



BERÄKNINGSVERKTYG FÖR BERGKARAKTÄRISERING VID INJEKTERINGSDESIGN

– TEORI OCH
ANVÄNDARHANDLEDNING

Johan Thörn

Sara Kvartsberg

Edward Runslätt

Sebastian Almfeldt

Åsa Fransson

BERÄKNINGSVERKTYG FÖR BERGKARAKTÄRISERING VID INJEKTERINGSDESIGN

-TEORI OCH ANVÄNDARHANDLEDNING

Calculation tool for rock characterisation during grouting design

-Theory and users guide

Johan Thörn, Chalmers tekniska högskola

Sara Kvartsberg, Norconsult AB

Edward Runslätt, Golder Associates AB

Sebastian Almfeldt, Chalmers tekniska högskola / SAA Konsult

Åsa Fransson, Chalmers tekniska högskola

BeFo Rapport 143

Stockholm 2015

ISSN 1104-1773

ISRN BEFO-R—143—SE

FÖRORD

Tätning av bergmassan förekommer i princip i alla bergprojekt idag och där är injektering kring en tunnel eller ett bergrum en väl beprövad metodik. Med allt högre krav på tätning så blir projektering/design en allt viktigare del i byggprocessen för att både uppnå de satta inläckagekraven och att möjliggöra effektivitet i byggfasen.

Injekteringsforskningen har kommit långt och kunskapen om hur man bör analysera, dimensionera och genomföra injekteringen är god och behöver därför förmedlas till branschens olika aktörer. Man har ofta en kännedom om bergets egenskaper och de hydrogeologiska förhållandena baserat på bl a mätdata från borrhål. De hydrauliska egenskaperna hos sprickorna i bergmassan kan beskrivas med statistiska mått utifrån kännedom av fördelningen av sprickornas genomsläpplighet längs testsektioner i borrhål. Den så kallade paretofördelningen är i många fall lämplig att använda för att beskriva sprickviddsfördelningen.

Detta utvecklingsprojekt syftar till att underlätta tolkningen av mätdata från hydrotester genom att ta fram verktyg för detta och är ett led i att föra ut kunskap från forskare och specialister till branschen. Verktuget består av denna rapport i tre delar och ett Excelblad. Syftet är att förenkla och automatisera den matematiska hanteringen och att beräkningarna i och med det görs på ett enhetligt sätt i injekteringsdesignen.

Utredningsarbetet har utförts av en grupp forskare och designers med Johan Thörn som projektledare (Chalmers), Sara Kvartsberg (Norconsult), Edward Runslätt (Golder Associates), Sebastian Almfeldt (Chalmers/SAA Konsult) och Åsa Fransson (Chalmers). Den referensgrupp som har bistått gruppen med värdefulla råd och granskning under projektet bestod av Björn Johansson (Skanska), Lars Hässler (Golder Associates), Magnus Eriksson (SGI), Thomas Dalmalm (Trafikverket) och undertecknad. Ett flertal personer har bidragit till projektet med egna insatser genom att ingå i Alfa- och/eller Betatest, och det är Christian Butron (Sweco), Ingvar Rhén (Sweco), Johanna Lithén (Bergab), Magnus Eriksson (SGI), Magnus Zetterlund (Norconsult), Björn Johansson (Skanska), Håkan Stille (KTH), Martin Stigsson (SKB), Mats Holmberg (Tunnel

Engineering), Mikael Creütz (Golder Associates), Nils Granberg (Tyréns),
Raymond Munier (SKB) och Thomas Janson (Tyréns).

Projektet finansierades av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo).

Stockholm i november 2015

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

Strikta inläckagekrav i berganläggningsprojekt leder ofta till ett ökat behov att täta sprickor med små sprickvidder, vilket i sin tur kräver en ökad förståelse för vilka sprickor som behöver tätas och val av injekteringsbruk för dessa sprickor. Dessa frågeställningar hanteras i en designmetodik för injektering som är framtagen vid Chalmers tekniska högskola. I designmetodiken ingår att beskriva bergmassans hydrauliska egenskaper genom att upprätta fördelningar av spricktransmissiviteter och hydrauliska sprickvidder, baserat på mätdata från hydrauliska tester och sprickdata från bergborrhål. Till följd av mätintervallängder och mätgränser ger dock testerna sällan information om enskilda sprickors genomsläpplighet. Mätdata måste därför bearbetas med statistiska fördelningar och i designmetodiken föreslås användning av den s.k. Paretofördelningen.

Designmetodiken har genomförts i ett antal tunnelprojekt i Sverige, men har oftast förts in som en del av ett forskningsprojekt. En av anledningarna till att metodiken ännu inte har nått en allmän och bred spridning hänger sannolikt ihop med att användaren måste kunna formulera olika typer av sannolikhetsfördelningar och utföra programmering av dessa. För att fler i bergbyggnadsbranschen ska kunna tillgodogöra sig metoden för statistikbaserad injekteringsdesign har därför ett kostnadsfritt och tillgängligt beräkningsverktyg för de statistiska beräkningarna utvecklats. Avsikten med verktyget är alltså att automatisera och tillgängliggöra en del av designmetodiken så att beräkningen utförs på ett enhetligt sätt och på så vis möjliggöra att fler personer i branschen kan använda metodiken vid injekteringsdesign i berg.

Verktyget finns att ladda ner fritt tillgängligt utan kostnad via Chalmers och BeFo:s hemsidor. Verktyget har gjorts som ett makro-kodat Excelblad för att maximera tillgängligheten och har under utvecklingen genomgått två testrundor i branschen. Denna rapport ger teoretisk bakgrund och användarhandledning till beräkningsverktyget och belyser även olika typer av möjliga felkällor och osäkerheter i statistiska analyser som kan uppkomma till följd av modellantaganden och vissa typer av indata. Rapporten är uppbyggd som tre mer eller mindre fristående delar för att belysa olika aspekter av beräkningsverktyget: A) Teoretisk bakgrund B) Praktiska råd och C) Användarhandledning.

Nyckelord: injekteringsdesign, Paretofördelning, hydrauliska tester, beräkningsverktyg, sprickviddsfördelning, transmissivitetfördelning

SUMMARY

Strict inflow demands in rock construction projects often lead to a need to seal rock fractures with small apertures, which in turn requires a good understanding of the fractures that need to be sealed and the type of grout that can penetrate the fractures. These issues are considered in a design process for rock grouting that was developed at Chalmers University of Technology. The design process includes several work stages where two are concerned with creating fracture transmissivity distributions and fracture aperture distributions, respectively. These distributions are based on data from hydraulic tests and fracture data from boreholes. However, as a result of measurement interval lengths and measurement limits, these hydraulic tests seldom contain information that can be linked to individual fractures. Measurement data must therefore be processed with statistical distributions and the design methodology proposes the use of the Pareto distribution.

The design process for grouting has been implemented in a number of tunnel projects in Sweden, although usually introduced as part of a research project. One of the reasons that the process has not yet reached a general and widespread use is probably due to the user having to formulate and program various types of probability distributions. To facilitate the use of the design process in the rock construction industry, a freely available computational tool for the statistical analyses has been developed. The purpose of the tool is thus to solve a tricky calculation step in the design process.

The tool itself can be downloaded free of charge via the Chalmers and BeFo websites. The tool has been programmed as a macro-coded Excel sheet to maximize the availability and has undergone two test rounds in the industry. This report provides the theoretical background and a user guide for the calculation tool. It also highlights various potential sources of errors and uncertainties in the statistical analyses that may arise as a result of model assumptions and certain types of input data. The report is structured as three more or less independent parts that illustrates various aspects of the statistical analysis: A) Theoretical background B) Practical advices and C) User's Manual.

Keywords: grouting design, Pareto distribution, hydraulic tests, calculation tool

ERKÄNNANDEN

Författarna vill tacka de personer som har bidragit med input under projektet, som referensgrupp, eller under alfa- respektive betatestfasen.

Referensgrupp

Björn Johansson, Skanska
Lars Hässler, Golder Associates
Magnus Eriksson, SGI
Per Tengborg, BeFo
Thomas Dalmalm, Trafikverket

Alfatest

Christian Butron, Sweco
Ingvar Rhén, Sweco
Johanna Lithén, Bergab
Magnus Eriksson, SGI
Magnus Zetterlund, Norconsult

Betatest

Björn Johansson, Skanska
Håkan Stille, KTH
Ingvar Rhén, Sweco
Martin Stigsson, SKB
Mats Holmberg, Tunnel Engineering
Mikael Creütz, Golder Associates
Nils Granberg, Tyréns
Raymond Munier, SKB
Thomas Janson, Tyréns

FRISKRIVNING OCH LICENS

Beräkningsverktyget levereras under MIT-licensen (<http://opensource.org/licenses/MIT>) detta innebär kort sagt att användaren är fri att göra som denne behagar med koden så länge texten nedan följer med (observera att det är den engelska formuleringen nedan som gäller)

Copyright © 2014 Sebastian Almfeldt, Åsa Fransson, Sara Kvartsberg, Edward Runslätt, Johan Thörn.

Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal in the Software without restriction, including without limitation the rights to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is furnished to do so, subject to the following conditions:

The above copyright notice and this permission notice shall be included in all copies or substantial portions of the Software.

THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE.

IN ADDITION TO THE LIMITATIONS OF LIABILITY REGULATED IN THIS LICENSE, THE FOLLOWING LIMITATIONS OF LIABILITY SHALL APPLY: IN NO EVENT SHALL ANY AUTHOR OR COPYRIGHT HOLDER BE LIABLE FOR ANY INDIRECT OR DIRECT DAMAGES, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO DEATH, BODILY INJURY AND PROPERTY DAMAGES (PUBLIC OR PRIVATE), EVEN IF SUCH AUTHOR OR COPYRIGHT HOLDER HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES. ANY USE OF THE SOFTWARE IS AT YOUR OWN RISK.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord	i
Sammanfattning	iii
Summary	v
Erkännanden	vi
Friskrivning och Licens	vii
Innehållsförteckning	ix
Beteckningar	xi
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	4
1.3 Avgränsning	4
1.4 Läsanvisning	5
Del A – Teori	7
2 Indata	9
2.1 Antal sprickor	11
2.2 Intervalltransmissiviteter	11
3 Sannolikhetsfördelningar	15
3.1 Transmissivitetsfördelning	16
3.2 Paretofördelningen	19
4 Modellantaganden	23
5 Tillämpning i designprocessen	27
5.1 Inflödesberäkning	27
5.2 Inträngning och val av injekteringsmedel	29
5.3 Tillämplighet av modeller och indata	30
Referenser del A	33
Del B – TILLÄMPNING	37
6 Fältmätning – undersökningsmetoder	39
6.1 Kärnbörning	39

6.2	Hammarborrning.....	41
6.3	Sprickkaraktärisering av bergmassan.....	41
6.4	Hydrauliska tester.....	43
6.5	Rekommendationer vid utförande.....	48
7	Diskussion fältmätning.....	51
7.1	Hänsyn till geologin.....	51
7.2	Borrhålsorientering.....	51
7.3	Läckage vid vattenförlustmätning.....	52
7.4	Sprick- och krosszoner.....	52
	Referenser del B.....	53
	Del C - Manual.....	55
8	Hur verktyget är utformat.....	57
8.1	Konditionera data.....	57
8.2	Kör simulering.....	63
8.3	Exportrapportens delar.....	65
9	När det strular.....	67
9.1	Felsökningstips.....	67
9.2	Felkoder.....	69
9.3	Kända problem.....	71
10	Körning med exempeldata och exportrapport.....	73
11	Revisionslogg.....	75

BETECKNINGAR

Latinska bokstäver

A	[m ²]	Area
b	[m]	Akvifärmäktighet
b_{hyd}	[m]	Ekvivalent hydraulisk apertur
C	-	Konstant
d	[m]	Djup under referensyta
g	[m/s ²]	Tyngdaccelerationen
h	[m]	Grundvattennivå
H	[m]	Djup under referensyta
I_{tot}	[-]	Antal intervall
$I_{tät}$	[-]	Antal intervall med en transmissivitet mindre än T
k	[-]	Formparameter för Paretofördelningen
K	[m/s]	Hydraulisk konduktivitet
L	[m]	Längd, mätskala
n	[-]	Antal, räknetal
N	[-]	Totalantal
q	[m ³ /s]	Flöde
r	[-]	Rang
r_{inj}	[-]	Antalet injekterade sprickor
r_t	[m]	Tunnelradie
t	[m]	Medeltjocklek för den tätade zonen
T	[m ² /s]	Transmissivitet

Grekiska bokstäver

ξ	[-]	Skinfaktor
μ	[Pa·s]	Vattnets viskositet
ρ	[kg/m ³]	Vattnets densitet

Matematiska uttryck

dh	[m]	Grundvattennivåskillnad
dh/dl	[m/m]	Hydraulisk gradient
dp	[Pa]	Trycknivåskillnad
Q/dh	[m ² /s]	Specifik kapacitet

Förkortningar

SKB	Svensk kärnbränslehantering AB
SGF	Svenska geotekniska föreningen
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIPS	Borehole Image Processing System
CDF	Cumulative distribution function (kumulativ fördelningsfunktion)

1 INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

Berganläggningsprojekt innebär som regel att ett mycket begränsat inläckage kan accepteras. Vid tunnelprojekt är det inte ovanligt att inläckagekrav enbart tillåter några enstaka liter per minut och 100 meter tunnel eller ännu mindre. De strikta kraven har främst kommit som en följd av skärpta miljökrav och ökat byggande i urbana miljöer där höga inläckage kan leda till skador på bebyggelse. Funktionskrav från beställare, exempelvis gällande dropp och isbildning, har i vissa fall också bidragit till mycket strikta kravformuleringar.

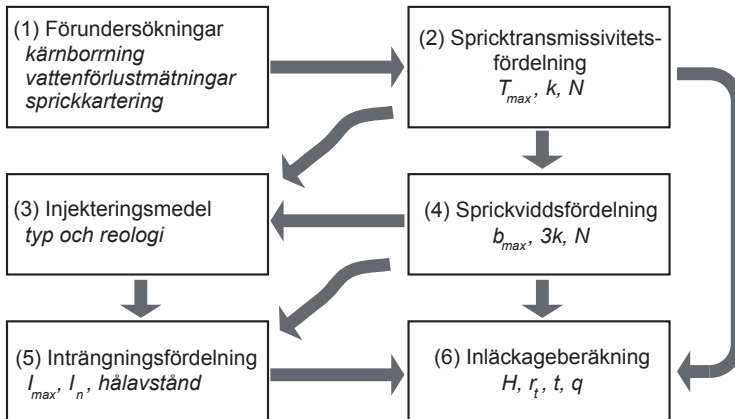
Strikta inläckagekrav leder ofta till ett ökat behov att tätas sprickor med små sprickvidder. Detta medför att traditionell, erfarenhetsmässig sprickinjektering med cementbaserade injekteringsmedel kan bli otillräcklig (Funehag 2011). För framgångsrik tätning vid strikta krav behövs en bra förståelse för vilka sprickor som behöver tätas och vilket injekteringsbruk som kan ta sig in i sprickorna. Viktiga frågeställningar som kan behöva analyseras vid projektering av tätningsåtgärder är därför:

- Vilken genomsläpplighet har de största sprickorna?
- Hur stor andel av sprickorna har en för liten vidd för att bruket ska tränga in?
- Hur stor andel av sprickorna kan tätas med valda tryck och bruk?
- Hur påverkas inläckaget till en tunnel eller öppen schakt om dessa tätas?

Om dessa frågor kan besvaras finns en god grund för att utforma en injekteringsinsats och förutsäga resultatet av denna (se t.ex. Gustafson 2009, och Eriksson & Stille 2005).

En designmetodik för injektering som presenteras av Gustafson et al (2004) hanterar ovanstående frågeställningar och möjliggör förutsägelser gällande resultat och resursåtgång. Metodiken baseras på att det finns fastställda inläckagekrav och möjlighet att förutsäga förekomsten av hydrauliska sprickvidder i sprickor, exempelvis längs tunnlar eller i bergschakt. De olika stegen i den strukturerade analysprocessen redovisas i Figur 1-1 och behandlas även i del A i rapporten.

I designmetodik ingår att upprätta fördelningar av spricktransmissiviteter och sprickvidder i bergmassan, vilket är ett sätt att karakterisera hydrauliska egenskaper hos sprickorna i bergmassan. Indata till fördelningarna fås främst från olika typer av hydrauliska mätningar, t.ex. vattenförlustmätningar. Dessa mätningar ger dock begränsad information om enskilda sprickors egenskaper till följd av mätintervallens



Figur 1-1. En rationell analysprocess från Gustafson et al (2004) som bas för injekteringsdesign. Metoden finns även redovisad och tillämpad i Gustafson (2009) och Fransson (2008). Detta projekt syftar till att underlätta utförande av (2) och (4), samt att ställa rimliga krav på utförande av undersökningar i (1).

A rational analysis process suggested by Gustafson et al (2004) as a basis for grouting design. The method is also presented in Gustafson (2012) and Fransson (2008). This project aims at simplifying analyses according to box (2) and (4) and put reasonable demands on how to conduct the measurements in box (1).

längd och begränsningar i mätnoggrannhet. Genom att behandla mätdata med hjälp av statistiska fördelningar kan dock en indikation fås om enskilda sprickors genomsläpplighet, även för mätningar genomförda i längre mätintervall och för sprickor vars genomsläpplighet befinner sig under mätgränsen.

Paretofördelningen är en statistisk fördelning som har visat sig passa väl för att beskriva den stora spridning som finns mellan olika sprickors genomsläpplighet (transmissivitet), också för sprickor som ligger utanför mätgränsen i vanliga sektionsvisa hydrotester (Gustafson och Fransson 2005). Med

antagande om att en sprickas vattenförande vidd (hydrauliska apertur) kan skattas med kubiska lagen kan en transmissivitetfördelning transformeras till en sprickviddsfördelning, vilket i sin tur kan sättas i relation till inflödeskrav. Därmed kan beräkningar ge en skattning av hur små sprickvidder som måste tätas för att nå ett givet inläckagekrav och utifrån detta kan väl underbyggda val av injekteringsbruk göras. Via dessa beräkningar fås även en indikation på hur komplicerad injekteringsinsatsen kan väntas bli. Beräkningarna utgör dock en tidig prognos av svårighetsgraden framtagna under specifika antaganden, och måste följas upp och uppdateras under injekteringsarbetet.

Den ovan beskrivna designmetodiken för injektering, som inkluderar användning av Paretofördelade hydrauliska sprickvidder, har genomförts i ett antal bergbyggnadsprojekt i Sverige. Exempel på tunnelprojekt är Hallandsåstunneln (Funehag och Gustafson 2004), Törnskogstunneln (Funehag och Gustafson 2005), Nygårdstunneln (Butron et al 2008), TASS-tunneln i Äspölaboratoriet (Funehag och Emmelin 2011) och Citybanan (Axelsson et al 2009). Den har även tillämpats i öppna bergschakt (Runslätt et al 2013). Metoden ger projekteringen av injekteringsinsatser ett rationellt arbetssätt vid val av bruk och har bidragit till tillfredsställande tätningsresultat. Tillvägagångssätt för att använda designmetodiken och Paretofördelningen finns också beskrivet i ett flertal forskningspublikationer, bl.a. Gustafson et al (2004), Gustafson och Fransson (2005), Fransson (2008) och Gustafson (2009).

I många av de ovan nämnda tunnelprojekten har dock designmetodiken införts som en del av ett forskningsprojekt och injekteringsdesign som baseras på statistisk hantering av sprick- och hydrodata har ännu inte nått en allmän och bred spridning. En av anledningarna till detta hänger sannolikt ihop med att användaren av de statistiska analyserna måste kunna formulera olika typer av sannolikhetsfördelningar, samt handgripligen passa och simulera resultat utifrån dessa. Dessutom förekommer ett antal modellantaganden med osäkerheter i analyserna som måste tas hänsyn till. Statistiska utvärderingar av hydrauliska testdata har fått viss spridning och egna verktyg har utvecklats av användarna, men de kräver ofta omfattande handpåläggning och riskerar därför att i mindre utsträckning vara testkörda och felsökta. För att fler i bergbyggnadsbranschen ska kunna tillgodogöra sig metoden för statistiskt

baserad bergkaraktärisering vid injekteringsdesign har därför ett kostnadsfritt och tillgängligt beräkningsverktyg för statistiska beräkningar utvecklats.

1.2 Syfte

Denna rapport ger teoretisk bakgrund och användarhandledning till ett beräkningsverktyg som utför en statistisk utvärdering av data från sektionsvisa hydrotester. Verktøget tar fram fördelningar av spricktransmissiviteter och sprickvidder utifrån Paretofördelningen och resultatet kan sedan implementeras för bergkaraktärisering i injekteringsdesign, exempelvis enligt designmetodiken illustrerad i Figur 1-1. Rapporten belyser även olika typer av möjliga felkällor och osäkerheter i statistiska analyser som kan uppkomma till följd av modellantaganden och vissa typer av indata. Hur dessa osäkerheter och felkällor kan hanteras, samt hur det är möjligt att avgöra när dataunderlaget är av för låg kvalitet tas upp, liksom en kravspecifikation som kan användas som checklista vid datainsamling till verktøget.

Beräkningsverktøget har utvecklats inom ramen för BeFo-projektet "Framtagande av användarhandledning samt utveckling av beräkningsverktøget för injekteringsdesign". Verktøget är upprättat i programvaran Microsoft Excel. Fördelarna med att använda Excel som bas för beräkningar är att programvaran är allmänt spridd och att många har kunskap om hur den används.

Verktøget möjliggör beräkningar som syftar till att ge en ökad konceptuell förståelse för bergmassans hydrauliska egenskaper och underlättar fortsatt undersökning av beräkningskonceptets användbarhet och robusthet vid beskrivning av det vattenförande spricksystemet. Detta har tidigare varit svårt då ett allmänt tillgängligt och väl strukturerat beräkningsverktøget har saknats.

1.3 Avgränsning

Verktøget är utvecklat för att i första hand utgöra ett hjälpmedel för att beskriva en bergmassas sprickviddsfördelning vid injekteringsdesign och riktar sig till användare som redan har kunskap om sprickviddsbaserad injekteringsdesign.

Analyserna som ingår i verktøget är utformade för att passa in i designprocessen för injektering som presenterats av Gustafson et al (2004). Det finns andra sannolikhetsfördelningar än Paretofördelningen som kan användas för att beskriva en bergmassas hydrauliska egenskaper, men eftersom

Paretofördelningen ingår i den ovan beskrivna designprocessen är det den som tillämpas i verktyget.

Beräkningarna bygger på ett antal modellantaganden om bergmassans hydrauliska egenskaper som användaren av verktyget bör känna till och kunna ta ställning till. Exempelvis antas sprickor vara oberoende, vilket medför att summan av enskilda sprickors transmissivitet motsvarar den totala borrhålstransmissiviteten. Det finns dock exempel på olika typer av bergmassa där sådana antaganden visat sig vara mindre lämpliga, t.ex. i mycket uppspruckna bergmassor. Detta, och fler exempel på antaganden, tas upp i del A, Kapitel 4. Det kan även finnas insamlad data som är utgör mindre lämplig indata för beräkningarna, beroende på hur analysresultaten ska användas. Detta diskuteras i del B, Kapitel 8.

1.4 Läsanvisning

Rapporten är indelad i tre delar som kan läsas var för sig. Del A hanterar teori och modellantaganden. Del B fokuserar på insamlandet av data och råd kring detta. Del C innehåller en användarhandledning för excelverktyget, samt dokumentation. En rapport som sådan är statisk i sitt medium, medan datormjukvara förväntas leva ett mer dynamiskt liv. Därför distribueras verktyget tillsammans med en pdf-version av rapporten, tillsammans med en revisionslogg som beskriver förändringar i verktyget och eventuella motsvarande dito i rapporten.

2 INDATA

En central aspekt av injekteringsdesign är att kartlägga hydrogeologiska förhållanden och bestämma bergets förmåga att leda vatten. När grundvattenflödet genom berg ska beskrivas brukar bergmassan betraktas som ett ekvivalent kontinuum. Bergets egenskaper jämnas då ut och ges någon form av effektivvärden. I kontinuumanalyser uttrycks flödesegenskaperna för berg med en hydraulisk konduktivitet K [m/s] som definieras som en proportionalitetskonstant för ett poröst medium i Darcys lag:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl} \quad \text{Ekvation 1}$$

Darcys lag uttrycker att flödet av vatten Q [m³/s] genom ett rör med tvärsnittsarean A [m²] är proportionell mot den hydrauliska gradienten dh/dl [-]. Uttrycket förutsätter även att flödet är laminärt, dvs. att det är möjligt att försumma de tröghetskrafter som uppstår när flödet ändrar riktning (turbulens).

Betraktande av berget som ett kontinuum medför ett förenklat sätt att räkna flöden som underlättar utvärderingar av hydrauliska tester och inflödesberäkningar till injekterade eller oinjekterade tunnlår (Emmelin et al 2007). Beräkningar med kontinuumanalyser har ofta visat sig ge ganska rimliga resultat, under förutsättning att analysen tar hänsyn till i vilken skala det är möjligt att betrakta bergmassan som approximativt homogent. Typiskt för sprickigt urberg är nämligen att det finns en skaleffekt för bergets genomsläpplighet och att främst stora bergvolymmer är lämpliga för antaganden om porösa medium. Gustafson (2009) förtydligar detta genom att visa att det representativa volymselementet (REV) för bergets genomsläpplighet, dvs. den volym när de hydrauliska egenskaperna förblir oförändrade när volymen ökas något, är i storleksordningen hundratals meter per sida. Vid injekteringsdesign är dock frågeställningar vanligtvis kopplade till egenskaper hos enskilda sprickor, vilket motsvarar en betydligt mindre skala. Att kunna beskriva flöden genom enskilda sprickor är därför ett viktigt komplement till storskaliga antaganden om porösa medium.

En spricka kan betraktas som en tvådimensionell struktur med en spalt genom vilken vattnet flödar. Hur mycket vatten som kan transporteras genom sprickan

uttrycks med proportionalitetskonstanten transmissivitet T [m^2/s], som är direkt proportionell mot den hydrauliska konduktiviteten K och akvifärens mäktighet b [m]:

$$T = K \cdot b \quad \text{Ekvation 2}$$

Transmissivitet kan även användas för att uttrycka flödet av vatten från bergmassan till sektioner i borrhål. Sektionens transmissivitet, här efter benämnd intervalltransmissiviteten T_i beräknas då genom att multiplicera den hydrauliska konduktiviteten med sektionens längd L [m].

Transporten av vatten genom en spricka kan också relateras till dess sprickvidd. Den verkliga sprickvidden längs en spricka varierar och flödesfördelningen i sprickan kommer därmed att vara ojämn och svår att karakterisera. Istället utnyttjas den effektiva hydrauliska sprickvidden, vilket förenklar sprickan till en idealiserad, planparallell spalt som ger samma medelflöde som den verkliga sprickvidden. Den hydrauliska sprickvidden b_{hyd} [m] kan kopplas till sprickans transmissivitet T med den kubiska lagen (Snow 1968):

$$b_{hyd} = \sqrt[3]{T \cdot \frac{12\mu_w}{\rho_w g}} \quad \text{Ekvation 3}$$

där μ_w [Pa s] är vattnets viskositet, g [m/s^2] är gravitationskonstanten och ρ_w [kg/m^3] är vattnets densitet.

Parametern hydraulisk sprickvidd och specifikt fördelningen av hydrauliska sprickvidder i bergmassan är en central del av designprocessen för injektering (se Figur 1-1). För att kunna ta fram information om fördelningen av hydrauliska sprickvidder i berg behövs indata från i huvudsak två parametrar:

- 1) Antal sprickor längs borrhål
- 2) Intervalltransmissiviteter utvärderade från sektionssvisa hydrauliska tester längs samma borrhål.

Parametrarna baseras på data från karteringar och hydrauliska tester i kärnborrhål.

2.1 Antal sprickor

Som input till de statistiska analyserna i beräkningsverktyget behövs en uppräknig av antalet öppna sprickor per intervall (sektion) i vilka de sektionsvisa hydrauliska testerna utförs. Förekomst av sprickor i bergmassan redovisas ofta med RQD-värden (Deere and Deere 1988), men RQD är ett generaliserat mått som inte kan relatera sprickantal till de hydrauliskt testade sektionerna.

Praktiskt kan hydrotesters sektioner kopplas till kärnkarteringsprotokoll där varje spricka anges med position på kärnans längdmätning. Det är viktigt att sprickorna är karterade som öppna sprickor eller delvis öppna eftersom läkta (slutna) sprickor ej förväntas bidra till testsektionens vattengenomsläpplighet. Notis om sprickorna är öppna eller läkta ska ges i karteringsprotokollet.

2.2 Intervalltransmissiviteter

Intervalltransmissiviteter utvärderas från sektionsvisa hydrauliska tester, vilka beskrivs kortfattade nedan. Mer utförliga beskrivningar av testmetoderna ges i del B. Vattenförlustmätningar (ibland benämnda injektionstester eller Lugeonmätningar) har länge varit en standardmetod för hydrotester i berg i Sverige. Testmetoden innebär att vatten pressas in i en borrhålssektion under ett visst konstant tryck. För att kunna genomföra mätningar i sektioner skärmas borrhålet ofta av med en så kallad dubbelmanschett. Vanliga sektionslängder är 3 m och 5 m.

Det är även möjligt att utföra mätningar av det naturliga inflödet av vatten i sektioner, dvs. inflödesmätning. Flödet mäts antingen i hela borrhål med successivt ökande längd eller i sektioner med dubbelmanschetter. Det finns också en testmetod som utförs med en så kallad Posiva Difference Flow Logger (PFL), som innebär differensflödesloggning under pumpning (se Kapitel 6).

Data som genereras från injektions- och inflödestester omfattar vattenflöden Q [m^3/s] och trycknivåhöjningar dp [Pa] eller grundvattentryck dh [m]. Med relativt enkla beräkningsformler kan dessa data omvandlas till en beskrivning av bergmassans genomsläpplighet, förutsatt att bergmassan beskrivs som ett homogent kontinuum med en hydraulisk konduktivitet K och en transmissivitet T (Gustafson 2009). Utvärderingsmetoder för injektions- och inflödestester innehåller ofta antaganden om att stationära tillstånd uppnås i

slutet av testet, dvs. att Q och dp eller dh är konstanta. Varje test har dock ett tidsförlopp; de är transienta. Vid transienta utvärderingar av hydrauliska test används data från hela testförloppet för att bestämma en transmissivitet, till skillnad från stationära utvärderingar där enbart slutvärdet används.

Moyes formel (Moye 1967) är en analytisk beräkningsformel som ofta används vid stationär utvärdering av intervalltransmissiviteter vid injektionstest:

$$T = \frac{Q\rho_w g}{2\pi \cdot dp} \left[1 + \ln\left(\frac{L}{2r_w}\right) \right] \quad \text{Ekvation 4}$$

där Q [m³/s] är flödet i slutet av testperioden, dp [Pa] är det konstanta injektionstrycket, ρ_w [kg/m³] är vattnets densitet, g [m/s²] gravitationskonstanten, r_w [m] är borrhålsradie och L [m] är sektionslängd. Ekvationen förutsätter ett tvådimensionellt (radiellt) flöde inom ett avstånd på $L/2$ från borrhålet och i huvudsak tredimensionellt flöde bortom $L/2$ (Moye 1967). Med liknande antaganden härleder Gustafson (2009) en manschettmättningsformel för utvärdering av intervalltransmissivitet för injektionstester:

$$T = \frac{Q}{2\pi \cdot \Delta h} \cdot \ln\left(\frac{L}{r_w}\right) \quad \text{Ekvation 5}$$

Gustafson (2009) beskriver även att om inflödet till en borrhålssektion kommer från en större, öppen spricka så kan intervalltransmissiviteten utvärderas med Thiems brunnsekvation:

$$T = \frac{Q}{2\pi \cdot \Delta h} \cdot \ln\left(\frac{R_0}{r_w}\right) \quad \text{Ekvation 6}$$

i vilken R_0 [m] är influensradien, dvs. det avstånd från injektionspunkten där grundvattennivån är opåverkad. Manschettmättningsformeln är identisk med Thiems brunnsekvation bortsett från att manschettavståndet förekommer på influensradiens plats. Influensradien för manschettmätningar brukar därför oftast anges vara lika med manschettavståndet. Av samma anledning brukar skalan för manschettmätningen vara manschettavståndet (Gustafson 2009).

Vid hydrauliska korttidstester har det även visat sig vara användbart att approximera transmissiviteten till den specifika kapaciteten $Q/\Delta h$ (Fransson 2001):

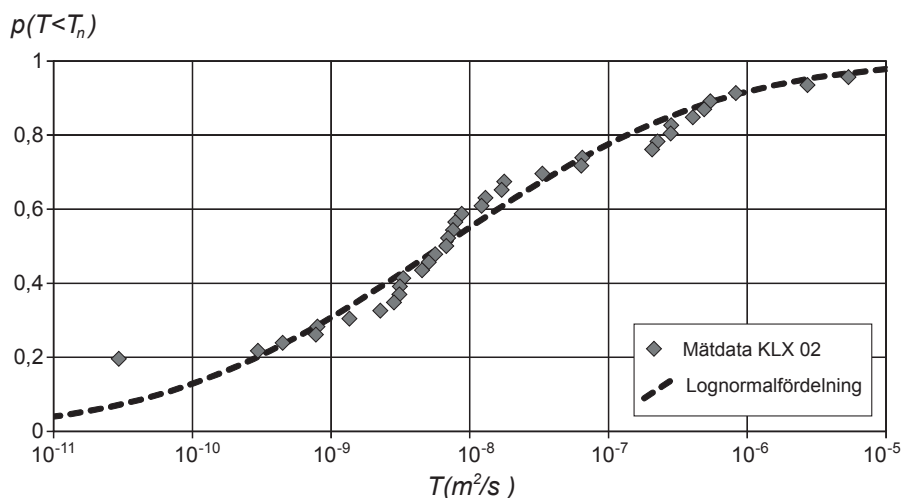
$$T \approx \frac{Q}{\Delta h} \quad \text{Ekvation 7}$$

3 SANNOLIKHETSFÖRDELNINGAR

Statistiska fördelningar är matematiska modeller som underlättar möjligheten att dra slutsatser om händelseutfall från en begränsad mängd data, dvs. osäkra variabler. Osäkerheter hanteras ofta genom att utföra beräkningar med sannolikhetsfördelningar, vari sannolikheten utgör ett mått på hur troligt det är att en viss händelse inträffar (Ang och Tang 2006). En sannolikhetsfördelning beskrivs med hjälp av fördelningsparametrar som tas fram utifrån tillgänglig ingångsdata och sammanfattas ofta med väntevärden och varians. Genom att involvera sannolikhetsfördelningar går det att på ett rationellt och vetenskapligt sätt hantera osäkerheter (bristande kunskap) och variabilitet (naturlig variation) i en eller flera variabler.

Det finns ett antal sannolikhetsfördelningar som ofta dyker upp i sammanhang där bergets egenskaper ska prognostiseras, däribland binomialfördelningen, poissonfördelningen, lognormalfördelningen och Paretofördelningen. I denna rapport ligger fokus på att beskriva Paretofördelningen eftersom den har visat sig väl lämpad för att beskriva sprickors genomsläpplighet och etablerats som en lämplig fördelning i designprocessen för injektering (Gustafson och Fransson 2005).

En fördelning som ofta nämns i sammanhang när hydraulisk konduktivitet eller transmissivitet för berg ska beskrivas är lognormalfördelningen, se Figur 3-1. Det har observerats att hydraulisk testdata (exempelvis från vattenförlustmätningar) vanligtvis har god passning till lognormalfördelningen (Stille et al 2003; Gustafson och Krásny 1994). Gustafson (2009) anmärker dock att även om passningen till huvuddelen av data är god, så är avvikelserna för de högsta värdena stora. Vidare diskuterar även Gustafson (2009) problem som uppstår när en lognormalfördelning ska passas till en censurerad datamängd, dvs. när det saknas mätvärden. Framförallt påverkar detta fördelningen i det lägre mätintervallet och även om det går att bestämma fördelningsparametrar för en lognormalfördelning med censurerad data så ökar osäkerheten i representationen.



Figur 3-1. Kumulativt fördelningsfunktionsdiagram med intervalltransmissiviteter för borrhål KLX02, samt en passad lognormalfördelning. Modifierad från Gustafson (2009).

Cumulative distribution function diagram with interval transmissivities from borehole KLX02 and a log-normal distribution fit to the data. Modified from Gustafson (2009).

3.1 Transmissivetsfördelning

Sannolikhetsfördelningar av sprick- och intervalltransmissiviteter, sektionvisa inflöden, samt sprickvidder redovisas ofta i diagram med en kumulativ fördelningsfunktion (engelskt akronym CDF). Den kumulativa fördelningsfunktionen visar sannolikheten att ett värde som följer en given sannolikhetsfördelning är mindre eller lika med ett visst värde, dvs. $p(X \leq x)$. Den studerade parametern redovisas längs x-axeln och sannolikheten $p(X \leq x)$ anges på y-axeln. Ett exempel på ett diagram med en empirisk CDF för uppmätta intervalltransmissiviteter redovisas i Figur 3-1.

Uppmätta värden för intervalltransmissiviteter eller sektionvisa inflöden kan redovisas med en empirisk CDF om vissa antagande görs om värdenas sannolikhetsfördelning. Om storleksorterade data antas följa en Weibullfördelning beräknas sannolikheten enligt:

$$p(X \leq x) = \frac{n_i}{N + 1} \quad \text{Ekvation 8}$$

där n_i är det storleksorterade värdets nummer och N är det totala antalet värden.

Empiriska fördelningar av sektionsvisa hydrauliska testdata utgör ofta indata för att ta fram sannolikhetsfördelningar för exempelvis bergmassans hydrauliska konduktivitet eller transmissivitet. Sprickviddsanalyser bygger dock på att information finns om enskilda sprickors transmissivitet. Sådana data förekommer sällan då hydrotester ofta utgörs av mätningar i längre sektioner. Det behövs därför en metod som gör det möjligt att skatta transmissiviteten hos intervallsprickorna N_i som tillsammans bygger upp intervalltransmissiviteten T_i .

En metod som förordas av Gustafson (2009) är en iterativ, icke-parametrisk metod som presenterats av Fransson (2002). Metoden bygger på att beräkna sannolikheten för att ett visst intervall med transmissiviteten T_i har en transmissivitet som är högre än transmissiviteten för övriga intervall. Beräkningen av sannolikheten kan utföras på två olika sätt, där det ena innebär att räkna antalet intervall och det andra genom att summera sannolikheterna för enskilda sprickor baserat på kombinatorik. Genom att kombinera dessa två beräkningsmetoder till en ekvation och lösa ekvationen med en Newton-Raphson iteration så åstadkoms punkter i en sannolikhetsfördelning som representerar enskilda, storlekssorterade sprickor. Kombinationen av de två beräkningsmetoderna ställs upp enligt följande ekvation:

$$\frac{I_{\text{tät}}}{I_{\text{tot}}} \approx \frac{\sum_{i=1}^I p(T < T_i)^{N_i}}{I_{\text{tot}}} \quad \text{Ekvation 9}$$

Ekvationen kan förenklas till:

$$I_{\text{tät}} \approx \sum_{i=1}^I p(T < T_i)^{N_i} \quad \text{Ekvation 10}$$

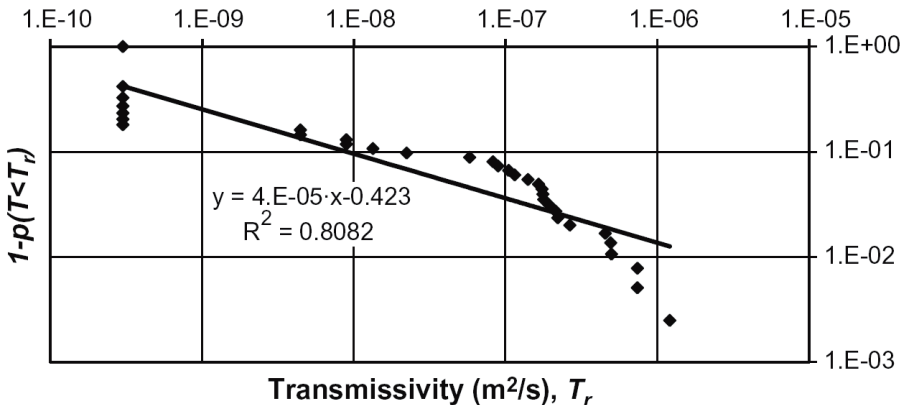
I det vänstra ledet i Ekvation 9 beräknas det förväntade antalet intervall, $I_{\text{tät}}$ av I_{tot} , som har en transmissivitet som är mindre än T_i . I det högra ledet används multiplikationsprincipen för att beräkna sannolikheten att alla sprickor i intervallet N_i är mindre än T_i . Detta summeras för samtliga intervaller och delas med antalet intervaller I_{tot} för att få fram en medelsannolikhet. Uppställningen

av ekvationen förutsätter att sprickor är oberoende av varandra, vilket innebär att den totala transmissiviten för borrhålet är lika med summan av de enskilda sprickornas transmissivitet (Fransson 2002). En annan förutsättning är att den största sprickan i varje intervall i stort sett anger intervalltransmissiviteten.

Vid användande av metoden ställs Ekvation 10 upp för varje testat intervall i borrhålet. Intervallen är storlekssorterade baserat på dess utvärderade transmissivitet (rangen r). Parametern I_r motsvarar antalet intervall med en transmissivitet som är mindre än T_r som är den storlekssorterade transmissiviteten med ordning r :

$$I_r \approx \sum_{i=1}^I p(T < T_r)^{N_i} \quad \text{Ekvation 11}$$

Ekvation 11 appliceras på de testade intervallen och löses med Newton-Raphson iteration. De resulterande värdena på $p(T < T_r)$ för varje intervall motsvarar sannolikheten för att en transmissivitet är mindre än transmissiviteten av den största sprickan inom varje intervall. Värdena plottas i ett kumulativt fördelningsdiagram (se exempel Figur 3-2) och det är utifrån detta kumulativa diagram en Paretofördelning kan anpassas till borrhålsdata.



Figur 3-2. Empirisk CDF med passning av Paretofördelning till spricktransmissivitetsdata från Nygårdstunneln. Från Butron et al. (2010). T-värden längst till vänster i diagrammet motsvarar värden belägna under mätgränsen.
Empirical CDF with fitting of a Pareto distribution to fracture transmissivity data from the Nygård Tunnel. From Butron et al (2010). T-values to the left in the diagram correspond to values below the measurement limit.

3.2 Paretofördelningen

Den sannolikhetsfördelning som används i den föreslagna designprocessen för injektering enligt Gustafson et al (2004) är den så kallade Paretofördelningen. Den är en potenslagsfördelning som med sin exponentiellt avtagande frekvens av en storhets värde reflekterar det typiska variationen i spricktransmissiviteter som finns i sprickigt, kristallint berg, dvs. ett fåtal stora sprickor och många små sprickor (Gustafson och Fransson 2005).

Gustafson och Fransson (2005) presenterar en fördelningsfunktion för Paretofördelningen (Ekvation 12) för att beräkna $p(T < T_n)$, dvs. sannolikheten att transmissiviten för en godtycklig spricka T är mindre än spricktransmissiviteten T_n i ett urval med N storleks sorterade sprickor.

$$p(T < T_n) = 1 - \frac{(T_{\max}/T_n)^k}{N+1} \quad \text{Ekvation 12}$$

Fördelningsfunktionen beräknas utifrån den största spricktransmissiviteten T_{\max} och det totala antalet öppna sprickor N i borrhålet. Funktionen innehåller även en konstant k , som är den så kallade formparameter för Paretofördelningen. Denna formparameter kan, som tidigare nämnts, skattas från en kumulativ fördelningsfunktion med utvärderad spricktransmissivitetsdata (se exempel i Figur 3-2). Detta sker genom att redigera om och logaritmera båda leden i Ekvation 12 enligt:

$$\log[1 - P(T)] = \log\left[\frac{T_{\max}^k}{(N+1)}\right] - k \cdot \log(T_n) \quad \text{Ekvation 13}$$

Ekvation 13 beskriver en rät linje med lutningskoefficienten $-k$ i ett logaritmiskt diagram. En metod att bestämma ekvationen för den räta linjen är att plotta spricktransmissivitetsdata i ett dubbellogaritmiskt diagram och bestämma funktionsparametrar genom att anpassa en potenslagstrendlinje med minsta kvadratmetoden. I Excel är detta standard för "lägg till trendlinje" i diagram. Passningen kan även genomföras med Maximum likelihood-metoden (MLE), vilket är att föredra för trendlinjepassning för paretofördelade datamängder¹. Clauset et al (2009) implementerar MLE genom att göra en passning med start i varje datapunkt, testa passningen med Kolmogorov-Smirnovs test (KS) och

¹ Martin Stigsson, Raymond Munier (SKB) personlig korrespondens per 2015-01-14

använda den passning som ger bäst KS-värde. Båda passningarna innebär antaganden om att sprickorna är oberoende (se vidare i Kapitel 4). Ekvationen för trendlinjen har formen enligt Ekvation 14, där C är en konstant i funktionen och k är formparametern:

$$y = C \cdot T^{-k} \quad \text{Ekvation 14}$$

Gustafson och Fransson (2005) visade att om rangen $r=N-n+1$ introduceras kan transmissiviteten för en spricka med rangen r beräknas enligt:

$$T_r = T_{\max} / r^{1/k} \quad \text{Ekvation 15}$$

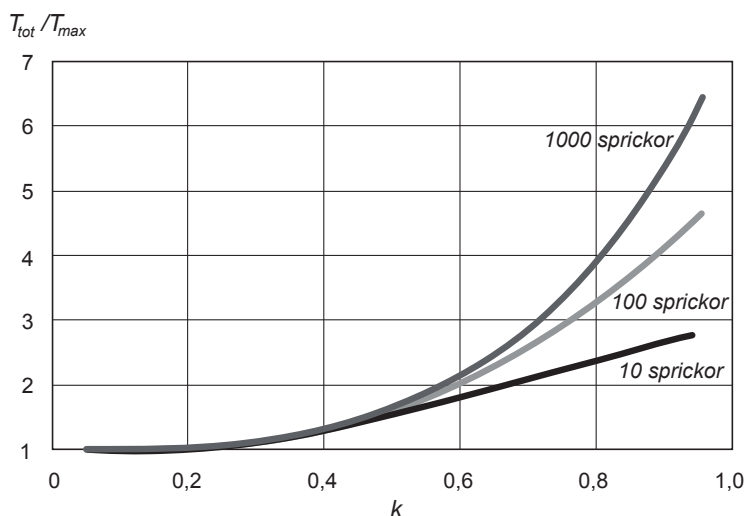
Den totala transmissiviteten för sprickorna längs borrhålet kan därför uttryckas med följande samband:

$$T_{\text{tot}} = T_{\max} \cdot \sum_{r=1}^N \frac{1}{r^{1/k}} \quad \text{Ekvation 16}$$

Ur Ekvation 16 är det möjligt att bestämma transmissiviteten för den största sprickan T_{\max} genom att beräkna kvoten mellan den totala transmissiviteten för alla testade sektioner T_{tot} och summan $\left[\frac{1}{1^{1/k}} + \frac{1}{2^{1/k}} + \dots + \frac{1}{N^{1/k}} \right]$. Med kända värden på formparametern k , största spricktransmissiviten T_{\max} , och antalet sprickor N , kan därefter transmissiviteten T_n för en valfri spricka i det storleksordnade urvalet beräknas med Ekvation 15.

I Figur 3-3 presenteras ett diagram som avslöjar egenskaper hos Paretofördelningen avseende relationen mellan formparametern, antalet sprickor och transmissiviteten hos den största spricka i förhållande till transmissiviteten för hela borrhålet. Gustafson (2009) förtydligar:

- Om det är få sprickor i ett intervall är den största sprickan alltid av samma storleksordning som intervalltransmissiviteten.
- Om $k < 1/2$ är den största sprickan alltid av samma storleksordning som intervalltransmissiviteten.
- Ju större värde på k , desto mindre är spridningen mellan spricktransmissiviteter. Dock utgör den största sprickan fortfarande en väsentlig del av den totala transmissiviteten.



Figur 3-3. Kvoten mellan transmissiviteten för hela borrhålet och transmissiviteten hos den största sprickan T_{tot}/T_{max} som funktion av olika värden på formparametern k och olika antal sprickor (modifierad från Gustafson 2009). *The ratio between the borehole transmissivity and the transmissivity of the largest fracture, T_{tot}/T_{max} , as a function of the formparameter k of the Pareto distribution and the number of fractures. Modified from Gustafson (2009).*

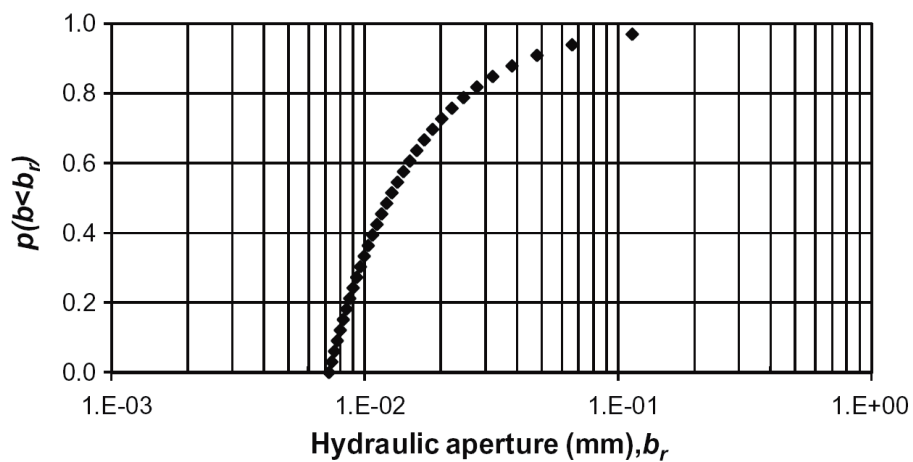
De Paretofördelade spricktransmissiviteterna kan sättas i direkt proportionalitet till en statistisk fördelning av hydrauliska sprickvidder genom att använda den kubiska lagen. Detta innebär att sprickvidderna också följer en Paretofördelning, men med formparametern $3k$.

$$b_r = b_{max} / r^{1/3k} \quad \text{Ekvation 17}$$

Fördelningsfunktion för aperturer $p(b < b_r)$ får följande utseende (jämför med Ekvation 12):

$$p(b < b_r) = 1 - \frac{(b_{max}/b_r)^{3k}}{N+1} \quad \text{Ekvation 18}$$

Sprickviddsfördelningen kan redovisas i ett kumulativt fördelningsdiagram, se exempel i Figur 3-4.



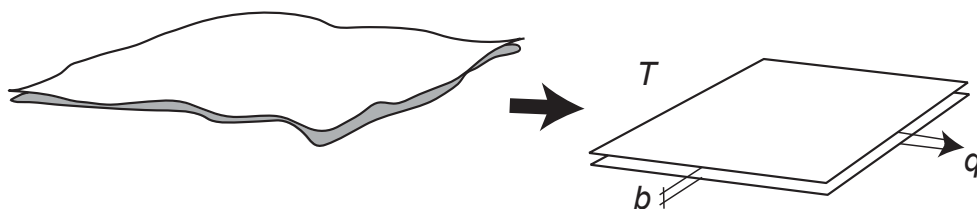
Figur 3-4. Beräknad hydraulisk sprickviddsfördelning för data från Nygårdstunneln.
Från Butron et al (2010).
*Calculated hydraulic aperture distribution for data from the Nygård Tunnel. From
Butron et al (2010).*

4 MODELLANTAGANDEN

De beräkningsmodeller som presenterats i Kapitel 2 och 3 utgör en del av en metod som används för att beskriva sprickors hydrauliska egenskaper för injekteringsdesign. Modellerna baseras på ett antal förenklingar och nedan följer en redogörelse för centrala antaganden, samt hur dessa påverkar beskrivningar av verkliga förhållanden.

Grundvattenströmning till ett borrhål eller en tunnel i ett sprickigt berg behandlas generellt analogt med grundvattenströmning i ett poröst medium, med antagande om en lokal homogenitet och laminärt flöde. Att hantera berget som ett kontinuum underlättar exempelvis utvärderingar av hydrauliska tester och beräkningar av inläckage, men variabiliteten hos bergmassans egenskaper medför att kontinuummodeller främst är lämpliga att använda vid analyser av grundvattenflöden i stora bergvolymmer (Emmelin et al 2007).

En central del av i designprocessen för injektering är att studera grundvattenflödet i individuella sprickor, dvs. att kunna genomföra diskreta analyser av enskilda sprickor. En vanlig förutsättning för diskret analys av sprickor är att anta att sprickor kan beskrivas som tvådimensionella grundvattenledare (med kubiska lagen) och att ett hydrauliskt effektivvärde för sprickvidden kan kopplas till sprickans transmissivitet (Gustafson 2009), se Figur 4-1. Så även om en verklig spricka har både varierande vidd och kontaktytor, så bygger den kubiska lagen på att sprickor kan idealiseras som en spalt mellan två planparallella, släta ytor. Generellt fungerar denna förenkling bättre för stora, öppna sprickor än för små sprickor med stor andel kontaktytor (se t.ex. Witherspoon et al 1980).



Figur 4-1. Sprickan som tvådimensionell grundvattenledare. Modifierad från Gustafson (2009).

A fracture as a 2D-conductor of groundwater. Modified from Gustafson (2009).

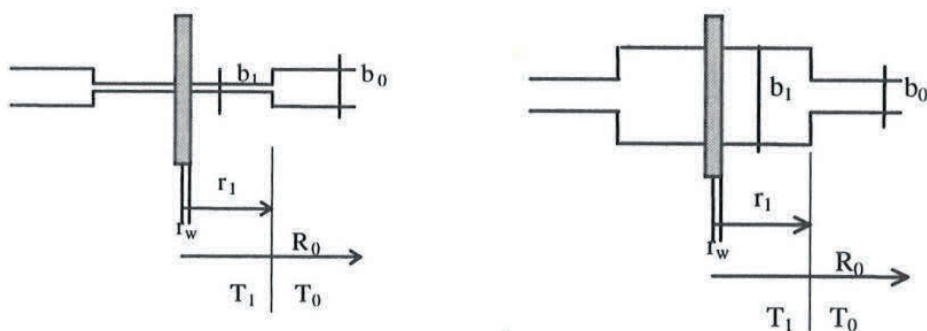
Ett annat centralt antagande är att sannolikheten är stor att det finns flera sprickor i en testad sektion som bidrar till det totala sektionsflödet. När en spricktransmissivitetfördelning ska bestämmas utifrån sektionsvisa mätdata antas den största sprickan i intervallet vara av samma storleksordning som intervalltransmissiviteten (Fransson 2002). En sådan skattning ger ingen information om de mindre sprickorna i intervallet. En förenkling av analysen som är möjlig att genomföra är att sätta sprickantalet till 1 i varje sektion, vilket beräkningsmässigt innebär att den största sprickan får samma transmissivitet som intervalltransmissiviteten. Exempelvis kan det vara lämpligt att sätta sprickantal till 1 i välkonnekterade krosszoner där enskilda och oberoende sprickor ej kan urskiljas. Beräkningar med sådana antaganden bör dock prövas i känslighetsanalyser (t.ex. genom att testa olika sprickantal och utvärdera resulterande sprickvidder), speciellt vid användning för bruksval.

De hydrauliska egenskaperna hos sprickorna antas vara statistiskt oberoende, vilket innebär att de inte påverkas av egenskaperna hos närliggande sprickor (Fransson 2002). Detta medför att den totala borrhålstransmissiviteten utgör en summa av de enskilda sprickornas transmissivitet och att intervalltransmissiviteten är summan av transmissiviteterna hos de genomborrade sprickorna. Forskning har dock visat att effekten av att täta en större vattenförande struktur (zon) kan påverka vattenföringen i mindre icke-tätade strukturer (se t.ex. Emmelin et al 2004). I praktiken går det därmed inte att utesluta att de genomborrade sprickorna är konnekterade (förbundna) och beroende av varandra. Det är därför upp till den enskilda användaren att avgöra om beräkningsmetodens antagande om oberoende sprickor är lämplig för den datamängd som analyseras.

Att ta hänsyn till konnektiviteten mellan sprickor kan vara särskilt viktigt då paretofördelade sprickvidder tillämpas på inläckageberäkningar, dvs. steg 6 i designprocessen (Figur 1-1). Exempelvis har Fransson och Hernqvist (2010) visat att inläckageberäkningar som utförs enligt metod beskriven i Kapitel 5 riskerar att underskatta inflöden i bergmassor med välkonnekterade spricknätverk och överskatta inflöden i dåligt konnekterade spricknätverk. Det kan även vara viktigt att ta hänsyn till att generella hydrauliska egenskaper hos bergmassans spricknätverk kan skilja sig mellan olika typer av geologiska domäner, dvs. att det förekommer olika hydrauliska domäner. I sådana fall kan

det vara lämpligt att urskilja olika hydrauliska domäner (t.ex. i data från olika borrhål) och utföra separerade sprickviddsfördelningar för sektioner tillhörande olika domäner, snarare än att utföra en övergripande analys med samtliga sektioner.

Utvärderingar av hydrauliska tester vid antaget stationära förhållanden representerar ofta en lokal transmissivitet i nära anslutning till borrhålet (Fransson 1999). I de beräkningsmodeller som ges i Kapitel 2.2 (Moyes, Q/dh etc.) antas att dessa lokala värden representerar spricktransmissiviteter i en större skala (t.ex. som input för ininflödesskattningar). Fransson (1999) diskuterar dock att borrhål kan träffa mer eller mindre täta delar av sprickplan och att den utvärderade transmissiviteten kan motsvara ett lokalt värde som inte är representativt i en större skala. Vid en lokalt större vidd är den uppmätta hydrauliska sprickvidden av samma storleksordning som den effektiva för hela sprickplanet (se Figur 4-2). Mätningen ger därmed en rättvisande bild av injekterbarheten av sprickan. Vid en lokalt mindre vidd där mätningen sker hindras inträngningen (Figur 4-2) och det är mindre sannolikt att den ger en bild av sprickplanets effektiva egenskaper. En spricka kan därför ha en större hydraulisk apertur än det lokala värdet utvärderat i borrhålet (Fransson 1999).



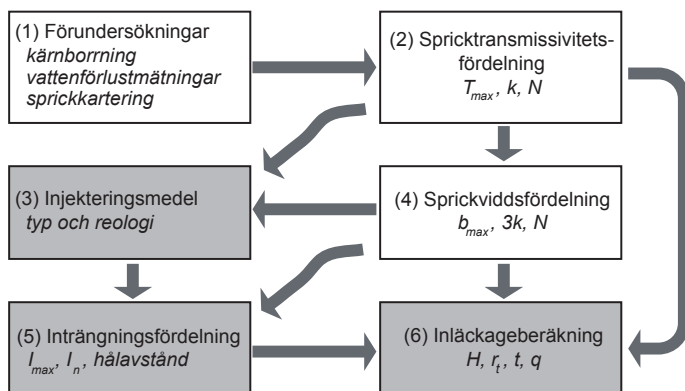
Figur 4-2. Principskiss med två sprickvidder med varierande radiell utbredning (t.v. lokalt liten sprickvidd nära borrhål, t.h. lokalt stor sprickvidd nära borrhålet). Från Fransson (1999).

Sketch of two apertures with varying radial extension (left: locally small aperture close to borehole, right: locally large aperture near borehole). From Fransson (1999).

5 TILLÄMPNING I DESIGNPROCESSEN

Framtagande av transmissivetsfördelningar och sprickviddsfördelningar utgör två inledande steg i designprocessen för injektering och är avgörande för att kunna utföra de avslutande stegen; (3) val av injekteringsmedel, (5) inträngningsfördelning och (6) inläckageberäkning (se Figur 5-1).

Den resulterande fördelningen av spricktransmissiviteter och sprickvidder används inledningsvis i designmetodiken för att beräkna den minsta hydrauliska sprickvidd b_{min} som behöver tätas för att uppfylla ett täthetskrav, den s.k. dimensionerande minsta sprickvidden. Därefter är det möjligt att välja injekteringsmedel som kan uppfylla krav på penetrationsförmåga och bestämma medlets reologiska egenskaper.



Figur 5-1. Designprocess för injektering (Gustafson et al 2004).

A design process for grouting (Gustafson et al 2004)

5.1 Inflödesberäkning

För att bedöma den minsta dimensionerande sprickvidden behövs en inflödesskattning som lämpligen utförs baserat på sprickviddsfördelningen. Den metod som förordas av Gustafson (2009) bygger på att varje enskild spricka bidrar till det totala inläckaget och genom att täta sprickor inom ett visst viddintervall reduceras inflödet till en viss nivå. Den minsta hydrauliska vidd som måste tätas för att nå inläckagekravet, dvs. den dimensionerande sprickvidden, kan beräknas genom att successivt ta bort sprickor från sprickviddsfördelningen till dess att det kvarvarande inflödet q uppfyller täthetskraven.

En ekvation som ofta tillämpas vid inläckageberäkning till injekterade tunnlar är:

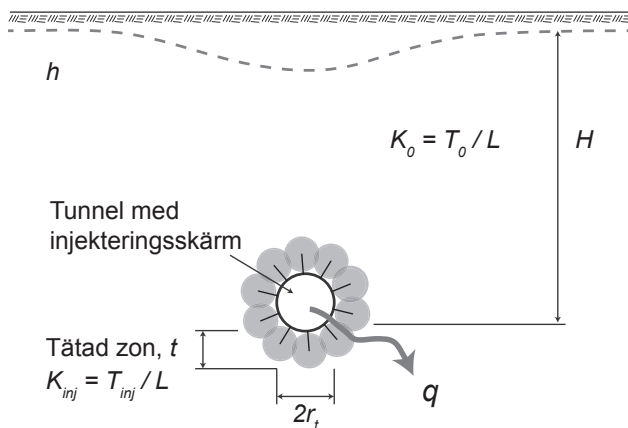
$$q = \frac{2\pi \cdot T_{tot} / L \cdot H}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \left(\frac{T_{tot}}{T_{inj}} - 1\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{r_t}\right) + \xi} \quad \text{Ekvation 19}$$

Ekvationen presenterades av Alberts och Gustafson (1983) och behandlar tunneln som ett förstorat horisontellt borrhål i ett poröst medium. För att kunna genomföra inläckageberäkningen (Ekvation 19) behövs information om transmissiviteten före injektering T_{tot} och transmissivitet efter injektering T_{inj} , även kallad resttransmissivitet (Gustafson 2009). I metoden antas resttransmissiviteten T_{inj} motsvara den summerade transmissiviteten för de sprickor som inte tätas (dvs. de som är mindre än den dimensionerande sprickvidden), och beräknas enligt (Gustafson 2009):

$$T_{inj} = T_{tot} - T_{max} \cdot \sum_1^{r_{inj}} \frac{1}{r^{1/k}} \quad \text{Ekvation 20}$$

där T_{tot} är transmissiviteten för alla testade sektioner och r_{inj} är antalet sprickor som injekteras.

Övriga parametrar i inläckageekvationen är avstånd till grundvattennivån ovanför tunnelsulan H och medeltjocklek för den tätade zonen t , se även Figur 5-2. Skinfaktorn ξ är en korrigeringsfaktor för avvikelser i flödesmotstånd som uppträder i den delvis vattenmättade zonen i tunnelns närhet (som ej härleds till injektering). Skinfaktorn är erfarenhetsmässigt större i tätare bergmassa (Gustafson 2009) och har som exempel beräknats till 5 för Äspötunneln (Rhén et al 1997).



Figur 5-2. Principskiss av inflöde till en förinjekterad tunnel (modifierad från Gustafson 2009).

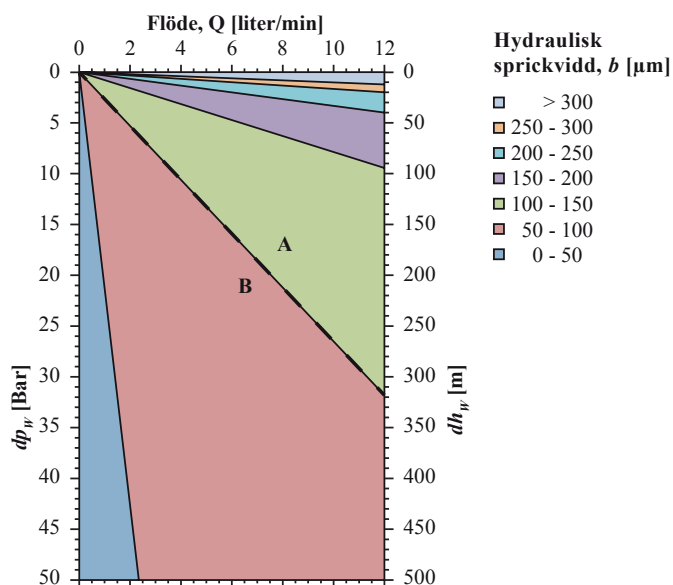
Sketch of flow to a pre-grouted tunnel (modified from Gustafson 2009)

5.2 Inträngning och val av injekteringsmedel

När den dimensionerande sprickvidden är bestämd kan krav ställas på injekteringsmedlets penetrationsförmåga, dvs. medlets förmåga att komma in i den minsta dimensionerande sprickan (Gustafson et al 2004). Val av egenskaper hos injekteringsmedlet görs därefter utifrån av en beräknad inträngningslängd i den minsta sprickan såväl som den största sprickan.

I designprocessen ingår att teoretiskt beräkna villkor för skärmöverlapp så att det blir en (teoretisk) kontinuerligt tätad zon runt tunneln, vari inträngningen i den minsta sprickan är dimensionerande för hålavstånd och hålmönster. Överlappens storlek väljs schablonmässigt som en procentuell andel av borrhålsavståndet med viss hänsyn tagen till sprickgeometrier (Jansson et al 2011). Även den största sprickan kan vara av intresse med hänsyn till att spridning av injekteringsmedel i den största sprickan kan behöva begränsas; både med avseende på total volym och längsta avstånd ut i bergmassan.

En illustration av tillvägagångssättet för att välja typ av bruk ges i Figur 5-3. I figuren presenteras ett bruksvalsdiagram (Fransson 2009) som baseras på utvärdering av penetrationsförmågan hos olika bruk och hur det för ett projekt kan kopplas till flöde, skillnader i tryck- eller grundvattennivå, samt hydraulisk apertur.



Figur 5-3. Bruksvalsdiagram baserat på penetrationsförmåga där område A indikerar cementbaserade bruk och område B fintättningsbruk (områdena är separerade med streckad linje). Ingående parametrar i diagrammet är flöde, skillnader i trycknivå eller grundvattennivå, samt hydraulisk apertur för den minsta dimensionerande sprickan. Modifierad från Fransson (2009).

Grout type selection diagram based on penetrability where area A indicates cement-based grout types and area B indicates grouts for fine aperture sealing (the areas are separated with a dashed line). The included parameters are flow, changes in pressure or head, and hydraulic aperture for the smallest fracture to be sealed. Modified from Fransson (2009).

5.3 Tillämpligheten av modeller och indata

Tillämpligheten av ovan givna beräkningsmodeller för inläckage, inträngningslängder och bruksval beror på hur väl den aktuella bergmassan motsvarar de antaganden som nämns i Kapitel 4, såsom skala, konnektivitet mellan sprickor, och förekomsten av kontaktytor inom sprickor. Vidare antas de transmissivitetsvärden som utvärderas från hydrauliska tester kunna representera bergets egenskaper.

Det finns dock studier som visat att transmissivitetsvärden tolkade med olika typer av hydrauliska test skiljer sig åt, och att de därmed är olika lämpade för olika applikationer. Resultat från hydrauliska tester och dess tillämpbarhet för studier av hydrauliska egenskaper har exempelvis undersökt av Follin och Ludvigson (2011). De studerade varför transmissivitet tolkade med

injektionstester skiljer sig från transmissiviteter tolkade med flödesloggning (PFL). Enligt deras undersökning är huvudorsaken till skillnaden att mätningar vid flödesloggning sker efter flera dagars pumpning, medan injektionstester endast pågår under ca 20 minuter. Korttidstester kan resultera i höga transmissiviteter fastän spricknätverket är dåligt konnekterat. Vid ett lägre transmissivitetsspann (register) kan alltså injektionstester förväntas ge större värden än flödesloggning.

Follin och Ludvigson (2011) anmärker också att injektionstester kan mäta vattenförluster i isolerade, öppna sprickor som inte är konnekterade med det övriga spricksystemet. Detta kan påverka inflödesprognoser som baseras på data från injektionstester, främst eftersom det ökar sannolikheten att överskatta bergmassans genomsläpplighet. Å andra sidan upptäcker en flödesloggning inte isolerade sprickor eller isolerade kluster av sprickor längs borrhål, vilket kan vara en nackdel i analyser för injekterbarhet. I sådana fall är injektionstester mer lämpade eftersom de efterliknar en injektering (Hernqvist et al 2012).

REFERENSER DEL A

Alberts C, Gustafson G, 1983. Undermarksbyggande i svagt berg – Del 4 Vattenproblem och tätningåtgärder. BeFo Rapport 106, Stiftelsen Bergteknisk Forskning.

Ang A H-S, Tang W H, 2006. *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*, 2nd Edition. Wiley.

Axelsson M, Eriksson M, Wilén P, 2009. *Implementation of grouting research in underground projects*. Nordic Symposium of Rock Grouting on 5th November, 2009. Helsingfors, Finland.

Butrón C, Gustafson G, Funehag J, 2008. Grouting in the Nygård Tunnel: Pre-Grouting Design for Drip Sealing and Evaluation. Publ. 2008:2. Institutionen för bygg- och miljöteknik. Chalmers tekniska högskola.

Butrón C, Gustafson G, Fransson F, Funehag J, 2010. Drip sealing of tunnels in hard rock: A new concept for the design and evaluation of permeation grouting. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25,114–121

Clauset A, Shalizi CR, Newman M.E.J, 2009 "Power-law distributions in empirical data" *SIAM Review* 51(4), 661-703 (2009). (arXiv:0706.1062, doi:10.1137/070710111)

Deere D U, Deere D W, 1988. *The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice*. In L. Kirkaldie (ed.), *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM Special Publication 984, 91-101 Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.

Emmelin A, Eriksson M, Fransson Å, 2004: Characterisation, design and execution of two grouting fans at 450 m level, Äspö HRL. R-04-58. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Emmelin A, Brantberger M, Eriksson M, Gustafson G, Stille H, 2007. Rock grouting – Current competence and development for the final repository. R-07-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Eriksson M, Stille H, 2005. Cementinjektering i hårt berg. SveBeFo rapport K22. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm.

Follin S, Ludvigson J-E, 2011. A comparison between standard well test evaluation methods used in SKB's site investigations and the generalised radial flow concept. P-06-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Fransson Å, 1999. Grouting Predictions Based on Hydraulic Tests of Short Duration: Analytical, Numerical and Experimental Approaches. Licentiatuppsats, Chalmers tekniska högskola.

Fransson Å, 2001. Characterisation of fractured rock for grouting using hydrogeological methods. Doktorsavhandling. Chalmers tekniska högskola.

Fransson Å, 2002. Nonparametric Method for Transmissivity Distributions Along Boreholes. *Ground Water* 40 (2), 201-204.

Fransson Å, 2008. Grouting design based on characterization of the fractured rock - Presentation and demonstration of a methodology. R-08-127. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Fransson Å, 2009. Selection of grouting material based on a fracture hydraulic aperture assessment. Nordic Symposium of Rock Grouting, Helsinki, Finland.

Fransson Å, Hernqvist L, 2010. *Geology, Water Inflow Prognosis and Grout Selection for Tunnel Sealing: Case Studies from Two Tunnels in Hard Rock, Sweden*. ITA-AITES World Tunnel Congress. Vancouver, May 17-19.

Funehag J, 2011.Handledning för injektering med silica sol - för tätning i hårt berg. BeFo Rapport 118. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.

Funehag J, Emmelin A, 2011. Injekteringen av TASS-tunneln Design, genomförande och resultat från förinjekteringen. R-10-39. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Funehag J, Gustafson G, 2004. Injekteringsförsök med Cembinder® U22 i Hallandsås. Publ. 2004:1. Institutionen för bygg- och miljöteknik. Chalmers tekniska högskola.

Funehag J, Gustafson G, 2005. Grouting with silica sol in the Törnskog Tunnel. Grouting design for silica sol in full production. Publ. 2005:12. Institutionen för bygg- och miljöteknik. Chalmers tekniska högskola.

Gustafson G, 2009. *Hydrogeologi för bergbyggare*. Forskningsrådet Formas.

Gustafson G, 2012. *Hydrogeology for rock engineers*, BeFo.

Gustafson G, Fransson Å, 2005. The use of the Pareto distribution for fracture transmissivity assessment. *Hydrogeology Journal* 14 (1), 15-20.

Gustafson G, Fransson Å, Funehag J, Axelsson M, 2004. Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering. *Väg och Vattenbyggaren* 4, p. 10-15.

Gustafson G, Krásny J, 1994. Crystalline rock aquifers: Their occurrence, use and importance. *Hydrogeology. Journal* 2: 64-75.

Hernqvist L, Butrón C, Fransson Å, Gustafson G, Funehag J. (2012). A hard rock tunnel case study: Characterization of the water-bearing fracture system for tunnel grouting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 30, p132-144.

Jansson T, Funehag J, Granberg N, Jonsson H, 2011. Underhållstätning av mediatunnel i Göteborg - design och utförande av efterinjektering. BeFo rapport 105. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.

Moye D G, 1967. Diamond drilling for Foundation Exploration. *Civil Engineering Transactions*, April 1967, pp 95-100.

Rhén I, Bäckblom G, Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997. Äspö HRL - Geoscientific evaluation 1997/2. Result from pre-investigations and detailed site characterization. TR 97-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Runslätt E, Creütz M, Hässler L. 2013. *Groutability of the rock mass using fracture statistics*. Proceedings 7th Nordic Grouting Symposium, Göteborg, Sverige 2013.

Snow D T, 1968. Rock fracture spacings, openings and porosities. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 94 73-91.

Stille, H., Andersson, J., Olsson, L. (2003). Information based design in rock engineering. SveBeFo rapport 61. Swedish Rock Engineering Research.

Witherspoon P Am Wang J S Y, Gale J E. 1980. Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture. Water Resources Research, Vol. 16, no. 6.



www.wordle.net

DEL B - TILLÄMPNING

I del B ges en beskrivning av och rekommendationer för insamling av fältdata som ligger till grund för analyserna.

6 FÄLTMÄTNING - UNDERSÖKNINGSMETODER

För att utföra en sprickviddsfördelningsanalys krävs antal sprickor och transmissivitet per mätsektion och det finns ett antal olika metoder för att samla in erforderlig data. De vanligast förekommande undersökningsmetoderna är:

- Kärnbörning
- Hammarbörning
- Vattenförlustmätning
- Naturligt inflödestest
- Kärnkartering
- Borehole Image Processing system, BIPS

Till dessa undersökningsmetoder finns det ett antal standarder och metodbeskrivningar, listade nedan, som beskriver utförande och ger rekommendationer och som alltid ska ligga till grund vid planering och utförande av undersökningar av bergmassans egenskaper.

1. *Svensk standard - Geoteknisk undersökning och provning - Provtagning genom borrhings- och utgrävningssmetoder och grundoattenmätningar, del 1 - Tekniskt utförande (SS-EN ISO 22475-1:2006)*
2. *Metodbeskrivning för jord-bergsondering (SGF Rapport 4:2012)*
3. *Svensk standard. Geoteknisk undersökning och provning – Geohydraulisk provning, del 2 - Bestämning av hydraulisk konduktivitet i öppna borrhål (SS-EN ISO 22282-2:2012)*
4. *Svensk standard. Geoteknisk undersökning och provning – Geohydraulisk provning, del 3 - Vattenförlustmätning i berg (SS-EN ISO 22282-3:2012)*
5. *Svensk standard. Geoteknisk undersökning och provning – Benämning och indelning av berg, del 1 – Benämning och beskrivning (SS-EN ISO 14689-1:2004)*
6. *Geoteknisk fälthandbok (SGF Rapport 1:2013)*

Nedan finns en introduktion till respektive undersökningsmetod, följt av ett avsnitt med författarnas rekommendationer för val av lämpliga metoder.

6.1 Kärnbörning

Vid kärnbörning används en ringborrkrona försedd med diamanter som rotationsborras in i berg för att på så vis få en om möjligt kontinuerlig

bergkärna. Kärnan tas vanligtvis upp i 1,5 m till 3 m intervall och läggs i kärnlådor för att senare kunna karteras och dokumenteras. Iakttagelser och avvikelser i fält dokumenteras i protokoll och på kärnlådorna. Exempel på avvikelser som är av intresse för analysen och för en fördjupad förståelse av berget är kärnförlust, dvs. om berget är så pass svagt/vittrat/uppsprucket att en kontinuerlig borrhärrör inte kan fås; spolvattenförlust, dvs. en spricka som upptar stora delar av det vatten som kyler borrhärröret och sköljer ut borrhärrör; och mekaniska brott på kärnan (orsakade av exempelvis borrhärrörningen, kärnupptag m.m.) som alltså inte ingår i tolkningen av berget.

Vid kärnborrhärrörning från markytan krävs det generellt foderrörborrhärrörning om det finns jord ovan berg. Den översta delen av ytberget kan generellt vara mer uppsprucken än bergmassan längre ned i borrhärröret. Detta kan dels försvåra tolkningen för övergången mellan jord och berg och dels att foderröret måste installeras ett par meter ner i berget vilket medför att det kommer att skugga de hydrauliska testerna för detta område. Det är med andra ord svårt att undersöka övergången mellan jord och berg, framförallt om ytberget är uppsprucket. Det är därför extra viktigt att borrhärröraren noggrant dokumenterar eventuella iakttagelser och avvikelser vid borrhärrörningen.

6.1.1 Kärnborrhärrörningsmetoder

Det finns flera olika system som används vid kärnborrhärrörning så som singel-, dubbel- och trippeltubsystem. Fördelen med ett dubbel- eller trippeltubsystem är att spolmediet transporteras i mellanrummet mellan två av tuberna i kärnfångarröret och på så vis skyddas borrhärrörningen från erosion och mekanisk påverkan. En annan fördel med dubbel- och trippeltubsystem är att risken för att rotationsborrhärrörningen orsakar ett mekaniskt brott i kärnan är mindre än vid borrhärrörning med ett singeltubsystem då kärnfångarröret inte roterar med som för ett singeltubsystem.

6.1.2 Krav på provtagning

I *Svensk standard Geoteknisk undersökning och utförande* finns tre kategorier, A, B och C, som beskriver hur stort eller ostört ett prov är vid provtagning av berg. Kategori A ställer högst krav vid provtagningen och ger minst påverkan på provet och kategori C ställer lägst krav vid provtagningen och ger sålunda störst påverkan vid provtagningen. Beroende på bergets egenskaper kan

exempelvis kategori A uppnås med alla tre kärnbörningsystemen varvid en diskussion alltid rekommenderas med borrharen för bestämning av relevant borrhmetod. Generellt gäller att om berget är kraftigt vittrat, uppsprucket, instabilt bör dubbel- eller trippeltubsystem användas då spolvattnet flödar i en separat kanal och inte kan erodera och skada provtaget berg ytterligare. Användande av enkel eller dubbeltubsystem medför generellt att kraven för kategori B uppfylls. Vid användande av trippeltubsystem uppfylls generellt kraven för kategori A.

6.2 Hammarborrning

Hammarborrning är en förstörande borrhmetod som bygger på att en borrhkrona roterar samtidigt som den knackar (slås) och krossar berget. Till skillnad från vid kärnbörning fås ingen borrhkärna varför det är av stor vikt att alla avvikelser dokumenteras under borrhningen så som borrhjunkning, borrhstopp, slag, spolvattenförlust etc. Fördelen med hammarborrning är att borrhjunkningen är mycket större i jämförelse med kärnbörning. Metoden medför även att borrhålets väggar blir förhållandevis ojämna i jämförelse med ett kärnborrat hål.

Ett viktigt krav som finns beskrivet i *Svensk standard för Vattenförlustmätning i berg* (SS-EN 2012) är att vald borrhmetod ska kunna producera ett borrhål med en jämn borrhålsvägg. Syftet med kravet är att vid vattenförlustmätningar minimera risken att manschetter inte sluter tätt mot borrhålsväggen, vilket kan leda till ett oönskat läckage runt manschetter och en överskattning av uppmätt vattenförlust.

6.3 Sprickkaraktärisering av bergmassan

Det finns två metoder som kan användas för sprickkaraktärisering av bergmassan, kartering av en fysisk borrhkärna eller kartering av en "digital" borrhålsprojektion dokumenterad med BIPS.

Bergmassan karteras med avseende på antal sprickor och sprickornas läge längs borrhålet. Antal sprickor är central information för att kunna utföra sprickviddsfördelningsanalysen. Sprickornas läge är viktigt att dokumentera då de korreleras mot testintervallen för de hydrauliska testerna. Bergmassan kan även karteras med avseende på bergart, struktur och sprickegenskaper

(geometri, fyllnad, vittring etc) vilket inte är nödvändig information för en sprickviddsfördelningsanalys men kan användas för annan projektering.

Det är även viktigt att dokumentera om sprickorna bedöms vara läkta, öppna eller öppna och vattenförande då det endast är de naturligt öppna sprickorna som ska inkluderas i analysen. Övrig information som är av betydelse är dokumenterade avvikelser så som kärnförlust samt svaghets- och sprickzoner.

Det är viktigt att i karteringsdokumentationen dokumentera information från borrharen, såsom läge för mekaniskt orsakade sprickor, kärnförlust, hugg, borrhållstopp, spolvattenförlust etc. Om hänsyn ej tas till borrhållsrelaterade osäkerheter kan antalet sprickor överskattas vilket i sin tur bland annat kan påverka sprickviddsfördelningsanalysen. Ett verktyg som kan hjälpa till med tolkningen av kärnan är BIPS.

6.3.1 Borrhållskamera – BIPS

Att fotografera/scanna ett borrhålls väggar med en borrhållskamera kan fungera som ett komplement till en kärnkartering eller vara underlag för en kartering om ingen borrhållskärna finns, till exempel om borrhålet har hammarborrats. Borrhållsväggen presenteras som en planprojektion där en geologisk kartering kan utföras med hjälp av en datormjukvara. I vissa fall kan det vara svårt att bedöma tolkningen för sprickor i synnerhet om sprickornas vidd eller apertur är liten (Strähle 2001). Det är generellt mycket svårt att från borrhållsfotografering avgöra om en spricka är öppen och eventuellt även vattenförande (Wikström et al 2007).

BIPS kan användas i hammarborrade borrhåll, dock finns det ett antal osäkerheter som kan påverka karteringsresultatet. För att fotografierna ska vara av tillräckligt hög kvalitet så att en sprickkartering kan utföras krävs det att borrhållsväggarna är relativt jämna. Hammarborrade hål ger inte lika släta väggar som ett kärnborrat hål. Detta är en av de större begränsningarna med att utföra fotografering i hammarborrhål då det blir svårare att göra bedömningar vid karteringen. En ojämn borrhållsvägg medför att avståndet från kameran till väggen varierar samt att kameran inte är helt centrerad i borrhålet. Detta medför att bilderna som registreras blir förvrängda och att skuggbildning kan försvåra tolkningen (Döse 2009). Storleken på borrhålet spelar också roll då ett

större borrhål innebär att avståndet från kameran till borrhålsväggen blir större vilket resulterar i att bildupplösningen blir lägre (Döse 2009).

En vinst med att använda BIPS vid kärnborrning är att vid kärnförlust kan fotografering bidra med information om kärnförlusten läge och utsträckning. Sprickinformation kan även bekräftas genom att jämföra de två karteringarna.

6.4 Hydrauliska tester

En sprickas förmåga att leda vatten, dess transmissivitet, kan utvärderas med hydrauliska tester. Testen utförs antingen sektionvis eller för helhål genom att manschetter expanderas och vatten pumpas in alternativt tillåts flöda ut ur avsedd testsektion. Dessa två mätmetoder benämns *vattenförlustmätning* respektive *naturligt inflödestest* och beskrivs ytterligare nedan.

6.4.1 Vattenförlustmätning

Vattenförlustmätning utförs i syfte att utvärdera bergmassans, och därmed sprickornas, transmissivitet genom att injektera vatten med ett konstant tryck i ett borrhål där både flödet och trycket registreras med tiden. Vanligast är så kallade enkelmanschett- eller dubbelmanschetttest.

Testen utförs antingen som enskilda test med ett trycksteg per sektion eller som en serie test med olika trycksteg för varje sektion. Fördelen med att utföra en serie med flera trycksteg per sektion är att mer information om formationen erhålls så som dess styvhet, om det förekommer sprickfyllnad som kan eroderas bort, igensättning av en spricka/ flera sprickor och om flödet är laminärt eller turbulent. Nackdelen med en serie med flera trycksteg är att det framförallt tar längre tid att utföra (Houlsby 1976, Jönsson och Hjerne 2013).

Testförfarande för vattenförlustmätningar finns beskrivet i *Svensk standard Vattenförlustmätning i berg* (SS-EN 3:2012), vilken även behandlar val av utrustning, redovisning av data, utvärdering och även ett kort avsnitt om injekterbarhet.

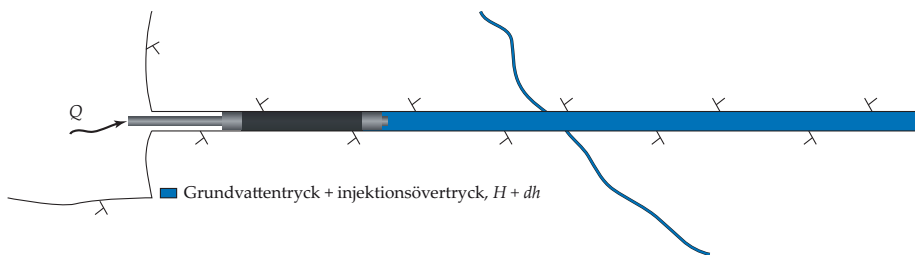
Vanligtvis krävs det en testtid på 10-30 minuter för en stationär utvärdering (SS-EN 3-2012). Om däremot testen utvärderas transient kan det räcka med en testtid på ca 5 min vid en snabb inreglering av trycket (Jönsson och Hjerne 2013).

6.4.2 Vattenförlustmätning – enkelmanschett

Vid test med enkelmanschett kan antingen hela eller delar av ett bergborrhål testas. Sektionen som trycksätts begränsas av manschetten och borrhålets botten (se Figur 6-1). Genom att utföra test från hålbotten och arbeta sig stegvis uppåt i borrhålet kan information om borrhålets intervalltransmissivitet utvärderas.

Detta testutförande innebär att testsektionen blir längre för varje test.

Nackdelen med denna testform är att om ett mer vattenförande avsnitt påträffas innebär det att ett avsnitt med begränsad transmissivitet inte går att särskilja från det större flödet. Om det kan förväntas väldigt vattenförande och även mindre vattenförande avsnitt rekommenderas istället användande av dubbelmanschett. En annan nackdel är att ett stort antal sektioner testas flera gånger vilket kan innebära att sprickor eroderas och får förändra flödesegenskaper.



Figur 6-1 Principskiss för vattenförlustmätning med enkelmanschett.
Sketch of water pressure test with single packer.

Fördelen med att använda enkelmanschett är att utrustningen är smidigare då det krävs färre komponenter vilket medför att utrustningen går lättare att flytta i borrhålet. Det är även mindre risk att det sker läckage runt manschetten eftersom det bara finns en manschett det kan läcka runt

6.4.3 Vattenförlustmätning – dubbelmanschett

Vid test med dubbelmanschett testas ett begränsat intervall, testlängd är normalt tre meter, mellan två kopplade manschetter (se Figur 6-2). Vanligtvis inleds testen från bergytan och utförs sektionsvis nedåt i borrhålet. Efter att den sista tremetersektionen är utförd utförs ett test där den nedre manschetten släpps för att på så vis även testa den sista sträckan mot borrhålsbotten.

Fördelen med att använda dubbelmanschett är att oavsett storlek på vattenförlusten, så länge utrustningen kan hantera flödet, är det mindre risk att

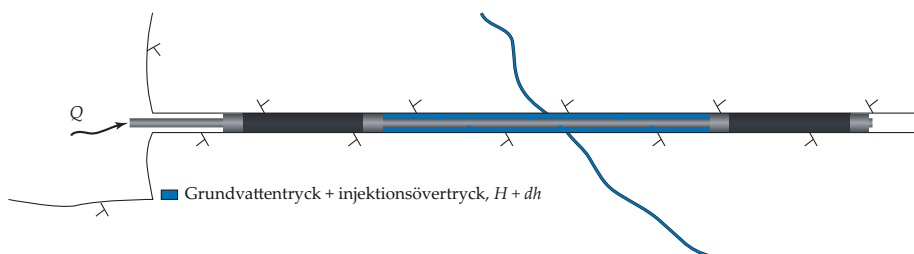
data från respektive sektion inte påverkas av borrhålets övriga vattenförande strukturer. Dessutom testas inte samma struktur flera gånger så länge det inte finns ett samband mellan sprickor mellan två intervall.

För att identifiera ett eventuellt läckage runt manschetterna bör ett mätsystem med tryckgivare monteras under den undre och över den övre manschetten (SS-EN 3:2012). Detta så att det i realtid kan upptäckas om ett läckage har uppstått. Om inte en realtidsmätning är möjlig så bör trycket ändå mätas under testerna för att i efterhand kunna utvärdera om ett läckage har uppstått. Fördelen med realtidsmätning/visning är att det ges möjlighet att förflytta manschetterna och göra om testet direkt vid testtillfället om läckage identifieras.

6.4.4 Utrustning

Övre och undre mätgränser och mätfel för flödesmätare är mycket viktigt att ta hänsyn till. Funehag och Emmelin (2011) diskuterar att med "vanlig" flödesmätare (vattenförlustmätning med exempelvis en injekteringsplattform) kan flöden mellan 0,1 L/min och 50 L/min registreras, men mätfelet/osäkerheten för flöden under 5 l/min blir successivt sämre och vid flöden under 1 l/min kan mätfelet/osäkerheten uppgå till mer än 100 %. Av denna anledning är det viktigt att utföra vattenförlustmätningar med utrustning som har rimliga mätgränser och ett litet mätfel både med avseende på tryck och flöde. I *Svensk standard Vattenförlustmätning i berg* (SS-EN 3:2012) rekommenderas att trycket är stabilt med en maximal avvikelse på $\pm 3\%$ och flödet ska ha en maximal avvikelse på $\pm 3\%$ inom aktuellt mätområde.

Följande räkneexempel illustrerar vad ovanstående flöden skulle motsvara i transmissivitet. För utvärdering av transmissivitet har Moyes formel använts. Antaget en borrhålsradie på 30 mm, 3 bars övertryck och en sektionlängd på 3 m för ett flöde på 1 L/min motsvarar en konduktivitet på ca 10^{-7} m²/s. Ett flöde på 5 L/min motsvarar en konduktivitet på ca 10^{-6} m²/s. I projekt i tätort med krav på liten omgivningspåverkan är det inte ovanligt med ett krav på tätning av bergmassan ned till konduktiviteter mellan 10^{-8} till 10^{-9} m/s varför en högre mätnoggrannhet för den lägre mätgränsen är av stor vikt.



Figur 6-2 Principskiss för vattenförlustmätning med dubbelmanschett.
Sketch of water pressure test with double packer.

6.4.5 Naturligt inflöde

Naturliga inflödestester är en metod för att utvärdera ett borrhåls transmissivitet i en bergtunnel. Inflödet mäts genom att en manschett monteras i borrhålet och inflödet mäts med en flödesmätare. En hygglig och robust metod är att använda ett uppsamlingskärl och en klocka. Noggrannheten på en sådan mätning styrs av tillgängligheten på ett kärl med rätt storlek baserat på flödet. Med ett kärl som tar 1-5min att fylla är det enkelt att hålla mättelet väl under 10 %.

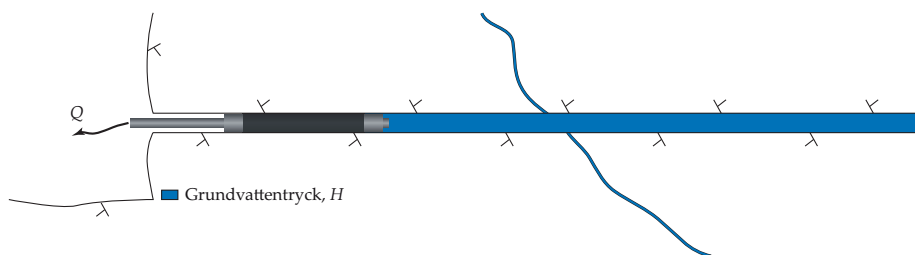
Mätningen kan antingen utföras som helhålmätningar eller sektionsvisa mätningar med en avgränsad sektion av exempelvis en dubbelmanschett eller Posiva difference Flow Logger (PFL). PFL är ett verktyg som är utvecklat av Posiva Oy, Finlands motsvarighet till SKB, och används precis som ett dubbelmanschettsystem för att utvärdera ett borrhåls sektionsvisa transmissivitet men där systemet förflyttas i små steg längs borrhålet vilket möjliggör ett mindre mätfel när det sker små förändringar av flödet.

Enkelmanschettmätning kan utföras på flera olika sätt i samband med borrhning eller efter att borrhålet är färdigborrat. I listan nedan redovisas de vanligaste utförandesätten:

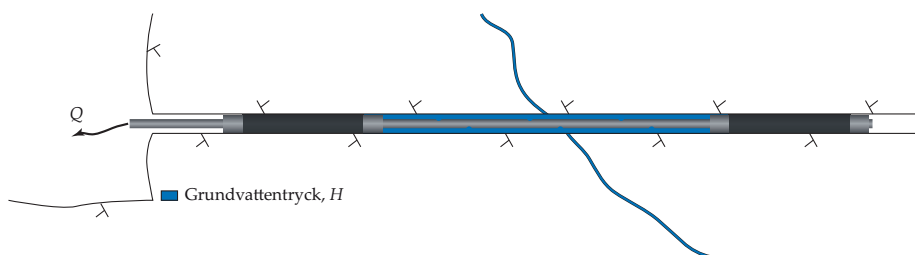
- A. Enkelmanschettmätning i samband med borrhning med successivt ökande mätintervall.
- B. Enkelmanschettmätning med successivt minskande eller ökande mätintervall i färdigborrat borrhål. Mätning påbörjas antingen i botten eller ytligt i borrhålet.
- C. Enkelmanschettmätning i samband med borrhning med konstant mätintervall, exempelvis 3 m.

Alternativ A och B är två olika vägar för att komma fram till resultatet där alternativ B är mer produktionsanpassad då ställtiden för borrharen vid utförande enligt alternativ A ökar. Fördelen med alternativ A är att mätningarna inte påverkas av resterande del av borrhålet som ej ännu har borrats. Alternativ C är den metod som generellt ger bäst resultat då varje sektion mäts individuellt, dock är ställtiden för borrharen förhållandevis stor.

Vid inflödesmätningar är det både för alternativ A och B svårare att upptäcka små inflödesökningar från mindre inflödespositioner ju längre borrhålet blir och ju större det ackumulerade inflödet blir. Detta är en av nackdelarna med att utföra stegvisa enkelmanschettmätningar. Detta undviks vid utförande enligt alternativ C.



Figur 6-3 Inflödesmätning med enkelmanschett. Figuren representerar fall A ovan.
Inflow test with single packer. The sketch represent procedure A, listed above.



Figur 6-4 Inflödesmätning med dubbelmanschett.
Inflow test with double packer.

Vid naturliga inflödestester med dubbelmanschett testas ett avgränsat avsnitt av ett färdigborrat hål i likhet med motsvarande test för vattenförlustmätning, se Figur 6-4. Fördelen gentemot enkelmanschettmätning enligt alternativ B och C är att respektive sektion inte påverkas av omgivande testsektioner.

6.5 Rekommendationer vid utförande

För att data från hydrauliska tester ska vara av tillräckligt god kvalitet för att utföra en sprickviddsfördelningsanalys bör ett antal aspekter beaktas vid utförandet. I listorna nedan finns ett antal punkter där råd eller krav från gällande svensk standard har utvecklats eller preciserats.

Generellt rekommenderas att projektören som utför sprickviddsfördelningsanalyser närvarar vid utförande av samtliga fältinsatser för att dels kontrollera att allt utförs enligt upprättad metodbeskrivning och dels för att få en bättre förståelse för kvalitén på insamlad data och därmed ges möjlighet att kunna beakta detta i analysen.

6.5.1 Rekommendationer borrhning

En ojämn och skrovlig borrhålsvägg tillför en mängd osäkerheter för både utförande och utvärdering av sprickartering och hydrauliska tester. Därför rekommenderas att utföra kärnborrhning som producerar en slät borrhålsvägg som både ger en bättre tillförlitlighet vid utförande av hydrauliska tester med manschetter och även möjligheten att använda BIPS med ett mer tillförlitligt resultat. Nedan listas ett antal punkter som bör beaktas vid insamling av sprickdata.

- Borrhning utförs enligt gällande standard.
- Utförande, systematisk följer en projektspecifik metodbeskrivning som meddelas och diskuteras med borrlaget för att klargöra syftet med undersökningen.
- Utförare har en stor noggrannhet vid dokumentation och sanningsenliga observationer, allt med klockslag och borrhjup.
- Särskilt beakta övergången mellan jord och berg vid undersökning från markytan, vid undersökningar för ytligt förlagda anläggningar. Övergången kan generellt vara mer uppsprucken än bergmassan längre ned i borrhålet och bör undersöka i möjligaste mån. Om foderrör har installerats ett par meter i berg medför detta att ytberget inte kan testas då foderröret skuggar denna del.
- Orienterad borrhärna. Orientering i sig är inget krav för en sprickviddsfördelningsanalys, men höjer den generella kvalitén på data

och inför ett krav på noggrannhet hos borraren som gynnar hela injekteringsdesignen.

- Tydlig dokumentation i protokoll och på kärnlådor framförallt med avseende på var mekaniska brott har uppkommit samt avslag av borrhärna till följd av att kärnan ska passa i kärnlåda.
- Dokumentation av iakttagelser som är av relevans för analysen så som borrhärrörelser, borrhärrörelser och förändring av densamma, spolvattenförlust, slag, kärnförlust m.m.

6.5.2 Rekommendationer hydrauliska tester

Det är viktigt att vara medveten om att vattenförlusttest och naturliga inflödestest resulterar i två olika typer av hydraulisk karaktärisering av bergmassan. Naturliga inflödestest ger enbart information om öppna och konnekterade sprickors transmissivitet, medan en vattenförlustmätning ger information om transmissiviteten hos samtliga öppna sprickor som korsar borrhålet. Vattenförlustmätning är därför att rekommendera vid sprickviddsfördelningsanalys då syftet med analysen ofta är att utvärdera alla öppna sprickor som potentiellt kan injekteras. Naturliga inflödestest går dessutom inte enkelt att utföra från markytan, vilket också talar emot den metoden.

För ändamålet att samla in och utvärdera data för en sprickviddsfördelningsanalys anses det ej vara nödvändigt eller ekonomiskt försvarbart att utföra test med flera trycksteg per sektion då testtiden (beroende på utvärderingsmetod) kan variera mellan 10-30 minuter.

Antal mätintervall som krävs för att kunna utföra en analys har inte analyserats. Erfarenhetsmässigt kan det generellt sägas att, beroende på mätgräns, cirka hälften av mätningarna har en vattenförlust lägre än mätgränsen. Fler mätningar är självklart bättre än färre. En rekommendation är därför att det minst bör utföras 20-40 mätningar för att erhålla ett acceptabelt underlag till analysen. Detta bör dock diskuteras i samband med planeringen för fältinsatsen.

Nedan följer rekommendationer att ta hänsyn till vid planering och utförande av hydrauliska tester:

- Utförandet ska vara systematiskt och följa en projektspecifik metodbeskrivning.
- Mätnoggrannhet styrs av projektspecifika krav på inläckage och tätningssatsar dvs. vilket informationsbehov om t.ex. sprickvidder projektören har, snarare än att använda utrustning som är lättillgänglig.
- Digital trycklogger ska finnas installerad i testsektionen för avläsning av tryck i realtid. Rekommendation enligt *Svensk standard Vattenförlustmätning i berg* är att både manuell eller automatisk avläsning kan användas, men att direkt avläsning i testsektion skall användas.
- Digital trycklogger ska finnas installerad under och över manschetter för att identifiera eventuellt läckage, avläsning i realtid. Rekommendation enligt *Svensk standard Vattenförlustmätning i berg* är att detta kan utföras men är inget krav.
- Nedre mätgräns samt mätfel för flödesmätaren ska ansättas i förhållande till minsta sprickvidd som behöver tätas. Som exempel kan nämnas att för en tunnel på 50 meters djup med inläckagekrav 2-10 L/min och 100 m tunnel behöver sprickor motsvarande flöden 0,01-0,1 l/min tätas. Därför bör mätutrustningen kunna registrera flöden ner till denna nivå. Rekommendation enligt *Svensk Standard Vattenförlustmätning i berg* är ett minsta mätbart flöde på 0,5 L/min om Q_{max} , största uppmätta flöde, är 10 L/min.
- Manschetterna ska kunna expanderas individuellt för att möjliggöra test av den sista sektionen mot hålbotten.
- Manschetter rekommenderas att ha en tätande längd på minst 1 m för att minimera läckage runt dessa. Kraven enligt *Svensk standard Vattenförlustmätning i berg* är att manschettlängden minst ska vara 10 gånger borrhålsdiametern dock minst 0,5 m.
- Korrelation av mätintervall i förhållande till erhållen kunskap från sprickkaraktäriseringen bör utföras i samband med vattenförlustmätningarna. Detta för att ges möjlighet att kunna tolka korrelation mellan områden med högre sprickfrekvens med eventuellt läckage runt manschetter alternativt stora vattenförluster.

7 DISKUSSION FÄLTMÄTNING

7.1 Hänsyn till geologin

Anledningen till att markundersökningar utförs i samband med infrastrukturprojekt är för att kunna beskriva *in situ*-förhållanden på ett för ändamålet lämpligt och tillräckligt sätt. Olika undersökningsmetoder introducerar olika former av vinkling (bias) av insamlade data vilket är väldigt viktigt att läsaren är väl medveten om. Om denna medvetenhet saknas är sannolikheten stor att data tolkas på felaktiga sätt vilket i sin tur kan få stora säkerhetsmässiga, kvalitetkritiska och definitivt ekonomiska konsekvenser.

Innan en mer detaljerad geologisk undersökning påbörjas bör alltid en översiktlig genomgång av tillgängligt material från öppna källor, så som SGU:s kartor och databaser utföras. I samband med en sådan genomgång identifieras olika bergarter som förekommer i området, storskaliga lineament, huvudsprickriktningar, spänningssituation med mera. Detta är värdefull information som ligger till grund för det undersökningsprogram som följer. En annan källa till information är tidigare undersökningar som gjorts för liknande ändamål i närområdet.

Nedan beskrivs ett antal exempel på olika form av vinkling (bias) som läsaren kan komma att stöta på i samband med undersökningsborrning, hydrauliska tester och utvärdering av dessa.

7.2 Borrhålsorientering

Innan en borrrplan fastställs med läge och orientering för respektive borrhål bör berg i dagen och befintliga bergtunnlar och bergskärningar i det som skrivbordsstudien identifierar som samma geologiska domän identifieras och karteras av geologer. Karteringen resulterar bland annat i vilka huvudsprickriktningar som är dominerande i området och detta tillsammans med geometrin för den konstruktion som ska byggas ligger sedan till grund för borrrplanen.

För varje borrhål finns det sprickorienteringar som är mindre troliga att de korsar borrhålet. Samma bias är inte lika framträdande på t.ex. tunnelskala eftersom tunneln har ett större tvärsnitt. Det finns därmed alltid en risk att en utvärdering från ett borrhål inte får med sprickor med en viss orientering (som

sedan korsas med större frekvens vid injektering och tunneluttag). Av denna anledning bör borrhåprogrammet bestå av tillräckligt många sonderingspunkter för att åtminstone täcka in förekommande huvudsprickriktningar.

7.3 Läckage vid vattenförlustmätning

En formation som är uppsprucken eller kraftigt vittrad innebär att injekterat vatten kan läcka runt manschetter i formationen. Detta medför ett ökat injekterat flöde och att transmissiviteten för berörd sektion överskattas. Detta kan hanteras med förhållandevis långa manschetter samt mätning av tryckuppbyggnad bakom den nedre och övre manschetten. Kraven enligt *Svensk standard Vattenförlustmätning i berg* är att manschettlängden minst ska vara 10 gånger borrhåldiametern dock minst 0,5 m.

7.4 Sprick- och krosszoner

Sprick- och krosszoner ska dokumenteras i samband med borrhningen och informationen ska överföras till utföraren av de hydrauliska testerna. Denna information kan då användas för att korrelera vattenförluster till sprick- eller krosszoner. Vid utförandet av vattenförlustmätningarna är det viktigt att manschetterna inte placeras i läge för en sådan zon då det kan medföra ett läckage förbi manschetten vilket får till följd att vattenförlusten kan komma att överskattas.

För sprickviddsanalysen används som bekant antal sprickor som indata. Sprick- och krosszoner består av en stor mängd sprickor som är konnekterade till varandra. På grund av detta rekommenderas det för analysen att både sprick- och krosszoner endast betraktas som en spricka.

REFERENSER DEL B

ASTM international Standard practice for Rock Core Drilling and sampling of rock for site investigation, D2113-08.

Döse, C. 2009: Site investigation SFR. Boremap mapping of percussion drilled boreholes HFR101, HFR102 and HFR105 and core drilled borehole KFR27 (down to 147,4 m length). Rapport P-09-37. Svensk kärnbränslehantering AB.

Funehag, J., Emmelin, A. 2011: Injekteringen av TASS-tunneln - Design, genomförande och resultat från förinjekteringen. SKB rapport R-10-39. Svensk kärnbränslehantering AB.

Houlsby, A., C. 1976: Routine interpretation of the Lugeon water test. Quarterly Journal of Engineering Geology, v9, pp. 303-313.

Jönsson, S., Hjerne, C. 2013: Utförande och tolkning av stegvisa vattenförlustmätningar. Bergmekanikdagen 2013. BeFo.

Rapport 4:2012. Metodbeskrivning för jord-bergsondering. Utförande, utrustning och kontroll. Svenska Geotekniska Föreningen.

SS-EN ISO 22475-1:2006 – Geoteknisk undersökning utförande

SS-EN ISO 14689-1:2004 Geoteknisk undersökning och provning – benämning och indelning av berg.

SS-EN_ISO_22282-1:2012 Geoteknisk undersökning och provning – Geohydraulisk provning – Del 1: Allmänna regler.

SS-EN_ISO_22282-2:2012 Geoteknisk undersökning och provning – Geohydraulisk provning – Del 2: Bestämning av hydraulisk konduktivitet i öppna borrhål.

SS-EN ISO 22282-3:2012 Geoteknisk undersökning och provning – Geohydraulisk provning – Del 3: Vattenförlustmätning i berg.

Strähle, A. 2001: Definition och beskrivning av parametrar för geologisk, geofysisk och bergmekanisk kartering av berg. SKB rapport R-01-19. Svensk kärnbränslehantering AB.

Wikström, M., Forsmark, T., Teurneau, B., Forssman, I., Rhén, I. 2008:
Oskarshamn site investigation- Correlation of Posiva Flow Log anomalies to
core mapped features in KLX09, KLX09B-G, KLX10, KLX10B-C and KLX11A-
F. SKB rapport P-07-213.

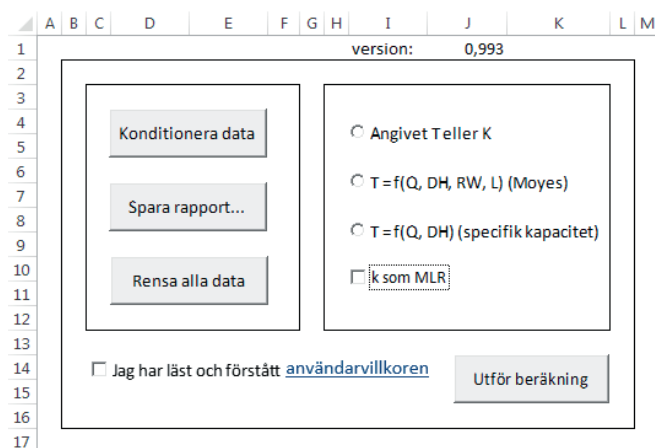


DEL C - MANUAL

Rapportdel C börjar med en beskrivning av verktygets utseende och greppen för att manövrera det samt de olika inmatningsvalen. Ett kapitel om felsökning listar de felkoder som finns implementerade samt generella felsökningstips.

8 HUR VERKTYGET ÄR UTFORMAT

Beräkningsverktyget är framtaget i excel och består av sex stycken flikar. När filen öppnas möts användaren av en startflik (Figur 8-1) där flera val kan göras. Först måste användaren fylla i sina data från vattenförlustmätningar och sprickkartering. Ett tryck på knappen *konditionera data* tar användaren till fliken med samma namn. Där skapar verktyget en indatafil som ska läsas in i nästa steg då beräkningen ska utföras. Under *start*-fliken väljer användaren att utföra beräkning varpå den nyligen skapade indatafilen läses in. Verktöget utför en beräkning och resultatet visas i rapportfliken med ett antal figurer. Nedan finns en utförligare beskrivning av de olika momenten.



Figur 8-1. Start-flikens utseende
Appearance of the Start-sheet

8.1 Konditionera data

Med konditionera avses att en datamängd räknas om till ett förutbestämt format och med förutbestämda enheter. I fliken *konditionera indata* (se Figur 8-2) ska användaren lägga in data från vattenförlustmätning och sprickkartering. Med konditionera avses att manuellt inmatat data sparas om till ett särskilt format i en textfil som därefter kan användas för att utföra en beräkning i verktyget.

Överst i fliken finns nio rader där borrhållsspecifik data anges, se Tabell 8-1 och Figur 8-2. Vid cell D2 ligger en "fritextruta", här går det bra att fylla i inform-

A		B		C		D		E		F		G	
1	Bornhålsnamn (N)	Testdatabornhålet		Antal sprickor (A)	Tryck (DH)	Flöde (Q)							
2	Sektionslängd (B)	3	[m]	-	MPa	/s							
3	Start bornhåll (S)	25.00	[m]										
4	Bornhålsradie (RW)	0.038	[m]										
5	Mätgräns undre (ML)	5.00E-09	[m ² /s]										
6	Mätgräns övre (MU)	1.00E-06	[m ² /s]										
7	Densitet (D)	1000	[kg/m ³]										
8	Viskositet (V)	0.0013	[Pas]										
9	Gravitation (G)	9.82	[m/s ²]										
10	Intervall (I)												
11		1	5	0.3	2.84E-01								
12		2	3	0.3	2.36E-02								
13		3	5	0.3	3.50E-01								
14		4	8	0.3	1.28E+00								
15		5	3	0.3	6.99E-04								
16		6	5	0.3	1.62E-04								
17		7	5	0.3	1.15E-03								
18		8	2	0.3	8.03E-05								
19		9	6	0.3	7.81E-02								
20		10	3	0.3	2.62E-05								
21		11	7	0.3	1.00E-02								
22		12	2	0.3	4.11E-08								
23		13	3	0.3	1.16E-02								
24		14	3	0.3	1.55E-03								
25		15	7	0.3	3.16E-00								
26													
27													
28													
29													
30													

Figur 8-2. Konditionera-flikens utseende. Rad 1-9 används för generell data och från rad 11 sektionsvis data där varje kolumns innehåll beskrivs av rullgardinerna på rad 10.

Appearance of the Conditioning-sheet. Row 1-9 is used for general data, and from row 11 section-wise data is inserted, where the contents of the column is described in the drop-down menus of row 10.

ation om testutförande, projektnummer etc. Notera att det maximalt kan användas 256 tecken, och att semikolon (;) inte kan användas. Sektionsvisa data klistras in med start i cell A11. Därefter anges vad som finns i kolumnen genom att välja egenskap och enhet i rullgardinslisterna på rad 10. När all inklistrad data har fått korrekta rubriker, samt de översta nio radernas generella data angivits exporteras data med knappen **Spara data...**. Ett klick på knappen sätter igång konditioneringen och felkontroller av datainmatningen. Om något har angivits på felaktigt sätt kan ett felmeddelande komma upp nu, (se vidare beskrivning nedan.) Om inga fel uppstår hamnar användaren tillbaka i startfliken.

De indataparametrar som finns att välja på finns beskrivna i Tabell 8-1 och

Tabell 8-2. Den versala notationen inom parentes är dels en programmerings-teknisk hjälp och dels en förutsättning för upplägget i datafilen som sparas från konditioneringen. Upplägget liknar det som genereras av geotekniska fältprovningmaskiner, och verktyget är därmed i grundstrukturen förberett för att ta emot data direkt från en framtida vattenförlustmätningstrustning som arbetar på ett sätt som liknar geotekniska provningmaskiner.

Tabell 8-1. Beskrivning av de parametrar som matas in i konditionera-flikens huvud
The input parameters of the data header

Parameter	Enhet	Beskrivning
Borrhålsnamn (N)	-	Ange borrhålsnamn
Sektionslängd (B)	m	Ange sektionlängd om konstant sektionlängd har använts vid vattenförlustmätningarna. Om olika sektionlängder har använts lämnas detta fält blankt och sektionlängd anges för respektive intervall vid inmatning av indata.
Start borrhål (S)	m	Ange borrhålsdjup för den i borrhålet överst utförda vattenförlustmätningen. Om inget värde anges startar längdmätning för det första intervallet på noll. Används bara för att adderas till längdmätningensvärdena i datapresentation. Behövs inte om secup och seclow används.

Borrhålsradie (RW)	m	Ange borrhålets radie. Används om beräkningsalternativet T enligt Moyes ska användas.
Mätgräns undre (ML)	m ² /s	Det lägsta värde som ska användas för beräkning, uttryckt i transmissivitet. OBS! om utrustningen har mätgräns i flöde och trycket varierar bör mätgräns anges radvis (se LM)
Mätgräns övre (MU)	m ² /s	Det högsta värde som ska användas för beräkning, uttryckt i transmissivitet. OBS! om utrustningen har mätgräns i flöde och trycket varierar bör mätgräns anges radvis (se UM)
Densitet (D)	kg/m ³	Densitet hos injektionsvätska (vatten)
Viskositet (V)	Pa s	Viskositet hos injektionsvätska (vatten)
Gravitation (G)	m/s ²	Jordens tyngdacceleration
[Fritextruta]		Här kan fritext anges som önskas på rapporten. T.ex. projektbenämning och utförare.

Tabell 8-2. Beskrivning av parametrarna som matas in i sektionvis i konditionera-fliken.

Section-wise data parameters

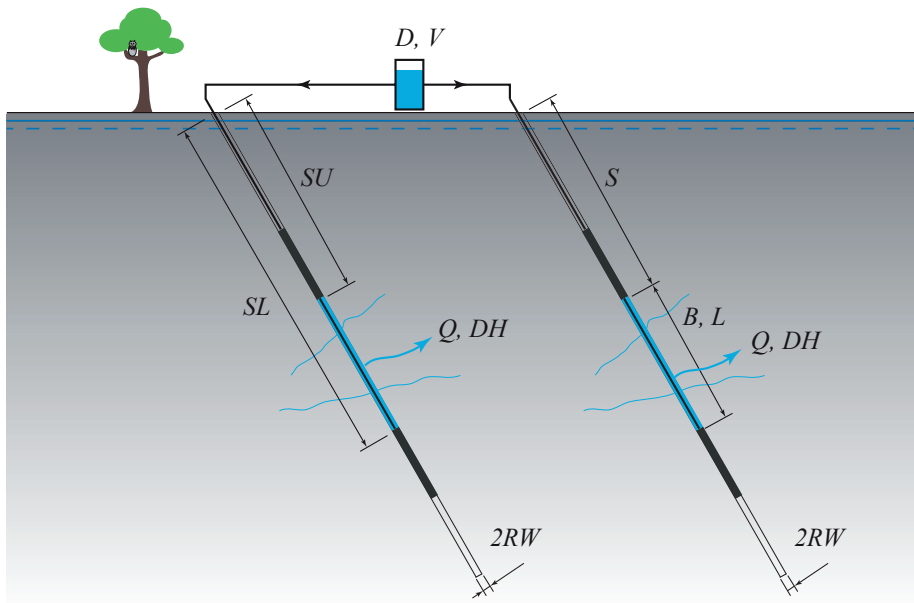
Parameter	Enhet	Beskrivning
Intervall (I)	-	Intervallnummer eller namn
Transmissivitet (T)	m ² /s	Sektionens transmissivitet, utvärderad av användaren
Antal sprickor (A)	-	Antal sprickor i sektionen
Flöde (Q)	L/s, L/min, L/h, m ³ /s, m ³ /min, m ³ /h	Uppmätt flöde vid injektion i sektionen, konverteras till m ³ /s under konditionering
Tryck (DH)	MPa, kPa, Pa, mvp	Pålagt övertryck vid injektion i sektionen, konverteras till mvp (meter vattenpelare) under konditioneringen.

Rang (R)	-	Rang vid storleks sorterad data.
Längd (L)	-	Sektionslängd vid variabel sektionlängd
Konduktivitet (K)	m/s	Hydraulisk konduktivitet för sektionen, utvärderad av användaren
Sec Up (SU)	m	Sektionens lägre värde på borrhålets längdmätning
Sec Low (SL)	m	Sektionens högre värde på borrhålets längdmätning
Undre mätgräns (LM)	m ² /s	Lägre mätgräns angiven sektionvis som transmissivitet där värdet varierar över sektionerna t.ex. vid mätutrustning med mätgräns i flöde och där injektion utförts med olika tryck
Övre mätgräns (UM)	m ² /s	Högre mätgräns angiven sektionvis som transmissivitet där värdet varierar över sektionerna t.ex. vid mätutrustning med mätgräns i flöde och där injektion utförts med olika tryck
Kommentar (RC)		Eventuell kommentar som ska följa med i den konditionerade datafilen för spårbarhet. Används inte i analysen

I fliken *Konditionera indata* finns fyra knappar. **Fyll i standardvärden** fyller i följande värden: Densitet (D)= 1000kg/m³, Viskositet (V)= 0,0013 Pas och Gravitation (G)=9,82 m/s². Detta ska ses som en hjälp och arbetsbesparing efter att knappen **Rensa indata** använts. Den klurige användaren hittar lätt hur fler uppgifter kan fyllas på efter behov, genom att utvidga makrot bakom knappen. **Rensa indata** rensar alla värden som finns i fliken *Konditionera indata*. **Läs in sparad data** låter användaren läsa in en tidigare konditionerad fil för att kunna göra ändringar och konditionera om den. **Spara data...** utför själva konditioneringen och sparar en indatafil som kan läsas av verktyget där varje värde från konditionera-fliken föregås av respektive datakod. Till exempel sparas borrhålsradien som "RW=(angivet värde);" (se Tabell 8-3). Ett antal kontroller görs på datasetet för att bedöma vissa aspekter av rimligheten, samt

om något värde saknas. Kontrollsekvensen beskrivs av felkoderna i avsnitt 10.3. Här är det viktigt att notera att kontrollsekvensen inte är, eller har ambitionen att vara heltäckande. Utseendet på textfilen som genereras i fallet ovan (Figur 8-2) är enligt Tabell 8-3.

I *konditionera indata* finns även en figur, Figur 8-3 som syftar till att beskriva förhållandet mellan det injekterade vattnets densitet (D) och viskositet (V), injektionens flöde (Q) och övertryck (DH), längdmätningkonventionerna secup (SU)/seclow (SL) och start borrhål (S), fast sektionens längd (B) eller sektionens längd (L) samt borrhålsdiametern som $2*RW$



Figur 8-3. Borrhålets geometri, till vänster illustreras längdmätningkonventionen med att ange mätsektionens övre (SU) och nedre (SL) position och till höger konventionen att beskriva sektionens längd (L eller B) i en följd som kan föregås av avståndet till läget där mätningen började (S).

The geometry convention of the borehole. Left: tested section given by its upper (SU) and lower (SL) boundary. Right: tested section given by its length (B or L) in a sequence that may be preceded by a length of untested rock (S)

Tabell 8-3: Innehåll i datafilen när datamängden i kapitel 10 körs enligt Figur 8-2.
Contents of the data-file generated when example-data D is run according to Figur 8-2.

```

$
N=Testdataborrhålet;B=3;S=25;RW=0.038;ML=0.000000005;MU=0.00001;D=1
000;V=0.0013;G=9.82;C=Projekt: DemoCrLfBeställare: Skärmdump i
rapportCrLfRad 3.CrLfRad 4.;GD=2015-03-04 13:20:35;VER=0.993
#
I=1;A=5;DH=30.5498981670061;Q=0.000284
I=2;A=3;DH=30.5498981670061;Q=0.0000236
I=3;A=5;DH=30.5498981670061;Q=0.00035
I=4;A=8;DH=30.5498981670061;Q=0.00128
I=5;A=3;DH=30.5498981670061;Q=0.000000639
I=6;A=5;DH=30.5498981670061;Q=0.000000162
I=7;A=5;DH=30.5498981670061;Q=0.00000115
I=8;A=2;DH=30.5498981670061;Q=0.0000000803
I=9;A=6;DH=30.5498981670061;Q=0.0000781
I=10;A=3;DH=30.5498981670061;Q=0.0000000262
I=11;A=7;DH=30.5498981670061;Q=0.00001
I=12;A=2;DH=30.5498981670061;Q=0.000000000411
I=13;A=3;DH=30.5498981670061;Q=0.0000116
I=14;A=3;DH=30.5498981670061;Q=0.00000153
I=15;A=7;DH=30.5498981670061;Q=0.00316

```

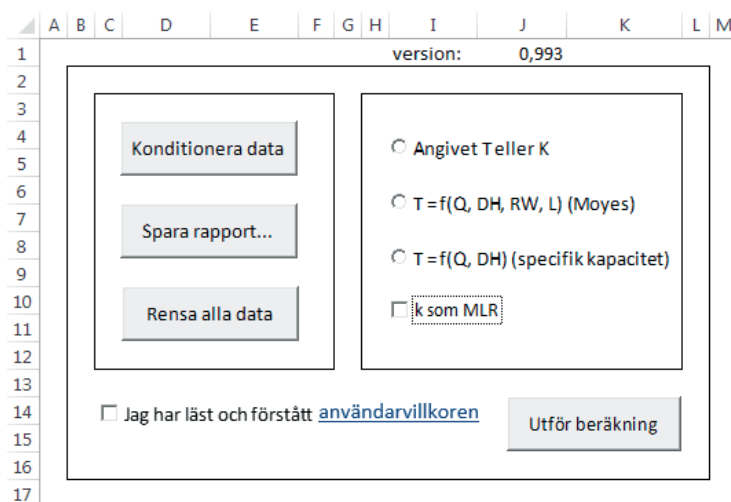
8.2 Kör simulering

Från fliken *Start* utförs beräkning genom att öppna den datafil som ska analyseras (Figur 8-4). Filen måste vara skapad av verktygets *KONDITIONERA*-funktion. I den högra ramen anges vilken form indata har med tre val.

- Angivet T eller K avser att transmissivitet eller konduktivitet är infogat i indata.
- T som Moyes och
- T som Q/dh är två sätt att beräkna transmissivitet då indata är på formen tryck och flöde.

Knappen **Utför beräkning** tar upp en dialog där indatafilen väljs, sätter igång beräkningen enligt rapportens del A, varefter förloppet kan följas i Excels statusrad, längst ned till vänster. När beräkningen är klar dyker värden upp i diagrammen under fliken *Rapport*, och användaren förflyttas automatiskt till det bladet. Knappen **Konditionera data** förflyttar användaren till konditionera-fliken. Knappen **Spara rapport...** genererar en pdf med innehållet i rapport-fliken. Knappen **Rensa alla data** tömmer all användar- och beräkningsgenererad data ur flikarna *Konditionera indata*, *Transmissivitet*, *Sprickvidder* och *Rapport*, och är därmed mer omfattande än rensningsknappen som finns i *konditionera indata*-fliken.

För att beräkningen ska kunna köras måste rutan *Jag har läst och förstått användarvillkoren* vara iöckad. Länken [användarvillkoren](#) tar användaren till användarvillkoren och dessa måste accepteras.



Figur 8-4. Start-flikens utseende. I den högra ramen anges om transmissivitet är inmatat direkt, eller om det ska beräknas från flöde och tryckdata.
Appearance of the Start-sheet. In the right-hand box a user input if the flow data is inserted as transmissivity or conductivity or if it shall be calculated as specific capacity (Q/dh) or according to Moye.

Det finns en ruta *k som MLR* som kan bockas i för att passa Paretofördelningens trendlinje med trolighetsmetoden (Maximum likelihood eller MLR). Funktionen finns med som ett alternativ i verktygets version 1.0, men är inte

färdigutvecklad och testad i denna version. Den följer med ifall användaren själv vill utveckla den vidare. Tills revisionsloggen säger att passningsmetoden MLR har åtgärdats avrådes från användning av funktionen.

8.3 Exportrapportens delar

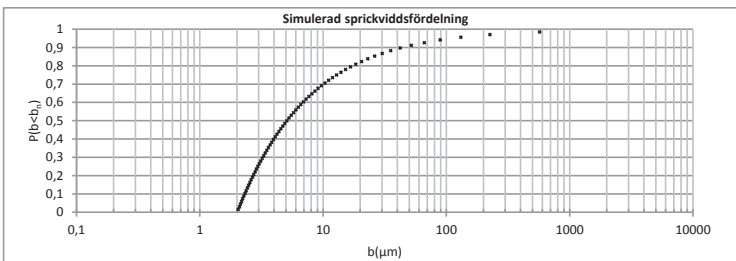
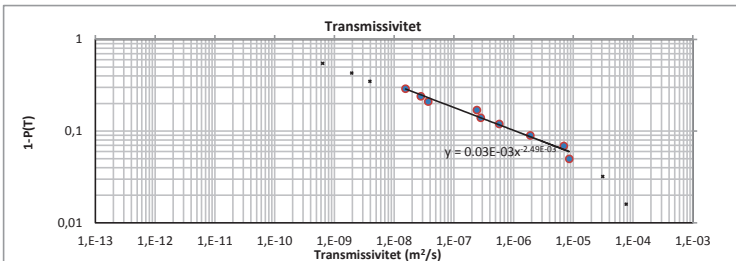
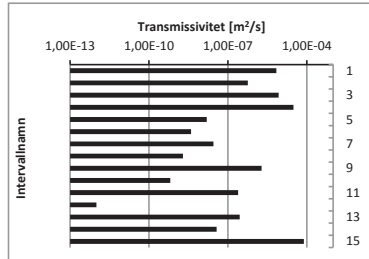
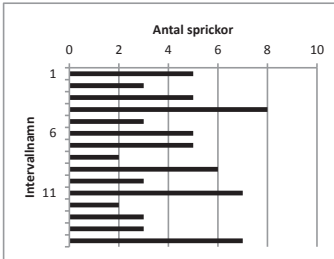
Exportrapporten innehåller ett datahuvud och fyra diagram (Figur 8-5). I datahuvudet finns parametrar från konditioneraflikens datahuvud samt värden på tex största transmissiviteten och paretoformfaktorn. Här finns inget hinder för att anpassa utseendet efter egna behov, eller tex ändra rubriktexten men för spårbarhet rekommenderas att inga större ändringar görs. I de två övre diagrammen finns liggande stolpdiagram med sektionernas antal sprickor respektive transmissivitet, med borrhålets början överst.

Det tredje diagrammet innehåller transmissivitet mot sannolikhet, och den passade Paretofördelningen som en rak linje. De datapunkter som har använts för passningen är de som ligger mellan mätgränserna och markeras med ring. De värden som ligger utanför mätgränserna markeras med kryss.

Det fjärde diagrammet innehåller simulerade sprickvidder enligt Paretofördelningen, vilket motsvarar att alla sprickor som angivits i indatafilen fått ett transmissivitetsvärde som omräknats till sprickvidd med kubiska lagen.

Testdataborrhålet

Borrhål	Testdataborrhålet	Borrhålsdiameter	0,076 [m]	Indatafil	Testdataborrhålet.txt
Kommentarer:		Borrhålslängd	45 [m]	Programversion	0,993
Projekt: Demo		Sektionslängd	3,00 [m]	Densitet	1000 [kg/m ³]
Beställare: Skärmdump i rapport		Start borrhål	25 [m]	Viskositet	0,0013 [Pas]
Rad 3.		Mätgräns undre	5,00E-09 [m ² /s]	Gravitation	9,82 [m/s ²]
Rad 4.		Mätgräns övre	1,00E-05 [m ² /s]	Paretoformfaktor, k	0,249
		Sektioner i beräkning	15 [st]	Största sprickan, T _{max}	1,17E-04 [m ² /s]
		Sprickor i simulering	67 [st]	Största sprickan, B _{max}	571 [µm]
				T _{tot}	1,27E-04 [m ² /s]



Figur 8-5. Resultatrapporten som genereras av verktyget. Uppifrån och ned: Datahuvud och körparametrar och vissa resultat. Beskrivning av borrhålet med antal sprickor respektive transmissivitet mot djupet. Intervalltransmissiviteter med passad Paretofördelning. Nederst: Simulerade sprickvidder utifrån Paretofördelningen via kubiska lagen. *Output data report generated by the tool. From the top: Description of the borehole with the number of fractures and interval transmissivities. Cumulative distribution function diagram with interval transmissivities and evaluated Pareto distribution. Simulated hydraulic aperture distribution.*

9 NÄR DET STRULAR

I detta kapitel ges vägledning om hur användaren kan gå tillväga för att lösa problem som kan uppstå. De felkoder som finns implementerade beskrivs samt några specifika kända problem listas med lösningar.

9.1 Felsökningstips

9.1.1 Fel vid uppstart

Testa först att ladda ned den senaste versionen från www.chalmers.se/hydrogeologi-injektering kontrollera att du tillåter makron och har ditt officepaket uppdaterat. Skriv ned koden på felmeddelandet som visas och var du hamnar i makrokoden om du trycker felsök. Fråga Google.

9.1.2 Verktiget kör, men resultaten är konstiga

Kontrollera all indata särskilt så att de parametrar som kan ges flera olika enheter har fått rätt enhet.

När rapportfliken öppnas efter körning kan meddelande om att rita noll eller negativa värden i logaritmiskt diagram komma upp. Sannolikt handlar det om att det finns nollflödessektioner. Om nedre mätgränsen är angiven större än noll så är inte nollvärdena med i beräkningen ändå, så det är mest ett kosmetiskt fel.

9.1.3 Fel vid konditionering

Först och främst, den data som behövs för varje sektion är "vattenföring", "borrhålslängdmätning" och "antal sprickor", där vattenföring anges som endast en av följande tre kombinationer 1) Transmissivitet, 2) Konduktivitet eller 3) Flöde och Tryck (dh). Borrhålslängdmätning kan anges som secup och seclow, konstant intervallängd (B) eller angiven intervallängd (L).

När något blir fel vid konditioneringen kommer oftast ett felmeddelande med felkod upp. Texten i meddelandet beskriver vilken av parametrarna som felet rör. Kontrollera så att den data som listas är den som du avsåg att klistra in. Klistra inte in "formler" i excel (default på ctrl+v) utan använd dig av "klistra in värden".

9.1.4 Fel vid körning

För att kunna köra verktyget måste du

- välja ansättningsmetod för "vattenföring", dvs. om du har a) angivit en transmissivitet eller konduktivitet b) har angivit flöde och tryck och vill att transmissivitet beräknas enligt Moye, eller c) har angivit flöde och tryck och vill att transmissivitet approximeras som Q/dh .
- Bocka i rutan att du har förstått och accepterat användaravtalet.
- Ha förberett en datafil med verktygets konditionera-funktion.

9.1.5 Något i verktyget är fult, eller inte som jag vill ha det

Ser knappar och liknande konstiga ut kan det vara skärmupplösningen som stökar, testa att ställa in en annan upplösning och se om det hjälper.

Bladen är låsta för att minska risken för att saker slutar bete sig som avsett. Om du tycker att du vet vad du gör får du gärna låsa upp bladet men vi rekommenderar starkt att ha bladen låsta när du arbetar med verktyget. Bladen är låsta vid uppstart. Kom ihåg att du alltid kan ladda ned en ny version av verktyget² och att det är klart att föredra framför att dela filer mellan kollegor. Kom även ihåg att enda kravet i licenstexten är att licenstexten ska följa med verktyget.

² Från <http://www.chalmers.se/hydrogeologi-injekttering> eller hänvisning via rapportens sida på <http://befoonline.org>

9.2 Felkoder

I verktyget finns ett antal kontroller implementerade som varnar med felmeddelande om beräkningen inte kan utföras. I Tabell 9-1 beskrivs dessa kortfattat för att ge information som kompletterar felkodens meddelande.

Tabell 9-1. Beskrivning av felkoder som kan komma upp.

Description of error codes

Felkod	Kontroll	Felmeddelande
1	Användaravtal	Felkod 1: Du har ej godkänt användaravtalet!
2	Om sektionslängd ej angivits Räkna SL-SU: $\neq 0$ Nej: Är fast L $\neq 0$ Nej: Fel	Felkod 2: Det går inte att beräkna intervalllängd!
3	Vid knapp "T eller K angivet" Är T och K tom?	Felkod 3: Inga värden angivna för K eller T
4	Vid knapp Moye Är Q $\neq 0$, DH $\neq 0$, R _w >0	Felkod 4: Q, DH eller r _w saknas!
5	Vid knapp T=Q/DH Saknas Q eller DH?	Felkod 5: Q eller DH saknas!
6	Är ingen av knapparna för beräkning av T vald?	Felkod 6: Välj hur T ska ansättas på startsidan!
7		Felkod 7: Fel i plottuppritning!
8	Lägre mätgränsen ser inte ut som förväntat	Felkod 8: Något är fel med den lägre gränsen!
9	Övre mätgränsen ser inte ut som förväntat	Felkod 9: Något är fel med den övre gränsen!
20	Är antalet datarubriker = antalet unika datarubriker	Felkod 20: Endast unika datamängder tillåtna!
21	Finns rubriken A	Felkod 21: Inga sprickantal är angivna!
22	Dubbelangivet flöde	Felkod 22: Endast K eller T eller Q och DH får anges!
23	Intervalllängd	Felkod 23: SecLow är lika stor eller mindre än SecUp! (Rad nr)

24	Intervallängd saknas	Felkod 24: Mata in data för intervallängd eller ange i tabellen! (Ej negativa värden eller 0)
25	Intervallängd SU-SL=L	Felkod 25: Angiven längd och SecUp/SecLow stämmer ej! (rad nr)
26	Annat fel intervallängd, t.ex. en av SU-SL saknas	Felkod 26: Felaktig beskrivning av intervallängd!
27		Felkod 27: Kommentartext innehåller otillåtet tecken (;)!
28		Felkod 28: Radkommentartext innehåller otillåtet tecken (;) på rad X!
29		Felkod 29: Kommentartext längre än 256 tecken!
30		Felkod 30: Övre gräns saknas för datapunkt! (rad X)
31		Felkod 31: Undre gräns saknas för datapunkt! (rad X)
32		Felkod 32: Angiven lägre gräns är lika stor eller större än övre gräns! (rad X)
33		Felkod 33: Felaktig beskrivning av mätgränser!
34		Felkod 34: Övre eller under mätgräns är mindre än noll!

9.3 Kända problem

Följande problem är kända

1. Om data innehåller nollvärden och mätgränser inte angivits fungerar inte beräkningen som den ska.
 - a. Åtgärd: Lätt fixat, alla mätningar har en mätgräns oavsett om den anges eller ej. Hitta på en mätgräns nu om du använder exempeldatan och säkerställ att korrekta värden på mätgränser alltid följer med en riktig mätning.
2. Om körfel / Runtime error 438 visas vid uppstart fungerar knappar inte som de ska. Detta beror på en bugg i en uppdatering av Excel som tillkom december 2014 och åtgärdades i februari 2015.
 - a. Automatisk åtgärd: Starta om bladet. Vi har en funktion som åtgärdar felet tills nästa gång.
 - b. Manuell åtgärd: (Visa dolda filer och mappar), sök upp och ta bort följande filer:
 - C:\Users\[user.name]\AppData\Local\Temp\Excel8.0\MSForms.exd
 - C:\Users\[user.name]\AppData\Local\Temp\VBE\MSForms.exd
 - C:\Users\[user.name]\AppData\Local\Temp\Word8.0\MSForms.exdmed Excel (och Word) avstängda.
3. Om felmeddelanden med innebörden "kompileringsfel, koden måste uppdateras för 64-bitarssystem" visas:
 - a. Åtgärd: Tryck fram felsökare/debug, titta efter den gulmarkerade raden, skriv "ptrSafe" framför "function" på det stället, spara och försök igen.

10 KÖRNING MED EXEMPELDATA OCH EXPORTRAPPORT

Med testdatamängden i Tabell 10-1 och Tabell 10-2 ska det gå att reproducera resultatrapporten i Figur 8-5 genom att mata/kopiera in värden i Konditionera-fliken så att det ser ut som i Figur 8-2 och köra med T enligt Moyes. Datafilen ska se ut som i Tabell 8-3.

Tabell 10-1: Generell data, exempeldataset.

General data for example dataset

Sektionslängd (B)	3
Gravitation (G)	9,81
Borrhålsradie (RW)	0,038
densitet (D)	1000
Mätgräns lägre (ML)	5,00E-09
Mätgräns övre (MU)	1,00E-06
Viskositet (V)	0,0013
Start borrhål (S)	25

Tabell 10-2: Sektionsvis data för exempeldataset

Section-wise data for example dataset

Intervall (I)	Antal sprickor (A)	Tryck (DH), MPa	Flöde (Q), l/s
1	5	0,3	2,84E-01
2	3	0,3	2,36E-02
3	5	0,3	3,50E-01
4	8	0,3	1,28E+00
5	3	0,3	6,39E-04
6	5	0,3	1,62E-04
7	5	0,3	1,15E-03
8	2	0,3	8,03E-05
9	6	0,3	7,81E-02
10	3	0,3	2,62E-05
11	7	0,3	1,00E-02
12	2	0,3	4,11E-08
13	3	0,3	1,16E-02
14	3	0,3	1,53E-03
15	7	0,3	3,16E+00

11 REVISIONSLOGG

Nedan följer en förteckning av förändringar som gjorts i verktyget. Observera att den tryckta rapporten bara innehåller fram till version 1.00, och att förteckning över senare uppdateringar endast finns tillgängliga i rapportens senaste webversion.

Tabell 11-1. Revisionslogg
Logg of revisions

Version	Rubrik, Beskrivning av förändringar sedan förra versionen
0-0.7	Interna arbetsversioner Användning avrådes bestämt
0.80	Alfatest Första publika versionen
0.81	Uppdaterad Alfatest Beräkningstidmätare togs bort då den inte fungerade med vissa systemkonfigurationer
0.82-0.93	Interna arbetsversioner Användning avrådes bestämt
0.94	Betatest Fler kontroller, ändrat utseende i både start- och konditioneraflik. Buggfixar.
0.95-0.99	Interna arbetsversioner Användning avrådes bestämt
1.00	Den publikt lanserade versionen Det är för denna version som den tryckta rapporten gäller.

BeFo



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104-1773