, g, vattnets viskositet, μ_w och lutningen, k. Transmissiviteten beskriver en sprickas förmåga att transportera vatten och är proportionell mot kuben på sprickvidden, ekvation 2.7. Transmissiviteten beror även den på vattnets densitet, ρ_w, normalaccelerationen, g och vattnets viskositet, μ_w men även sprickvidden, b.

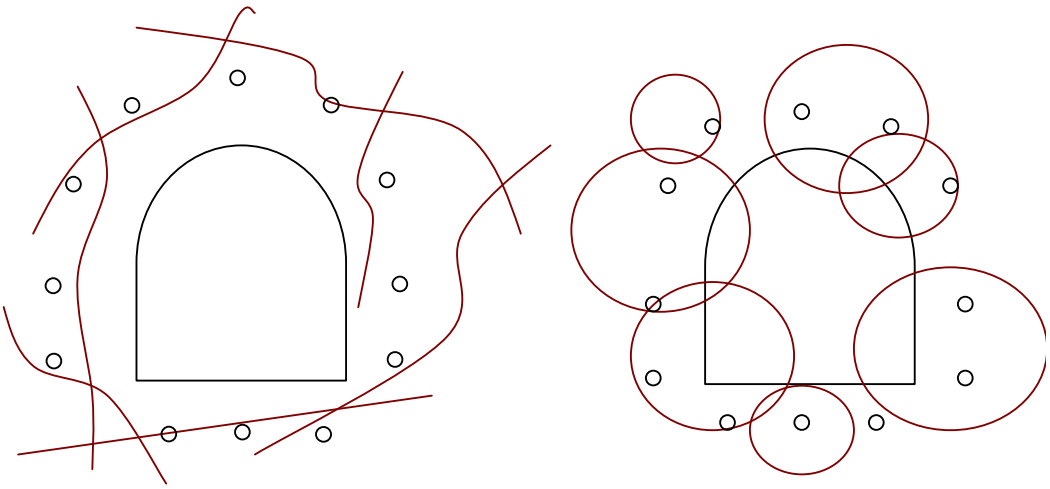
$$K = \frac{\rho_w g}{\mu_w} \cdot k \ \text{[m/s]} \tag{2.6}$$

$$T = \frac{\rho_w g}{\mu_w} \cdot \frac{b^3}{12} \ \text{[m}^2\text{/s]} \tag{2.7}$$

Enligt Fransson (2001) kan sektionstransmissiviteten också uppskattas som den specifika kapaciteten med flödet, Q, och grundvattentrycket i meter vattenpelare, dh (ekvation 2.8).

$$T = \frac{Q}{dh} \ \text{[m}^2\text{/s]} \tag{2.8}$$

Som tidigare nämnts rör sig grundvatten i bergets sprickor och sprickornas egenskaper påverkar flödet. Beroende på skalan kan bergmassan i vissa fall beskrivas som ett homogent medium (3D), men i verkligenheten är sprickorna i huvudsak tvådimensionella (2D) och grundvattnet flödar i ett nätverk av sprickor med plana strukturer (Gustafson manuskript). Flödet av grundvattnet kan också ses som kanaliserat till öppna kanaler, vilket kallas endimensionella flödeskanaler (1D), se Figur 2.7. När grundvattnet flödar i endimensionella kanaler är det svårare att träffa kanalerna vid injektering än vad det är vid strömning i tvådimensionella kanaler.



Figur 2.7: Endimensionellt flöde (till vänster) och tvådimensionellt flöde (till höger).

2.3.2 Mätmetoder

Det är viktigt att känna till bergets egenskaper för att kunna designa en effektiv injekteringsskärm. För att beskriva bergets hydrauliska egenskaper kan olika mätmetoder genomföras efter borrning och innan injektering. Nedan förklaras en del av dessa kortfattat.

Vattenförlustmätning

Vattenförlustmätningar i borrhål är ett sätt att värdera sprickplan. Borrhålet delas av i sektioner genom att tättslutande dubbelmanschetter trycker an mot väggen eller så görs mätning i hela hålet. Vatten pressas in samtidigt som vattentryck och vattenflöde registreras. Mätningarna ger den hydrauliska konduktiviteten men också möjligheten att uppskatta vattenproblem under drifttiden. Ett problem med vattenförlustmätningar är att de överskattar den verkliga bergkonduktiviteten och den viktigaste orsaken till detta är att man sällan inväntar stationära förhållanden vid mätningar. (Lindblom 2001)

Naturligt inflöde

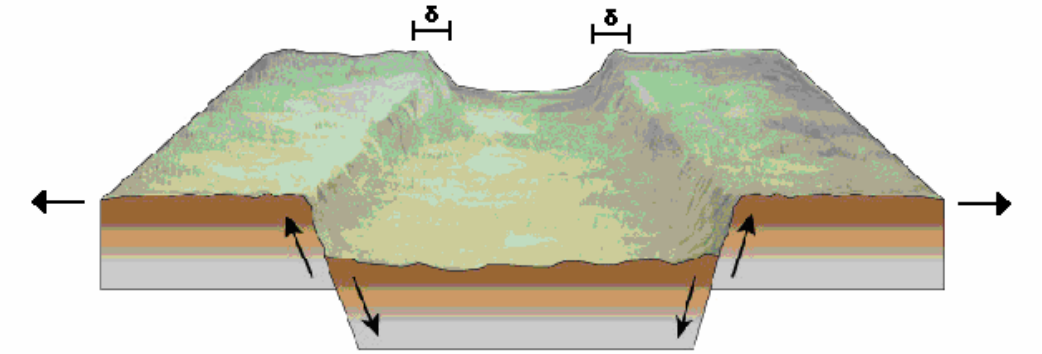
Manschetter monteras och stängs för att bygga upp ett tryck. Sedan mäts hur mycket vatten som rinner ut under en viss tid vilket gör att man kan uppskatta flödet. Noggrannheten på denna mätmetod är upp till utföraren men kan teoretiskt klara mycket låga flöden.

3 Objektsbeskrivning

Detta kapitel omfattar, förutom skärmutformning för den aktuella sträckan, också beskrivning av den lokala och regionala geologin.

3.1 Geologisk beskrivning

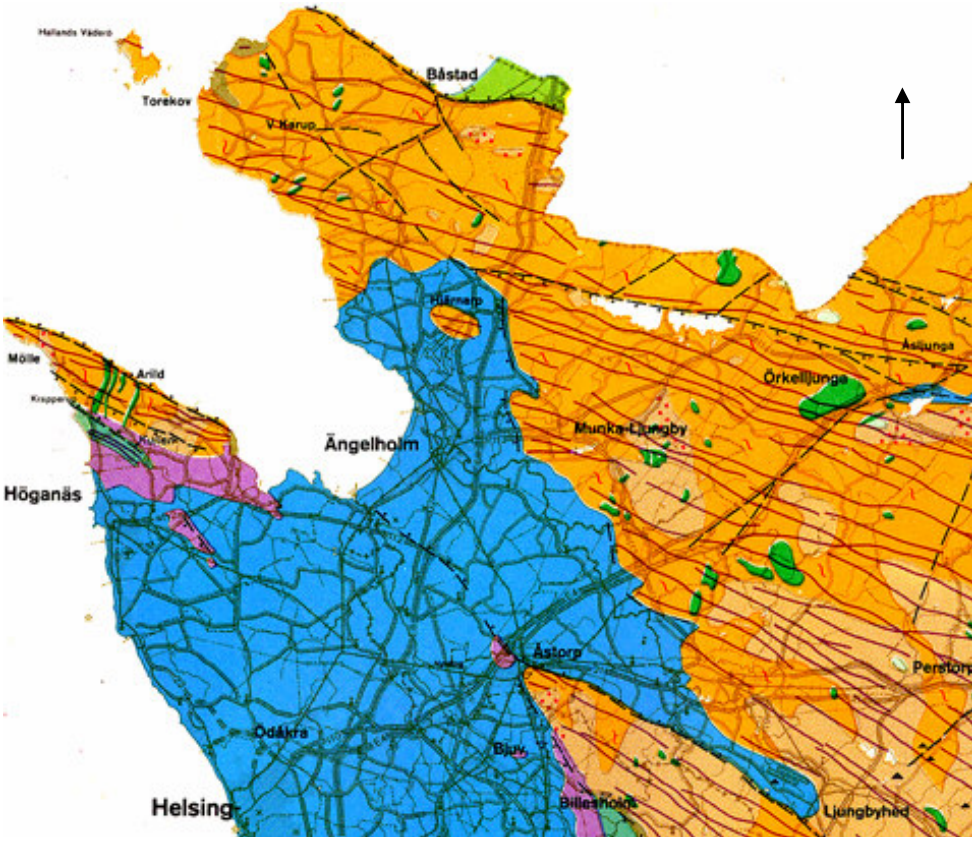
Diagonalt över Skåne går Tornquistzonen som sedan fortsätter ner över Europa. Detta är ett område som för 70 – 100 miljoner år sedan var tektoniskt aktivt. Stora dragspänningar gav upphov till deformationer i jordskorpan, berggrunden sjönk och bildade gravsänkor (se Figur 3.1). De kvarvarande höjderna mellan dessa gravsänkor är urberg och kallas i dag ”de Skånska åsarna”. Sedan bildningen har åsarna eroderats ner och den högsta är Hallandsås.



Figur 3.1: Principskiss för de skånska åsarnas bildning (geography.sierra.cc.ca.us)

Berggrunden i Hallandsås skiljer sig från den västsvenska geologin trots att bergarterna är desamma, se Figur 3.2 (Hela Skånes berggrundskarta och legend återfinns i bilaga A). Överlag är den västsvenska berggrunden mycket hård och sprickfri medan berggrunden i Hallandsås varierar från bra bergkvalitet till mycket uppsprucket. De uppspruckna och vittrade zonerna kan vara lerfyllda eller innehålla stora mängder vatten. Den mest besvärliga delen i tunneln är Möllebackzonen som är 300 meter och kraftigt vittrad och uppsprucken. För att kunna passera denna zon behöver den stabiliseras, detta har gjorts genom nedfrysning (Banverket hemsida 2007)

Åsen domineras av berggrund med granitiska ådergnejser. Vid de kraftigaste foliationerna är ofta glimmermineral samlade i tydliga skikt, vilket kan leda till uppspräckning vid sprängning. I gnejsen förekommer inslag av amfibolit parallellt med förskiffringen, allt från små linser till mycket stora förekomster. Kännetecknande för amfiboliterna är att de i samband med metamorfos veckats med de plastiska deformationerna som drabbat gnejsen. En viss mineralomvandling i form av biotit har skett och detta ger dåliga fogar mellan amfiboliten och dess sidosten, vilket kan innebära att amfibolitkroppar kan falla ut ur tunnelns tak och väggar. (Förfrågningsunderlag, 1991)



Figur 3.2: Berggrundskarta över NV Skåne med Bjärehalvön. (Banverket 2007)

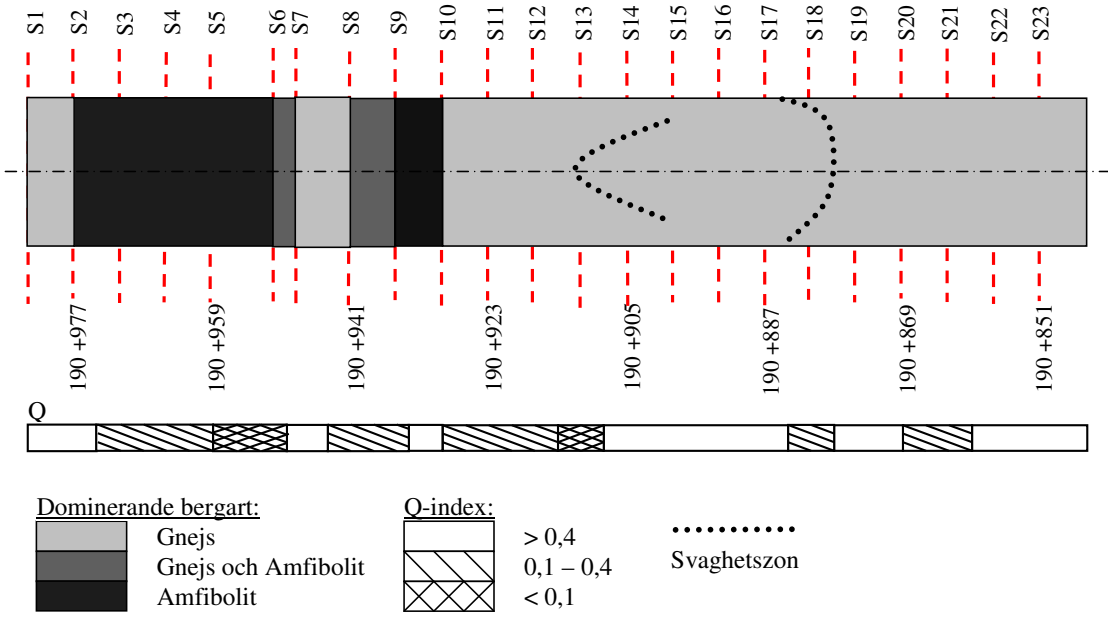
3.1.1 Bergarterna – Gnejs och Amfibolit

Gnejsen i Hallandsås är en metamorf bergart som bildats av att granitisk magma blivit omvandlad under ändrat tryck och temperatur. Gnejsen har en parallellstruktur som gör att den kan klyvas i tjocka skivor längst glimmerskiktet. Bergarten är spröd och har en hög E-modul. Den vanligaste förekommande bergarten i åsen är en fin-medelkornig röd-rödgrå gnejs. De dominerande mineralerna är kvarts, biotit, hornblände samt röda och vita fältspater. De mörka partierna består av pyroxen och amfibolit.

Även amfiboliten är en metamorf bergart som bildats med en hög omvandlingsgrad ur eruptivbergarter. Den är hårdare än gnejsen och är ofta en tät barriär i en sprucken gnejs. Förbandet vid övergången mellan de två bergarterna är ofta dåligt och kan ge blockutfall i tunnlar samt vara en vattenväg. I förundersökningsmaterialet delas amfiboliten in i två grupper; typ 1 som ligger inbakad som sliror eller band i gnejsen och typ 2 som bildar en renodlad gångbergart. Typ 2 är mer uthållig och homogen och är inte helt amfibolitomvandlad.

Diabas är en mörk, finkornig, massformig magmatisk bergart som är mycket hård och har ett bra motstånd mot nötning. Diabasens huvudmineraler är plagioklas och pyroxen och den bildas genom att den kristalliseras på väg upp mot jordskorpan. Dess hårdhet beror på en relativt snabb avkylning. Den finns i mindre omfattning i åsen men övergången mellan diabas och gnejs är dock vittrad och vattenförande (Banverket hemsida 2007).

Sektionen 190+851 – 190+983 (132 meter) består till huvudsak av gnejs med inslag av amfibolit. Mellan 190+951 – 190+977 och 190+929 – 190+935 (ungefär 30 meter) är det dock amfiboliten som är den dominerande bergarten, se Figur 3.3. Sträckan är svagt till måttligt folierad och har till största delen friska sprickor.



Figur 3.3: Geologisk beskrivning av den specifika tunnelsträckningen.

3.1.2 Ingenjörsgeologiska tolkningar

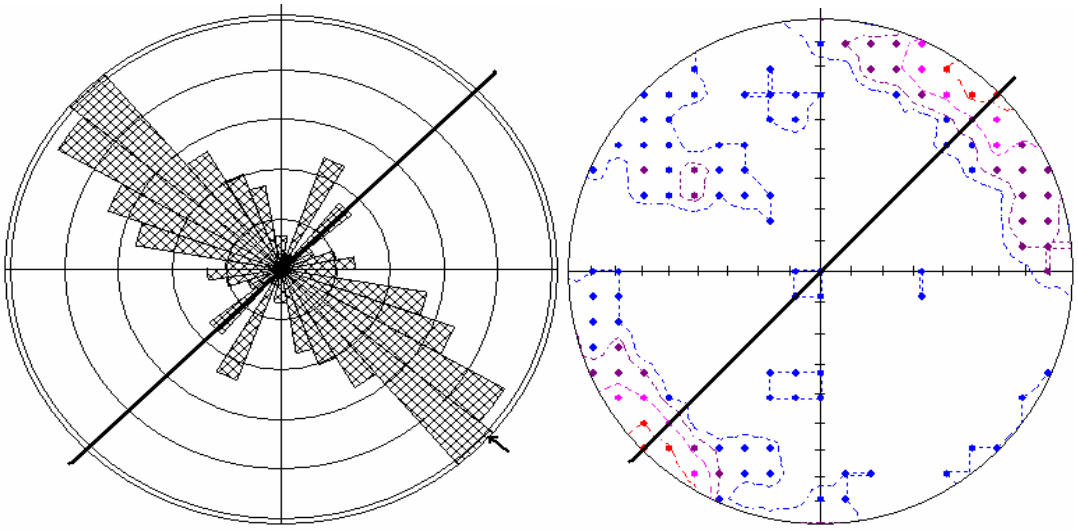
I området är det gjort en geologisk strukturkartering vilket innebär att man mäter orienteringen av strukturplan så som foliation, sprickor och krosszon. RQD och Q-värden har tagits fram från kärnborrhål och ger en överblick av bergets kvalitet. (Förfrågningsunderlag, 1991)

På sträckan som ska utvärderas ligger RQD mellan 25 och 70 vilket är i kategorierna dåligt och relativt dåligt. Medelvärdet för tunnelsträckan är 46 och klassas alltså som dåligt berg. Q-värdena ligger under 1,0 under nästan hela sträckan vilket då klassas som mycket dåligt berg. Eftersom Q-värdena varierar mellan 0,06 och 1,3 delas värdena in i ytterliggare tre intervall för att kunna se skillnader under sträckan, se indelningen i Figur 3.3. 190+905 – 190+971 (66 meter) har generellt sämre RQD och Q än resten av sträckan. Beskrivning av RQD och Q-värden återfinns i bilaga B.

Eftersom det är sprickorna som leder vattnet är det sprickornas hydrogeologiska egenskaper som är avgörande för bergmassans egenskaper. Det är antalet sprickor och dess egenskaper som påverkar om efterinjekteringen blir lyckad eller inte. Hallandsåsen är sprickrik och innehåller stora mängder grundvatten. I många av sprickorna förekommer sprickmineral i form av kalcit och lera. Huvudriktningen på de karterade sprickorna är vinkelrät mot tunnelsträckningen i NV-SO (se rosdiagram i Figur 3.4) medan en tredjedel av sprickorna stryker 5-10 grader mot tunneln. Den generella stupningen är brantstående, mellan 70-90 grader men där finns även sprickor med svagare stupning, 10-40 grader, se stereonät i Figur 3.4 (Geologisk kartering). Som ses i rosdiagrammet nedan stryker ett fåtal av sprickorna längs

tunnelriktningen. Dessa sprickor är underrepresenterade och lätta att missa vid injektering.

Sprickzoner, som är av varierande storlek och karaktär, kan vara kraftigt uppkrossade och vittrade. I den aktuella tunnelsträckningen finns inga sprickzoner däremot två mindre svaghetszoner med tydliga avgränsningar som korsar tunneln i bågar. De är 0,5 till 1 meter breda och relativt branta.



a) b)

Figur 3.4: 98 sprickor är uppmätta på sträckningen. a) Rosdiagram inklusive tunnelsträckningen. b) Stereonät inklusive tunnelsträckningen.

Bergtäckningen är 50-70 meter vid sträckningen.

Enligt förundersökningar bedöms vattenföringen att vara störst inom spricksystemen i tunnelområdets centrala och norra del, även höga vattentryck på upp till 1,5 MPa kan förväntas inom flera sektioner. (Förfrågningsunderlag, 1991)

3.2 Utformning av injekteringsskärm

För att få en så tät tunnel som möjligt är det viktigt att designa en bra injekteringsskärm. Skärmens geometri bestäms förutom av tryck och injekteringsmedel av geologin i berget. Målet är att korsa sprickorna i 90° vinkel och att inga sprickor skall missas. Förinjekteringen och efterinjekteringen går, i Hallandsåstunneln, mot varandra för att öka säkerheten att träffa alla sprickor. Att designa en injekteringsskärm är en iterativ process och för att få en bra design måste sannolikt processen göras fler gånger. I kapitlen nedan beskrivs hur designen ser ut geometriskt och hur den förhåller sig till den ursprungliga designen.

3.2.1 Injekteringsdesign

Att komma fram till en design är en iterativ process och i detta fall är det olika förslag som tagits fram för att sedan kombinerats till ett reviderat förslag. (Minnesanteckningar)

Ursprungsförslag

Injektera i fyra omgångar där Primär består av 16 stycken 7,5 meters hål och det fördjupade Primära av 16 stycken 18,5 meters hål. Båda omgångarna injekteras med Rheocem 650. Sekundär- och Tertiäromgången ser ut på samma sätt genom 16 stycken 7,5 och 18,5 meters hål, skillnaden är att det i dessa omgångar används Cembinder U22.

Chalmers förslag

Detta förslag innehåller endast tre omgångar med 12 hål i varje. Omgång Primär injekteras med cement, är på 18,5 meter och går direkt ut i oinjekterad zon. Omgång Sekundär och Tertiär har båda längder på 12 meter och injekteras med Cembinder. Chalmers målsättning med designen är att uppnå en kompletterande tätning, detta görs genom fullängdshålen som syftar till att nå utanför tidigare injekterad zon så att kapaciteten på cementen utnyttjas. Genom att mäta inflödet kan tjockleken på den redan injekterade zonen bestämmas. Hålen med Silica sol görs fler och kortare för att öka sannolikheten att täta fina sprickor och på så sätt få en kompletterande tätning utan onödig förlust av bruk.

Reviderat förslag

Det reviderade förslaget som är det slutgiltiga, följer Chalmersförslaget med att varje omgång består av 12 hål och att omgång Sekundär och Tertiär injekteras med Cembinder i 12 meters hål. Däremot behålls de två första omgångarna med Rheocem i 7,5 och 18,5 meter.

De stora skillnaderna var att ett mer trögflytande bruk rekommenderades för att ge kortare inträngning och vara mer erosionståligt, detta genomfördes dock inte. Borrhålen i omgång Sekundär och Tertiär kortas ner för att minska risken att nå mindre injekterat berg.

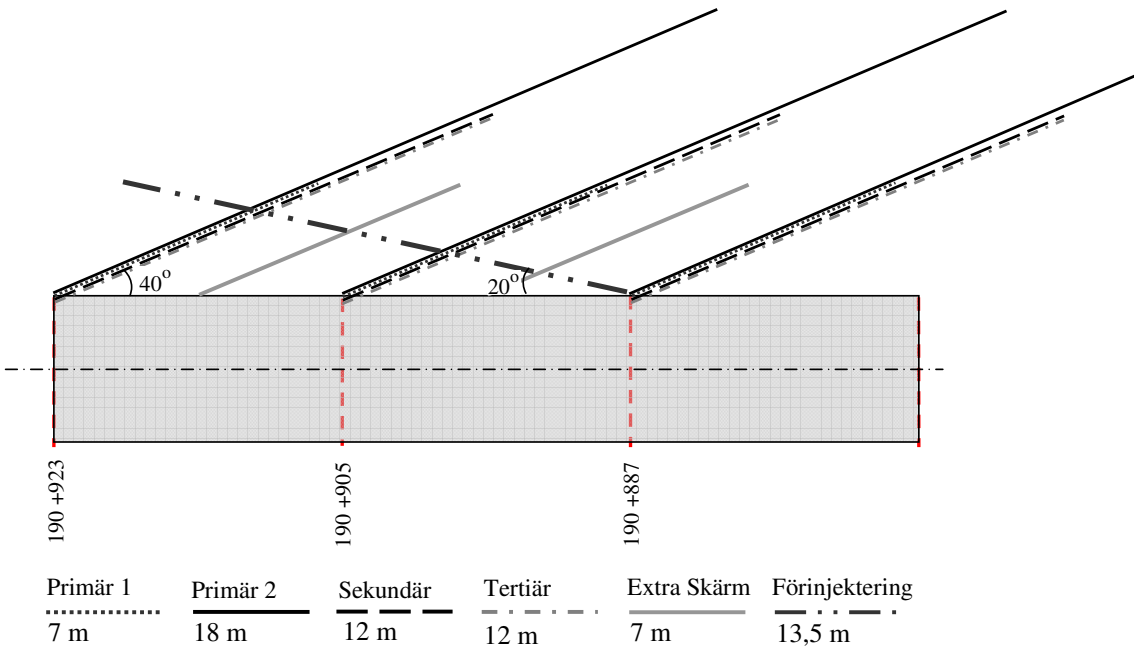
3.2.2 Injekteringsgeometri

De givna borrhålslängderna varierar upp mot en halv meter på de olika skärmarna. I Tabell 3.1 ses en översikt av benämning, längd, injekteringsmedel, och förkortningar, vilka används vidare i rapporten. Varje skärm borras med 12 hål i varje omgång vilket ger 48 hål/skärmläge.

Tabell 3.1: Översikt över borrhål, längder och injekteringsmedel.

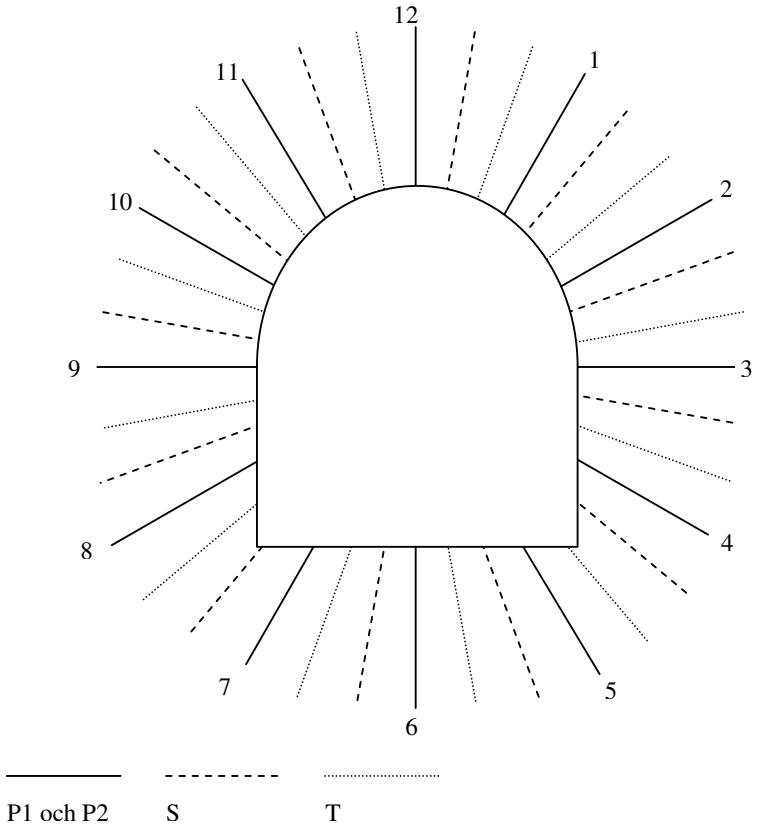
Benämning	**Förkortning**	**Längd [m]**	**Injekteringsmedel**
Primärhål	P1	7,5	Rheocem 650 (cementbaserat)
Fördjupat Primärhål	P2	18,5	Rheocem 650 (cementbaserat)
Sekundärhål	S	12	Cembinder (silica sol)
Tertiärhål	T	12	Cembinder (silica sol)

Förinjekteringen gjordes från norr mot söder medan tunneln drevs framåt. Injekteringshålen är 13 meter långa och vinklas ut från tunneln med 20°, se Figur 3.5. Det blir en överlappseffekt då skärmarna sitter med 8 meters mellanrum.



Figur 3.5: Geometrisk modell och inträngningslängder.

Efterinjekteringen sker från södra delen av sträckan mot norra delen av sträckan med skärmar som sitter med 6 meters mellanrum. Den sker i motsatt håll i förhållande till förinjekteringen, på så sätt har man större chans att träffa sprickor man missat. Injekteringen sker i 4 omgångar där borrhålen vinklas ut 40° från tunneln och sitter med ett mellanrum på 30°. De två första omgångarna, P1 och P2 (förkortningar, se Tabell 3.1), injekteras med Rheocem och sitter på samma ställe. För att sedan täta ytterliggare och komma åt sprickor med mindre sprickvidd används ett kemiskt injekteringsmedel i de två sista omgångarna, S och T. I de fall inflödet fortfarande är över 10 l/min efter P2 används Rheocem även i S och T. För att komma åt och täta så många sprickor som möjligt sker injektering i P1 och P2 på samma ställe medan S har en förskjutning på 10° och T har en förskjutning på ytterliggare 10°. För längdgeometrin se Figur 3.5 och för vinkelgeometri i skärmen se Figur 3.6.



Figur 3.6: Principskiss för placering av borrhål. S och T flyttas 10° respektive 20° åt höger.

Efter injektering var inläckaget fortfarande högt så ytterliggare tätning behövdes. Den kronologiska ordningen av injekteringsomgångarna ses i bilaga C. Avståndet mellan ursprungsskärmarna halverades, från skärm 1 till skärm 7, genom att 9 extra skärmar sattes in, se Figur 3.5. Denna extrainjektering sker, i likhet med P1, med Rheocem i 7 meter långa borrhål.

4 Metodbeskrivning

Utvärderingen baseras på de efterinjekteringsprotokoll som finns att tillgå från den aktuella sträckan. Protokollen beskriver borrplan, injektering, vattenmätning och bruksdata för varje skärm och omgång. Sammanlagt ingår 23 efterinjekteringsskärmar i sträckan men skärm 7, 17 och 18 utgår på grund av att ingen injektering utförts i dessa. Anledningen är, enligt Skanska och Banverket, att dessa vid inspektion var ”torra” och att efterinjektering inte ansågs nödvändig.

Följande metoder ligger till grund för utvärderingen:

- **Inflödesanalys** som ligger till grund för beräkning av **transmissivitet, konduktivitet** och **kritisk sprickvidd.**
- **Effektiv injekteringsvolym**
- **Dimensionalitetskontroll**
- **Inträngningslängd**

4.1 Inflödesanalys

Inflödesanalysen avser att beskriva den successiva tätningen av bergmassan. Indata är hämtad från vattenmätningsprotokollen där inflödesmätning är utförd *innan* varje injekteringsomgång. Resultat från inflödesanalysen ligger även till grund för beräkning av transmissivitet, konduktivitet samt kritisk sprickbredd. Dessa redovisas senare i detta kapitel.

Genom att redovisa den statistiska fördelningen hos parametern x (inflöde) i ett kumulativt fördelningsdiagram visas sannolikheten att ett uppmätt värde på parametern x är mindre eller lika med ett visst värde $p(T \le T_i)$ (Gustafson, manuskript). De uppmätta inflödena storlekssorteras och ges ordningsnummer n_i. Då den sökta sannolikheten är medianen i intervallet kan Weibulls formel (ekvation 4.1) användas.

$$p(T \le T_i) = \frac{n_i}{N+1} \tag{4.1}$$

Då spridningen i mätdata är stor används en logaritmisk skala för att få en jämn spridning, vilket fungerar väl eftersom mätvärden kommer i samma ordning som hos en linjär skala.

Inflödet antas vara lognormalfördelat, då definitionen för detta är att en variabel x som inte är negativ sägs ha en lognormalfördelning om $ln(x)$ har en normalfördelning med parametrarna σ och μ. (Devore J och Farnum N, 1999)

För att tolka den logaritmerade datan används inversen av lognormalfördelningen.

Vissa antaganden har varit nödvändiga att göra både för att göra indata mer lätthanterlig samt för att förenkla metoden.

- Mätvärdet 0 (noll) l/min kan inte plottas med en logaritmisk skala och har därför getts värdet $1 \cdot 10^{-5}$ l/min. Att mätvärdet noll förekommer i mätdata beror antagligen på att inflödet understiger mätinstrumentens noggrannhet, inte att inget vatten förekommer.
- Där ∞ är angivet i vattenmätningsprotokollen överstiger inflödet mätinstrumentens mätkapacitet. I dessa fall ersätts ∞ med inflödet 300 l/min.
- Där dropp anges i vattenmätningsprotokollen antas inflödet vara 0,05 l/min.
- Extraskärmarna är satta mellan de ordinarie skärmarna. I inflödesanalysen är de dock plottade i grafen för den skärm som ligger närmast och där påverkan av extrainjekteringen anses vara störst.

4.1.1 Transmissivitet

Transmissiviteten för varje omgång och sektion plottas i likadana grafer som inflödet och med samma metod (se bilaga D).

Transmissiviteten beräknas enligt ekvation 4.2.

$$T \approx \frac{Q}{dh} \ [\mathrm{m^2/s}] \qquad (4.2)$$

där Q är inflödet från vattenmätningarna och dh är grundvattentrycket angivet i antal meter vattenpelare.

Det grundvattentryck som används har tagits ur vattenmätningsprotokollen. Dessvärre är kompletta mätserier få (se bilaga E) och antaganden om grundvattentrycken är därför nödvändiga.

Där mätvärden finns används det högsta lämpliga värde på dh, i den primära omgången mellan 40 mvp och 50 mvp, för att sedan höjas i kommande omgångar. Att värdet på dh höjs beror på antagandet att ju tätare tunneln blir ju högre blir också trycker in mot tunneln. Högsta värdet ligger vid ca 78 mvp, ofta i den fördjupade primära omgången. Om ett värde lägre än det tidigare högsta förekommer används det högre värdet, dh sänks aldrig i påföljande omgångar.

Efter skärm 11 förekommer mycket få vattentrycksmätningar pga. trasig mätutrustning. Då bergtäckningen minskar med ökande skärmnummer sätts trycket i omgång P1 till 45 mvp från skärm 11 och framåt. I påföljande omgångar höjs trycket till 48 mvp.

4.1.2 Konduktivitet

Konduktiviteten, K, för varje omgång och sektion beräknas enligt ekvation 4.3.

$$K = \frac{T_m}{L} \ [\mathrm{m/s}] \qquad (4.3)$$

T_m = mediantransmissiviteten från lognormalberäkningen (helhålsmätning) [$\mathrm{m^2/s}$]

L = borrhålslängden [m]

För omgång P2 är två konduktiviteter beräknade. Den ena för borrhålets verkliga längd ca 18 m, och i det andra fallet där de första 7 metrarna av borrhålet anses som tätat. Dessa första 7 metrar är både förinjekterade samt efterinjekterade en gång.

4.1.3 Hydraulisk sprickvidd

Den hydrauliska sprickvidden har visat sig ge ett bra underlag för förutsägning av inträngning av injekteringsmedel. Vatten och injekteringsbruk tar samma väg och om sprickvidden inte är direkt mätbar kan en generaliserad hydraulisk sprickvidd beräknas. Den hydrauliska sprickvidden *b* ges av ekvation 4.2 och ekvation 4.4

$$T = \frac{\rho_w g}{\mu_w} \cdot \frac{b^3}{12} \tag{4.4}$$

Parametrarna i ekvation 4.4 tas upp i kapitel 2.3.1. Som jämförelse antas cement inte kunna penetrera sprickbredder mindre än 100 µm. Silica sol antas kunna penetrera sprickbredder ner till 14 µm. (se kapitel 2.2)

4.2 Effektiv injekteringsvolym

Effektiv injekteringsvolym, V_e, är den volym bruk, V_b, som injekteras i ett borrhål utöver hålets volym, V_h. Det innebär den injekteringsvolym som går in i sprickor eller, i ogynnsamma fall, i angränsande borrhål. Ekvation 4.5 visar effektiv hålvolym.

$$V_e = V_b - V_h \tag{4.5}$$

För att beräkna och grafiskt beskriva den effektiva volymen injektering görs följande antaganden:

- Eftersom negativa värden och noll-värden inte kan plottas i en logaritmisk skala har de fått värdet, $1 \cdot 10^{-5}$ m^3.
- Extra skärmarna är för sig själva i stapeldiagrammen men inlagda i de närmsta skärmarna i lognormal-diagrammen.
- Där det är skillnad på borrhålslängd och injekteringslängd används borrhålslängden.
- Vid ominjektering (i ett hål) har den totala volymen använts.
- Vid växelvis injektering har den totala mängden injekteringsmedel deltas på hälften och adderats till respektive hål.

En sammanställning har gjorts av borr- och injekteringsrapporter där borrdjup, håldiameter och injekteringsvolym är av intresse för vidare beräkningar, se Tabell 4.1.

Tabell 4.1: Information om injekteringsomgångarna

Benämning	Injekteringsmedel	Borrdjup [m]	Diameter [mm]	Hålvolym [ca lit.]
Primärhål 1	Rheocem 650	7 – 7,5	64	24
Primärhål 2	Rheocem 650	18 – 18,5	64	60
Sekundärhål	Cembinder/Rheocem650	12 – 12,5	64	40
Tertiärhål	Cembinder/Rheocem650	12	64	40

4.3 Dimensionalitetskontroll

För att få reda på hur inträngningen av injekteringsmedlet ser ut har en dimensionalitetskontroll genomförts. Av de 23 skärmar har tre skärmar valts ut för en djupare genomgång. De skärmar som valdes är 5, 11 och 19 och ligger därmed jämnt fördelade över den aktuella tunnelsträckan. I varje skärm och omgång har de hål tagits fram som har ett konstant injekteringstryck.

Kurvornas lutning avgör om det är 1D och 2D (se bilaga F), denna lutning fås fram med hjälp av ekvation 4.6.

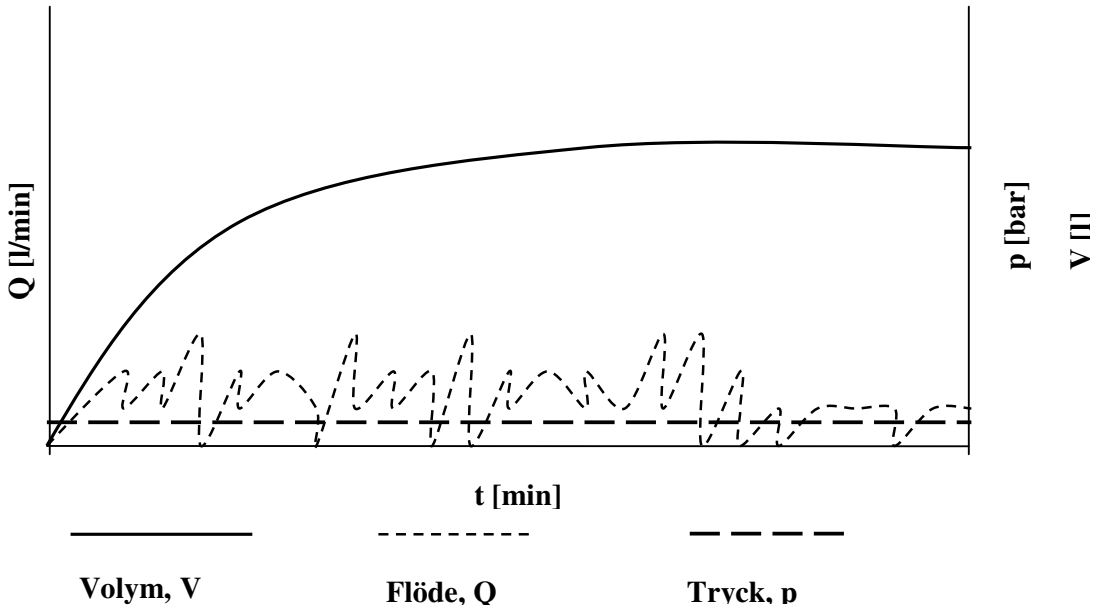
$$\frac{d\log V}{d\log t} = \frac{d\ln V}{d\ln t} = \frac{dV}{V}\cdot\frac{t}{dt} = \frac{dV}{dt}\cdot\frac{t}{V} \tag{4.6}$$

Eftersom $\frac{dV}{dt} = Q$ kan ekvation 4.6 utvecklas till ekvation 4.7 nedan.

$$\frac{d\log V}{d\log t} = \frac{Q\cdot t}{V} \tag{4.7}$$

Vid konstant tryck kan därför flöde, Q, volym, V, och tid, t, avläsas i ett pVt-diagram. (Gustafson och Stille 2005)

2 minuters intervall markeras i diagram och Q och V läses av. För en principskiss av ett pVt-diagram, se Figur 4.1.



Figur 4.1: En principskiss över ett pVt-diagram.

4.4 Inträngningslängd

Inträngningslängd beräknas olika beroende på om bruket ses som en Binghamvätska eller en Newtonvätska (se kapitel 2.2).

Då injekteringstrycket varierar från fall till fall sammanställs de för att få fram tre olika tryck för vidare beräkning:

- Min-tryck är medelvärdet av de lägsta trycken i varje omgång.
- Max-tryck är medelvärdet av de högsta trycken i varje omgång.
- Median-tryck är medelvärdet på varje omgångs median värde.

Då det lägsta trycket ibland hamnar under grundvattentrycket, som på sträckan antas vara 0,7 MPa, har det istället satts till 0,75 MPa för att vara över grundvattentrycket.

4.4.1 Binghamvätska – Cement

Några antaganden som är gjorda vid beräkning av inträngningslängd är:

- b = 0,1 mm (den kritiska gränsen för cement)
- bruket har efter 20 min den förväntade viskositeten och flytgränsen enligt Tabell 4.2.

Tabell 4.2: Viskositet och flytgräns beror på vct och tiden efter blandning.

VCT	Tid efter blandning, t [min]	Viskositet, μ [Pas]	Flytgräns, τ [Pa]
0,6	10	$2{,}86 \cdot 10^{-2}$	2,85
	20	$2{,}82 \cdot 10^{-2}$	**3,09**
	30	$2{,}68 \cdot 10^{-2}$	2,78
0,8	10	$1{,}16 \cdot 10^{-2}$	1,17
	20	$1{,}59 \cdot 10^{-2}$	**1,74**
	30	$1{,}50 \cdot 10^{-2}$	1,97
1,0	10	$7{,}49 \cdot 10^{-3}$	0,59
	20	$9{,}54 \cdot 10^{-3}$	**0,75**
	30	$9{,}09 \cdot 10^{-3}$	0,89

I kapitel 2.2.1 beskrivs den maximala inträngningslängden för cement som beräknas med ekvation 4.8 och beror på injekteringsövertrycket Δp, flytgränsen $\tau_{0,}$ och sprickbredden b. För att sedan få fram inträngningslängden I, används en beräkningsgång (enligt Gustafson och Stille 2005) som redovisas i bilaga H.

$$I_{\max} = \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right) \cdot b \qquad (4.8)$$

För att få fram hur inträngningslängden varierar med bruket görs tre olika diagram med vct 0,6, 0,8 och 1,0 (se bilaga G).

4.4.2 Newtonvätska – Silica sol

Vid beräkning av inträngningslängd har följande antaganden gjorts.

- Injekteringen sprids endimensionellt i berget
- Initial viskositet, μ_0 är 0,005 Pas
- b = 0,014 mm (den kritiska gränsen för silica sol)

Inträngningslängden för endimensionell inträngning beräknas enligt ekvation 4.9 nedan och beskrevs i kapitel 2.2.2.

$$I_{1D} = b \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot t}{6 \cdot \mu_0}} \qquad (4.9)$$

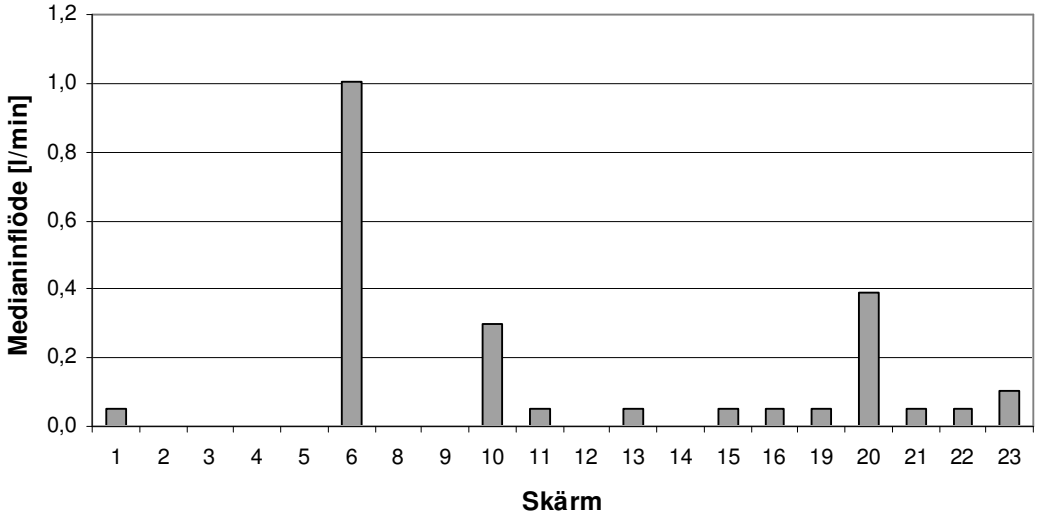
5 Resultat

Nedan sammanställs resultaten av utvärderingen. Resultaten är uppdelade omgångsvis där inflöde, konduktivitet och effektiv volym bruk redovisas. Lägg märke till att skärm 7, 17 och 18 inte ingår i analysen. Resultatet av djupanalyser på skärm 5, 11 och 19 redovisas i kapitel 5.5 sedan. I djupanalyserna ingår även redovisning av den dimensionalitetskontroll som gjorts samt beräknad inträngningslängd.

5.1 Primär injekteringsomgång

Borrhålen i den primära omgången är 7 till ca 7,5 meter långa (se kapitel 3.2.2) och skall enligt designen inte nå utanför förinjekterad zon.

Över större delen av tunnelsträckningen ligger medianinflödet mellan nära 0 och 0,05 l/min, se Figur 5.1. Undantagen är skärm 6, 10 och 20. Den primära injekteringsomgångens högsta medianvärde är 1 l/min och återfinns i skärm 6 (190+951). Skärm 6 är satt i vad som kan vara en övergång från amfibolitdominerat berg till gnejs.



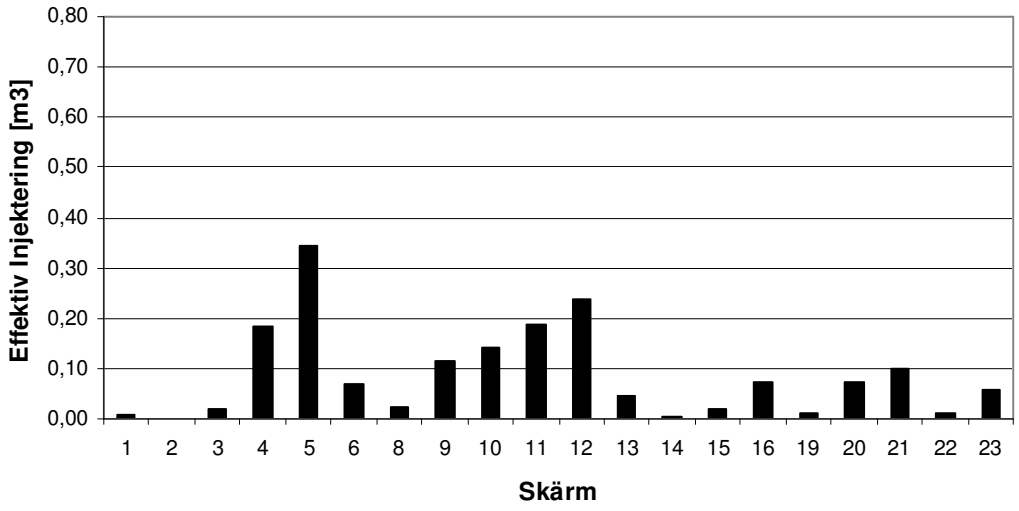
Figur 5.1:Medianinflödet baserat på lognormalfördelning i varje skärm för P1.

Vid beräkning av transmissivitet har hänsyn också tagits till vattentrycket (se metodbeskrivning). Vattentrycken finns redovisade i bilaga E. Nedan (Tabell 5.1) följer en sammanställning av mediantransmissivitet, konduktivitet och hydraulisk sprickvidd för skärmarnas primära omgång.

Tabell 5.1: Sammanställning av mediantransmissivitet, konduktivitet och sprickvidd.

Skärm	Omgång	Transmissivitet [m2/s]	Konduktivitet [m/s]	Sprickvidd [µm]
1	P	2,15E-08	3,07E-09	29,98
2	P	4,40E-12	6,29E-13	1,77
3	P	3,13E-10	4,47E-11	7,32
4	P	4,26E-12	6,36E-13	1,75
5	P	4,26E-12	6,09E-13	1,75
6	P	3,71E-07	5,31E-08	77,51
8	P	3,86E-12	5,52E-13	1,69
9	P	3,88E-12	5,54E-13	1,69
10	P	1,04E-07	1,49E-08	50,78
11	P	1,94E-08	2,77E-09	28,97
12	P	Mätningar saknas	-	-
13	P	1,93E-08	2,68E-09	28,94
14	P	3,88E-10	5,54E-11	7,86
15	P	1,90E-08	2,64E-09	28,79
16	P	1,94E-08	2,70E-09	28,98
19	P	1,96E-08	2,72E-09	29,06
20	P	1,44E-07	2,00E-08	56,52
21	P	1,86E-08	2,58E-09	28,55
22	P	1,86E-08	2,48E-09	28,58
23	P	3,72E-08	4,97E-09	36,01

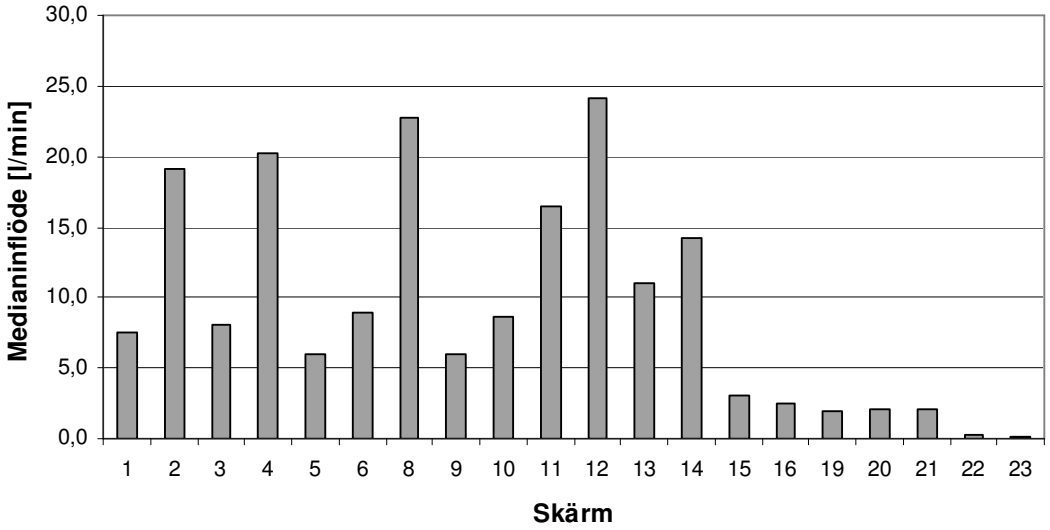
Den effektiva volymen redovisas i Figur 5.2 som stapeldiagram över medianvolymen från lognormalfördelningen.



Figur 5.2: Medianvärdet av den effektiva injekteringsvolymen i varje skärm för P1.

5.2 Fördjupad injekteringsomgång

I den fördjupade injekteringsomgången borras injekteringshålen ca 18 meter långa och dessa är enligt designen tänkta att nå utanför tidigare injekterad zon. I figur 5.3 nedan ses medianinflödet för den fördjupade primära omgången.



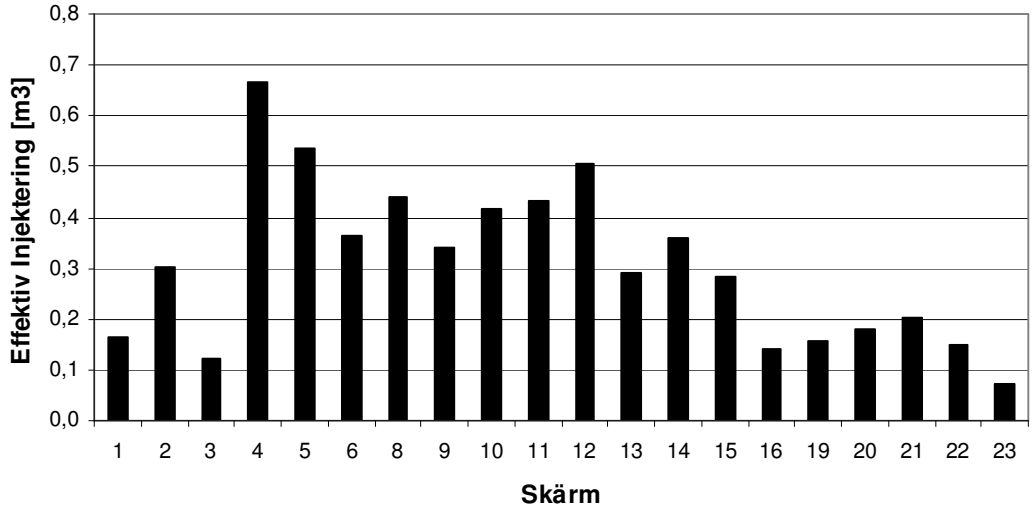
Figur 5.3: Medianinflödet i varje skärm för P2.

Konduktiviteten från skärm 1 till 14 ligger mellan $6{,}52 \cdot 10^{-8}$ m/s och $7{,}27 \cdot 10^{-7}$ m/s. Från skärm 15 och framåt ligger konduktiviteten mellan $9{,}09 \cdot 10^{-8}$ m/s och $4{,}95 \cdot 10^{-9}$ m/s, se Tabell 5.2

Tabell 5.2: Sammanställning av mediantransmissivitet, konduktivitet och sprickvidd.

Skärm	Omgång	Transmissivitet [m2/s]	Konduktivitet [m/s]	Sprickvidd [µm]
1	PF	1,80E-06	1,56E-07	131,11
2	PF	4,91E-06	4,47E-07	183,31
3	PF	2,08E-06	1,89E-07	137,65
4	PF	3,12E-06	2,71E-07	157,53
5	PF	7,18E-07	6,52E-08	96,54
6	PF	2,14E-06	1,94E-07	138,91
8	PF	4,85E-06	4,22E-07	182,58
9	PF	1,28E-06	1,11E-07	116,94
10	PF	1,84E-06	1,60E-07	132,22
11	PF	5,70E-06	4,96E-07	192,66
12	PF	8,36E-06	7,27E-07	218,84
13	PF	3,84E-06	3,34E-07	168,80
14	PF	4,93E-06	4,29E-07	183,54
15	PF	1,05E-06	9,09E-08	109,46
16	PF	8,73E-07	7,59E-08	103,05
19	PF	6,96E-07	6,05E-08	95,56
20	PF	7,26E-07	6,31E-08	96,92
21	PF	7,15E-07	6,50E-08	96,42
22	PF	1,18E-07	1,07E-08	52,85
23	PF	5,20E-08	4,95E-09	40,24

Injekteringsvolymen ligger högst mellan skärm 4 och skärm 12, se Figur 5.4.

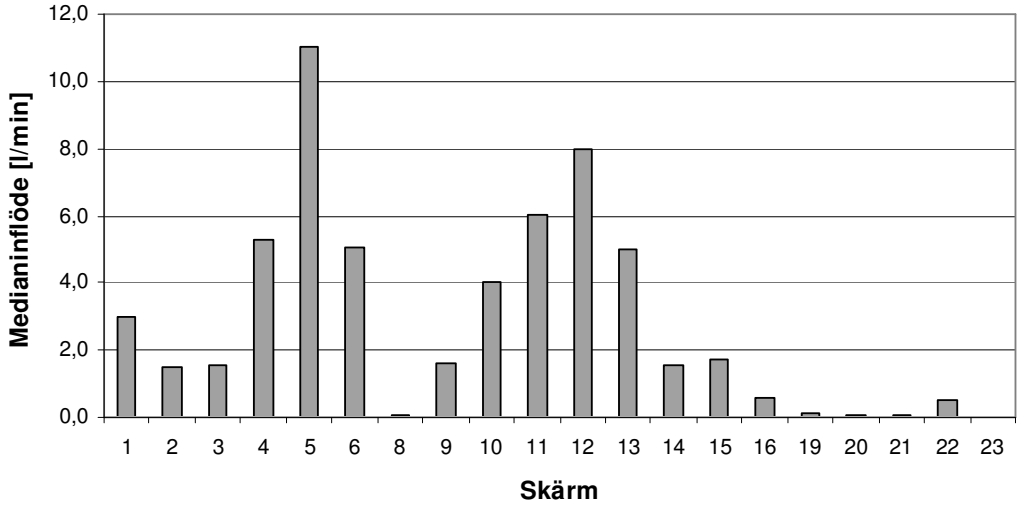


Figur 5.4: Medianvärdet av den effektiva injekteringsvolymen i varje skärm för P2.

5.3 Sekundär injekteringsomgång

Den sekundära injekteringsomgången syftar till att fungera som fintätning av den redan injekterade zonen.

Det högsta inflödet i den sekundära omgången, 11 l/min återfinns i skärm 5 (se Figur 5.5). Skärm 5 är placerad i det område på tunnelsträckningen som har lägst Q-index, dvs. sämst bergkvalitet.



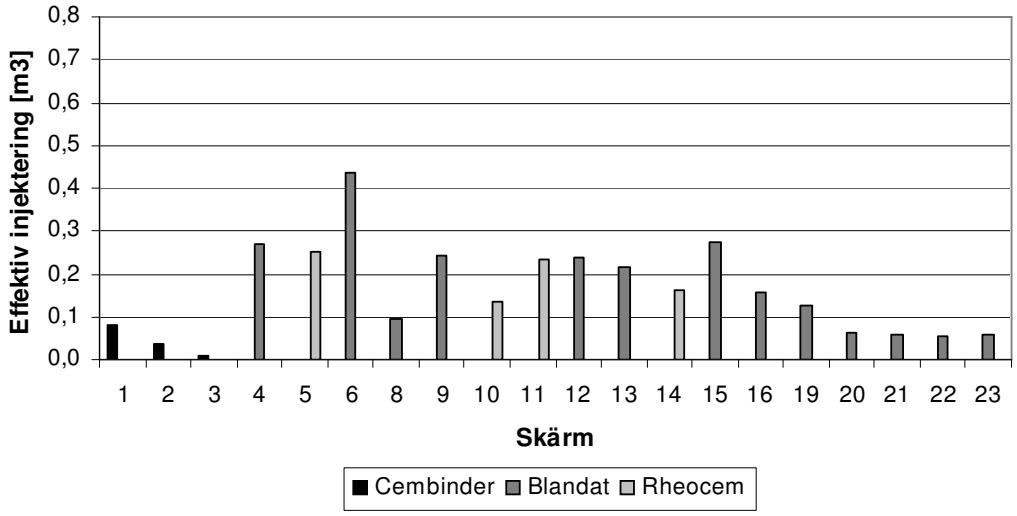
Figur 5.5: Medianinflödet i varje skärm för S.

Konduktiviteten i den sekundära injekteringsomgången varierar mellan $3{,}09 \cdot 10^{-13}$ m/s (skärm 23) och $3{,}33 \cdot 10^{-7}$ m/s (skärm 3). Den låga konduktiviteten i skärm 23 härrör från att inflödet i skärmen är nära 0, se Tabell 5.3.

Tabell 5.3: Sammanställning av mediantransmissivitet, konduktivitet och sprickvidd.

Skärm	Omgång	Transmissivitet [m2/s]	Konduktivitet [m/s]	Sprickvidd [µm]
1	S	7,17E-07	5,74E-08	96,53
2	S	3,87E-07	3,09E-08	78,57
3	S	4,03E-06	3,22E-07	171,60
4	S	2,42E-06	1,93E-07	144,70
5	S	1,43E-06	1,19E-07	121,52
6	S	9,86E-07	8,21E-08	107,31
8	S	1,09E-08	8,70E-10	23,89
9	S	1,79E-06	1,43E-07	130,94
10	S	8,59E-07	7,16E-08	102,52
11	S	2,25E-06	1,80E-07	141,32
12	S	2,76E-06	2,30E-07	151,34
13	S	1,58E-07	1,26E-08	58,28
14	S	5,42E-07	4,33E-08	87,90
15	S	6,06E-07	4,85E-08	91,24
16	S	1,91E-07	1,59E-08	62,07
19	S	3,60E-08	2,88E-09	35,59
20	S	1,77E-08	1,47E-09	28,08
21	S	1,82E-08	1,52E-09	28,36
22	S	1,74E-07	1,45E-08	60,17
23	S	3,71E-12	3,09E-13	1,67

Den sekundära injekteringsomgången är injekterad med Rheocem vid inflöden som är över 10 l/min och Cembinder vid uppmätta inflöden under 10 l/min. Lägg märke till att injekteringsvolymen i Figur 5.6 nedan är uppdelad mellan de olika injekteringsmedlen. Procentandel av respektive injekteringsmedel finns i bilaga E.

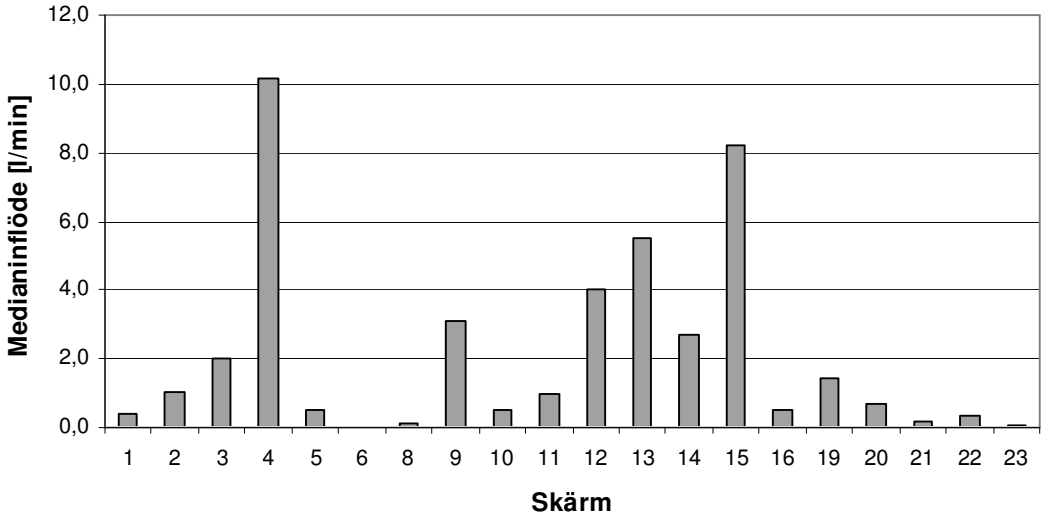


Figur 5.6: Medianvärdet av den effektiva injekteringsvolymen i varje skärm för S. En översikt av använt injekteringsmedel.

5.4 Tertiär injekteringsomgång

Även den tertiära injekteringsomgången syftar till att fungera som fintätning.

Det största inflödet återfinns i skärm 4, 10 l/min (se Figur 5.7) och de lägsta värdena ligger runt 0,1 l/min. Liksom i tidigare omgångar är inflödet lägre i slutet av tunnelsträckningen.



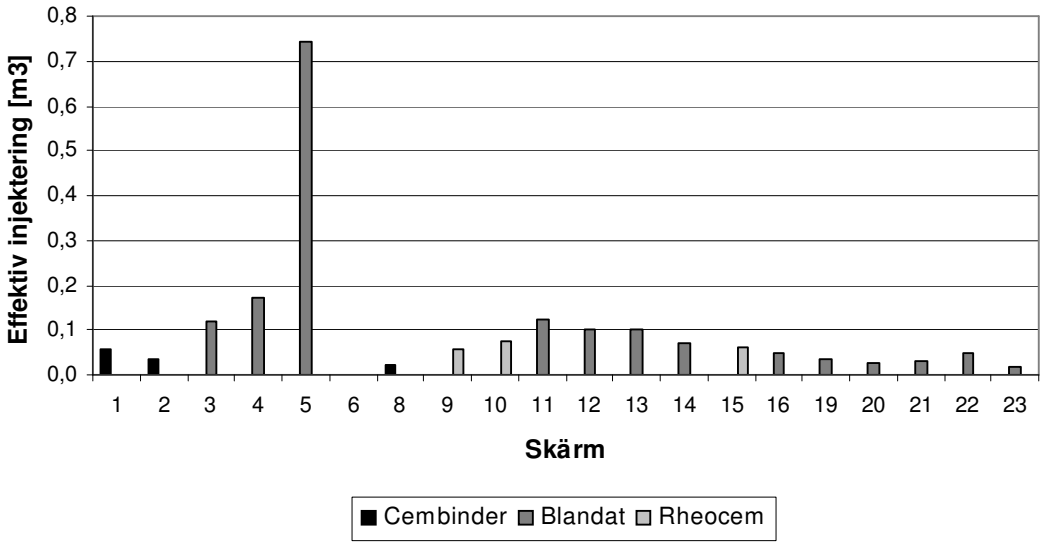
Figur 5.7: Medianinflödet i varje skärm för T.

Konduktiviteten varierar även den mycket över tunnelsträckningen, från $1{,}52 \cdot 10^{-9}$ m/s i skärm 23 till $2{,}37 \cdot 10^{-7}$, se Tabell 5.4.

Tabell 5.4: Sammanställning av mediantransmissivitet, konduktivitet och sprickvidd.

Skärm	Omgång	Transmissivitet [m2/s]	Konduktivitet [m/s]	Sprickvidd [µm]
1	T	9,67E-08	8,06E-09	49,49
2	T	2,63E-07	2,11E-08	69,10
3	T	4,82E-07	3,86E-08	84,56
4	T	1,25E-06	1,04E-07	116,26
8	T	2,67E-08	2,23E-09	32,23
9	T	6,59E-07	5,49E-08	93,85
10	T	1,10E-07	9,13E-09	51,59
11	T	3,32E-07	2,77E-08	74,68
12	T	1,40E-06	1,16E-07	120,52
13	T	1,92E-06	1,60E-07	133,91
14	T	9,44E-07	7,87E-08	105,79
15	T	2,85E-06	2,37E-07	152,86
16	T	1,75E-07	1,46E-08	60,33
19	T	5,04E-07	4,20E-08	85,81
20	T	2,30E-07	1,92E-08	66,05
21	T	5,68E-08	4,73E-09	41,44
22	T	1,16E-07	9,69E-09	52,63
23	T	1,82E-08	1,52E-09	28,38

På samma sätt som i den sekundära omgången injekteras Rheocem eller Cembinder beroende på om inflödet i borrhålet är större eller mindre än 10 l/min. Liksom i de tidigare omgångarna finns den största effektiva injekteringsvolymen i skärm 5, se Figur 5.8.



Figur 5.8: Medianvärdet av den effektiva injekteringsvolymen i varje skärm för T. En översikt av använt injekteringsmedel.

5.5 Djupanalyser av skärmar

I skärm 5, 11 och 19 har en mer ingående redovisning gjorts. I dessa skärmar finns stort underlag för utvärdering och de representerar hela tunnelsträckningen.

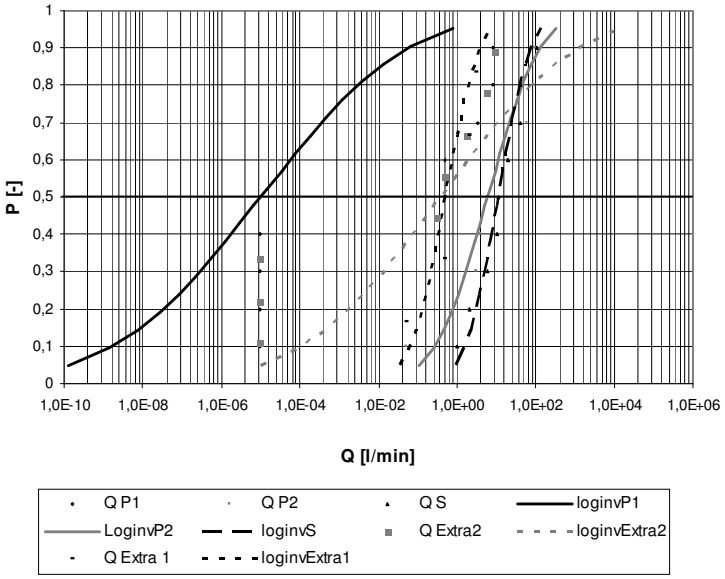
Förinjekteringen ägde rum 1995. Flödesmätningar gjordes innan injektering och i kontrollhål efter injektering. Då antal injekteringshål och injekteringslängd skiljer sig från efterinjekteringen är konduktiviteten beräknad, med approximerade tryck, för att de ska bli jämförbara.

5.5.1 Skärm 5

I skärm 5 dominerar amfiboliten men det finns en del kontakter mellan gnejs och amfibolit. De flesta sprickorna i skärmen går vinkelrät mot tunneln. Q-värdet här är 0,06 vilket klassas som mycket dåligt och uppsprucket samt att det är det lägsta Q-värdet på hela sträckan.

Inflöde och konduktivitet

I Figur 5.9 nedan ses ett diagram över inflödet. Utifrån inflödet är konduktiviteten beräknad och den redovisas i Tabell 5.5. I den tertiära omgången finns endast information om inflöde i tre borrhål, vilka befinner sig i sulan, varför denna omgång inte är medräknad.



Figur 5.9: Lognormaldiagram på inflödet i Skärm 5.

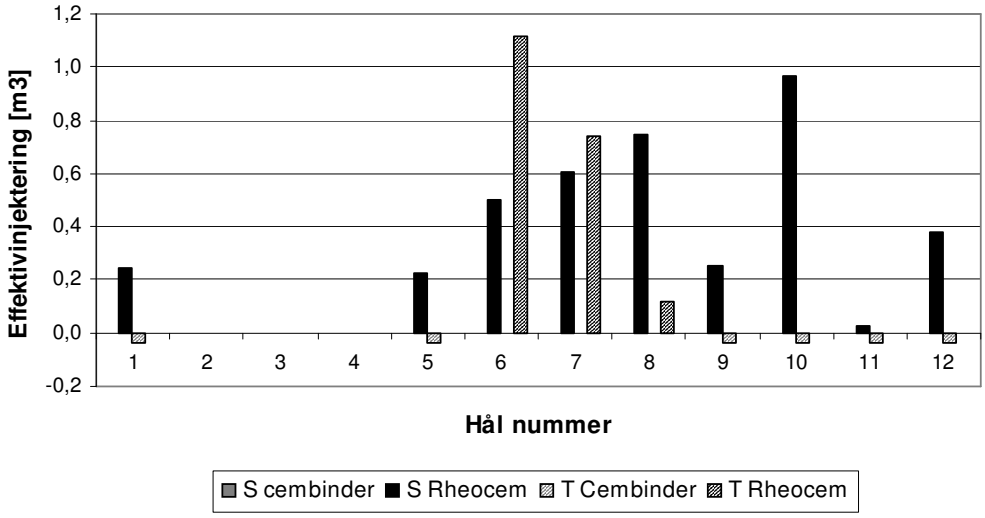
Konduktiviteten sjunker nästan två 10-potenser efter förinjekteringen vilket tyder på ett lyckat resultat, se Tabell 5.5. Att P1 ligger så mycket som fem 10-potenser lägre än P2 beror på att den ligger i redan injekterad zon och endast är till som en kompletterande tätning. Konduktiviteten ökar till P2 vilket är naturligt då P2 är 18 meter lång och når utanför tidigare injektering. Vid beräkning av konduktiviteten räknas längden i P2 som 11 meter eftersom de första 7 meterna anses täta, detta kan göra att det beräknade värdet blir något högt. En anledning till att konduktiviteten inte sjunker till omgång S kan bero på de dåliga geologiska förutsättningarna.

Tabell 5.5: Beräknad konduktivitet [m/s].

Före förinjektering	Efter förinjektering	Före P1	Före P2	Extra	Före S	Extra	Före T
$9{,}07 \cdot 10^{-7}$	$1{,}31 \cdot 10^{-8}$	$6{,}09 \cdot 10^{-13}$	$3{,}99 \cdot 10^{-8}$	$1{,}66 \cdot 10^{-8}$	$1{,}19 \cdot 10^{-7}$	$8{,}24 \cdot 10^{-9}$	-

Effektiv injekteringsvolym

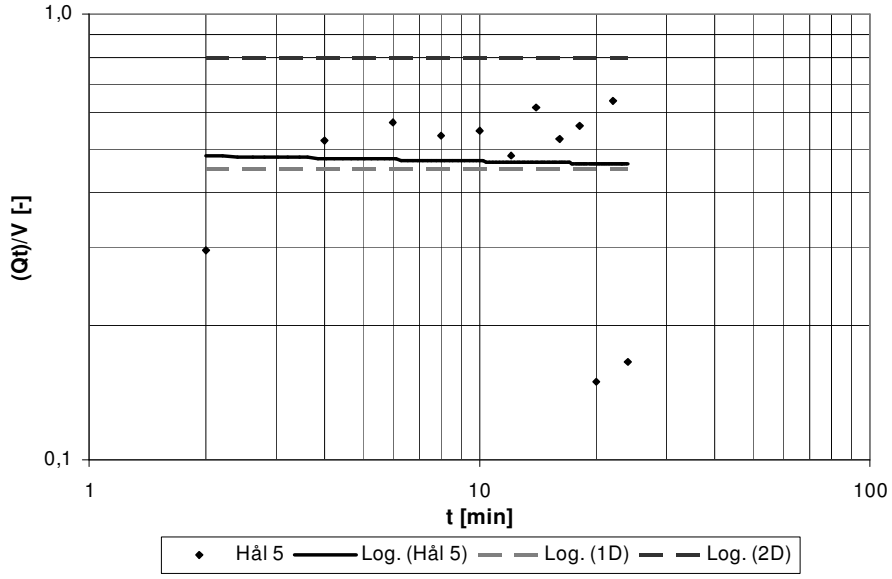
Eftersom bergmassan vid skärm 5 är så uppsprucken och har höga inflöden är det intressant att se vilket injekteringsbruk som använts. I Figur 5.10 nedan ses att cembinder inte är använt i omgång S och där det använts i omgång T har det inte fyllt borrhålen.



Figur 5.10: Uppdelning mellan Cembinder och Rheocem i omgång S och T.

Dimensionalitetskontroll och inträngningslängd

En kurva som har lutningen 0,8 visar på en tvådimensionell spridning av injekteringsmedlet medan en lutning på 0,45 visar på en endimensionell spridning (Gustafson och Stille 2005). Figur 5.11 visar en typisk kurva i skärm 5. Genomgång av alla dimensioneringskontroller i skärmen visar att kurvan varierar lite men stiger aldrig så högt som 0,8. Detta stärker antagandet om en endimensionell spridning i området.



Figur 5.11: Dimensionalitetskontroll för skärm 5.

En sammanställning för tid och tryck har gjorts för injekteringsbruket cement, se Tabell 5.6. Den sekundära omgången hade för få värden med cembinder varför den saknas i denna sammanställning.

Tabell 5.6: Injekteringstid och injekteringstryck i P1 och P2 för skärm 5.

	P1 (Rheocem)		P2 (Rheocem)	
	tid [min]	tryck [Mpa]	tid [min]	tryck [Mpa]
1	51,0	0,3	23,0	1,0
2	33,0	0,2	115,0	2,1
3	77,0	0,5	49,0	2,0
4	26,0	1,0	38,0	1,9
5	21,0	0,2	26,0	1,8
6	30,0	1,4	46,0	0,3
7	44,0	0,8	12,0	1,3
8	8,0	0,0	50,0	4,0
9	132	2,0	65,0	2,4
10	12,0	0,6	60,0	2,0
11	27,0	0,5	37,0	2,0
12	57,0	1,7	29,0	2,2
13	12,0	1,6		
14	5,0	1,8		
15	54,0	1,8		
Summa	589	14,4	550	23
Medel	39,3	1,0	45,8	1,9

Från medelvärdet på tid och tryck läses inträngningslängden av i diagram, se bilaga G. Eftersom vct varierar mellan 0,6 – 1,0 under injekteringen varierar även inträngningslängderna. Inträngningskravet med överlapp på 50 %, har beräknats för att se om omgångarna klarar kravet. Resultatet ses i Tabell 5.7.

Tabell 5.7: Redovisning av inträngningslängd i P1 och P2.

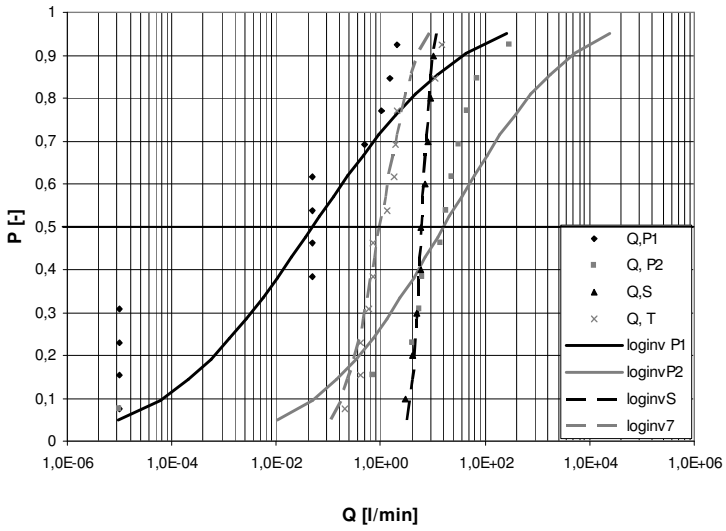
	Tid [min]	Tryck [Mpa]	Bruk	Inträngningslängd [m]	Överlapp 50 %
P1	40	1,0	Rheocem	10 - 23	ok
P2	46	1,9	Rheocem	0,8 - 3	nej

5.5.2 Skärm 11

I skärm 11 dominerar gnejs men sliror av amfibolit är karterad i tunnelvägg. Ett fåtal sprickor löper tvärs över tunneln och är mycket brantstående. Q-värdet här ligger på 0,15 vilket tillhör kategorin mycket dåligt.

Inflöde och konduktivitet

I Figur 5.12 nedan ses inflödet före de fyra olika injekteringsomgångarna.



Figur 5.12: Lognormaldiagram på inflödet i Skärm 11.

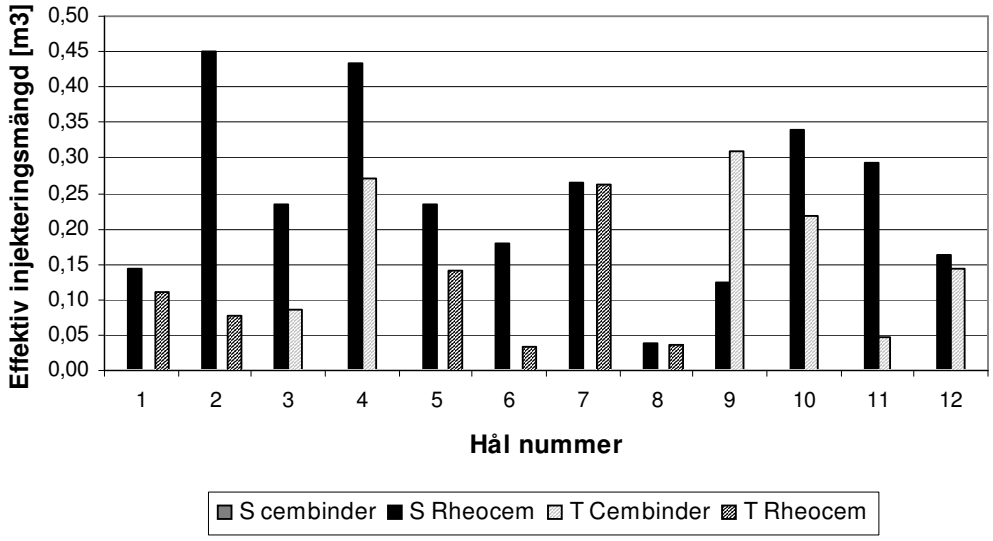
Skärm 11 visar på ett ideal då konduktiviteten sjunker en potens från före till efter förinjekteringen. Detta fortsätter sedan under efterinjekteringsomgångarna. Höjningen mellan P1 och P2 beror på att P2 är längre och går utanför zonen. Från P2 sjunker sedan konduktiviteten till både S och T vilket visar på att lyckat resultat, se Tabell 5.8.

Tabell 5.8: Beräknad konduktivitet [m/s].

Före förinjektering	Efter förinjektering	Före P1	Före P2	Före S	Före T
$7{,}7 \cdot 10^{-7}$	$2{,}42 \cdot 10^{-8}$	$2{,}77 \cdot 10^{-9}$	$3{,}08 \cdot 10^{-7}$	$1{,}80 \cdot 10^{-7}$	$2{,}77 \cdot 10^{-8}$

Effektiv injekteringsvolym

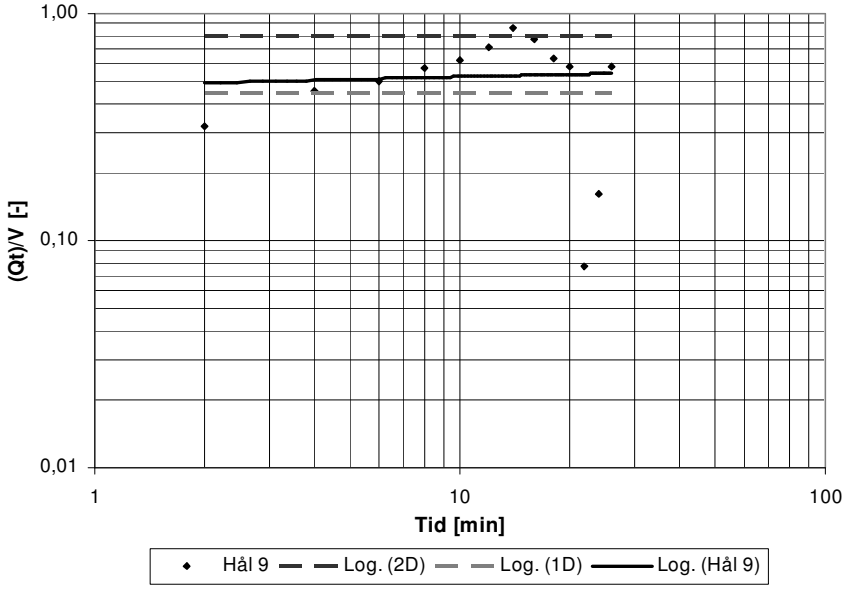
I Figur 5.13 nedan ses att Cembinder inte är använt i omgång S utan Rheocem har använts som enda bruk. I omgång T däremot har både Rheocem och Cembinder använts. Vad diagrammet visar är att den effektiva injekteringsvolymen är hög i alla hål vilket kan tyda på en bra spridning.



Figur 5.13: Uppdelning mellan Cembinder och Rheocem i omgång S och T.

Dimensionalitetskontroll och inträngningslängd

Figur 5.6 visar en typisk kurva i skärm 11. Genomgång av alla dimensioneringskontroller i skärmen visar att kurvan varierar mellan 0,35 och 0,7 men övergripande visar att även detta område innehar en endimensionell spridning.



Figur 5.14: Dimensionalitetskontroll för skärm 11.

En sammanställning för tid och tryck har gjorts för injekteringsbruket. Omgång P1, P2 och S med rheocem och T med cembinder, se Tabell 5.9. I Tabell 5.10 visas inträngningslängden för skärm 11.

Tabell 5.9: Injekteringstid och injekteringstryck i P1, P2, S och T för skärm 11.

	P1 (Rheocem)		P2 (Rheocem)		S (Rheocem)		T (Cembinder)	
	tid [min]	tryck [Mpa]	tid [min]	tryck [Mpa]	tid [min]	tryck [Mpa]	tid [min]	tryck [Mpa]
1	37,0	2,0	21,0	2,40	32,0	1,8	15	1,2
2	5,0	1,8	15,0	2,60	52,0	1,7	32	1,5
3	18,0	0,2	22,0	2,60	44,0	1,6	60	2
4	61,0	0,5	61,0	2,40	71,0	2,0	43	2,7
5	38,0	0,3	55,0	0,09	94,0	2	23	2,4
6	64,0	0,07	21,0	1,10	49,0	2,3	34	2,5
7	7,0	0,04	50,0	0,30	23,0	1,5		
8	69,0	1,3	108,0	0,90	27,0	2,2		
9	37,0	0,4	73,0	2,50	5,0	2,1		
10	44,0	0,8	67,0	2,80	28,0	2,5		
11	19,0	1,2	11,0	3,10	30,0	0		
12	37,0	0,7	30,0	2,40	25,0	1,5		
13			130,0	1,90	30,0	0,9		
14					22,0	1,3		
Summa	436	9,31	664	25,09	532,0	23,4	207	12,3
Medel	36,3	0,8	51,1	1,9	38,0	1,7	34,5	2,1

Tabell 5.10: Redovisning av inträngningslängd i P1, P2, S och T.

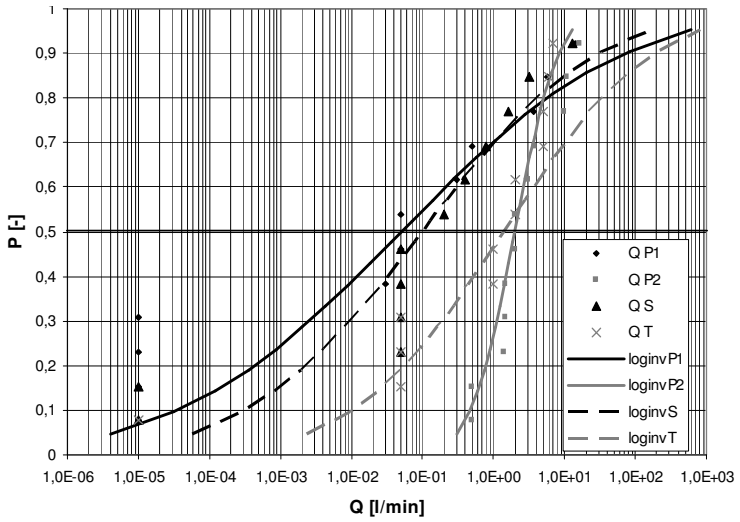
	Tid [min]	Tryck [Mpa]	Bruk	Inträngningslängd [m]	Överlapp 50 %
P1	36	0,8	Rheocem	0,8 - 2,9	nej
P2	51	1,9	Rheocem	11 - 25	ok
S	38	1,7	Rheocem	10 - 22	ok
T	35	2,1	Cembinder	3,2	nej

5.5.3 Skärm 19

Q-värdet i skärm 19 ligger på 0,42 vilket i den lokala indelningen (se Figur 3.3) är bästa klass, trots att det i den riktiga indelningen är mycket dåligt berg. Bergarten som dominerar är gnejs och amfiboliten återfinns knappt alls. Ett par sprickor går parallellt med tunneln och behöver därför kontrolleras noga för att komma med i injekteringen

Inflöde och konduktivitet

I Figur 5.15 nedan ses inflödet före de fyra olika injekteringsomgångarna.



Figur 5.15: Lognormaldiagram på inflödet i Skärm 19.

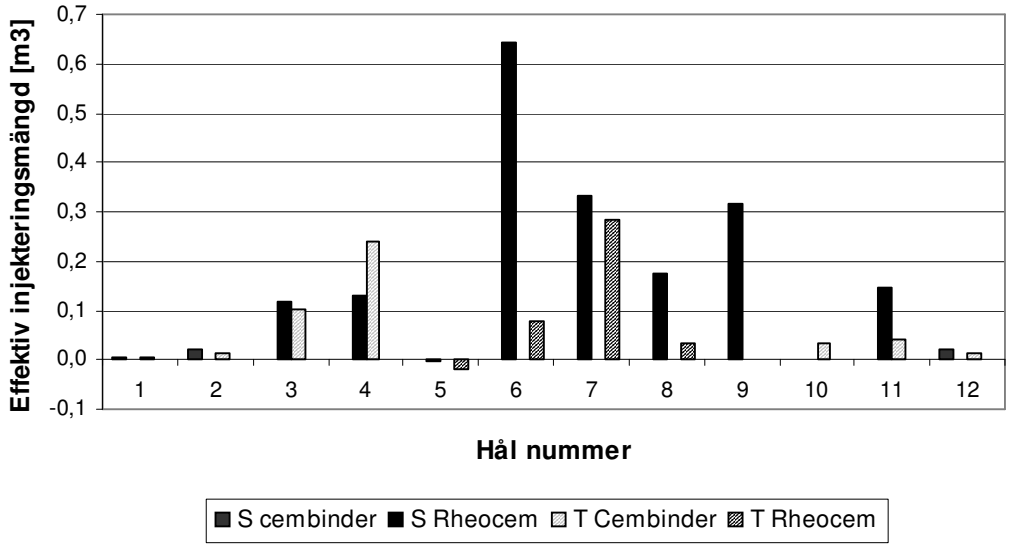
Skärm 19 ligger på koordinaterna 190+875 varifrån ingen information finns att tillgå vad det gäller förinjekteringen. Därför är konduktiviteten beräknad på de koordinater som är närmast, se Tabell 5.11Tabell 5.11. De beräknade konduktiviteterna visar att förinjekteringen har varit lyckad och att det i området inte är något stort inflöde. Att konduktiviteten sedan ökar mot omgång T kan bero på att det är så pass tätt att gradienten mot tunneln ökar.

Tabell 5.11: Beräknad konduktivitet [m/s].

	Före förinjektering	Efter förinjektering	Före P1	Före P2	Före S	Före T
190+855	$3{,}25 \cdot 10^{-7}$	$1{,}64 \cdot 10^{-7}$				
Skärm 19			$2{,}72 \cdot 10^{-9}$	$3{,}76 \cdot 10^{-8}$	$2{,}88 \cdot 10^{-9}$	$4{,}20 \cdot 10^{-8}$
190+884	$1{,}23 \cdot 10^{-7}$	0				

Effektiv injekteringsvolym

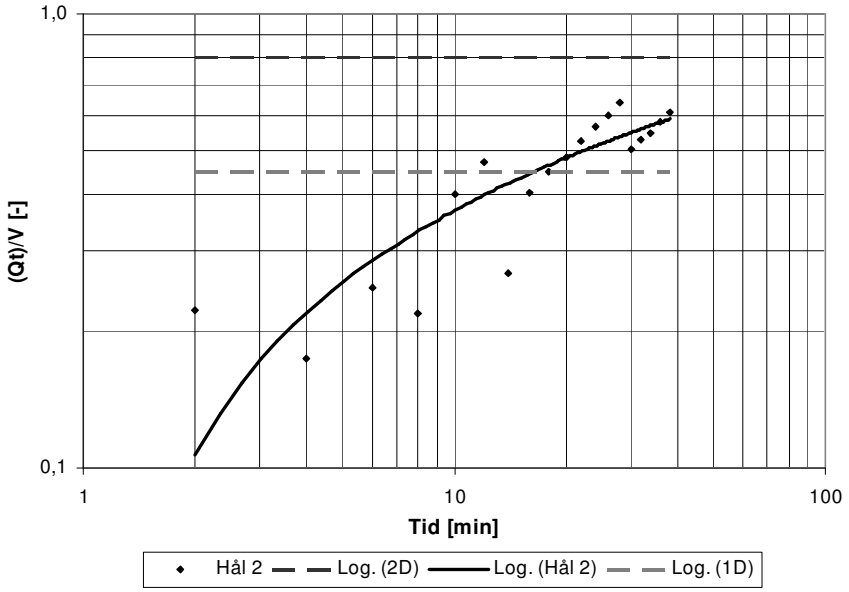
Precis som i inflödet ökar injekteringsbruket mellan P1 och P2 och mellan S och T sjunker mängden. Även i denna skärm har flödet varit för högt för att endast cembinder ska kunna användas, se Figur 5.16.



Figur 5.16: Uppdelning mellan Cembinder och Rheocem i omgång S och T.

Dimensionalitetskontroll och inträngningslängd

Figur 5.17 visar en typisk kurva i skärm 19. Genomgång av alla dimensioneringskontroller i skärmen visar att kurvan varierar mellan 0,2 och 0,65. Kurvan visar att detta område innehar en endimensionell spridning.



Figur 5.17: Dimensionalitetskontroll för skärm 19.

En sammanställning för tid och tryck i borrhålen har gjorts för injekteringsbruket. Omgång P1 och P2 med rheocem och omgång S och T med cembinder, se Tabell 5.12.

Tabell 5.12: Injekteringstid och injekteringstryck i P1, P2, S och T för skärm 19.

	P1 (Rheocem)		P2 (Rheocem)		S (Cembinder)		T (Cembinder)	
	tid [min]	tryck [Mpa]	tid [min]	tryck [Mpa]	tid [min]	tryck [Mpa]	tid [min]	tryck [Mpa]
1	11,0	2,0	11	3,6	6	2,2	7	1,4
2	3,0	3,2	19	3,9	8	2,8	6	0,9
3	10,0	2,0	46	4,2	11	2,7	10	0,7
4	9,0	2,4	63	2,9			34	2,1
5	9,0	2,4	1	2,2			5	1,5
6	16,0	1,2	14	2,5			9	1
7	3,0	4,1	39	0			5	1,9
8	42,0	2,2	22	0,04				
9	56,0	1,6	34	1,9				
10	21,0	2,4	23	1,1				
11	10,0	2,0	29	3				
12	14,0	2,3	16	3,1				
Summa	204	27,8	317	28,44	25	7,7	76	9,5
Medel	17,0	2,3	26,4	2,4	8,3	2,6	10,9	1,4

Från medelvärdet på tid och tryck läses inträngningslängden av i diagram, se bilaga G Inträngningskravet med överlapp på 50 %, har beräknats för att se om de olika omgångarna klarar kravet. Resultatet ses i Tabell 5.13.

Tabell 5.13: Redovisning av inträngningslängd i P1, P2, S och T.

	Tid [min]	Tryck [Mpa]	Bruk	Inträngningslängd [m]	Överlapp 50 %
P1	17	2,3	Rheocem	3,5 - 15	ok
P2	26	2,4	Rheocem	8,4 - 18	ok
S	8	2,6	Cembinder	1,5	nej
T	11	1,4	Cembinder	1,8	nej

6 Diskussion

Beräkningarna av inträngningslängd i primära efterinjekteringsomgången i skärm 5, 11 och 19 visar att injekteringen ger ett överlapp på ca 50 % förutom i skärm 11. Beräkningar för fördjupad, sekundär och tertiär omgång följer samma mönster.

6.1 Primär injekteringsomgång

I den primära injekteringsomgången är trycken och inflödena, relativt de andra omgångarna, små. Anledningen till detta är att borrhålen i denna omgång endast är 7 meter långa och inte når utanför tidigare injekterad zon. Storleken på den tidigare injekterade zonen är inte beräknad, men då förinjekteringsborrhålen är 14 meter långa bör 7 meters hålen i efterinjekteringen inte nå utanför. Dessutom visar en överslagsberäkning i ett av förinjekteringsborrhålen att konduktiviteten sjönk från $9{,}07 \cdot 10^{-7}$ m/s innan förinjekteringen 1995 till $1{,}31 \cdot 10^{-8}$ m/s i kontrollhål borrade efter förinjekteringen. Hade 7 meters hålen i den primära omgången nått utanför den förinjekterade zonen hade de antagligen visat på betydligt högre konduktivitet än den beräknade ($6{,}09 \cdot 10^{-13}$ m/s). Den stora konduktivitetsminskningen mellan kontrollhålen 1995 och mätningarna gjorda innan den primära efterinjekteringsomgången kan bero på en förtätning hos förinjekteringen.

Från skärm 1 till 9 i den primära efterinjekteringsomgången ligger konduktiviteten mellan 10^{-13} – 10^{-11} m/s, med undantag av skärm 6 där konduktiviteten stiger till $5{,}3 \cdot 10^{-8}$ m/s. I en noggrannare kontroll av skärm 6 ses att inflödet i borrhål 1 är 5 l/min och borrhålet träffar antagligen en kraftigt vattenförande spricka. Dessutom är bergmassan kring skärm 6 klassad med det lägsta Q-indexet på hela sträckan. Från skärm 10 och framåt ligger den beräknade konduktiviteten kring $2 \cdot 10^{-9}$ m/s, med några undantag. Att konduktiviteten överlag är högre i början av sträckan och lägre från skärm 10 och framåt kan ha att göra med att amfiboliten, i början av sträckan, är mindre genomsläpplig än gnejsen.

Det högsta medianvärdet på effektiva volymen injektering finns i skärm 5 vilken ligger i samma uppspruckna zon som skärm 6. Alltså kan här ses en koppling mellan stora inflöden och stora volymer injekteringsbruk.

6.2 Fördjupad injekteringsomgång

Syftet med den fördjupade injekteringsomgången var att nå utanför den tidigare injekterade zonen och att detta syfte uppnåtts visas av transmissivitetsfördelningarna. Medianinflödet och transmissiviteten ligger i stort sett i samtliga fall högre i den fördjupande injekteringsomgången än i den primära omgången. Undantaget är i skärm 23 där det ligger oförändrat.

Mellan skärm 1 och 14 varierar inflödet mellan 6 och 24 l/min. Topparna finns i skärmarna 2, 4, 8 och 12 (se Figur 5.3). Gemensamt för dessa skärmar är att de är satta i övergång mellan amfibolit och gnejs och/eller i område med Q-index lägre än 0,4. Från skärm 15 och framåt sjunker värdet från 3 l/min till 0,1 l/min i skärm 23. Geologin mellan skärm 15 och 23 domineras av gnejs med Q-index över 0,4. En svaghetszon förekommer mellan skärm 17 och 19 vilken antagligen är lerfylld och därför mindre permeabel än övrig bergmassa.

Då de första 7 meterna av de 18 meter långa borrhålen anses som täta beräknas konduktiviteten utifrån 11 meter. Detta på grund av att de första 7 meterna tätats med förinjektering och kompletterande efterinjektering. Konduktiviteten ligger kring $1 \cdot 10^{-8}$ m/s vilket korrelerar med konduktiviteterna innan förinjektering, dvs. för otätad bergmassa.

6.3 Sekundär och Tertiär injekteringsomgång

Borrhålen i både den sekundära och den tertiära injekteringsomgången är 12 meter långa och skall enligt planen i första hand injekteras med Cembinder. Cembinder har används i de fall där inflödet är mindre än 10 l/min i inflödesmätningarna, vilket det faktiskt inte är särskilt ofta. I den sekundära injekteringsomgången injekteras de tre första skärmarna endast med cembinder som ett försök. De flesta skärmar är injekterade med både Cembinder och Rheocem medan 5 skärmar är injekterade med endast Rheocem. I den tertiära omgången är 3 skärmar injekterade med endast Cembinder och 3 skärmar med endast Rheocem.

En intressant iakttagelse är att transmissiviteten och därmed konduktiviteten i vissa fall ökar från mätningar gjorda innan den sekundära injekteringsomgången till mätningarna gjorda innan den tertiära injekteringsomgången. Den högsta konduktiviteten är i den sekundära omgången $3{,}22 \cdot 10^{-7}$ m/s medan den högsta i den tertiära är $2{,}37 \cdot 10^{-7}$ m^2/s. Den lägsta konduktiviteten i den sekundära är $3{,}09 \cdot 10^{-13}$ m^2/s och i den tertiära injekteringsomgången $1{,}52 \cdot 10^{-9}$ m^2/s. De lägsta värdena i de två omgångarna ligger i skärm 23, vilken har haft låga värden vid alla beräkningar. På grund av dåligt mätunderlag (se Bilaga E) kan några slutsatser inte dras om tryckets påverkan inför den tertiära omgången.

6.4 Mätningar gjorda efter den tertiära omgången

Då mätningar från 2007 av inläckaget av grundvatten i tunneln jämförs med mätningar från 2004, dvs. innan efterinjekteringen, syns en tydlig sänkning av mängden inläckande vatten. Mätning med Thompson överfall för teststräckan 190+950 – 190+985 visade att vatteninläckaget sänktes från 2,4 l/s innan arbetet startade till 0,6 l/s efter efterinjektering, dvs en sänkning med 75 %. En utvärdering av hela den efterinjekterade sträckan (190+986 – 190+850) visar att sänkningen av inläckande grundvatten i tunneln är ca 71 % (Kenneth Rosell 2007).

7 Slutsats

I inledningen av rapporten ställdes ett antal frågor som här besvaras.

Injekteringsdesignen

Utifrån tillgänglig data så ser injekteringsdesignen ut att ha följts geometriskt. Som tidigare diskuterats har Cembinder inte använts i så stor utsträckning i den tertiära och sekundära injekteringsomgången då flödena ansetts för stora. Det har även konstaterats att den fördjupade primära omgången når utanför tidigare injekterad zon och den primära inom injekterad zon, vilket var syftet.

Transmissivitet och konduktivitet

Genom analysen av data kan det ses att tätheten i bergmassan faktiskt har ökat då inflödet sjunker i stort sett i alla skärmar. Dessutom uppvisas tendenser till att tätheten hos tidigare injektering har ökat från mätningar gjorda efter förinjekteringen till mätningar gjorda före den primära efterinjekteringsomgången. I vissa fall ökar transmissiviteten inför den tertiära injekteringsomgången och en trolig orsak till detta är att vattenförande sprickor har träffats som inte har injekterats i tidigare omgångar. Inläckaget av grundvatten före och efter efterinjekteringen visar också de på lägre värden efter efterinjekteringen.

1D- inträngning

Genom dimensionalitetskontroll har 1D-inträngning konstaterats för de fyra omgångarna på hela sträckan. 1D-inträngning gör att det är svårare att träffa sprickorna. När en spricka träffas går det åt stora bruksvolymer, vid långa pumptider finns risk att stora volymer går rakt ut i berget. Träffas inte någon spricka blir inträngningen mycket liten. Detta kan förklara varför transmissiviteten och konduktiviteten skiftar så mycket mellan de olika omgångarna. Problemet med liten spridning vid 1D-inträngning kan underlättas med tätare placering av injekteringshål vilket ger större chans träffa sprickor.

Effektiv bruksvolym

Det finns tendenser till att bruksvolymerna följer inflödena, dvs. stora inflöden ger större injekteringsvolymer. Detta kan enbart ses skärmvis, då det på ”hålnivå” är för stor skillnad på bruk, tryck och geometri. Variationerna i effektiv bruksvolym är ett tydligt exempel på inverkan av 1D inträngningen.

Bergets egenskaper

Vid bergartsövergångar där bergmassan ofta är mycket uppsprucken och vattenledande samt Q-värdet lågt, kan större volymer och fler ominjekteringar förväntas.

Dokumentation

Något som har uppmärksammats vid arbetet med denna rapport är att rutiner kring dokumentation av vattenmätningar och injektering bör ses över. För att underlätta

utvärdering av data bör protokoll och dylikt vara konsekvent utformade och ifyllda. Vad som avses i ett protokoll kan verka självklart, men kan vid inkonsekvent dokumentation leda till misstolkningar.

8 Referenser

8.1 Artiklar:

Gustafson G, Fransson Å, Funehag J, Axelsson M, (2004): *Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering*, Väg- och vattenbyggaren nr. 4 2004, pp 10-15

Gustafson G, Stille H, (2005): *Stop Criteria for Cement Grouting*, Felsbau nr. 3 2005

8.2 Publikationer/Böcker:

Axelsson M, (2006): *Strength criteria on Grouting Agents for Hard Rock*, Division of GeoEngineering, Geology, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden

Carlsson L, Gustafson G, (1997): *Provpumpning som en geohydrologisk undersökningsmetodik,* Publ C62, Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige

Devore J, Farnum N, (1999): *Applied Statistics for Engineers and Scientists*, Brooks/Cole Publishing Company

Domenico P.A, Schwartz F.W, (1990): *Physical and chemical hydrogeology*

Fransson Å, Gustafson G, (2006): *Efterinjektering: Inläckageprognos och design – förslag till analys*, SveBeFo Rapport 75, Stockholm, Sverige

Fransson Å, (2001): *Characterisation of Fractured Rock for Grouting Using Hydrogeological Methods,* Division of GeoEngineering, Geology, Chalmers University of technology, Göteborg, Sweden

Funehag J, (2007): *Grouting of Fractured rock with silica sol*, Division of GeoEngineering, Geology, Chalmers University of technology, Göteborg, Sweden

Gustafson G, (Manuskript): *Hydrogeologi för bergbyggare,* Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige

Lindblom U, (2001): Bergbyggnadsteknik

8.3 Anteckningar/Möten:

Möte om efterinjektering, hallandsås 2005-11-10*, Minnesanteckningar*

Banverket södra regionen, 1991: *Skottorp – Förslöv, Ny järnväg, primärdata bergundersökningar, Hallandsås*. 1991-02-28 Förfrågningsunderlag, pärm 2

Kennet Rosell, 2007, *PM- Projekt Hallandsås, Utvärdering av efterinjektering i östra tunneln norr om TT1*, Banverket 2007-12-18

8.4 Internetsidor:

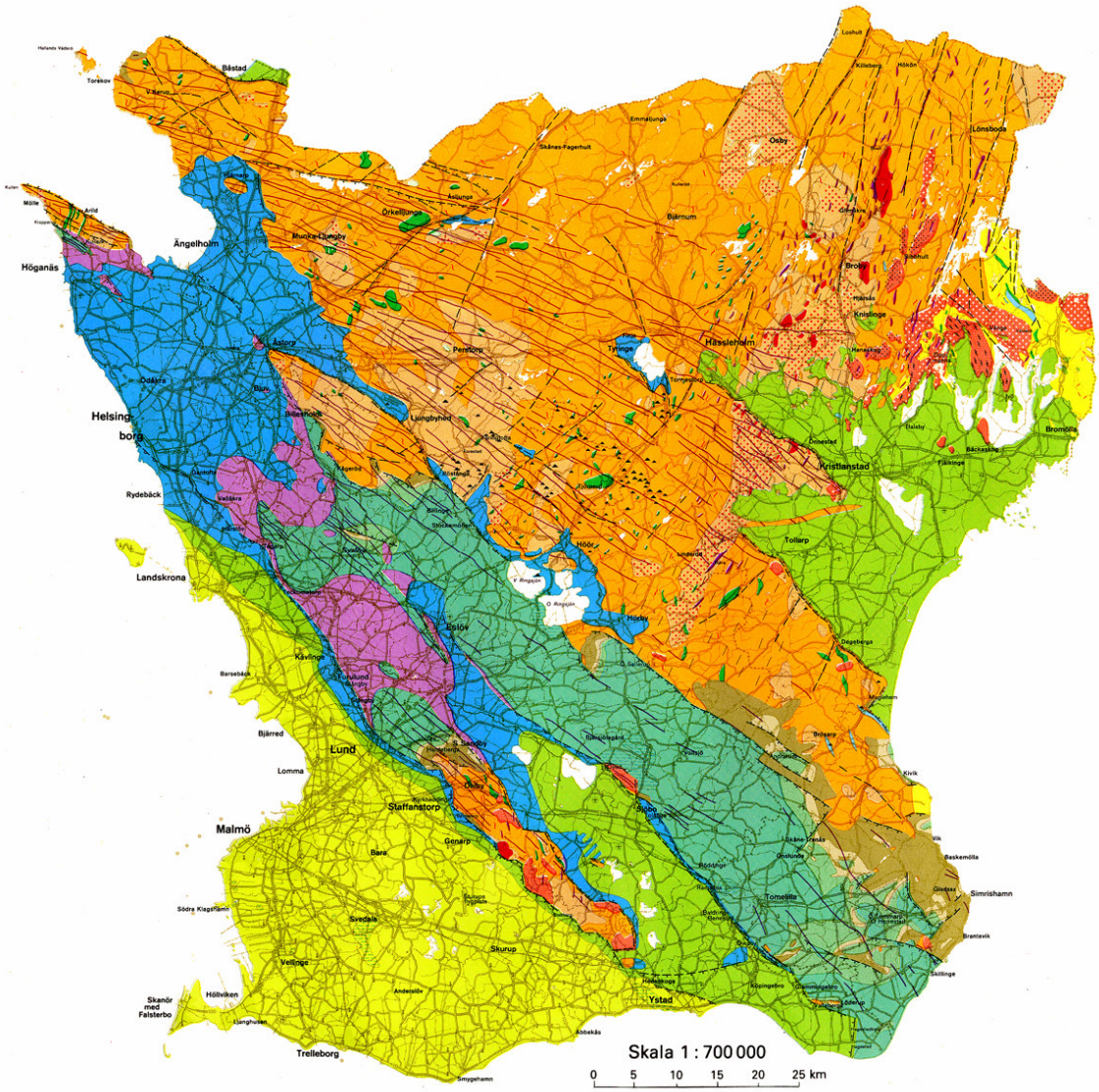
Banverket, 2007, Hallandsås, http://www.banverket.se/sv/Amnen/Aktuella-projekt/Projekt/1869/Hallandsas.aspx, Åtkomst 2007-09-21

Google bilder, sökord: horst och geology, Åtkomst 2007-11-27, http://geography.sierra.cc.ca.us/booth/California/1_lithosphere/graben_horst.jpg

Vägverket, 2000, *Tätning av bergtunnlar - förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser.* http://www.vv.se/filer/publikationer/tatning_av_bergtunnlar_slutrapport.pdf, Åtkomst 2007-08-06

Banverket, 2007, Banverkets presentation vid miljödomstolsförhandlingar

Berggrundskarta över Skåne



Teckenförklaring finns på efterföljande sida.


Granit, finkornig
Granit, röd (Vångagranit)
Granit, ögonförande (Karlshamnsgranit)
Granit, röd, fältspatrik
Pegmatit och aplitgranit
Ögonstruktur
Ådergnejsomvandling
Charnockit
Granit, vanligen gnejsig
Grönsten, mestadels amfibolit
Gnejs, mestadels finkornig
Vulkanit och vulkanitgnejs
Tektonisk zon
Zon med förskiffringsstråk (protoginzonen)
Tertiär: märgelsten m. m.
Tertiär: dankalksten
Krita: kalksten, sandsten, lera m. m.
Rät, jura: lerskiffer, sandsten etc.
Trias: sandsten, lera m. m. (Kågerödslager)
Silur: kalksten, skiffer (Öved-Ramsåsalager)
Silur: lerskiffer m. m.
Ordovicium: lerskiffer m. m.
Kambrium, u. ordovicium: alunskiffer
Kambrium: sandsten
Basalt
Diabas, permo-karbonisk (i urval)
Syenit

RQD

RQD är ett enkelt mätetal som beskriver graden av sprickighet genom att ange den procentuella andelen kärnbitar som är längre än 10 cm i förhållande till en hel kärnlängd.

Q-metoden är speciellt utvecklad för att bedöma berg och förstärkningsmetod i tunnlar. Q-värdet räknas fram som produkten av tre kvoter mellan bergsparametrar. Tillskillnad från RQD tar Q-metoden även hänsyn till sprickornas råhet, vittringsgrad samt vattenmängden *(Lindblom 2001)*.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{Ja} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

J_n = Antal sprickgrupper

J_r = Sprickytornas råhetsgrad

J_a = Sprickornas vittringsgrad

J_w = Vattenförhållandet i berget

SRF = Spänningsförhållandet i berget

RQD och Q är endast en uppskattning och används tillsammans med tidigare erfarenheter. I Tabell1 nedan ses indelningen för bergsklassificering av RQD och Q-värden.

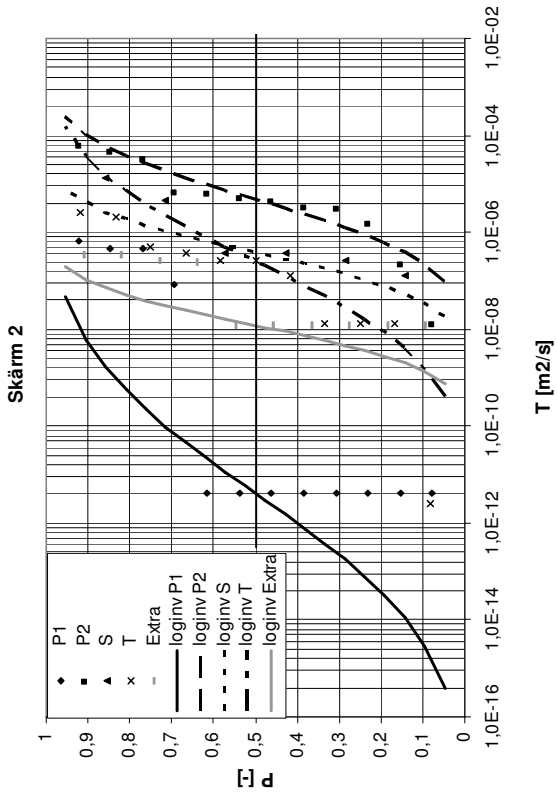
Tabell1: Bergsklassificering av RQD och Q-värden

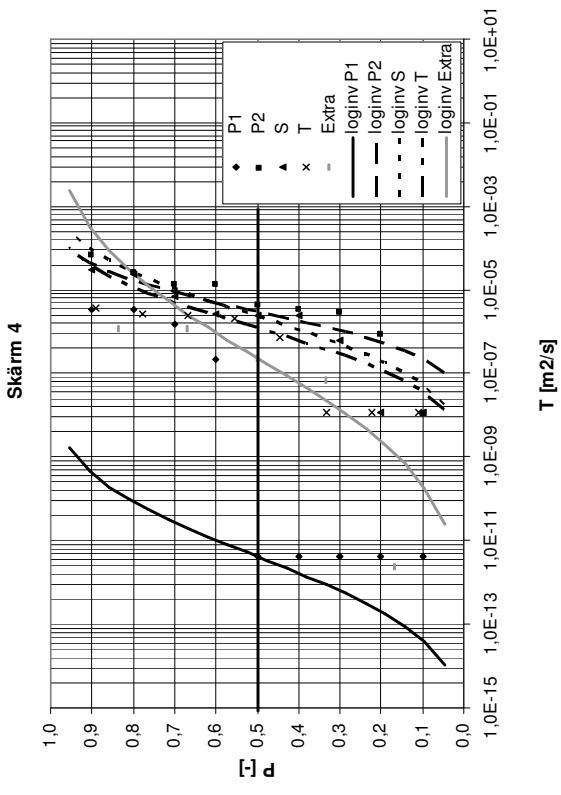
	Mycket Bra	Bra	Relativ Dåligt	Dåligt	Mycket Dåligt
RQD	100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	25 - 0
Q	100 – 40	40 – 10	10 – 4	4 – 1	1 – 0,1

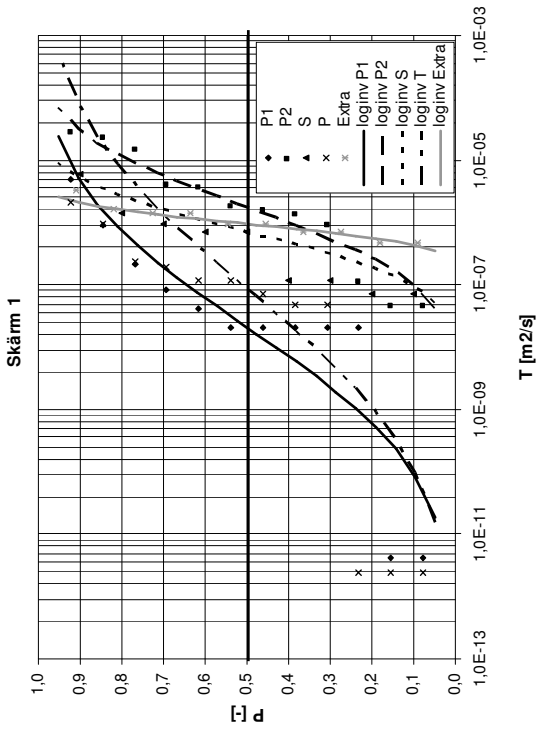
Skärmar och omgångar i kronologisk ordning

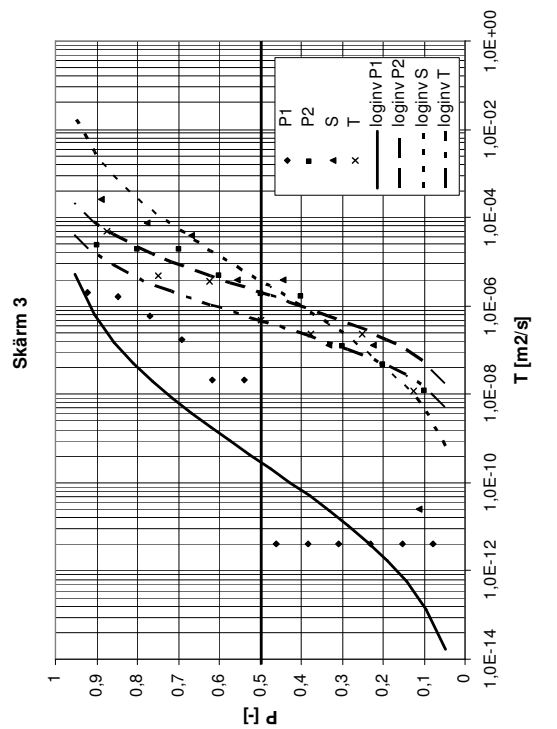
	Datum	Omgång	Skärmläge
Skärm 1:	060321	P1	983
	060405	P2	983
	060418	S	983
	060419	T	983
	060829	E	978
Skärm 2:	060323	P1	977
	060406	P2	977
	060420	S	977
	060424	T	977
	060516	E	974
	060905	E	975
Skärm 3:	060327	P1	971
	060410	P2	971
	060425	S	971
	060426	T	971
	060518	E	968
Skärm 4:	060328	P1	965
	060427	P2	965
	060522	E	962
	060529	S	965
	060627	T	965
Skärm 5:	060403	P1	959
	060503	P2	959
	060523	E	956
	060613	S	959
	060704	T	959
	060731	E	958
	060731	E	953
Skärm 6:	060412	P1	951
	060508	P2	951
	060607	E	948
	060620	S	951
	060707	T	951

Transmissivitetsfördelning

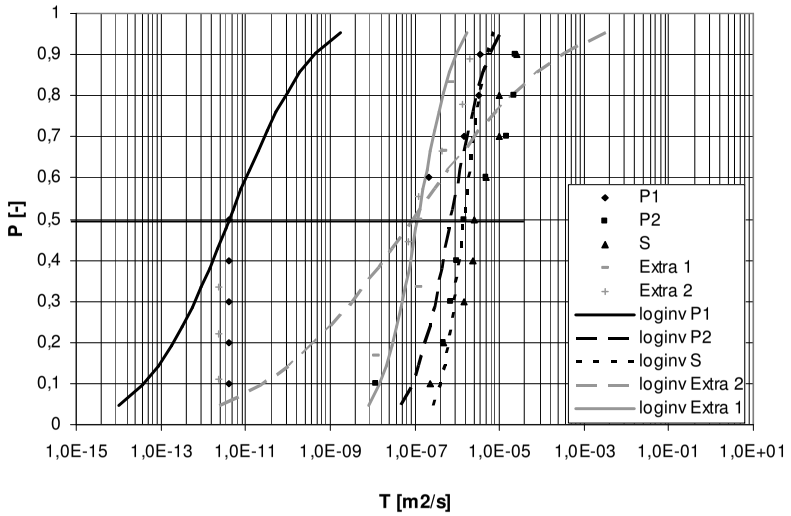




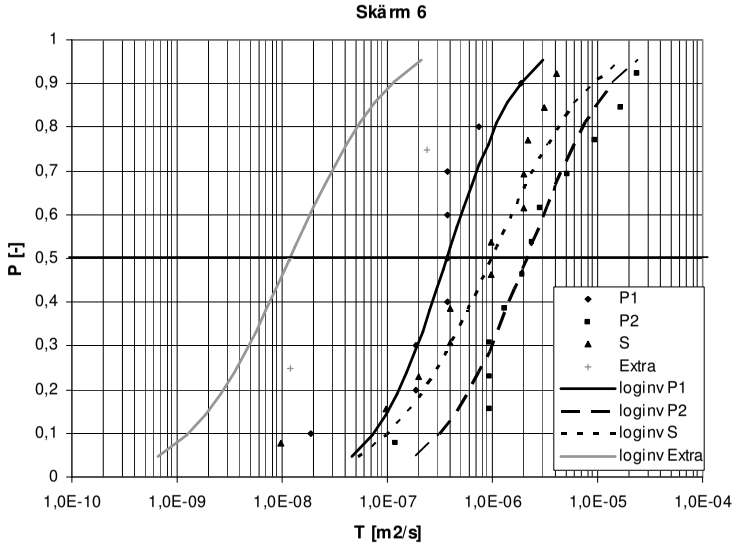




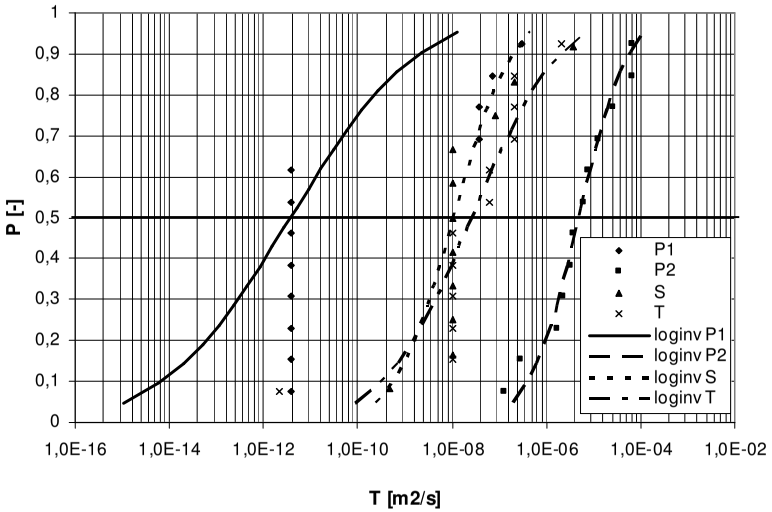
Skärm 5



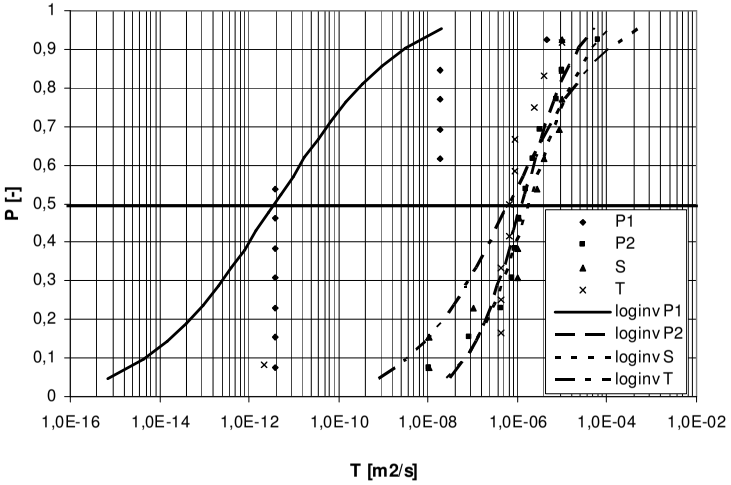
Skärm 6



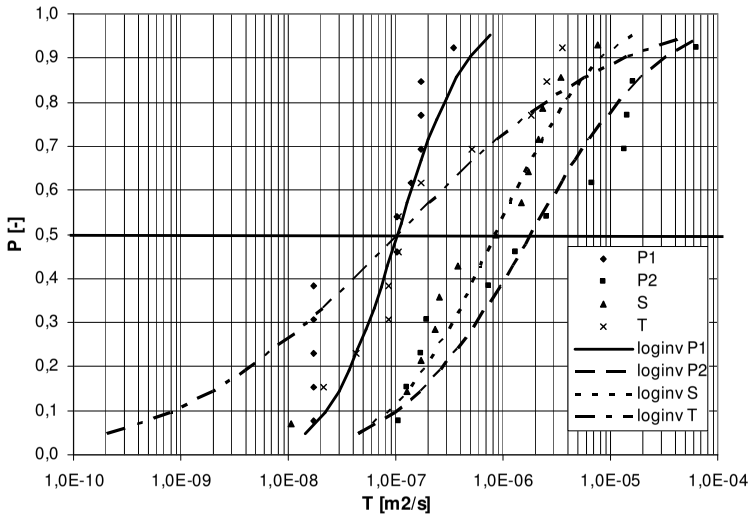
Skärm 8



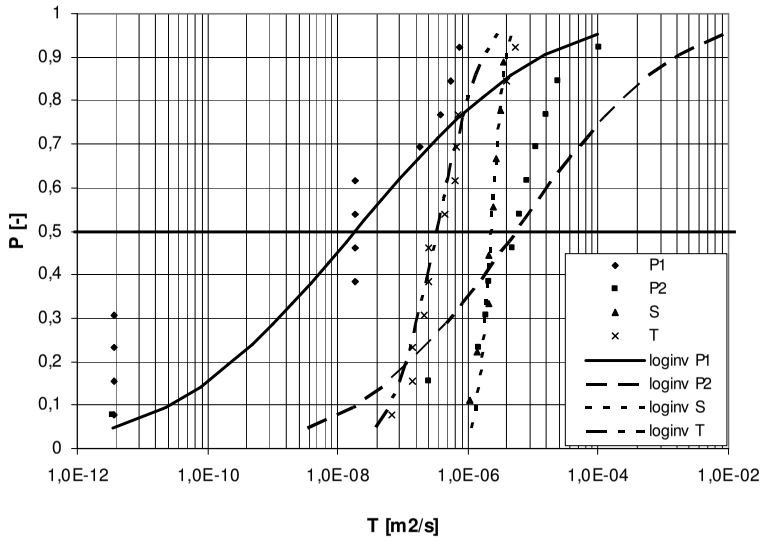
Skärm 9



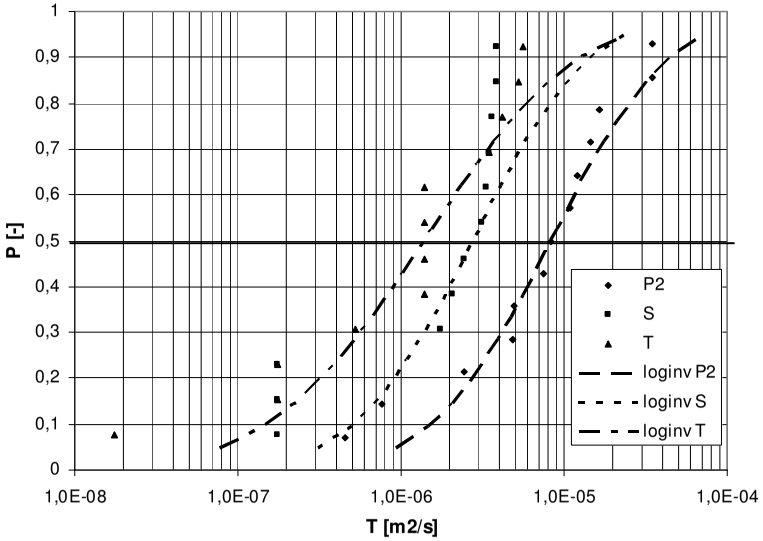
Skärm 10



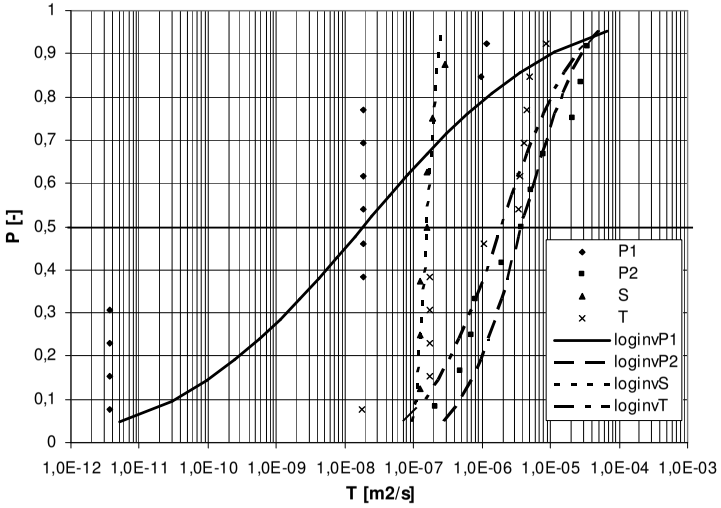
Skärm 11

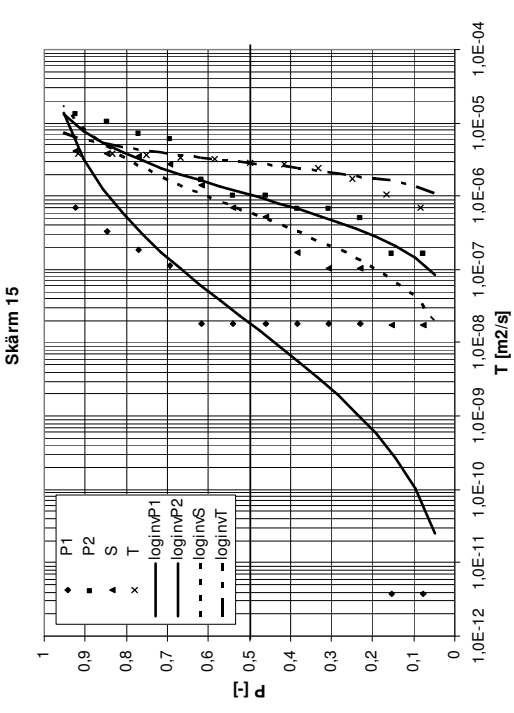


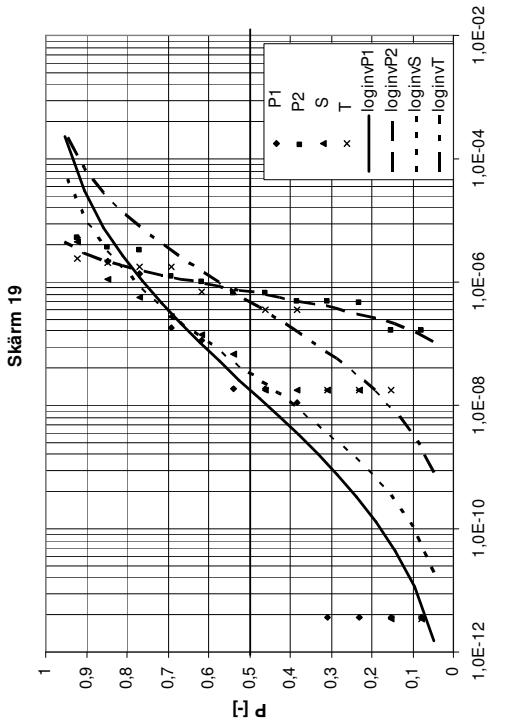
Skärm 12

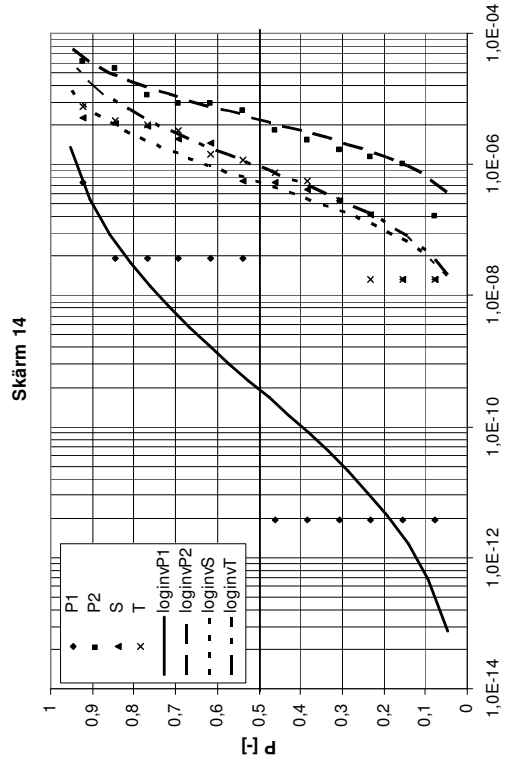


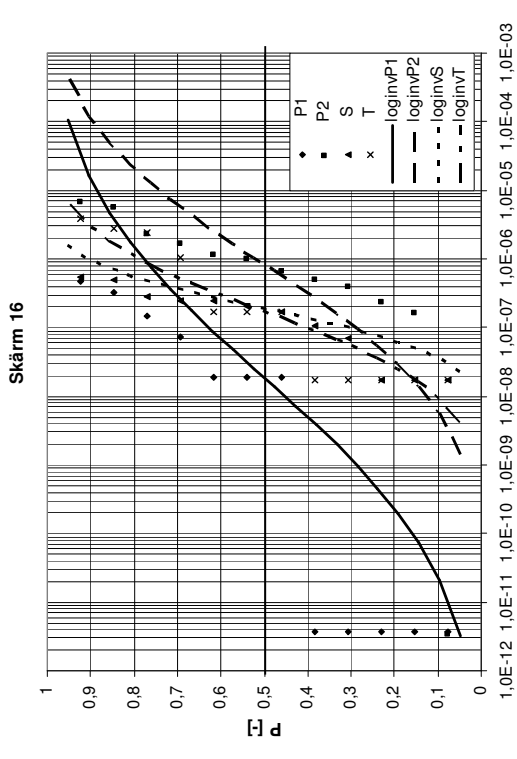
Skärm 13

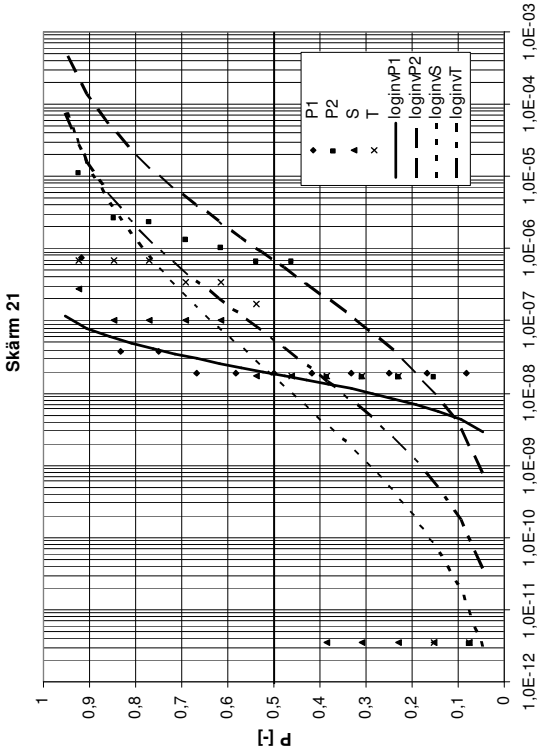


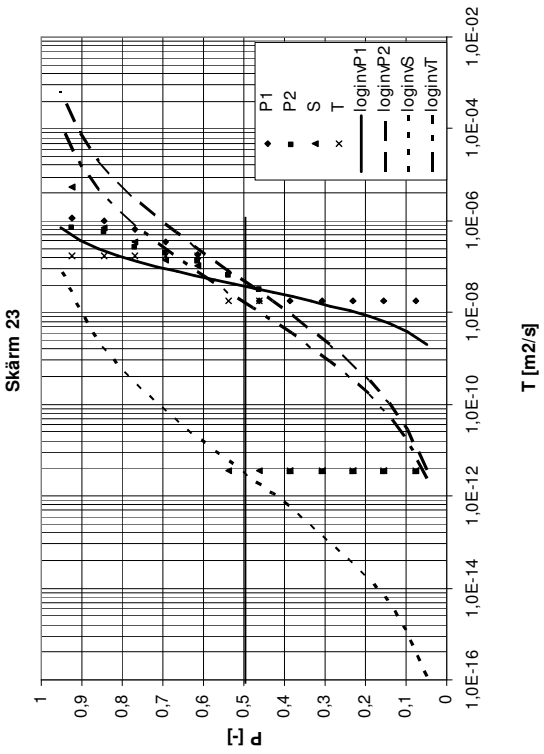

Skärm 15
P1
P2
S
T
loginvP1
loginvP2
loginvS
loginvT
P [-]
T [m2/s]

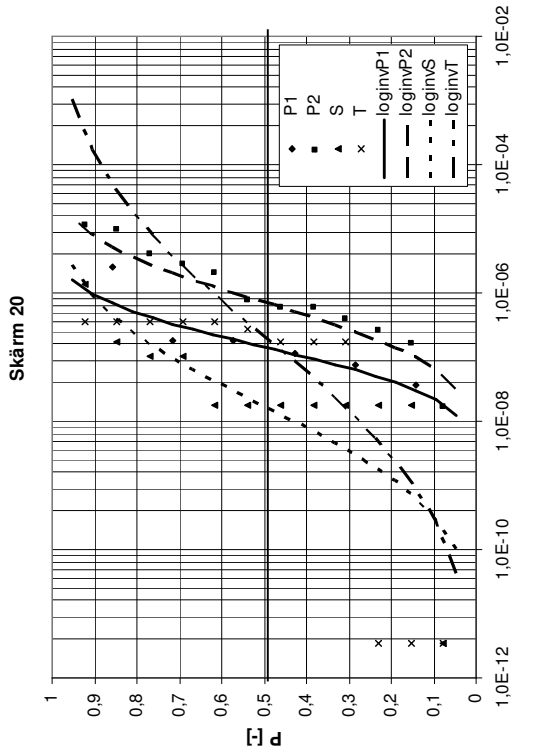

Skärm 19
P1
P2
S
T
loginvP1
loginvP2
loginvS
loginvT
P [-]
T [m2/s]

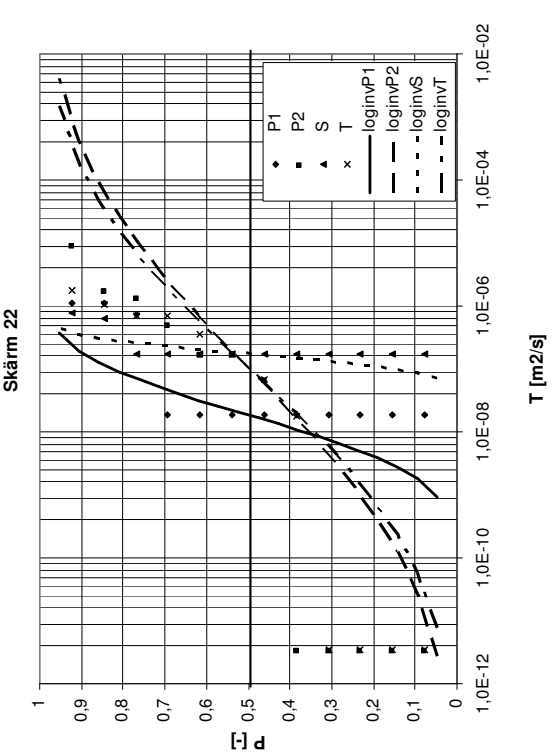

Skärm 14
P1
P2
S
T
loginvP1
loginvP2
loginvS
loginvT
P [-]
T [m2/s]


Skärm 16
P1
P2
S
T
loginvP1
loginvP2
loginvS
loginvT
P [-]
T [m2/s]


Skärm 21
P [-]
T [m2/s]
P1
P2
S
T
loginvP1
loginvP2
loginvS
loginvT


Skärm 23
P [-]
T [m2/s]
P1
P2
S
T
loginvP1
loginvP2
loginvS
loginvT


Skärm 20
P [-]
T [m2/s]
P1
P2
S
T
loginvP1
loginvP2
loginvS
loginvT


Skärm 22
P [-]
T [m2/s]
P1
P2
S
T
loginvP1
loginvP2
loginvS
loginvT

Vattentryck och fördelning av använt injekteringsbruk

Tabell 1: Vattentrycket under sträckan

Tryck [bar]																							medel
Skärm:	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	
P1	4	2	4	2	2	4,5						4	4,3	3,8										3,4
P2	7	6,5	6,5	7	7	5		7,8				4,2		4,3						4,1	4,5	4		5,7
S	6	5	6,5	7	6,5	8,5								4,8		3,8			4,6		3,8	3,8	3	5,3
T	7	6,5	7	7		7					4,3								4					6,1

Tabell 2: Fördelning av använt injekteringsbruk i de olika skärmarna

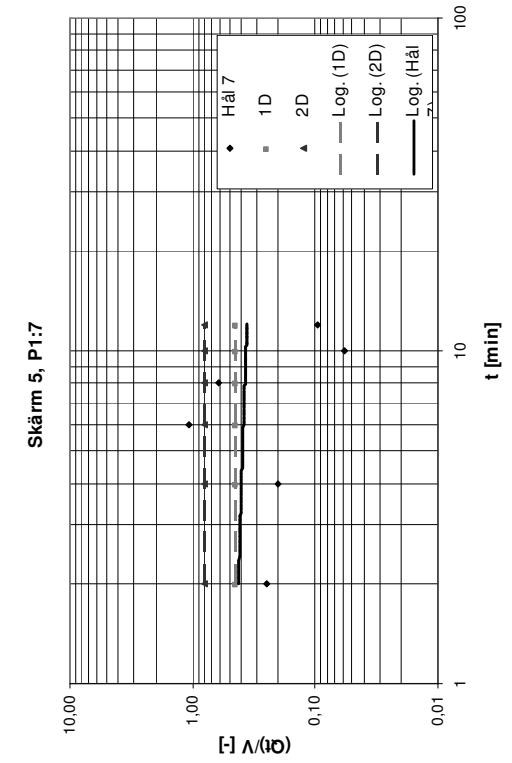
Skärm	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
Omgång	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär
Rheocem [antal hål]	0	0	0	0	0	3	7	4	12	3
Cembinder [antal hål]	12	12	12	12	12	9	2	5	0	0
Mängd Cembinder [%]	100	100	100	100	100	75	22	56	0	0

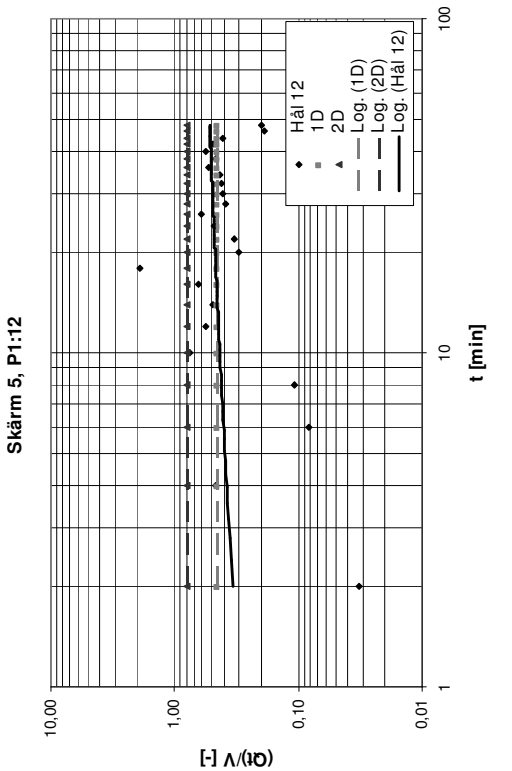
Skärm	**6**		**8**		**9**		**10**		**11**	
Omgång	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär
Rheocem [antal hål]	7	1	2	0	9	12	12	12	12	6
Cembinder [antal hål]	6	0	10	12	3	0	0	0	0	6
Mängd Cembinder [%]	46	0	83	100	25	0	0	0	0	50

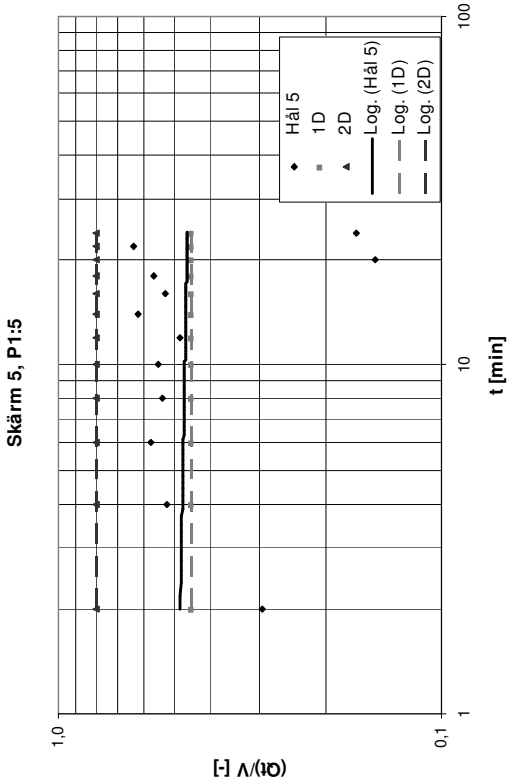
Skärm	**12**		**13**		**14**		**15**		**16**	
Omgång	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär
Rheocem [antal hål]	9	8	12	8	12	6	7	12	6	6
Cembinder [antal hål]	3	4	0	4	0	6	5	0	6	6
Mängd Cembinder [%]	25	33	0	33	0	50	42	0	50	50

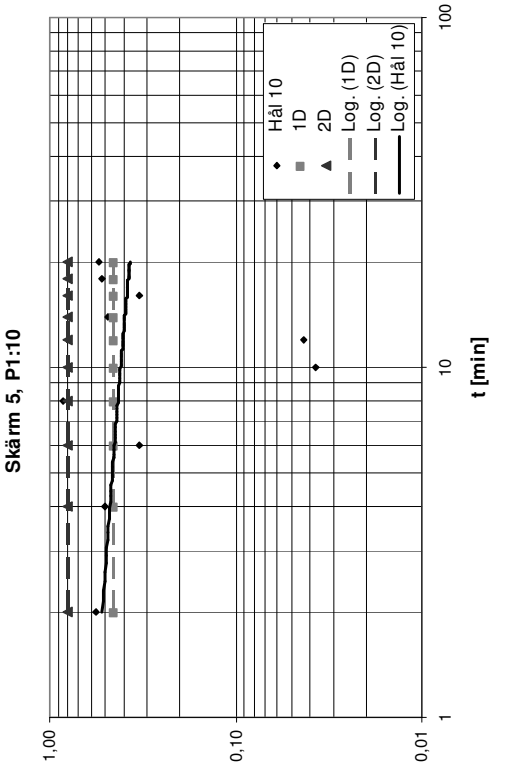
Skärm	**19**		**20**		**21**		**22**		**23**	
Omgång	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär	Sekundär	Tertiär
Rheocem [antal hål]	9	5	7	4	4	4	8	4	6	6
Cembinder [antal hål]	3	7	6	8	8	8	4	8	6	6
Mängd Cembinder [%]	25	58	46	67	67	67	33	67	50	50

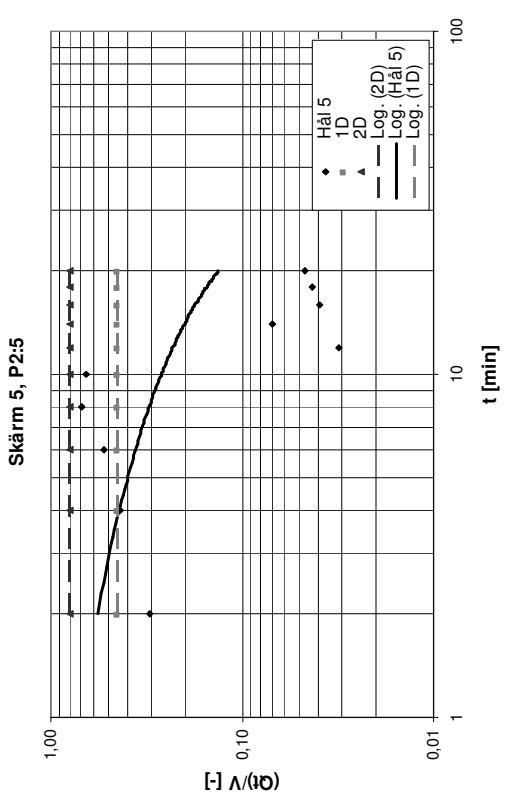
Dimensionalitetskontroll

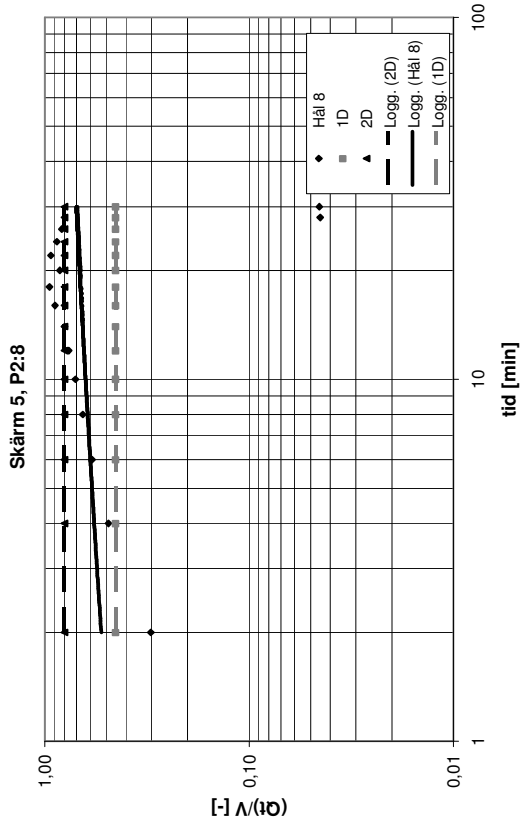


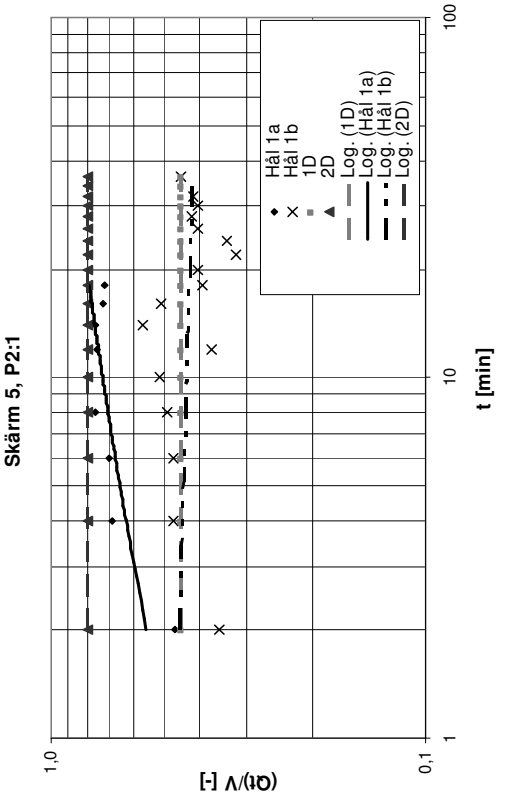


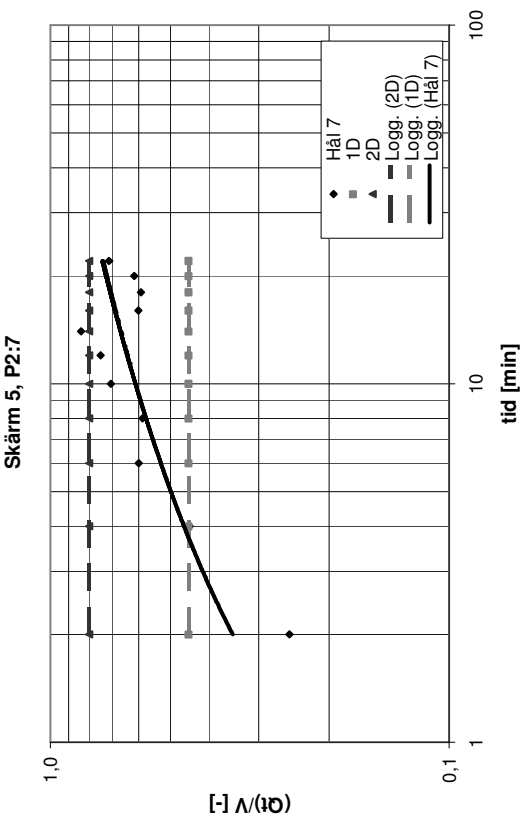


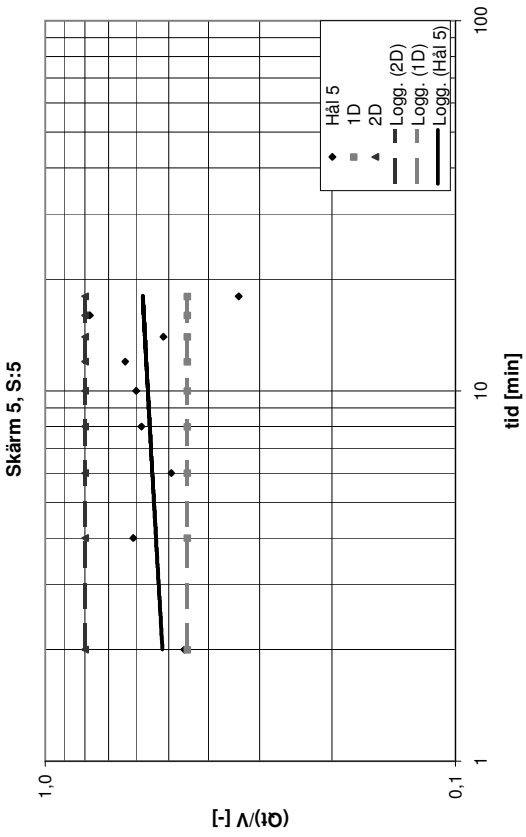


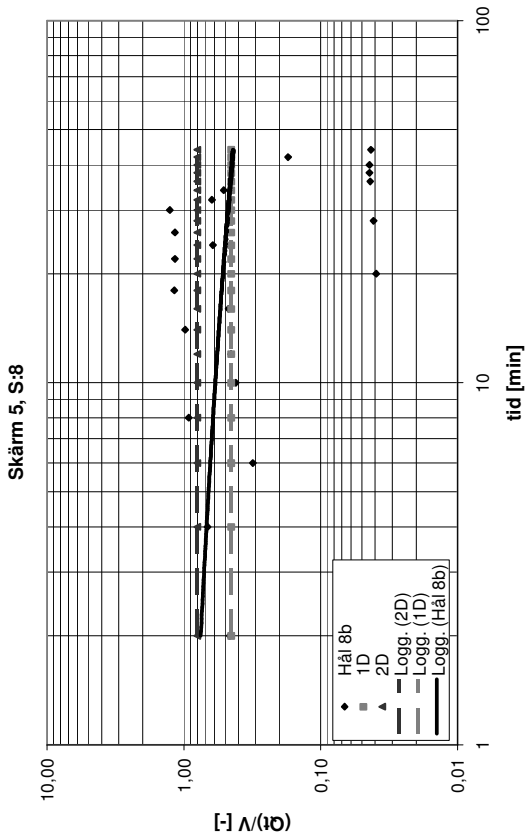

Skärm 5, P2:5
(Qt)/V [-]
t [min]
Hål 5
1D
2D
Log. (2D)
Log. (Hål 5)
Log. (1D)
1,00
0,10
0,01
1
10
100

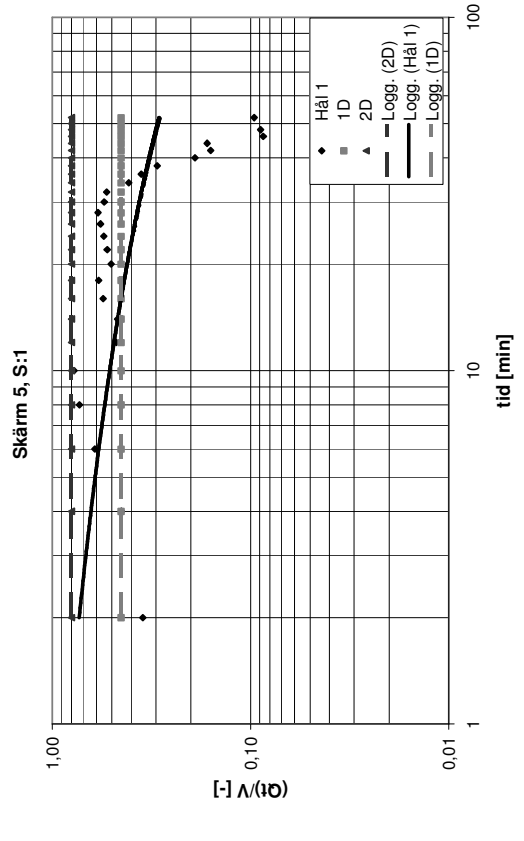

Skärm 5, P2:8
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 8
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (Hål 8)
Logg. (1D)
1,00
0,10
0,01
1
10
100

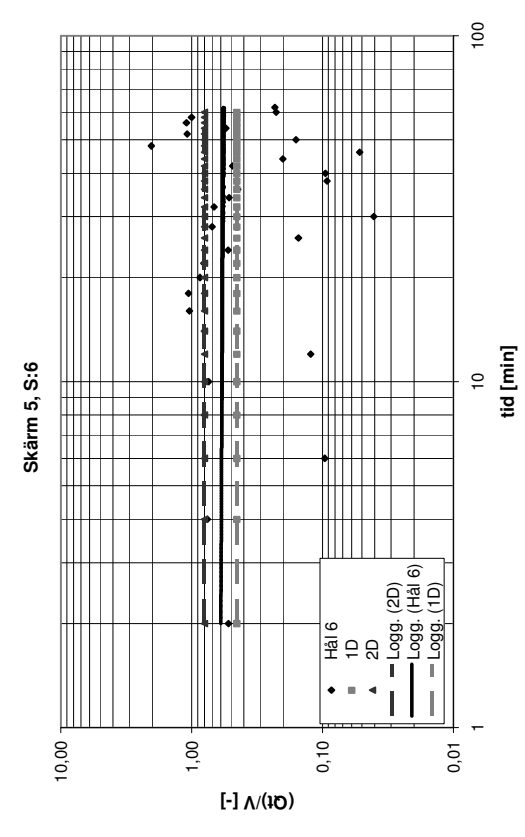

Skärm 5, P2:1
(Qt)/V [-]
t [min]
Hål 1a
Hål 1b
1D
2D
Log. (1D)
Log. (Hål 1a)
Log. (Hål 1b)
Log. (2D)
1,0
0,1
1
10
100

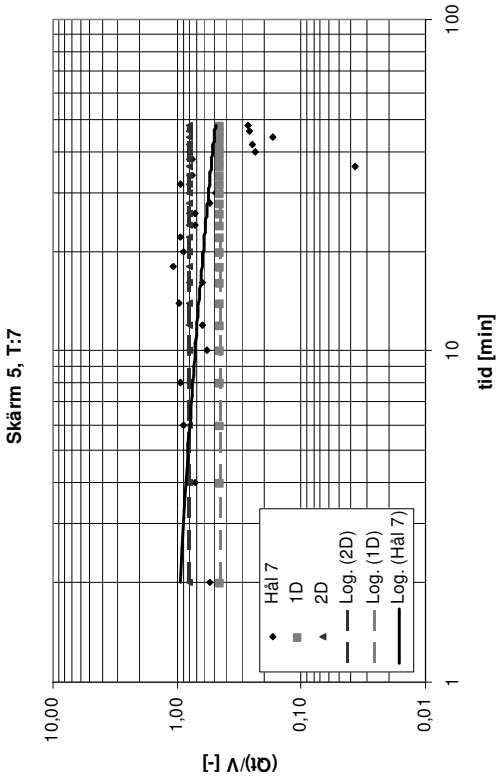

Skärm 5, P2:7
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 7
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 7)
1,0
0,1
1
10
100

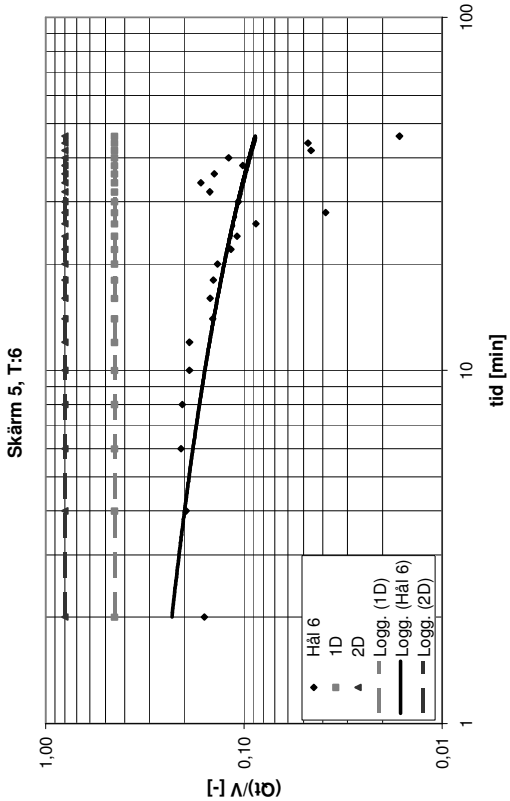

Skärm 5, S:5
Hål 5
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 5)
1,0
0,1
1
10
100
tid [min]
Q(t)/V [-]

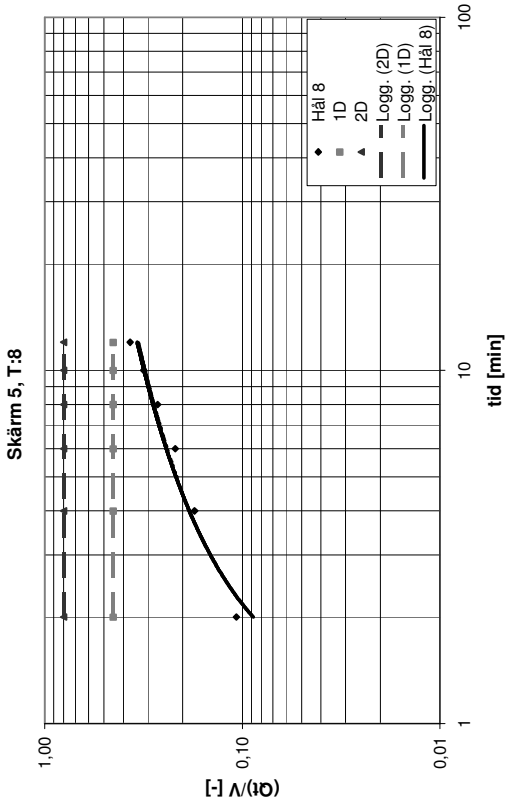

Skärm 5, S:8
Hål 8b
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 8b)
10,00
1,00
0,10
0,01
1
10
100
tid [min]
Q(t)/V [-]

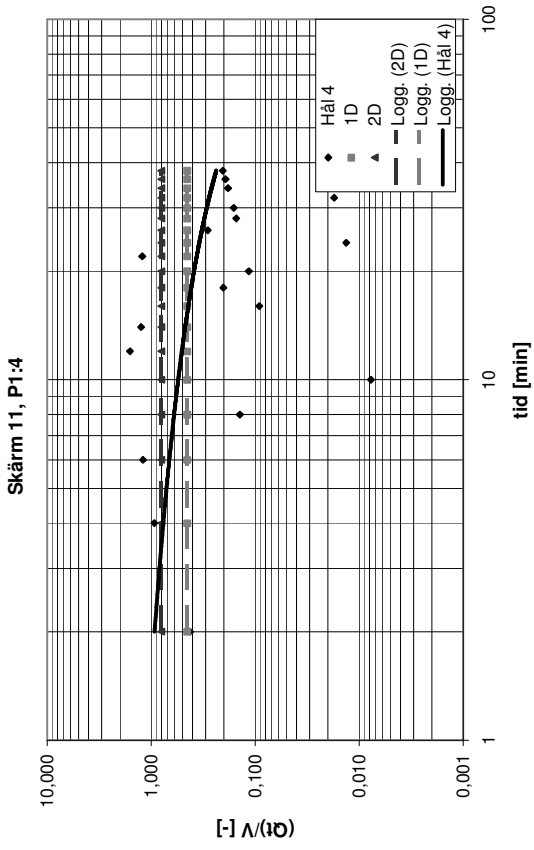

Skärm 5, S:1
Hål 1
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (Hål 1)
Logg. (1D)
1,00
0,10
0,01
1
10
100
tid [min]
Q(t)/V [-]

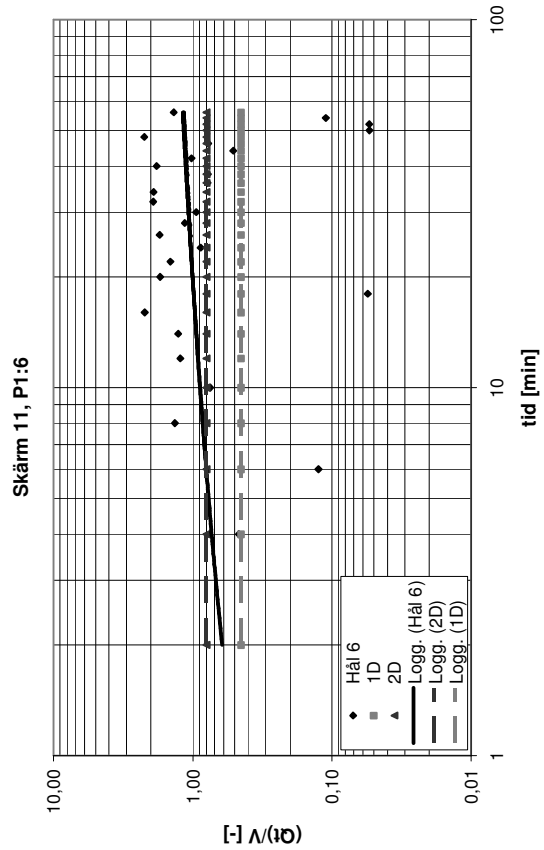

Skärm 5, S:6
Hål 6
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (Hål 6)
Logg. (1D)
10,00
1,00
0,10
0,01
1
10
100
tid [min]
Q(t)/V [-]

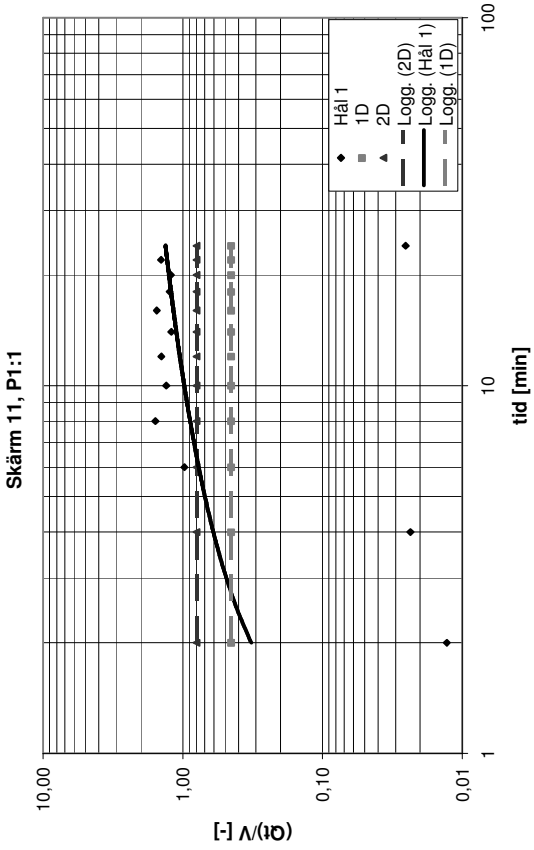

Skärm 5, T:7
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 7
1D
2D
Log. (2D)
Log. (1D)
Log. (Hål 7)

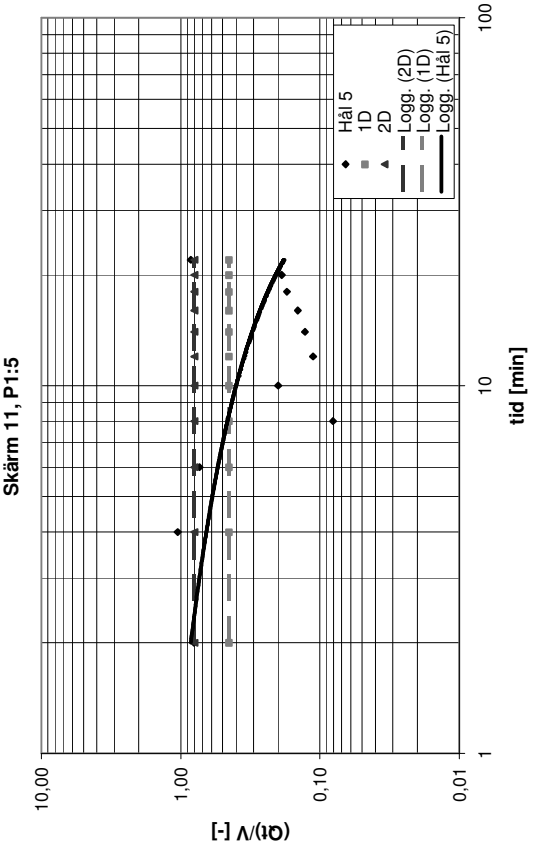

Skärm 5, T:6
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 6
1D
2D
Logg. (1D)
Logg. (Hål 6)
Logg. (2D)

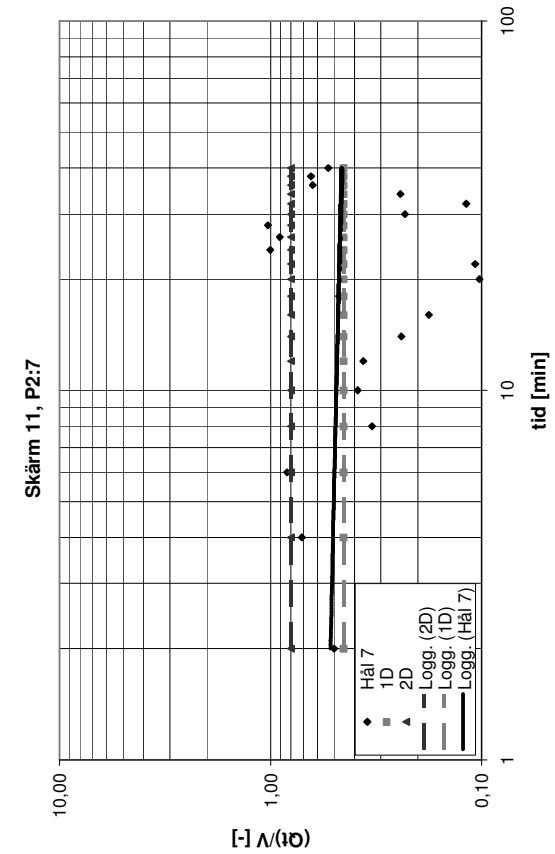

Skärm 5, T:8
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 8
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 8)

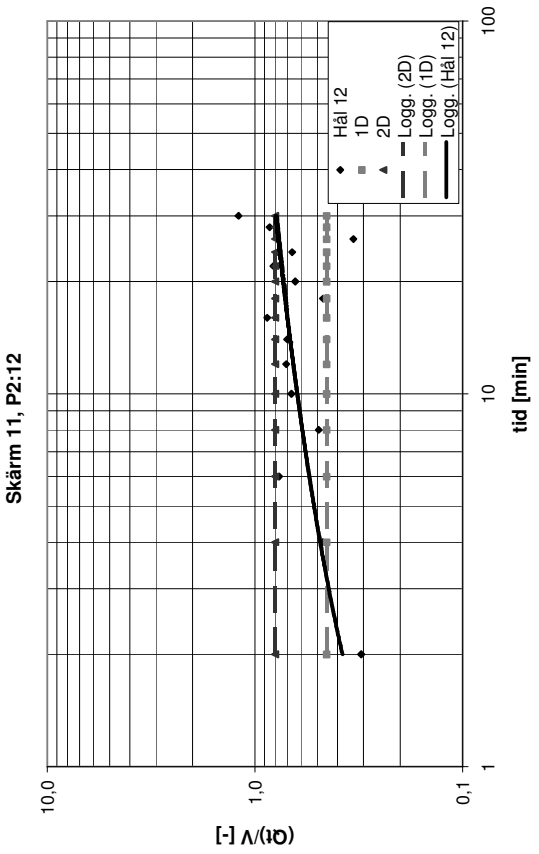

Skärm 11, P1:4
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 4
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 4)

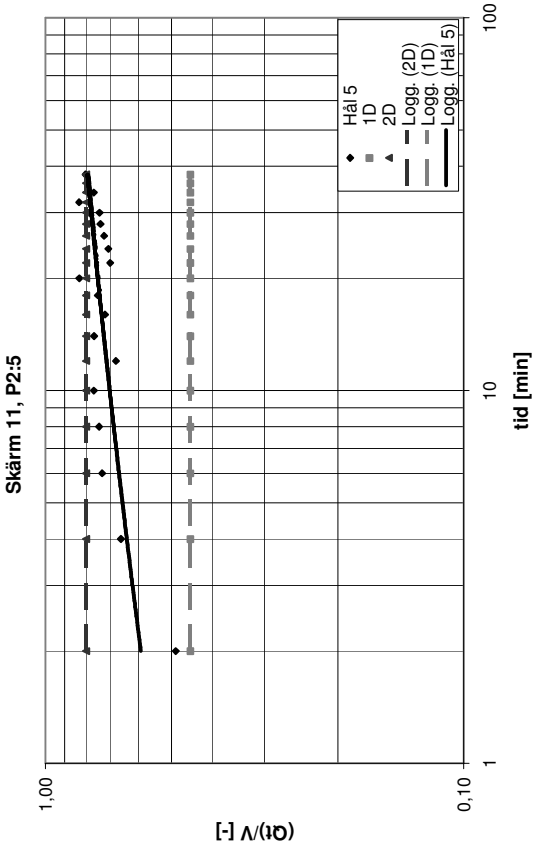

Skärm 11, P1:6
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 6
1D
2D
Logg. (Hål 6)
Logg. (2D)
Logg. (1D)

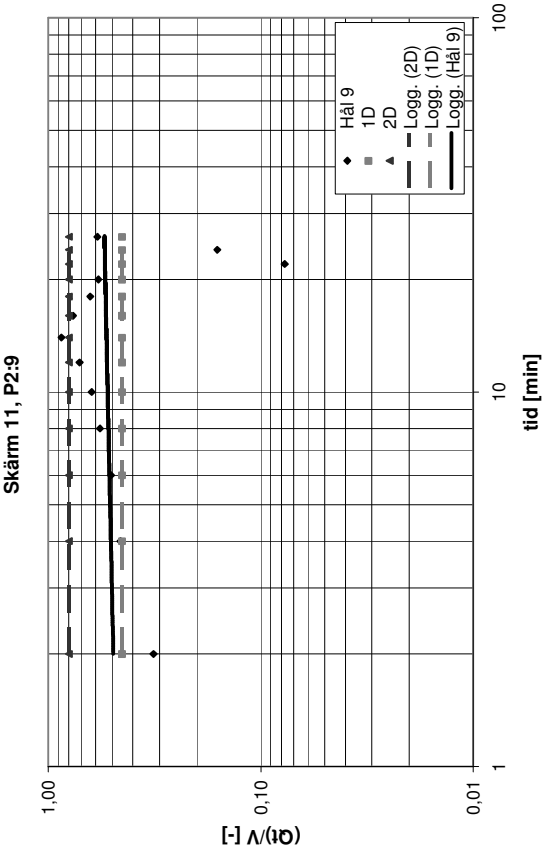

Skärm 11, P1:1
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 1
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (Hål 1)
Logg. (1D)

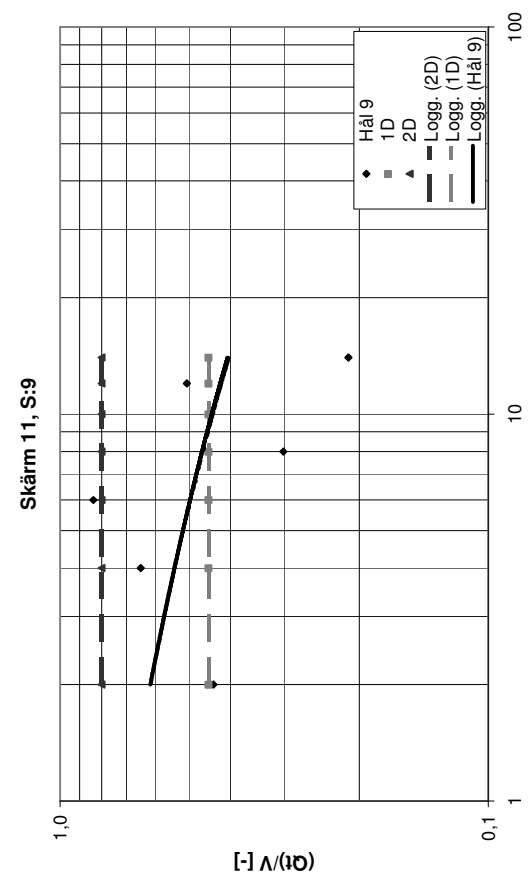

Skärm 11, P1:5
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 5
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 5)

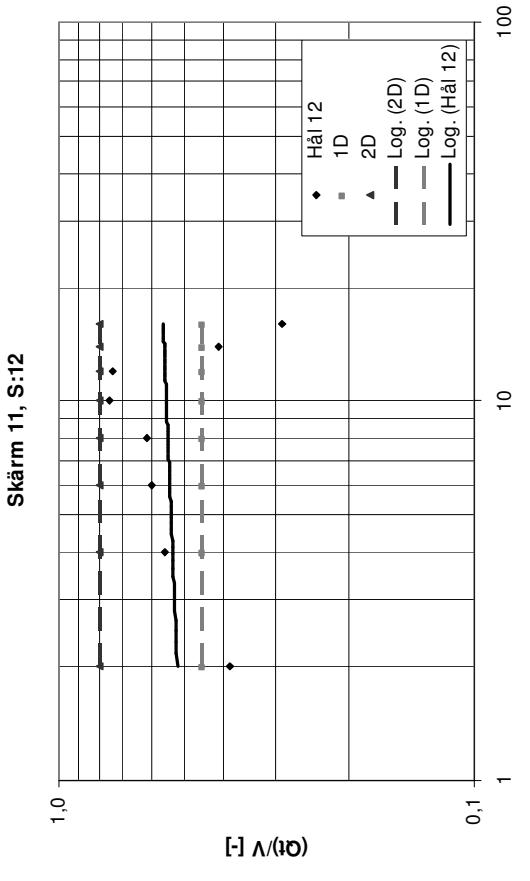

Skärm 11, P2:7
Hål 7
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 7)
10,00
1,00
0,10
1
10
100
tid [min]
Q(t)/V [-]

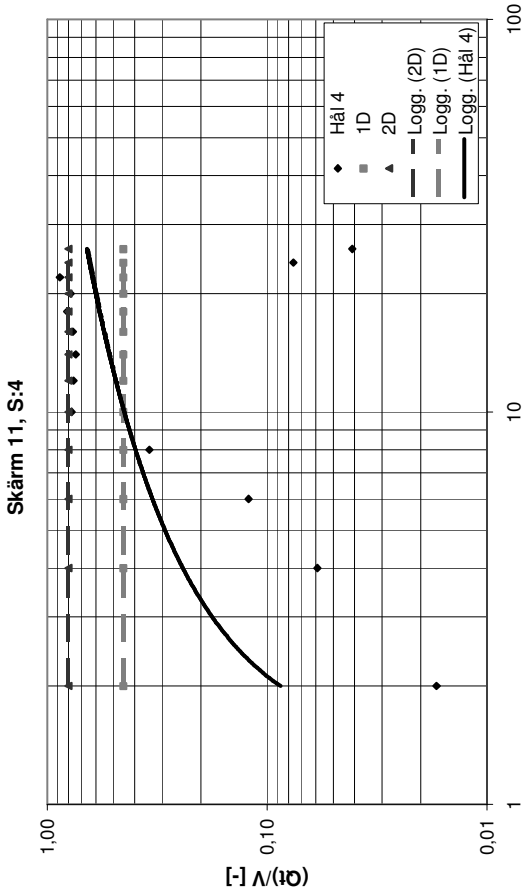

Skärm 11, P2:12
Hål 12
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 12)
10,0
1,0
0,1
1
10
100
tid [min]
Q(t)/V [-]

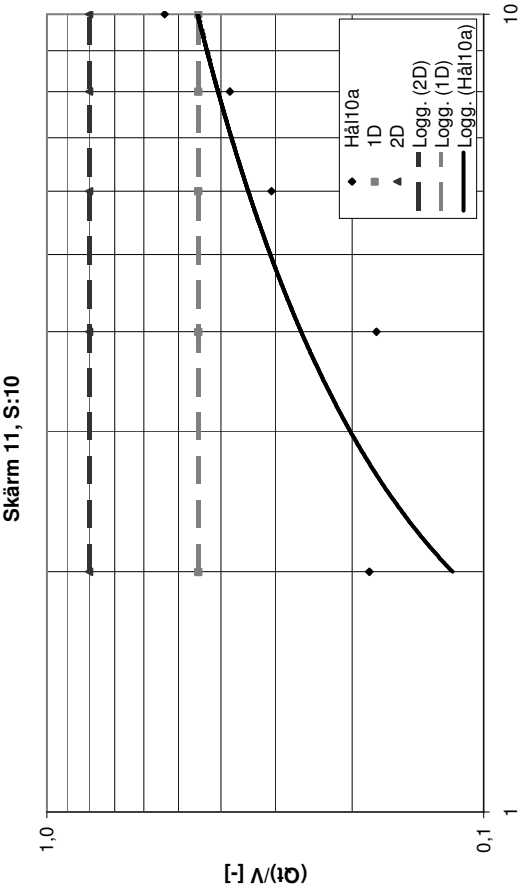

Skärm 11, P2:5
Hål 5
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 5)
1,00
0,10
1
10
100
tid [min]
Q(t)/V [-]

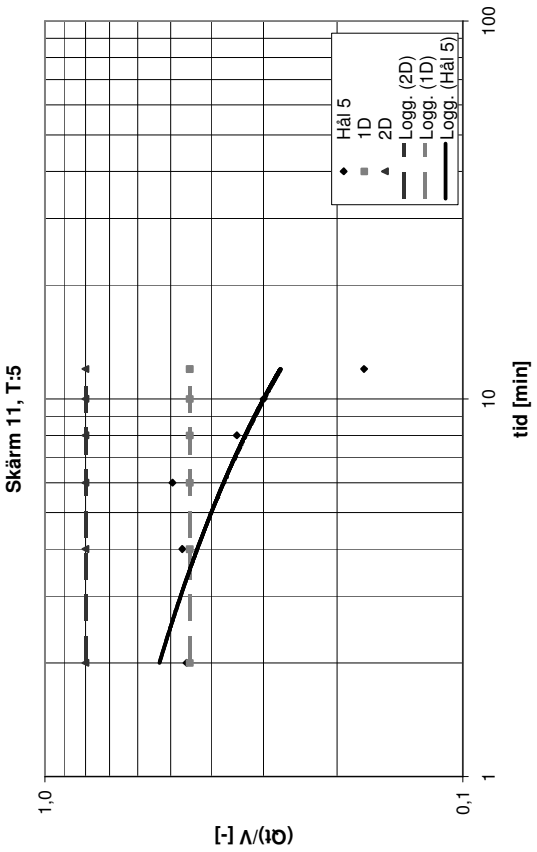

Skärm 11, P2:9
Hål 9
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 9)
1,00
0,10
0,01
1
10
100
tid [min]
Q(t)/V [-]

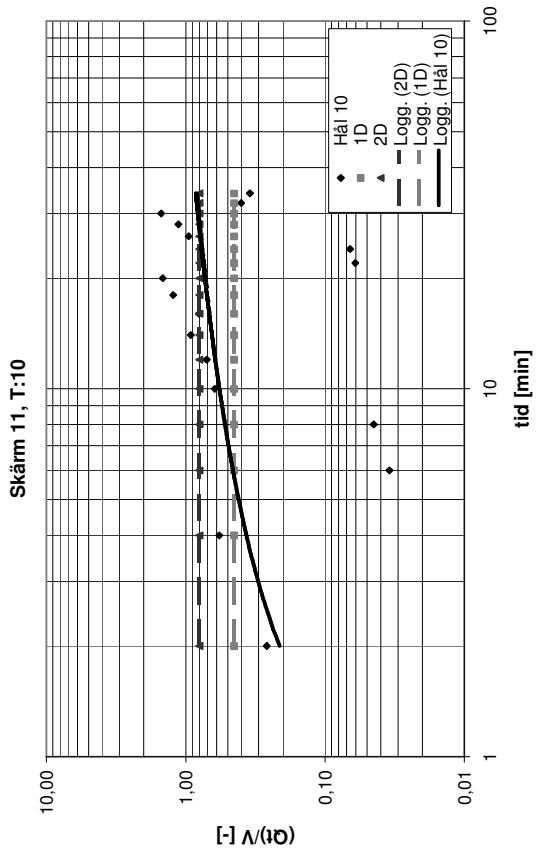

Skärm 11, S:9
Hål 9
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 9)
(Qt)/V [-]
tid [min]
1,0
0,1
1
10
100

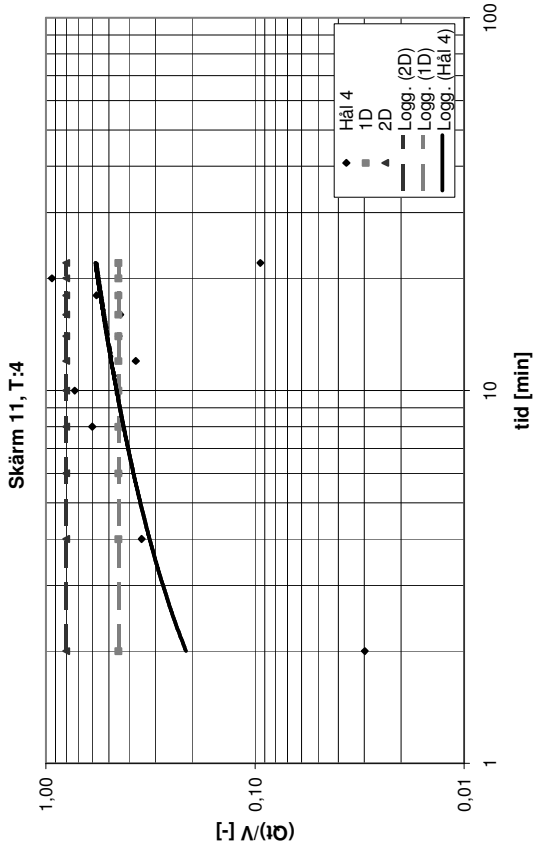

Skärm 11, S:12
Hål 12
1D
2D
Log. (2D)
Log. (1D)
Log. (Hål 12)
(Qt)/V [-]
Tid [min]
1,0
0,1
1
10
100

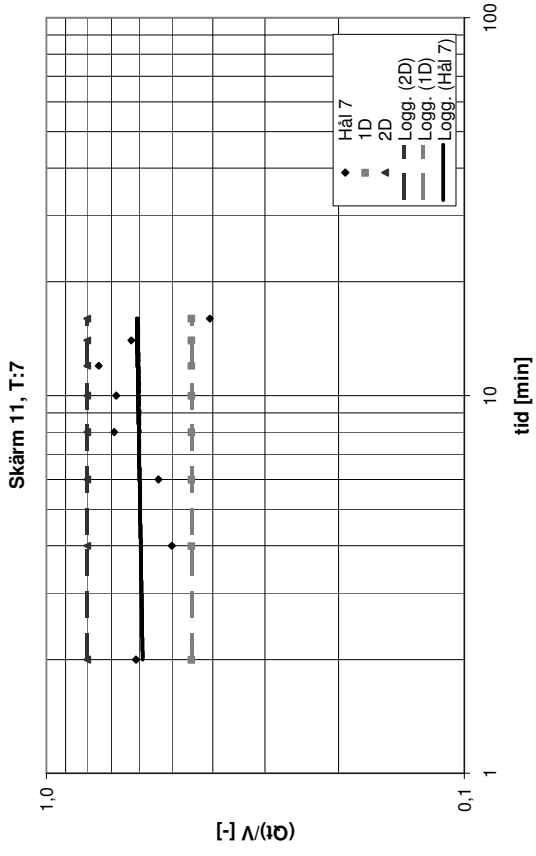

Skärm 11, S:4
Hål 4
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 4)
(Qt)/V [-]
tid [min]
1,00
0,10
0,01
1
10
100

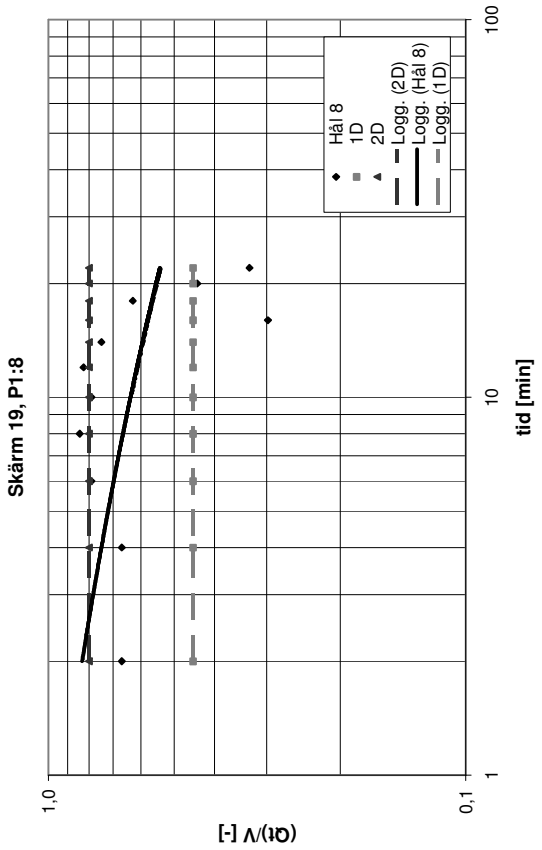

Skärm 11, S:10
Hål10a
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål10a)
(Qt)/V [-]
tid [min]
1,0
0,1
1
10

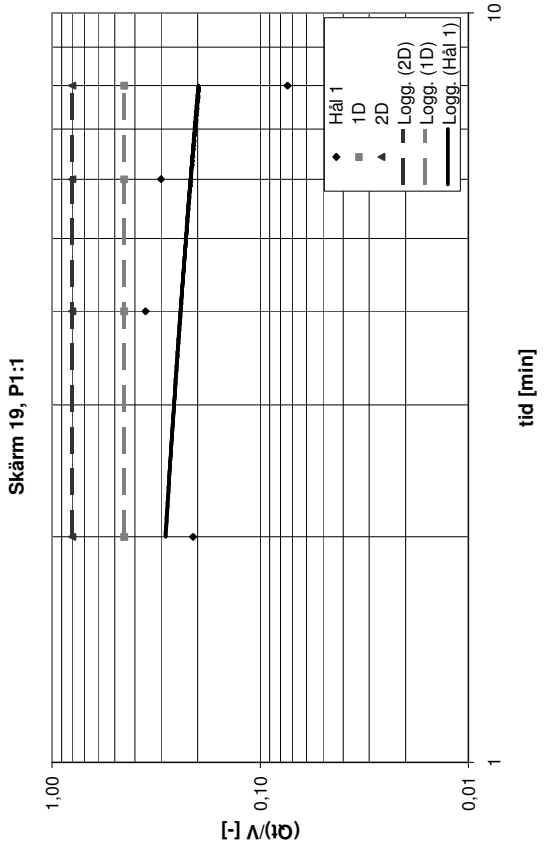

Skärm 11, T:5
Hål 5
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 5)
(αt)/V [-]
tid [min]
1,0
0,1
1
10
100

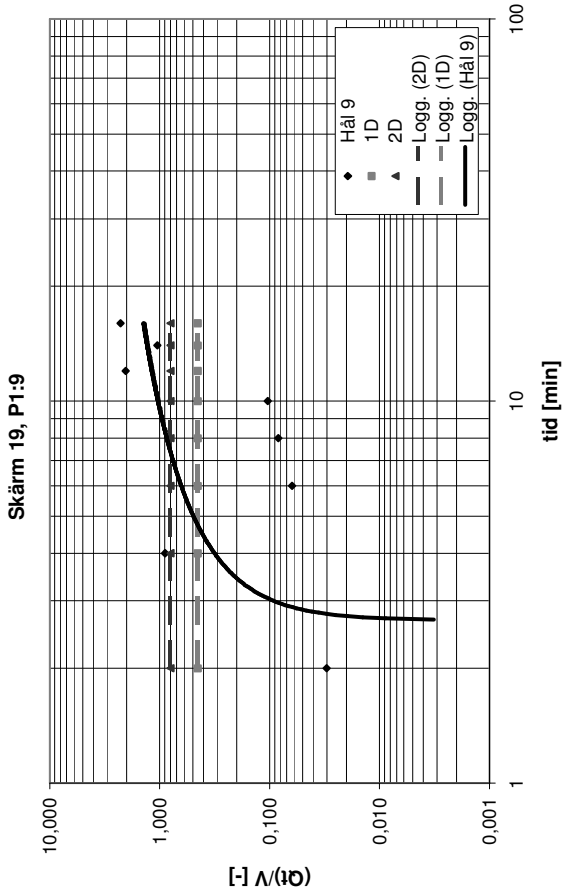

Skärm 11, T:10
Hål 10
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 10)
(αt)/V [-]
tid [min]
10,00
1,00
0,10
0,01
1
10
100

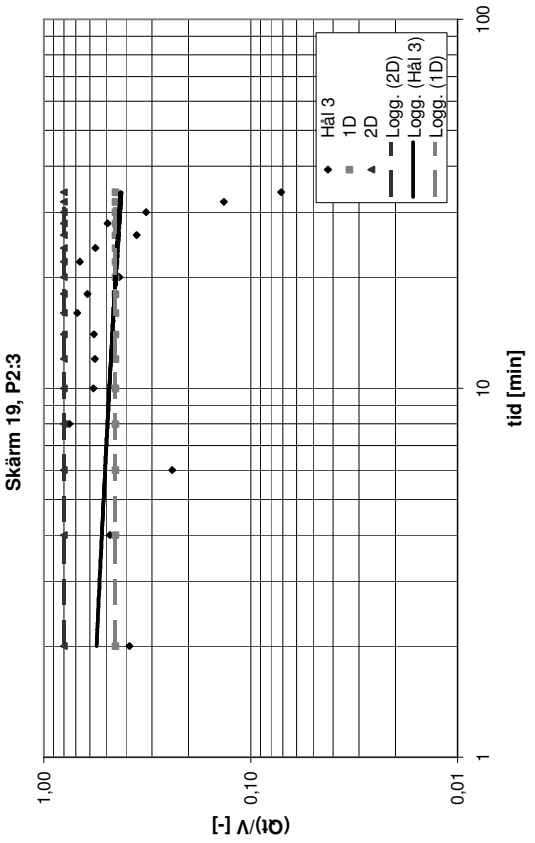

Skärm 11, T:4
Hål 4
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 4)
(αt)/V [-]
tid [min]
1,00
0,10
0,01
1
10
100

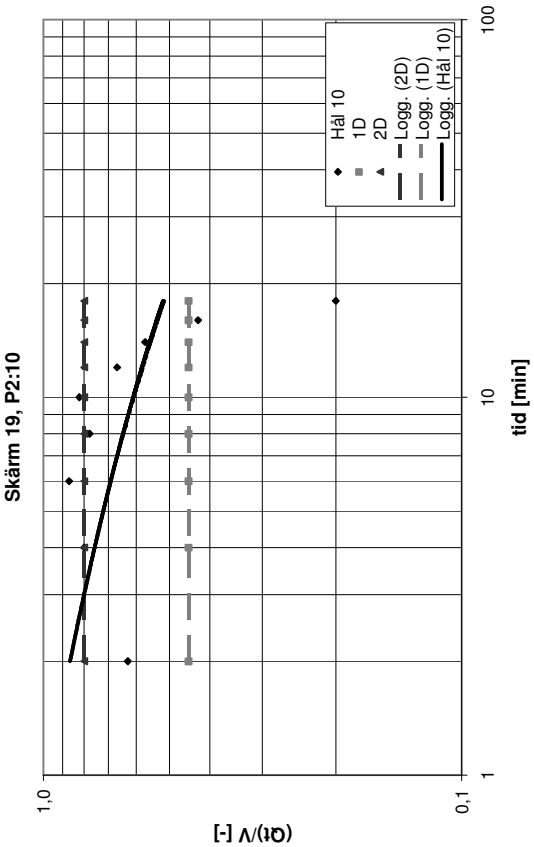

Skärm 11, T:7
Hål 7
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 7)
(αt)/V [-]
tid [min]
1,0
0,1
1
10
100

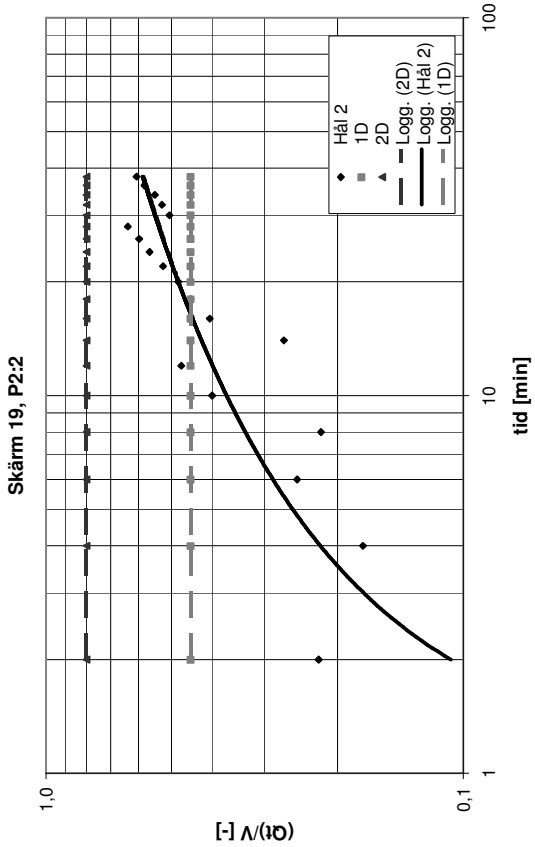

Skärm 19, P1:8
(Qt)/V [-]
tid [min]
1,0
0,1
1
10
100
Hål 8
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (Hål 8)
Logg. (1D)

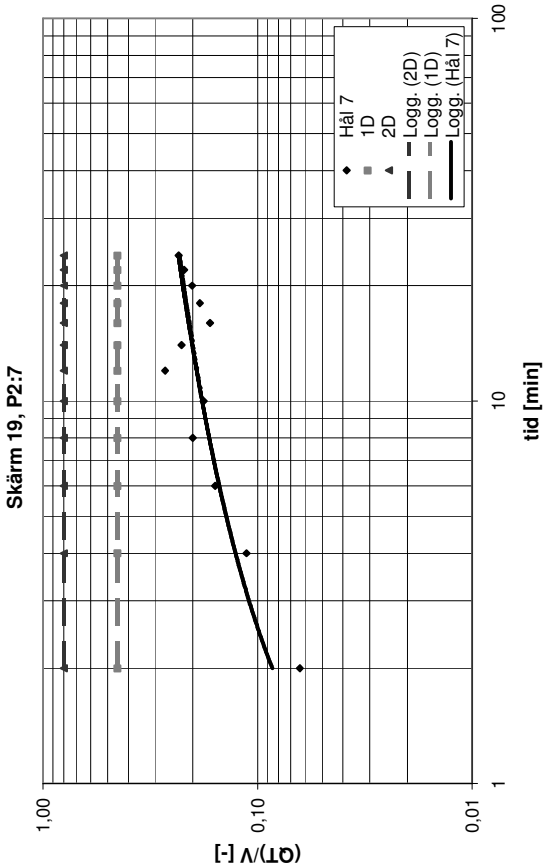

Skärm 19, P1:1
(Qt)/V [-]
tid [min]
1,00
0,10
0,01
1
10
Hål 1
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 1)

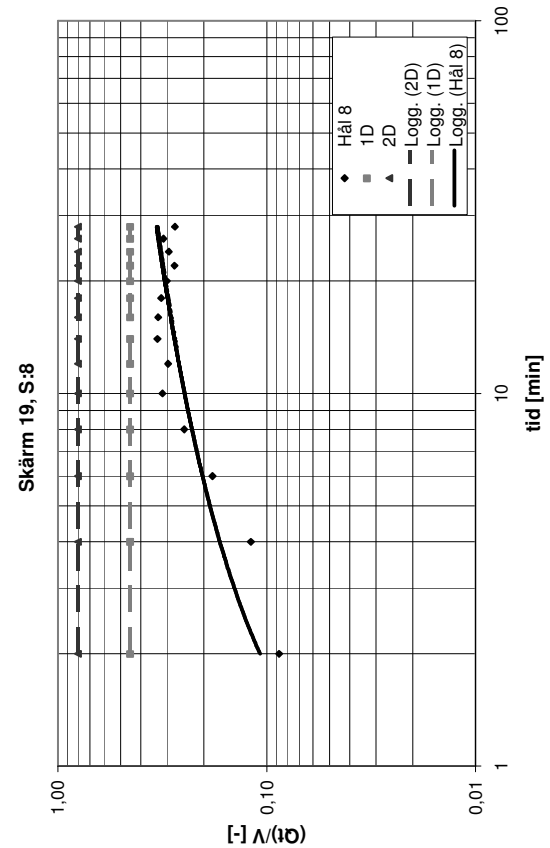

Skärm 19, P1:9
(Qt)/V [-]
tid [min]
10,000
1,000
0,100
0,010
0,001
1
10
100
Hål 9
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 9)

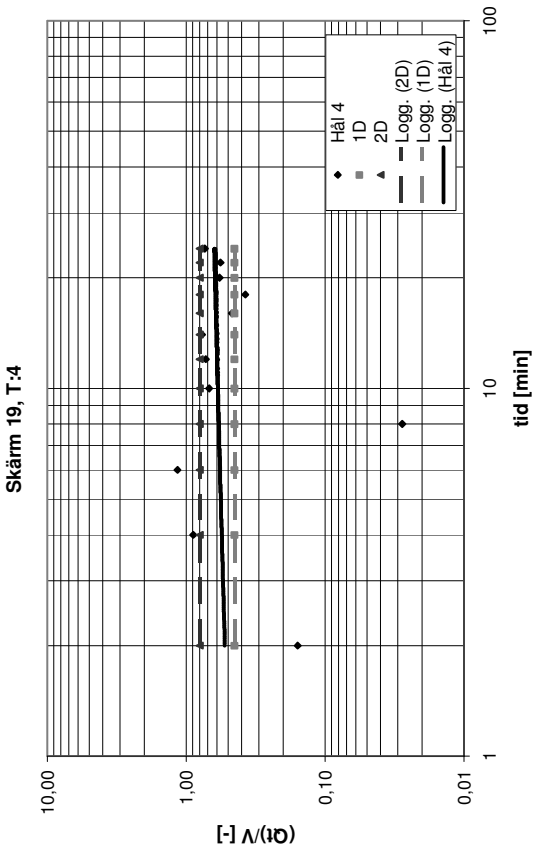

Skärm 19, P2:3
(Qt)/V [-]
tid [min]
1,00
0,10
0,01
1
10
100
Hål 3
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (Hål 3)
Logg. (1D)

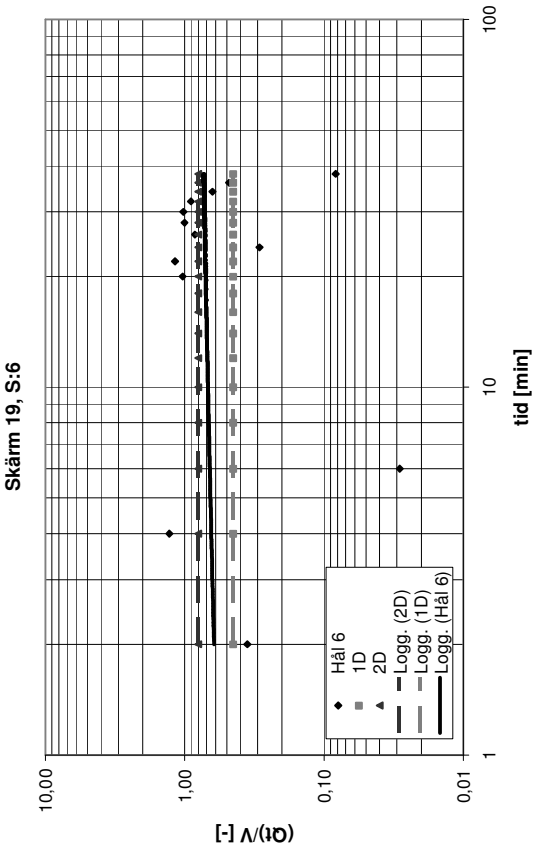

Skärm 19, P2:10
(Qt)/V [-]
tid [min]
1,0
0,1
1
10
100
Hål 10
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 10)

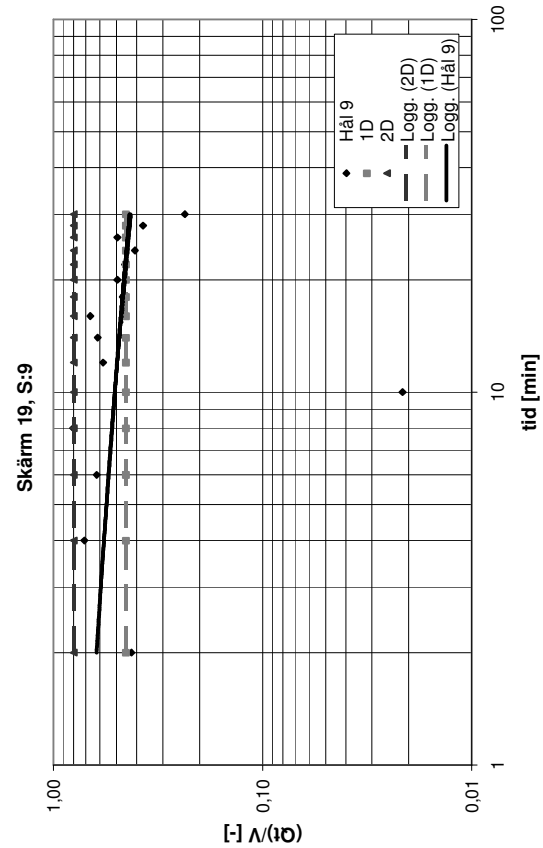

Skärm 19, P2:2
(Qt)/V [-]
tid [min]
1,0
0,1
1
10
100
Hål 2
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (Hål 2)
Logg. (1D)


Skärm 19, P2:7
(QT)/V [-]
tid [min]
1,00
0,10
0,01
1
10
100
Hål 7
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 7)

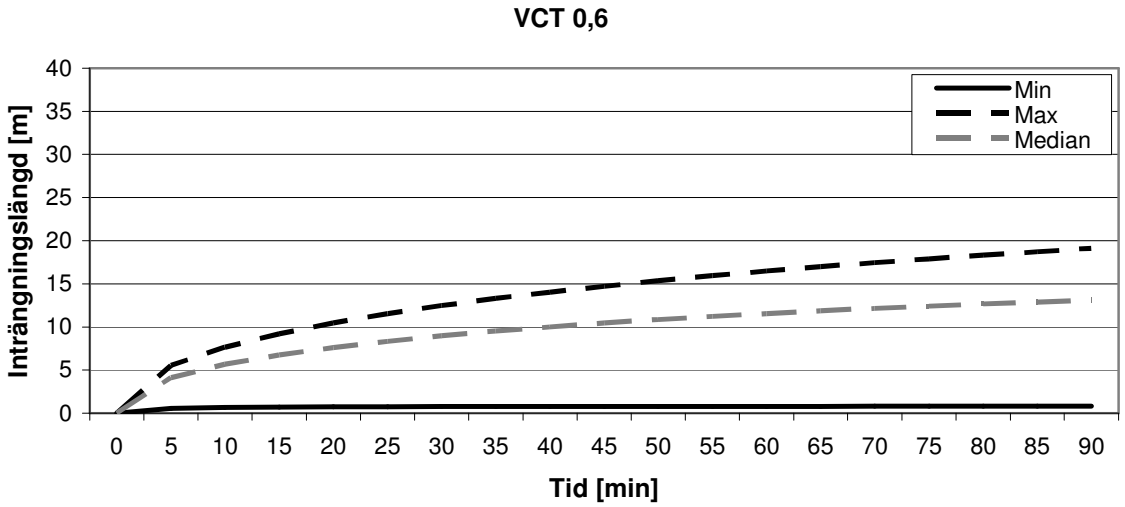

Skärm 19, S:8
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 8
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 8)

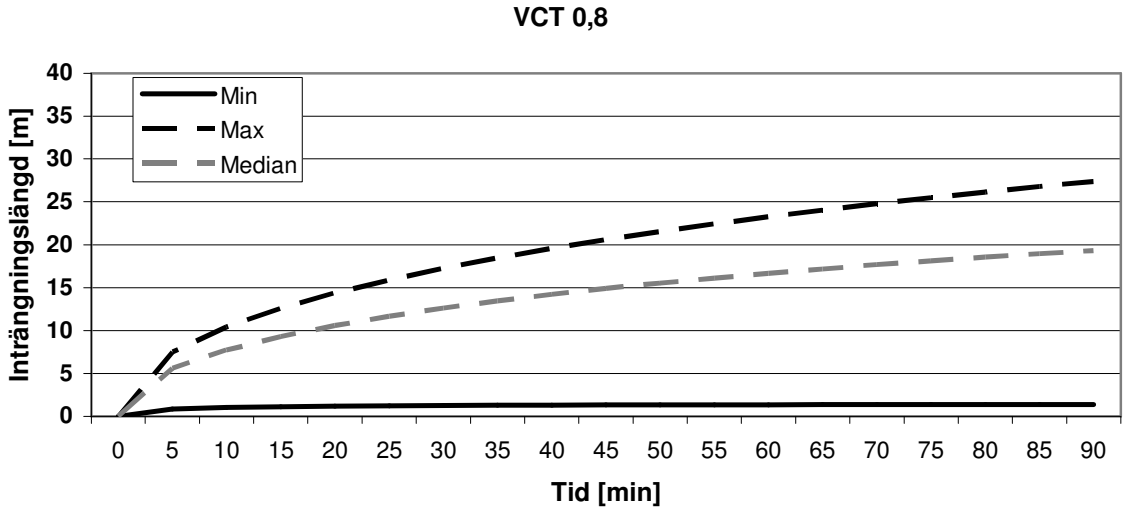

Skärm 19, T:4
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 4
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 4)


Skärm 19, S:6
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 6
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 6)

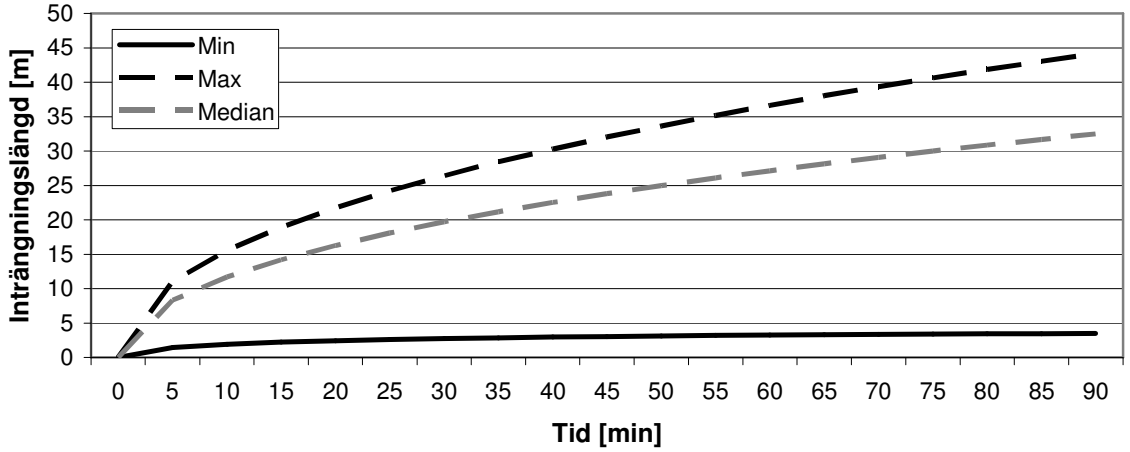

Skärm 19, S:9
(Qt)/V [-]
tid [min]
Hål 9
1D
2D
Logg. (2D)
Logg. (1D)
Logg. (Hål 9)

Inträngningslängd

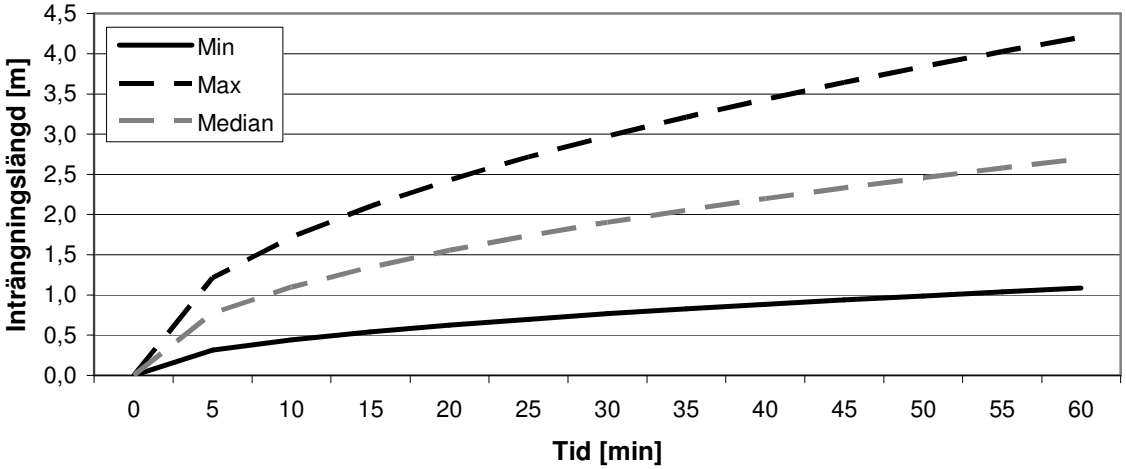




VCT 1,0



Silica sol



Inträngningslängd - beräkningar

Inträngningslängd beräknas olika beroende på om bruket ses som en Binghamvätska eller en Newtonvätska. Nedan redovisas beräkningsgången för en Binghamvätska.

Binghamvätska – Cement

För att skatta inträngningslängd och injekteringstid används beräkningsgången enligt ekvation 1.1-1.8, mer beskrivning finns i Gustafson och Stille (2005).

Den maximala inträngningslängden beskrivs med ekvation 1.1 och beror på injekteringsövertryck Δp, flytgränsen $\tau_{0,}$ och sprickbredden b.

$$I_{\max} = \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right) \cdot b \tag{1.1}$$

Injekteringsövertrycket i sin tur definieras som differensen mellan injekteringstryck p_g och grundvattentryck p_w, se ekvation 1.2.

$$\Delta p = p_g - p_w \tag{1.2}$$

Injekteringstiden är viktig för att beräkna inträngningslängden eftersom det i princip krävs oändlig tid för att nå en maximal inträngning. I ekvation 1.3 uttrycks den karakteristiska injekteringstiden t_0, med hjälp av de injekteringsrelaterade parametrarna flytgräns τ_0, och viskositeten μ_g.

$$t_0 = \frac{6 \cdot \Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2} \tag{1.3}$$

I_D och t_D är två dimensionslösa parametrar, relativ inträngning och relativ injekteringstid, som definieras enligt ekvation 1.4 och 1.5.

$$t_D = \frac{t}{t_0} \tag{1.4}$$

$$I_D = \frac{I}{I_{\max}} \tag{1.5}$$

Den dimensionslösa tiden används sedan till att skatta parametern θ, för endimensionellt (ekvation 1.6) och tvådimensionellt flöde (ekvation 1.7). Denna parameter används sedan för att få fram ett värde på den dimensionslösa inträngningen, se ekvation 1.8.

$$\theta_{1D} = \frac{t_D}{2 \cdot (0{,}6 + t_D)} \tag{1.6}$$

$$\theta_{2D} = \frac{t_D}{2 \cdot (3 + t_D)} \tag{1.7}$$

$$I_D = \sqrt{\theta^2 + 4 \cdot \theta} - \theta \tag{1.8}$$

För att få fram inträngningen I, används ekvation 1.5 och ekvation 1.8 tillsammans.