



# FÖRUNDERSÖKNINGSDATA FÖR INJEKTERINGSDESIGN: METOD, RÅD OCH RIKTLINJER AVSEENDE SPRICKVIDDSFÖRDELNINGAR

Sara Kvartsberg

Johan Thörn

Edward Runslätt

Sebastian Almfeldt



# **FÖRUNDERSÖKNINGSDATA FÖR INJEKTERINGSDESIGN: METOD, RÅD OCH RIKTLINJER AVSEENDE SPRICKVIDDSFÖRDELNINGAR**

**Pre-investigation data in grouting design:  
methodology and guidelines regarding  
fracture aperture distributions**

Sara Kvartsberg, Norconsult

Johan Thörn, Chalmers/Bergab

Edward Runslätt, Golder Associates/Band of Runslätt

Sebastian Almfeldt, SAA konsult



## FÖRORD

Vid injekteringsprojektering i projekt med hög svårighetsgrad används ofta en designmetodik där sprickviddsfördelningar utgör underlag för val av injekteringsparametrar. Metodiken möjliggör en systematisk kvantifiering av bergets hydrogeologiska egenskaper och kan underlätta projektering av effektiva tätningsinsatser. Emellertid kan fel och osäkerheter uppstå i beräkningsresultat, orsakade av modellantaganden eller bristande kvalitet i förundersökningsdata.

Föreliggande projekt är en vidareutveckling av BeFo-projekt 143 där ett beräkningsverktyg togs fram för att förenkla och automatisera de statistiska beräkningar som kan ingå i en sprickviddsbaserad injekteringsdesign. I detta projekt studeras hur hydrogeologiska tolkningar, samt kvantitet och kvalitet hos förundersökningsdata kan påverka resulterande fördelningar och efterföljande analyser. I projektet genomförs även uppdateringar och förbättringar av beräkningsverktyget.

Studien genomfördes med analyser av dataset från fyra tunnelprojekt och en litteraturstudie av tidigare publicerade tillämpningar av designmetodiken. Rapporten avslutas med rekommendationer avseende beräkningsmetodens användning och de krav som bör ställas på utförande av förundersökningar som nyttjas för designmetodiken.

I utförande projektgruppen ingick Johan Thörn (Bergab), Sara Kvartsberg (Norconsult), Edward Runslätt (Band of Runslätt/Golder) och Sebastian Almfeldt (SAA Konsult). Projektets referensgrupp har bestått av Johan Funehag (Tyréns), Åsa Fransson (Golder), Magnus Eriksson (Trafikverket), Ulf Håkansson (Skanska), Håkan Stille (Geokonsult Stille), Martin Stigsson (SKB), Christian Butrón (Trafikverket) och Per Tengborg (Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo).

Det är vår förhoppning att föreliggande rapport kan tjäna som stöd vid framtagande av handlingar i tunnelprojekt där presenterade resultat kan leda till mer ändamålsenliga undersökningsinsatser och underlätta beräkningar för injekteringsprojektering. Vidare kan rapporten bidra med underlag för vidareutveckling av metodbeskrivningar relaterade till geologisk kartering och hydrauliska tester.

Projektet har finansierats av BeFo, Stiftelsen Bergteknisk Forskning.

Stockholm, 2021

*Per Tengborg*



## SAMMANFATTNING

Vid injekteringsprojektering för sprickig bergmassa kan en designmetodik nyttjas där transmissivitets- och sprickviddsfördelningar utgör underlag för val av designparametrar. Metodiken nyttjar att sektionstransmissiviteter utvärderade från hydrauliska tester i borrhål kan länkas till enskilda, karterade sprickor med hjälp av den statistiska fördelningsfunktionen Paretofördelning. Denna typ av statistiska beräkningar har använts i ett flertal forsknings- och infrastrukturprojekt i Sverige, men det förekommer fortfarande osäkerheter gällande exempelvis krav på förundersökningsdata och hur data bör tolkas och hanteras i beräkningsprocessen.

I denna rapport presenteras en studie av hur olika typer av testutföranden och tolkningar av geologi kan påverka en Paretoanalyserad sprickviddsfördelning. Känslighetsanalyser har utförts genom att genomföra statistiska beräkningar med dataset från fyra bergtunnelprojekt och variera parametrar såsom mätgränser, sektionslängder och antal sektioner. Resultaten från känslighetsanalyserna ligger till grund för rekommendationer avseende beräkningsmetodens tillämpning, utförande av mätningar och inverkan av modellantaganden. Studien omfattar även sammanställning av tidigare utförda projekt med denna typ av statistiska beräkningar och en genomgång av resultaten från dessa.

Analysresultaten i föreliggande rapport visar att krav på god kvalitet beträffande både kartering av borrhåll och utförande av hydrauliska tester behövs för att producera ändamålsenliga sprickviddsfördelningar. Kartering av borrhåll rekommenderas utföras med omsorg beträffande läge och antal öppna sprickor, samt läge och egenskaper hos svaghetszoner i bergmassan. Data bör genomgå en hydrogeologisk tolkning och sorteras in i domäner. En grundläggande sortering utgörs av ytberg, zonberg och normalberg, som därefter kan underindelas efter platsspecifik geologi. Data från större svaghetszoner bör exkluderas från analysen då grundläggande modellantaganden inte uppfylls för en uppsprucken bergmassa.

Grundläggande för att producera användbara sprickviddsfördelningar är att tillräckliga och representativa mängder data samlas in. Preliminära resultat är att efter domänindelning bör åtminstone 80 sektioner kvarstå. Hydrauliska tester rekommenderas utföras med sektionslängd 3 meter eftersom det utgör en rimlig avvägning mellan kvantitet och kvalitet hos insamlade data. Mätutrustningen bör ha kapacitet att mäta flöden motsvarande en lägsta sektionstransmissivitet om ca  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (motsvarande ca 0,03 l/min vid 0,3 MPa övertryck i en 3 m lång sektion), eller ännu lägre i bergmassa där många sektioner riskerar att falla under mätgräns. En spricktransmissivitet i storleksordningen  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  motsvarar en hydraulisk sprickvidd på ca 25  $\mu\text{m}$ . Flödesmätaren bör även kunna mäta samma storleksordning som flödet från den största sprickan för att analys av största sprickvidd och inflöde/tätningseffekt ska bli representativ. Om betydande brister i datakvalitet identifieras bör följaktligen betydelsen av sprickviddsfördelningen i designprocessen minskas.

Det rekommenderas att projektören bekantar sig med sitt dataset och utför känslighetsanalyser på olika parametrar för att på så vis kunna bekräfta att utvärderade fördelningar är ändamålsenliga. Exempelvis kan definition av zonberg, gräns mellan ytberg och normalberg eller registrerade flöden nära testutrustningens mätkapacitet vara föremål för djupare analys. Beräkningsverktyget som nyttjats i denna studie möjliggör snabba beräkningar där olika antaganden kan analyseras. I rapporten ges både förslag på kravlista avseende utförande som minskar osäkerheter och diagnostiska kontroller för att identifiera felkällor och bedöma kvalitén hos resulterande sprickviddsfördelning.

**Nyckelord:** Injekteringsdesign, sektionstransmissivitet, sprickviddsfördelning, Paretofördelning, hydrauliska test, känslighetsanalys



## SUMMARY

In grouting design, a design methodology can be used where transmissivity and fracture aperture distributions form the basis for selecting grouting parameters. The methodology is based on transmissivity data calculated from hydraulic tests in boreholes, which are linked to individual, mapped fractures using the statistical distribution function Pareto distribution. This type of statistical calculations has been used in a number of research- and infrastructure projects in Sweden, but there are still uncertainties regarding, for example, requirements for pre-investigation data and how data should be handled in the calculation process.

This report presents a study of how different types of test designs and interpretations of geology can affect a Pareto-analysed fracture aperture distribution. Sensitivity analyses have been performed by testing various datasets and modifying parameters such as measurement limits, section lengths, and number of sections. The results of the sensitivity analyses form the basis for recommendations regarding the applicability of the calculation method, test execution and model assumptions. The study also includes a compilation of previously reported projects where this type of statistical analyses has been performed and the result from these.

The analysis results of this report show that both mapping of drill cores and execution of hydraulic tests must be of good quality to produce suitable fracture aperture distributions. Mapping of drill cores should be performed with care regarding the location and number of open/water-bearing fractures, as well as the location and properties of weakness zones in the rock mass. Data is recommended to be sorted into domains based on shallow rock, zones and host rock. These domains can then be subdivided according to site-specific geology. Data from major weakness zones should be excluded from the analysis as model assumptions are not fulfilled in heavily fractured rock mass.

Fundamental to producing reliable fracture aperture distributions is the collection of sufficient and representative amounts of data. Preliminary results are that after domain division, at least 80 sections should remain. Hydraulic tests are recommended to be performed with a section length of 3 meters as it gives a reasonable balance between quantity and quality of collected data. The flow equipment should have the capacity to measure flows corresponding to a section transmissivity of approximately  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (corresponding to 0,03 litres/minute at 0,3 MPa overpressure in a 3 m long section), or even lower in tight rock mass where many sections fall below the measuring limit. A fracture transmissivity of  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  corresponds to a hydraulic aperture of approximately 25  $\mu\text{m}$ . The flow meter should also be able to measure the same magnitude as the flow from the largest fracture in order to create representative results of largest fracture aperture and inflow/sealing effect. If significant deficiencies in data quality are identified, the importance of the fracture aperture distribution in the design process should be reduced.

It is recommended that the designer familiarises with the dataset and perform sensitivity analyses. For example, the definition of weakness zones, the boundary between shallow rock and host rock or recorded flows near the measuring capacity of the test equipment may be subject to deeper analysis. The calculation tool used in this study enables fast calculations where different assumptions can be analysed. Included in the report is a list of requirements regarding execution that reduces uncertainties and diagnostic checks to identify sources of error and assess the reasonableness of the resulting fracture aperture distribution.

**Keywords:** Grouting design, section transmissivity, fracture aperture distribution, Pareto distribution, hydraulic test, sensitivity analysis

## BETECKNINGAR OCH FÖRKORTNINGAR

### Latinska bokstäver

$b$	[m]	Akvifärmäktighet
$b_{hyd}$	[m]	Ekvivalent hydraulisk sprickvidd
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Tyngdaccelerationen
$H$	[m]	Djup under grundvattenyta
$k$	[-]	Formparameter för Paretofördelningen
$K$	[m/s]	Hydraulisk konduktivitet
$L$	[m]	Längd, mätskala
$n$	[-]	Antal, räkneta
$N$	[-]	Totalantal
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	Flöde
$r$	[-]	Rang
$r_{inj}$	[-]	Antalet injekterade sprickor
$r_t$	[m]	Tunnelradie
$r_w$	[m]	Borrhålsradie
$T$	[m <sup>2</sup> /s]	Transmissivitet
$T_{inj}$	[m <sup>2</sup> /s]	Resttransmissivitet, efter injektering
$T_{max}$	[m <sup>2</sup> /s]	Transmissivitet, största sprickan

### Grekiska bokstäver

$\xi$	[-]	Skinfaktor
$\mu$	[Pa·s]	Vattnets viskositet
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Vattnets densitet

### Matematiska uttryck

$dh$	[m]	Grundvattennivåskillnad
$dp$	[Pa]	Trycknivåskillnad
$Q/dh$	[m <sup>2</sup> /s]	Specifik kapacitet
$\mu_{Tinj}$	[m <sup>2</sup> /s]	Medelvärde av resttransmissivitet

### Förkortningar

BIPS	Borehole Image Processing System
CDF	Cumulative distribution function (kumulativ fördelningsfunktion)
ML	Maximum likelihood
PFL DIFF	Posiva Flow Log, Difference Flow Method (differensflödesloggning)
RQD	Rock Quality Designation



## INNEHÅLL

1.	INTRODUKTION.....	1
1.1	Bakgrund .....	1
1.2	Syfte.....	3
1.3	Genomförande .....	3
1.4	Indata .....	4
2.	TEORETISK ÖVERSIKT.....	7
2.1	Förberedelse av indata.....	7
2.2	Upprättande av Paretofördelning.....	9
2.3	Tillämpning i injekteringsprocessen.....	12
2.4	Modellantaganden .....	14
2.5	Om verktyget .....	14
3.	ANALYSER AV DATASET.....	17
3.1	Domänindelning .....	17
3.2	Erforderligt antal sektioner .....	21
3.3	Sektionslängd .....	24
3.4	Antal sprickor .....	27
3.5	Mätgränser .....	30
4.	FALLSTUDIER .....	39
4.1	Studieobjekt.....	39
4.2	Sektionslängd .....	40
4.3	Mätgränser .....	40
4.4	Antal sektioner.....	42
4.5	Antalet passningsmätpunkter.....	42
4.6	Passning av Paretofördelning till data .....	44
5.	UPPDATERING AV RÄKNEVERKTYG.....	49
6.	DISKUSSION .....	51
6.1	Domänindelning .....	51
6.2	Kvantitet och kvalitet hos insamlade data .....	51
6.3	Känslighetsanalyser .....	52
7.	SLUTSATSER .....	57
7.1	Förslag till vidare studier.....	58

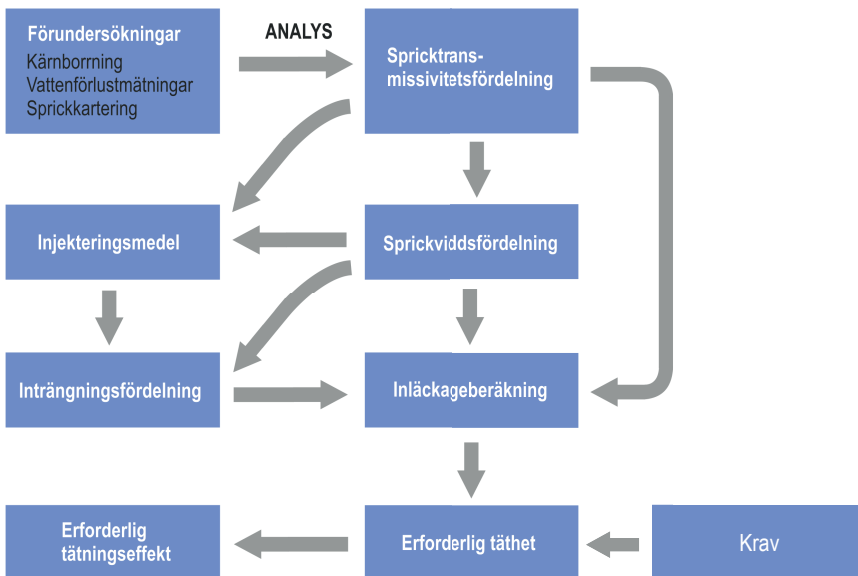
REFERENSER ..... 59  
Bilaga 1

# 1. INTRODUKTION

## 1.1 Bakgrund

Vid tunnelbyggande i hårt, sprickigt berg utförs i de flesta fall tätningsåtgärder för att erhålla en tillräckligt torr tunnelmiljö och för att minimera skadlig omgivningspåverkan till följd av grundvattenbortledning. Tätning utförs oftast som kontinuerlig förinjektering med cementbaserade injekteringsmedel, men beroende på inläckagekrav och injekteringskomplexitet och svårighetsgrad ställs olika krav på omfattning av undersökningar, analyser och parameterval.

I Trafikverkets dokument Krav TRVINFRA-00233 Tunnelbyggande (Trafikverket 2021) anges att vid injektering med hög svårighetsgrad bör transmissivets- och sprickviddsfördelningar bestämmas som underlag vid val av injekteringsparametrar. Fördelningarna ingår som ett analyssteg i en designmetodik för injektering (Figur 1-1) som presenterades av Gustafson m.fl. (2004) och kan användas för beräkning av injekteringsmedlets inträngningslängd och resttransmissiviteter vid olika kombinationer av injekteringsparametrar. Designmetodiken ger även projekteringen en systematik och transparens som ligger i linje med att projekt med höga till mycket höga krav på täthet ska kunna basera projekteringen på välgrundade antaganden och objektspecifika analyser.



**Figur 1-1.** Designprocess för injektering. Modifierad från Gustafson (2009).  
*Figure 1-1. A design process for grouting. Modified from Gustafson (2009).*

En metod för framtagande av transmissivitets- och sprickviddsfördelningar som utvecklats vid Chalmers tekniska högskola innebär att en statistisk fördelning (Paretofördelning) passas till data från sektionsvisa hydrauliska tester i borrhål (Fransson 2002, Gustafson och Fransson 2005). Mer specifikt innebär detta att uppmätta sektionsflöden länkas till enskilda sprickor vars antal bestäms genom sprickkartering och/eller genom att fotografera/scanna ett borrhåls väggar. Funktionen innehåller en konstant  $k$ , som är den så kallade formparametern för Paretofördelningen. En teoretisk översikt som mer ingående beskriver den statistiska fördelningen och dess passning till mätdata ges i Kapitel 2.

Metodikerna med sprickviddsfördelningar för hydrogeologisk karakterisering har bidragit till tillfredsställande tätningsresultat i ett flertal forsknings- och infrastrukturprojekt i Sverige där den har tillämpats. Exempel på projekt där sprickviddsanalyser nyttjats är Törnskogstunneln (Funehag och Gustafson 2005), Nygårdstunneln (Butron m.fl. 2008) och TASS-tunneln i Äspölaboratoriet (Funehag och Emmelin 2011). Det förekommer även infrastrukturprojekt där designmetodikerna tillämpats, men där resultat inte har publicerats, t.ex. Citybanan, Västlänken och City Link.

Metodikens tillämpning i infrastrukturprojekt har i vissa fall varit begränsad till följd av beräkningsmässiga svårigheter att utföra de statistiska analyserna. För att underlätta beräkningarna utvecklades därför i BeFo-projekt 143 ”Beräkningsverktyg för bergkarakterisering vid injekteringsdesign” (Thörn m.fl. 2015) ett beräkningsverktyg som automatiserar de statistiska beräkningarna. Detta verktyg möjliggör en snabb och strukturerad utvärdering av data från testade borrhål.

Det förekommer dock osäkerheter gällande exempelvis beräkningsantaganden och krav på mätutförande när sprickviddsanalyser ska tillämpas. I Thörn m.fl. (2016) och Runslätt m.fl. (2017) presenteras två fallstudier där beräkningsverktyget nyttjats för sprickviddsanalys. Mer specifikt undersöks hur mätgränsen hos mätutrustningen påverkar analysresultat och möjliga slutsatser om bergets sprickviddsfördelning och efterföljande inläckageberäkningar. Studierna visade att mätgränsen kan få stor betydelse för analysresultaten.

Stille (2015) diskuterar att beräkningen även är känslig till modellantaganden avseende antalet sprickor och borrhålsslängd (antalet testade sektioner) som används i beräkningen. Om antalet oberoende sprickor i ett borrhål överskattas blir transmissiviteten hos den största sprickan överskattad och därmed även efterföljande beräkningar av inflöden. Inflödesberäkningarna är dessutom beroende av att borrhålen innehåller ett stort antal sektioner eftersom inflödesekvationer som generellt används förutsätter att bergmassan kan beskrivas som ett homogent kontinuum. Fördelningen av spricktransmissiviteter i korta borrhål varierar och kan antas representera en slumpmässig samling av få sprickor, vilket nödvändigtvis inte är representativt i en stor bergmassa. Det finns alltså en medvetenhet om vanliga osäkerheter och problem som påträffas när sprickviddsanalyser ska genomföras, men det saknas en enhetlig genomgång av rekommendationer avseende exempelvis mätgräns, sektionslängd, sprickantal och borrhålsslängd.



## 1.2 Syfte

I forsknings- och infrastrukturprojekt där designmetodik med sprickviddsfördelningar tillämpats har det uppkommit diskussioner avseende hantering av felkällor och osäkerheter som följer modellantaganden och kvalitet hos indata. Syftet med denna studie är att undersöka hur olika typer av testutföranden och tolkningar av geologi kan påverka resulterande sprickviddsfördelning och i förlängningen val av injekteringsutförande. Genom att testa olika dataset från befintliga forsknings- och infrastrukturprojekt i Sverige och modifiera parametrar såsom mätgränser, sektionslängder, antal sektioner och domäner produceras resultat vilka ligger till grund för rekommendationer avseende beräkningsmetodens applicerbarhet, utförande av mätningar och modellantaganden. Rekommendationerna ökar metodikens användarvänlighet och ger även en bättre förståelse för de resultat som presenterats i hittills genomförda sprickviddsanalyser inom svensk bergbyggnad.

I projektet har även det utvecklade beräkningsverktyget uppdaterats och förfinats genom att korrigerat fel och lägga till funktioner som varit till nytta för de simuleringar som utförts.

## 1.3 Genomförande

De analyser som har utförts omfattar beräkningar och modifieringar av dataset vilket i grunden är känslighetsanalyser som undersöker hur variation av parametrar för hydrauliska tester och kärnkartering påverkar resulterande sprickviddsfördelning och efterföljande inläckageberäkning.

De parametrar som analyserats är:

- *Domänindelning.* Hur påverkar en indelning i olika hydrogeologiska domäner, exempelvis ytberg–zonberg–normalberg?
- *Erforderligt antal sektioner.* Hur många sektioner behövs för att representativt beskriva en domän?
- *Sektionslängd.* Vilken inverkan har sektionslängden? Är vanliga sektionslängder (3–6 m) tillräckligt korta för att modellantagande om en dominerande spricka ska gälla?
- *Antal sprickor.* Hur påverkar olika sprickantal (överskattning och underskattning) analysresultatet?
- *Mätutrustningens mätgräns.* Vilken inverkan har flödesmätarens mätområde, dvs. övre och undre mätgräns? Hur mycket påverkar flödesmätarens omfång på mätintervallet?

Beräkningsverktyget som har nyttjats för beräkningarna presenteras i Thörn m.fl. (2015). Verktöget har uppdaterats något under detta arbete, och en ny version släpps i samband med publicering av denna rapport.

Respektive analys presenteras i huvudsak genom att redovisa hur formfaktorn för Paretofördelningen,  $k$ , och största sprickvidd,  $b_{max}$ , i simuleringen påverkas. Vidare har alla analyser utförts med beräkning av ett schablonmässigt beräknat inläckage  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] till en otätad tunnel baserad på den simulerade uppsättningen sprickvidder enligt Ekvation 1 (se t.ex. Gustafson 2009):

$$Q = \frac{2\pi K_{berg}H}{\ln(2H/r_t) + \xi} \quad \text{Ekvation 1}$$

Där  $H$  = grundvattentryck [m],  $K_{berg}$  = medelvärdet på hydraulisk konduktivitet före injektering [m/s],  $r_t$  = ekvivalent radie för tunnel/bergutrymme [m],  $\xi$  = skinfaktorn (korrektionsfaktor för flödesmotstånd) [-]. I de analyserade exemplen har grundvattentryck satts till 30 m, tunnelradie till 5 m och skinfaktor till 5.

Vidare har denna studie omfattat att sammanställa tidigare publicerade resultat från projekt där transmissivitets- och sprickviddsfördelningar har ingått som underlag till injekteringsdesign. Sammanställningen bidrar till en beskrivning av vad som karaktäriserar normalt förekommande svensk berggrund, men kan även visa hur passning av Paretofördelningen påverkas av bristande kvalitet i indata.

Rapporten inleds med en teoretisk översikt i Kapitel 2. Resultatet av analyserna presenteras i Kapitel 3. I Kapitel 4 presenteras en sammanställning av resultat från hittills publicerade sprickviddsanalyser inom svensk bergbyggnad. Rapporten avslutas med diskussioner och slutsatser i Kapitel 6 respektive Kapitel 7.

## 1.4 Indata

Nedan följer en beskrivning av de infrastrukturprojekt och dataset som har använts för att utföra beräkningar med ovanstående angivna analyser. Alla dataset har inte nyttjats för samtliga analyser, använd data framgår under respektive rubrik. Generellt nyttjas dataset från tre projekt per analyserad parameter.

### 1.4.1 Förbifart Stockholm

Förbifart Stockholm är en vägtunnel som utgör en del av den ringled runt Stockholm där E4 ska ledas i ca 18 km bergtunnel med sex trafikplatser. Analyserade data kommer från Kungens Kurva och Hjulsta. Berggrunden inom dessa områden består mestadels av fin- till grovkornig sedimentgnejs. Enstaka grönstens- och pegmatitgångar förekommer.

Utvärderade data från Förbifart Stockholm omfattas av olika dataset utförda med olika mätutrustning. Ett nyttjat dataset omfattar 10 kärnborrhål med injektionstester utförda i 3 m med en sammanlagd längd på 703 m. Testerna genomfördes med WIC-utrustning med

konstant övertryck på ca 0,2 MPa under 15 minuter. Nedre mätgräns med avseende på flöde är satt till 5 ml/min och övre mätgräns ca 60 l/min.

Ett annat dataset omfattar 12 borrhål, totalt 600 m, med injektionstester utförda i 3 m långa sektioner. Kärnborrhålen är uppdelade mellan södra delen (FS12, 8 kärnborrhål, 131 sektioner) och norra delen (FS15, 4 kärnborrhål, 65 sektioner). Testerna genomfördes med konstant övertryck på ca 0,2 MPa under 15 minuter. Nedre mätgräns med avseende på flöde är satt till 5 ml/min och övre mätgräns ca 60 l/min. Undantag är 2 kärnborrhål (41 sektioner) i FS12 där nedre mätgräns är 100 ml/min.

#### *1.4.2 Äspö Utbyggnad*

Äspö Utbyggnad är ett tunnelavsnitt i undermarksanläggningen Äspölaboratoriet i Oskarshamns kommun. Berggrunden i Äspölaboratoriet domineras av äspödiorit med förekomst av en mindre mängd finkornig diorit/gabbro, samt gångar av pegmatit och finkornig granit.

Utvärderade data omfattas av 2 borrhål (332 m) med differensflödesloggning (PFL DIFF) i 1 m långa sektioner och kärnkartering med BIPS (se utförlig metodbeskrivning i Johansson m.fl. 2015). Vid flödesmätningar med en 1 m lång testsektion förflyttas mätsonden successivt i steg om 0,1 m i den mätbara delen av borrhålet. Tryck i borrhålet förändrades genom att justera flödet från borrhålet. Mätområdet för PFL-utrustningen ligger mellan ca 30 ml/h och 300 000 ml/h (5 l/min). I datasetet förekommer en stor mängd nollsektioner där inget flöde uppmätts trots hög kvalitet på mätningen.

#### *1.4.3 Nygårds- och Kattlebergstunneln*

Nygårdstunneln (3,0 km lång) och Kattlebergstunneln (1,8 km lång) är två järnvägstunnlar tillhörande projektet BanaVäg I Väst. De är belägna i Lilla Edets och i Ale kommun och öppnades för trafik 2008, respektive 2012. Berggrunden domineras av gnejs med inslag av amfibolit.

Utvärderade data omfattas av 9 borrhål (273 m) med injektionstester i 3 m långa sektioner. Borrhålen är till största delen utförda i ytberg och är maximalt ca 60 m långa. Injektionstesterna är utförda i tre övertrycksteg (0,2–0,5–0,2 MPa). För Nygårdstunneln var pumpetid för varje steg 10 minuter, med en maximal pumpkapacitet på 43 l/min (totalt 430 l under 10 min) och en minsta på 0,1 l/min (1 l under 10 min). För Kattlebergstunneln pågick varje pumpsteg i 3 minuter med en maximal pumpkapacitet på 60 l/min (totalt 180 l) och en lägsta på 0,3 l/min (1 l under 3 min).

#### *1.4.4 Västlänken*

Västlänken är en järnvägstunnel för pendeltågstrafik som byggs under Göteborg. Längd i berg är ca 6 km och totalt ingår tre nya stationer, varav två delvis byggs i berg. Berggrunden inom det studerade området domineras av rödgrå till grå, granitiska till

tonalitiska gnejser. Undersökningar har visat att hydrauliska tester i berget öster om Mölndalsån visar en större spridning i hydraulisk konduktivitet jämfört med berget väster om Mölndalsån (Trafikverket 2016), och denna domänindelning av data har även utförts i denna studie.

Utvärderade data omfattar 6 borrhål (285 m) med injektionstester i 3 m långa sektioner. Testerna utfördes i ett trycksteg med övertryck 0,3 MPa under minst 10 minuter eller tills stationära förhållanden bedömdes ha uppnåtts. Övre och undre mätkapacitet för mätutrustningen är ca 50 l/min, respektive ca 5 ml/min.

## 2. TEORETISK ÖVERSIKT

Fokus för denna rapport är utvärdering av de förundersökningsdata som ligger till grund för framtagande av transmissivitets- och sprickviddsfördelningar:

- 1) Enskilda sprickor vars antal bestäms genom kärnkartering och/eller fotografering/scanning av borrhållsväggar.
- 2) Sektionstransmissiviteter utvärderade från sektionsvisa hydrauliska tester längs samma borrhål.

I detta kapitel ges en kortfattad bakgrund för tillvägagångssättet att omvandla förundersökningsdata till statistiska fördelningar och vilka modellantaganden som har avgörande betydelse för resultatet. För att förenkla läsbarheten har matematiska härledningar till formler och ekvationer uteslutits. För att ta del av dessa hänvisas läsaren till Gustafson (2009) där detaljerade redogörelser av relevanta antaganden och härledningar ges.

### 2.1 Förberedelse av indata

Berggrundens hydrauliska egenskaper avseende dess vattenförande förmåga kan uttryckas med dess hydrauliska konduktivitet  $K$  [m/s]. Normalt betraktas bergmassan som ett ekvivalent kontinuum där vattenförande egenskaper jämnas ut och berggrunden ges någon form av effektivvärde. I frågeställningar kopplade till injektering finns också intresse av egenskaper hos enskilda sprickor där en spricka ofta förenklas till en tvådimensionell spalt genom vilken vatten flödar. Mängden vatten som kan transporteras genom sprickan kan uttryckas med transmissivitet  $T$  [m<sup>2</sup>/s], som är direkt proportionell mot den hydrauliska konduktiviteten och akvifärens (sprickans) mäktighet,  $b$  [m].

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

Vidare kan transporten av vatten genom en spricka relateras till dess hydrauliska sprickvidd,  $b_{hyd}$  [m] vilken kopplas till sprickans transmissivitet genom den kubiska lagen:

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

Där  $\mu_w$  är vattnets viskositet [Pas],  $\rho_w$  vattnets densitet [kg/m<sup>3</sup>] och  $g$  är tyngdaccelerationen [m/s<sup>2</sup>]. Parametrarna  $K$  och  $T$  utvärderas vanligen från hydrauliska mätningar i kärnborrhål och hammarborrhål. Exempel på hydrauliska mätningar är

injektionstest (vattenförlustmätningar) och differensflödesloggning (PFL). Vid injektionstest mäts flödet som pressas in i en sektion av borrhålet under konstant tryck. Testet kan utföras med olika övertrycksteg och injektionstider, oftast med målet att uppnå stationära förhållanden i testsektionen. Vid differensflödesloggning mäts inflödet längs borrhål i korta borrhålssektioner. En vanligt förfarande är att mäta flödet från en 5 m lång testsektion (som successivt förflyttas med 0,5 m) under såväl naturliga förhållanden som vid pumpning. Flödesmätningar kan även utföras under pumpning med en 1 m lång testsektion som successivt förflyttades i steg om 0,1 m.

Data som genereras från hydrauliska tester utgörs av vattenflöden  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] och trycknivåhöjningar  $dp$  [Pa] eller grundvattentryck  $dh$  [m]. För att dessa data ska kunna nyttjas till sprickviddsberäkningar måste flödesdata omvandlas till transmissivitetsdata. En vanligen nyttjad beräkningsformel är Moyes formel (Moye 1967):

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

där  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] är flödet i slutet av testperioden,  $dp$  [Pa] är det konstanta injektionstrycket,  $\rho_w$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] är vattnets densitet,  $g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] gravitationskonstanten,  $r_w$  [m] är borrhålsradie och  $L$  [m] är sektionenslängd. Moyes formel förutsätter att stationära tillstånd uppnås i slutet av testet och att  $Q$  och  $dp$  eller  $dh$  är konstanta. Vidare förutsätts ett tvådimensionellt (radiellt) flöde inom ett avstånd på  $L/2$  från borrhålet och i huvudsak tredimensionellt flöde bortom  $L/2$  (Moye 1967).

Manschettmätningar i smala borrhål avviker dock från den sfäriska punktkälla som avses i Moyes formel och liknar till utseende en linjär källa. Det finns en modifierad variant av Moyes formel, Ylinens formel, som är optimerad för smala borrhål när  $L/r_w > 30$ , dvs. när avståndet mellan manschetterna är längre än 0,8 m i ett borrhål med diameter 56 mm diameter, eller 1,1 m i ett 76 mm hål (Hämäläinen 2013). Utvärdering av hydraulisk konduktivitet med Ylinens formel sker enligt:

$$K = \frac{Q \cdot \rho_w \cdot g}{2\pi \cdot L \cdot dp} \cdot \ln \left( \frac{L}{2r_w} \right) \quad \text{Ekvation 5}$$

Manschettmätningar utförda i sektioner i borrhål ger information om sektionstransmissiviteter och inte flödet i enskilda sprickor. I normalsprickig svensk berggrund antas dock flödet från sektionens största spricka dominera det totala flödet i sektionen. Detta antagande har studerats och får vid vissa förhållanden stöd av Hernqvist m.fl. (2014). Deras studie visar att den största sprickans flöde blir mindre dominerande i grunda borrhål (ytberg) och i sektioner där vattenförande sprickor förekommer i kluster

(zonberg). Även sektionenslängd påverkar resultatet och antagandet bedöms gälla för längder upp till 5 m. I normalberg, där alltså en spricka kan antas dominera flöde, är det därför rimligt att anta att statistiska fördelningsfunktioner kan nyttjas för att estimeras enskilda sprickors genomsläpplighet.

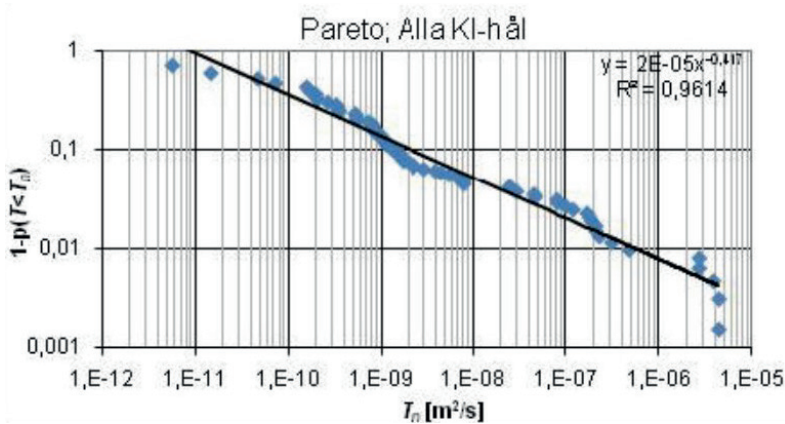
## 2.2 Upprättande av Paretofördelning

Statistiska fördelningar är matematiska modeller som underlättar möjligheten att dra slutsatser om händelseutfall från en begränsad mängd data. Modellberäkningar utförs ofta i form av sannolikhetsfördelningar, vari sannolikheten utgör ett mått på hur troligt det är att en viss händelse inträffar. En statistisk fördelningsfunktion som etablerats som lämplig för att beskriva enskilda sprickors transmissivitet och hydrauliska sprickvidd är Paretofördelningen. Den är en potenslagsfördelning som med sin exponentiellt avtagande frekvens av en storhets värde reflekterar den typiska variationen i spricktransmissiviteter som finns i sprickigt, kristallint berg, dvs. ett fåtal stora sprickor och många små sprickor (Gustafson och Fransson 2005).

Fördelningsfunktionen för Paretofördelningen kan kortfattat beskrivet beräknas utifrån den största spricktransmissiviteten  $T_{max}$  och det totala antalet öppna sprickor  $N$  i borrhålet enligt Ekvation 6. Funktionen innehåller även en konstant  $k$  som är den så kallade formparametern för Paretofördelningen.

$$p(T < T_n) = 1 - \frac{(T_{max}/T_n)^k}{N+1} \quad \text{Ekvation 6}$$

Formparametern för Paretofördelningen kan skattas från en kumulativ fördelningsfunktion med utvärderad spricktransmissivitetsdata, se exempel i Figur 2-1. Funktionen motsvaras av den räta linjen när spricktransmissivitetsdata plottas i ett dubbellogaritmiskt diagram och funktionsparametrar fås genom att anpassa en linjär regressionstrendlinje med minsta kvadratmetoden. I Excel är detta standard för ”lägg till trendlinje” i diagram. Inom detta projekt har även en annan regressionsmetod sökts för att implementera i verktyget, som jämförelse. Matematiska svårigheter har uppstått i att översätta den diskreta fördelningen till en kontinuerlig på vilken den utmanande regressionsmetoden ”Maximum Likelihood” kan tillämpas. Då ingen regression kunde utföras enligt ML presenteras detta inte ytterligare i rapporten.



**Figur 2-1.** Skattad Paretofördelning för samtliga kärnbrorhål i TASS-tunneln i Äspölaboratoriet ( $k = 0,42$ ) (Funehag och Emmelin 2011). Passning är utförd med linjär regression i Excel.

*Figure 2-1. Estimation of a Pareto distribution for boreholes in the TASS-tunnel in Äspö HRL ( $k = 0,42$ ) (Funehag och Emmelin 2011). The fitting is carried out with linear regression in Excel.*

En kumulativ fördelningsfunktion (engelsk akronym CDF) visar sannolikheten att ett värde som följer en given sannolikhetsfördelning är mindre eller lika med ett visst värde  $p(X \leq x)$ . Den studerade parametern redovisas längs  $x$ -axeln och sannolikheten  $p(X \leq x)$  anges på  $y$ -axeln. För att kunna redovisa utvärderade data, dvs. empiriska data, som CDF görs antagandet att värdenas sannolikhetsfördelning följer en Weibullfördelning:

$$p(X \leq x) = \frac{n_i}{N+1} \quad \text{Ekvation 7}$$

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

Ett sista steg innan funktionen för Paretofördelningen kan passas i det kumulativa fördelningsdiagrammet är att omvandla sektionstransmissiviteter till transmissivitet hos enskilda sprickor. En av Gustafson (2009) förordad metod är en iterativ, icke-parametrisk metod presenterad av Fransson (2002). Metoden innebär förenklat att sannolikheten  $p(X \leq x)$  längs  $y$ -axeln räknas om så att resulterande värden  $p(T < T_r)$  för varje sektion istället motsvarar sannolikheten för att en transmissivitet är mindre än transmissiviteten av den största sprickan inom varje sektion. Tillvägagångssättet för den icke-parametriska metoden beskrivs mer ingående i Gustafson (2009).



Med ett  $k$ -värde från den skattade Paretofördelningen kan  $T_{max}$  beräknas. Första steget är att introducera rangen  $r=N-n+1$  så att transmissiviteten för en spricka med rangen  $r$  beräknas enligt Ekvation 8.

$$T_r = \frac{T_{max}}{r^{1/k}} \quad \text{Ekvation 8}$$

Ur Ekvation 8 är det möjligt att bestämma transmissiviteten för den största sprickan  $T_{max}$ . 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 7.

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

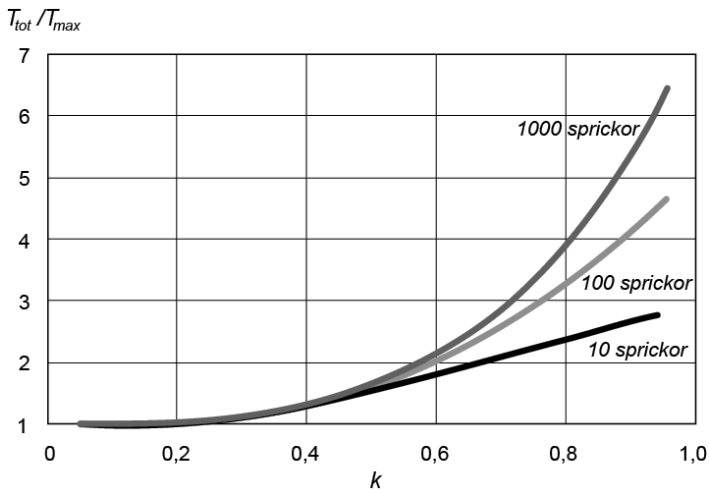
$$T_{tot} = T_{max} \cdot \sum_{r=1}^N \frac{1}{r^{1/k}} \quad \text{Ekvation 9}$$

Med den kubiska lagen sätts spricktransmissiviteten i direkt relation till den hydrauliska sprickvidden enligt Ekvation 10 och fördelningsfunktion för sprickvidder  $p(b < b_r)$  får utseende enligt Ekvation 11 (jämför med Ekvation 6):

$$b_r = \frac{b_{max}}{r^{1/3k}} \quad \text{Ekvation 10}$$

$$p(b < b_r) = 1 - \frac{(b_{max}/b_r)^{3k}}{N+1} \quad \text{Ekvation 11}$$

Det resulterande  $k$ -värdet avslöjar egenskaper hos det dataset som Paretofördelningen beskriver. Om  $k < 1/2$  är den största sprickan alltid av samma storleksordning som den totala, summerade transmissiviteten. Ju större värde på  $k$ , desto mindre är spridningen mellan spricktransmissiviter. Dock utgör den största sprickan fortfarande en väsentlig del av den totala transmissiviteten  $T_{tot}$ , se Figur 2-2.



**Figur 2-2.** Kvot mellan summerad totaltransmissivitet  $T_{tot}$  och transmissivitet hos den största sprickan  $T_{max}$  som funktion av olika värden på formparametern  $k$  och olika antal sprickor  $N$  (Gustafson 2009).

*Figure 2-2. Ratio between the total transmissivity  $T_{tot}$  and the transmissivity of the largest fracture  $T_{max}$ , as a function of different values on Pareto distribution parameter and fracture count (Gustafson 2009).*

### 2.3 Tillämpning i injekteringsprocessen

Den resulterande fördelningen av spricktransmissiviteter och sprickvidder används i designmetodiken (Figur 1-1) 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. Den största sprickvidden kan nyttjas för att bedöma en beräknad inträngningslängd i den största sprickan och om spridningen behöver begränsas, både med avseende på total volym och längsta avstånd ut i bergmassan.

Beräkning av dimensionerande sprickvidd kan även ligga till grund för en analys av bedömd tätningseffekt ( $1 - K_{inj}/K_{berg}$ ), vilket kan nyttjas för en skattning av injekteringsarbetets svårighetsgrad. En tättningsgrad på 10 motsvarar en tätningseffekt på 90%, och tättningsgrad 100 motsvarar tätningseffekten 99%. Stille (2012) presenterar en tabell (Tabell 2-1) där svårighetsgrad för injektering definieras utifrån tätningseffekt (sealing efficiency) och vilken hydraulisk konduktivitet som ska uppnås efter injektering. Bedömningen bygger på att injektering blir svårare om en större andel av de vattenförande sprickorna behöver tätas, vilket också innebär att finare sprickor behöver tätas. Injektering bedöms också bli svårare om den erfordrade hydrauliska konduktiviteten efter injektering är lägre eftersom sprickor med liten apertur är svårare att tätas med konventionell cementinjektering.

**Tabell 2-1.** Svårighetsgrad som funktion av tätningseffekt och hydraulisk konduktivitet efter injektering (Stille 2012).

*Table 2-1. Degree of difficulty as a function of sealing effect and hydraulic conductivity after grouting (Stille 2012).*

Required sealing efficiency	<90%	90–99%	>99%
Required conductivity			
>10 <sup>-7</sup> m/s	Uncomplicated grouting	Fair grouting	Difficult grouting
10 <sup>-7</sup> to 10 <sup>-8</sup> m/s	Fair grouting	Difficult grouting	Very difficult grouting
<10 <sup>-8</sup> m/s	Difficult grouting	Very difficult grouting	Very difficult grouting

Den minsta hydraulisk vidd som måste tätas för att nå inläckagekravet kan beräknas genom att successivt ta bort sprickor från sprickviddsfördelningen (vilket motsvarar att dessa har tätats) till dess att ett beräknat kvarvarande inflödet  $Q$  uppfyller täthetskraven. I metoden antas resttransmissiviteten  $T_{inj}$  motsvarar den summerade transmissiviteten för de sprickor som inte tätas och som därmed är mindre än dimensionerande sprickvidd (Gustafson 2009):

$$T_{inj} = T_{tot} - T_{max} \cdot \sum_1^{r_{inj}} \frac{1}{r^{1/k}} \quad \text{Ekvation 12}$$

där  $T_{tot}$  är transmissiviteten för alla testade sektioner och  $r_{inj}$  är antalet sprickor som injekteras. Den hydrauliska konduktiviteten hos den injekterade bergmassan motsvarar  $K_{inj} = T_{inj}/L$ .

Det finns dock studier som visat att resttransmissiviteter tolkade från Paretofördelningar baserade på olika typer av hydrauliska test skiljer sig åt, och att de kan vara olika lämpade för att bedöma exempelvis inläckage, se vidare i Avsnitt 2.4. Ekvation 12 innebär även att samtliga återstående spricktransmissiviteter från ej injekterade sprickor bidrar till bergets genomsläpplighet efter injektering. Detta riskerar dock att överskatta inflödet efter injektering på motsvarande sätt som flödet i oinjekterad bergmassa överskattas om alla sprickor antas bidra till inflödet. Stille (2016) föreslår att ett nytt aritmetiskt medelvärde för bergets genomsläpplighet  $\mu_{Tinj}$  beräknas enligt Ekvation 13. Den analytiska inflödesekvationen för injekterat berg motsvaras av Ekvation 14 (Stille 2016):

$$K_{inj} = \frac{\mu_{Tinj}}{L} \quad \text{Ekvation 13}$$

$$Q_{inj} = \frac{2\pi \cdot \mu_{T_{inj}} / L \cdot H}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \xi}$$

*Ekvation 14*

## 2.4 Modellantaganden

Vid nyttjande av de statistiska fördelningarna finns det ett antal modellantaganden som är viktiga att känna till och eventuellt ta hänsyn till. Dessa listas kortfattat nedan. För mer omfattande beskrivning av bakgrund och konsekvenser av dessa antaganden hänvisas läsaren till angivna referenser.

- Den kubiska lagen förutsätter 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 m.fl. 1980).
- Transmissiviteten hos den största sprickan i sektionen antas vara av samma storleksordning som sektionstransmissiviteten. Hernqvist m.fl. (2014) visar att stödet för detta antagande minskar i ytlig och uppsprucken bergmassa, samt vid långa sektionslängder.
- De hydrauliska egenskaperna hos sprickorna antas vara statistiskt oberoende, vilket innebär att de inte påverkas av egenskaperna hos närliggande sprickor. Att täta en större vattenförande struktur kan dock påverka vattenföringen i mindre, icke-tätade strukturer (se t.ex. Emmelin m.fl. 2004).
- Den förekommande konnektiviteten i bergmassan kan inte bortses från vid inläckageberäkningar. Paretofördelade sprickviddsanalyser riskerar att underskatta inflöden i bergmassor med välkonnekterade spricknätverk och överskatta inflöden i dåligt konnekterade spricknätverk (Fransson och Hernqvist 2010).
- Injektionstester representerar ofta en lokal transmissivitet i nära anslutning till borrhålet och kan ge en rättvisande bild av injekterbarheten av sprickan (Fransson 1999). De tenderar dock att överskatta bergmassans genomsläpplighet och ger därmed överskattningar vid inläckageberäkningar. Vid beräkning av inflöde efter injektering har det därför visat sig lämpligt att nyttja ett medelvärde för transmissivitet efter injektering istället för en total resttransmissivitet (Stille 2016).
- Data från flödesloggning (t.ex. PFL) påverkas av konnektiviteten i spricksystemet och kan ge en rättvisande bild av bergmassans storskaliga flödesegenskaper (Follin m.fl. 2011). Dock identifieras inte flödesisolerade sprickor vilket kan vara en nackdel i analyser för injekterbarhet (Hernqvist m.fl. 2012).

## 2.5 Om verktyget

För att underlätta skattningen av en Paretofördelning för ett dataset utvecklades i BeFo-projektet ”Beräkningsverktyg för bergkaraktärisering vid injekteringsdesign” (Thörn m.fl. 2015) ett beräkningsverktyg som automatiserar de statistiska beräkningarna.

Verktyget är upprättat i programvaran Microsoft Excel. Fördelarna med att använda Excel som bas för beräkningar är att programvaran är allmänt spridd och använd.

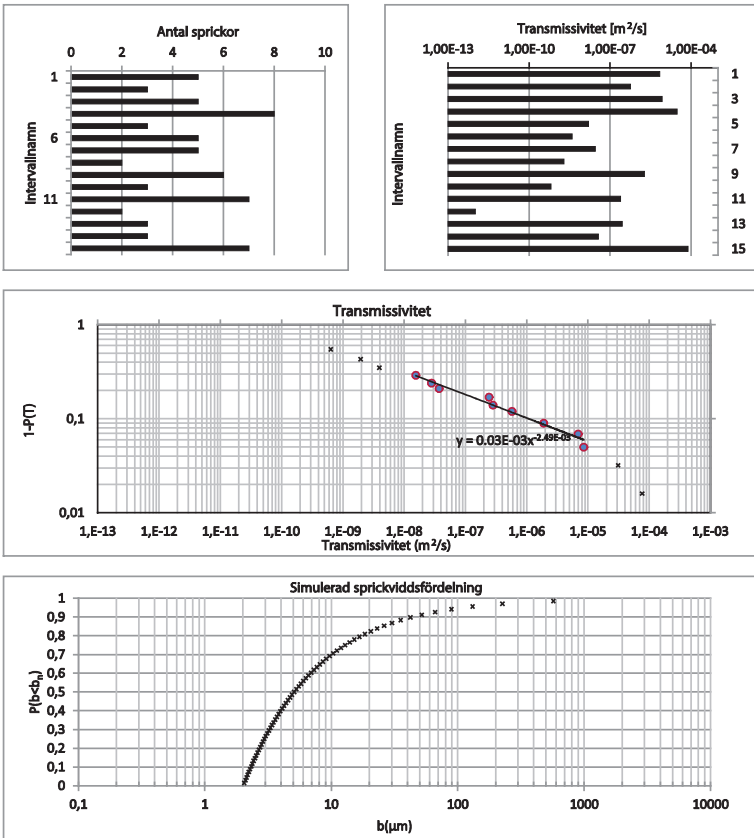
Körningen av verktyget inleds med att användaren fyller i sina data från hydrauliska tester och sprickkartering i fliken ”Konditionera data” och där genererar en indatafil. För att utföra beräkningarna från fliken ”Start” behöver typ av indata specificeras genom ett av följande fyra alternativ;

- 1) Angivet  $T$  eller  $K$  (transmissivitet eller konduktivitet är infogat i indata),
- 2)  $T$  ska beräknas enligt Moyes formel,
- 3)  $T$  ska beräknas enligt Ylinens formel, eller
- 4)  $T$  ska beräknas som  $Q/dh$ .

Efter genomförd beräkning produceras en Resultatrapport, se Figur 2-3. Resultatrapporten innehåller angivna parametervärden från konditioneraflikens datahuvud, exempelvis borrhålsinformation, tillsammans med värden för den beräknade Paretofördelningen, som största spricktransmissivitet  $b_{max}$  och formfaktorn  $k$ . Den passade Paretofördelningen redovisas som en rak linje i ett log-logdiagram. De datapunkter som har använts för passningen är de som ligger mellan mätgränserna och markeras med ring. Värden som ligger utanför mätgränserna markeras med kryss. Det produceras även ett diagram med simulerade sprickvidder enligt Paretofördelningen, vilket motsvarar att alla sprickor som angivits i indatafilen fått ett transmissivitetsvärde som omräknats till sprickvidd med kubiska lagen. Rapporten kan sparas som pdf.

### 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 <sup>3</sup> ]
Beställare: Skärmdump i rapport		Start borrhål	25 [m]	Viskositet	0,0013 [Pas]
Rad 3.		Mätgräns undre	5,00E-09 [m <sup>2</sup> /s]	Gravitation	9,82 [m/s <sup>2</sup> ]
Rad 4.		Mätgräns övre	1,00E-05 [m <sup>2</sup> /s]	Paretoformfaktor, k	0,249
		Sektioner i beräkning	15 [st]	Största sprickan, T <sub>max</sub>	1,17E-04 [m <sup>2</sup> /s]
		Sprickor i simulering	67 [st]	Största sprickan, B <sub>max</sub>	571 [µm]
				T <sub>tot</sub>	1,27E-04 [m <sup>2</sup> /s]



**Figur 2-3.** Resultatrapporten genererad av verktyget. Uppifrån och ned: Borrhålsbeskrivning med antal sprickor och sektionstransmissiviteter. Diagram med passad Paretofördelning. Simulerade sprickvidder utifrån Paretofördelningen via kubiska lagen.  
*Figure 2-3. Result report generated by the tool. From the top: Borehole description with the number of fractures and interval transmissivities. Cumulative distribution function diagram with evaluated Pareto distribution. Simulated hydraulic aperture distribution based on the cubic law.*

### 3. ANALYSER AV DATASET

I detta kapitel ges beskrivningar av de analyser och resultat som har producerats inom projektet.

#### 3.1 Domänindelning

Domänindelning och dess inverkan på resulterande Paretofördelning analyseras för att förtydliga geologins betydelse för antaganden om exempelvis injekterbarhet och inläckage.

Det finns ofta urskiljbara skillnader i hydrauliskt beteende mellan olika geologiska enheter, såsom bergarter, svaghetszoner eller djupberoende i bergmassan. Dessa skillnader kvantifieras vanligen i den ingenjörsgelogiska prognosen (eller motsvarande dokument) för större tunnelprojekt genom att redovisa hydrogeologiska domäner. Utgående från erfarenheter av bergundersökningar och tunneldrivning kan en första ansats till hydrogeologisk domänindelning baseras på indelningen ytberg, svaghetszoner (zonberg) och övrig bergmassa (här benämnt normalberg).

Normalberg utgörs av den dominerande andelen av bergmassan med en förväntad spridning av genomsläpplighet i enlighet med en övergripande analys av hydraulisk medelkonduktivitet. Bergartsegenskaper eller djupberoende kan dock föranleda behov av ytterligare indelning av normalberg. Ytberg utgörs generellt av ett mer uppsprucket berg, ofta i kombination med horisontella/sub-horisontella bankningsplan, vilket leder till ett generellt genomsläppligt spricknätverk och därmed en generellt hög hydraulisk medelkonduktivitet. Svaghetszoner (även kallade deformationszoner) utgörs av partier i berggrunden som har en ökad sprickintensitet och ökad grad av deformation. Dock kan de hydrogeologiska egenskaperna i och i anslutning till zoner variera beroende på exempelvis sprickfyllnad, förekomst av läkta sprickor och hydraulisk konnektivitet mellan sprickor.

##### 3.1.1 Indata

Följande dataset har nyttjats i analysen av domänindelning:

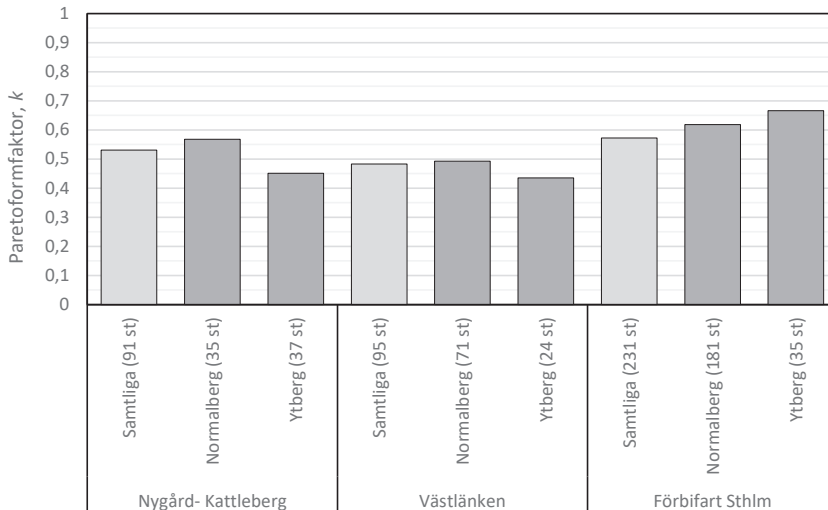
- *Nygårds- och Kattlebergstunneln*: Injektionstester i 3 m långa sektioner från åtta kärnborrhål (totalt 91 sektioner). Domänerna "ytberg" (definieras som bergtäckning mindre än 15 m) och "normalberg" har analyserats. "Zonberg" definieras utifrån förundersökningen beskrivna krosszoner och/eller partier med lågt RQD (<40).
- *Västlänken*: Injektionstester i 3 m långa sektioner från åtta kärnborrhål belägna i området väster om Mölndalsån (totalt 95 sektioner). Analyserade domäner är "ytberg" och "normalberg". Sektioner tillhörande domänen "zonberg" har i förundersökningsmaterial konstaterats inte avvika från normalberg och särredovisas därför inte i underlagsdata.

- *Förbifart Stockholm*: Injektionstester i 3 m långa sektioner från tio kärnbrorhål (totalt 231 sektioner). Domänerna ”ytberg” (definierat som de översta 10 m av bergmassan) och ”normalberg” har analyserats. ”Zonberg” har identifierats i kärnkarteringsprotokoll där uppkrossade partier av kärnorna och/eller svaghetszoner beskrivs.

### 3.1.2 Resultat

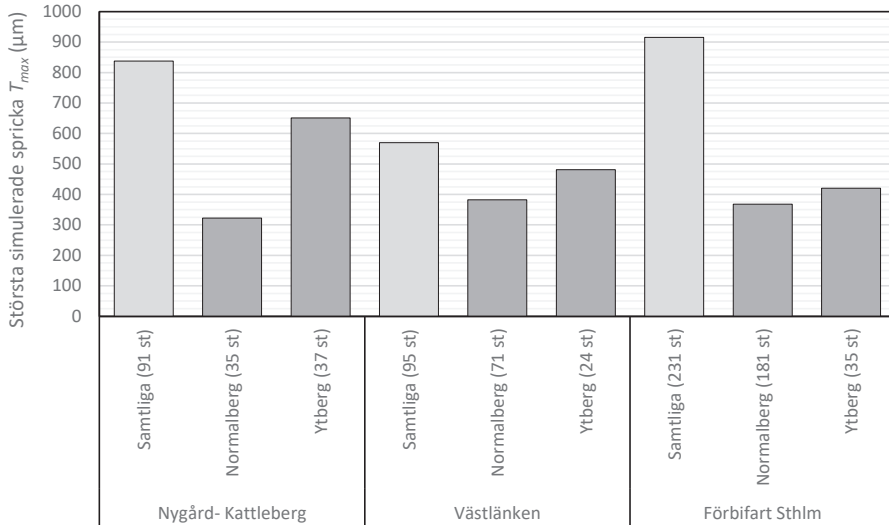
Analys av domänindelningens inverkan på resulterande sprickviddsfördelningar har utförts på dataset där varje testad sektion baserat på karteringsresultat har kategoriserats som ”ytberg” eller ”normalberg”. Resultaten jämförs med analyser baserat på samtliga sektionsdata, dvs. med ytberg, zonberg och normalberg. Resultat av körningarna presenteras i Figur 3-1 i form av formfaktorn  $k$  och största simulerade spricka. I Figur 3-3 presenteras beräknade inläckage till en schablonmässig, otätad tunnel.

Resultatet av analyserna visar att beräknat inläckage och största sprickvidd utan domänindelning (samtliga sektioner) är större än inläckage och största sprickvidd beräknat för data enbart tillhörande normalberg. Vidare ger ytberg högre inläckage och större sprickvidder än normalberg. Det kan också noteras ett högre värde på formfaktorn för normalberg än för ytberg (med undantag för Förbifart Stockholms ytberg). Detta indikerar en större variation i genomsläpplighet i ytberg än i normalberg, där normalberg generellt kan ses som en mer hydrogeologiskt enhetlig bergmassa.

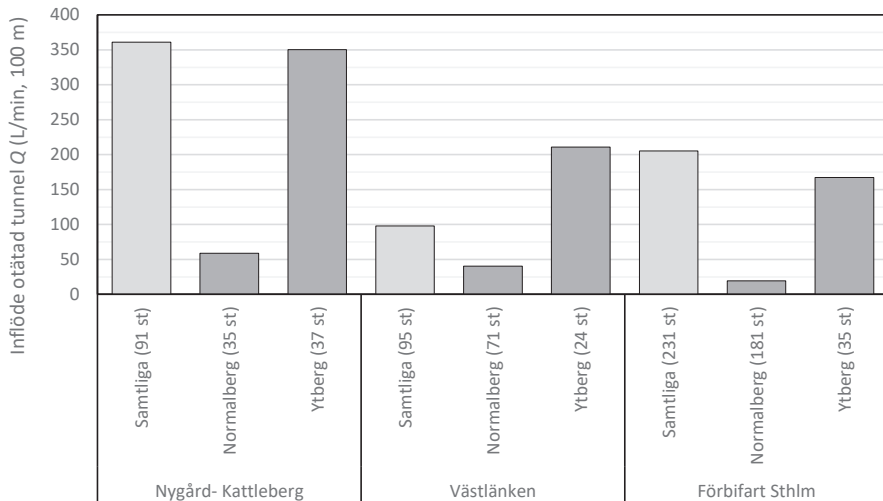


**Figur 3-1.** Beräknad formfaktor för olika dataset, uppdelat mellan samtliga sektioner och sektioner tillhörande de hydrogeologiska domänerna normalberg och ytberg.  
*Figure 3-1.* Calculation of the Pareto distribution parameter for all available data, compared to subsets with sections solely belonging to host rock or shallow rock.



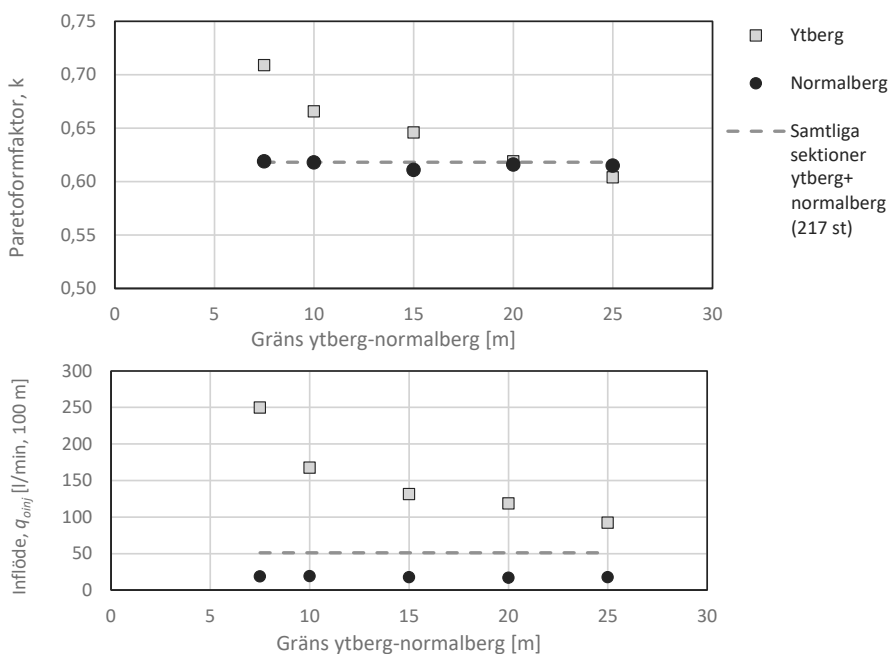


**Figur 3-2.** Beräknad största spricka för olika dataset, uppdelat mellan samtliga sektioner och sektioner tillhörande de hydrogeologiska domänerna normalberg och ytberg.  
*Figure 3-2. Calculation of maximum fracture aperture for all available data, compared to subsets with sections solely belonging to host rock or shallow rock.*



**Figur 3-3.** Inläckage till schablonmässig otätad tunnel, uppdelat mellan samtliga sektioner och sektioner tillhörande de hydrogeologiska domänerna normalberg och ytberg.  
*Figure 3-3. Calculation of tunnel inflow for all available data, compared to subsets with sections solely belonging to host rock or shallow rock.*

Dataset från Förbifart Stockholm har även analyserats för att visa hur den resulterande Paretofördelningen påverkas av den definierade gränsen mellan ytberg och normalberg, se Figur 3-4. Analys av formfaktorn och beräknat inflöde visar att skillnader i domänernas beskaffenhet minskar när ytberget definieras till ett större djup under bergöverytan. Med minskad andel ytberg minskar dock antal sektioner i ytbergsanalysen, vilket ökar osäkerheten i resultatet, se följande avsnitt om ”Erforderligt antal sektioner”.



**Figur 3-4.** Beräknad formfaktor för dataset från Förbifart Stockholm, där gränsen mellan ytberg och normalberg varierats mellan 7,5 m och 25 m djup under bergöverytan. Streckad linje motsvarar resulterande  $k$ -värde när alla sektioner i ytberg och normalberg slås ihop, men zonberg exkluderas.

*Figure 3-4. Calculation of the Pareto distribution parameter for data from Stockholm Bypass, where the boundary between shallow rock and host rock varies between 7,5 m and 25 m below the rock surface. The dotted line represents the resulting  $k$ -value when all sections in shallow rock and host rock are combined (excluding weakness zones).*

Utförda analyser visar att en sammanslagning av samtliga sektioner, dvs. om domänindelning inte utförs, innebär att medelvärde på hydraulisk konduktivitet överskattas för normalberget. En generell injekteringsklass, vilken antas utgöra en stor andel av tunnelns längd, riskerar då att bli för konservativ. Vidare, injektering i ytberg skulle med samma resonemang och samma injekteringsklass sannolikt visa sig otillräcklig då hydraulisk medelkonduktivitet i denna del av bergmassan underskattas.

Att använda beräkningsmetodikerna på zonberg kan inte rekommenderas eftersom det grundläggande antagandet om oberoende sprickor och största sprickans dominans inte uppfylls i välkonnektade spricknätverk. I regel är zonerna tillräckligt väl kända deterministiskt, och kan hanteras på det sättet designmässigt också. Om zonberg tas med i analysen tillsammans med övriga data finns risken att även detta leder till onödigt konservativ design för normalberg.

### **Sammanfattande kommentarer för domänindelning:**

- Passning av Paretofördelningar bör utföras på dataset som representerar domäner stället för analys av hela borrhål.
- En grundläggande ansats för domänindelning i infrastrukturprojekt kan vara normalberg, ytberg och zonberg.
- Zonberg kan behöva exkluderas från sprickviddsanalysen eftersom det grundläggande antagandet om oberoende sprickor och enskilda sprickors dominans inte uppfylls. Analyser underlättas om det i karteringsprotokoll finns väl beskrivet vilka delar av borrhålen som består av zonberg enligt projektets definition.
- Data från olika borrhål kan slås samman för att åstadkomma större dataset med fler testade sektioner. Se dock vidare i nästa analys av ”Erforderligt antal sektioner” då det totala antal sektioner i respektive domän bör uppfylla en viss mängd för att minska osäkerheter.

## **3.2 Erforderligt antal sektioner**

Omfattningen på de hydrauliska tester som behövs för att representativt beskriva en hydrogeologisk domän är av stort intresse för planering av testutförande. I Stille (2015) anges som tumregel att 100 sektioner behövs för att beskriva en transmissivitetfördelning hos sprickorna i en domän.

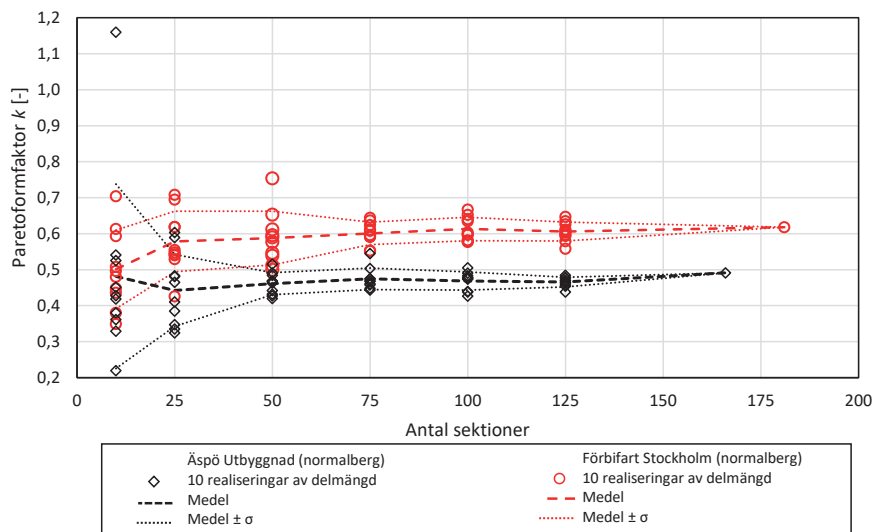
### *3.2.1 Indata*

Följande dataset har nyttjats i analysen av erforderligt antal sektioner:

- *Åspö Utbyggnad*: Indata utgörs av flödesloggning från två kärnborrhål (KA2051A01 och KA3007A01) belägna i samma domän. Data är rapporterad i 1 m långa sektioner, men har analyserats aggregerat i 2 m. Totalt för borrhålen analyserades 166 sektioner.
- *Förbifart Stockholm*: Injektionstester i 3 m långa sektioner från tio kärnborrhål. Både dataset innehållande alla sektioner (231 sektioner) och dataset enbart innehållande normalberg (181 sektioner) har analyserats.

### 3.2.2 Resultat

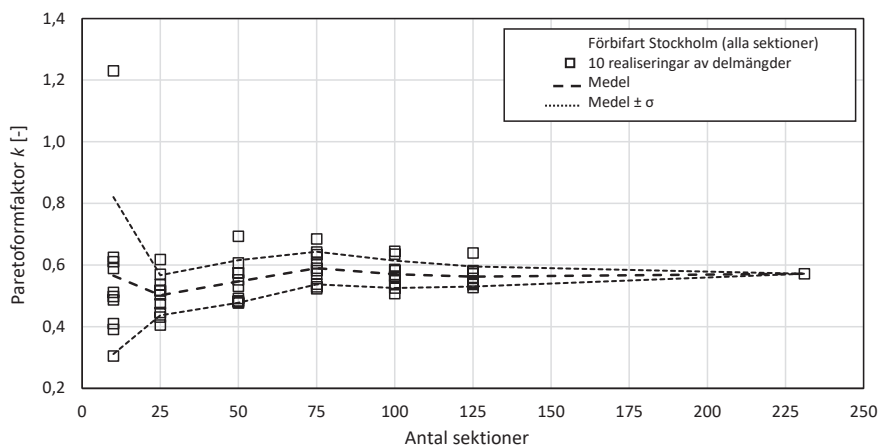
För att analysera denna tumregel har dataset med fler än 100 sektioner använts. En körning av verktyget har gjorts med alla tillgängliga sektioner, vilket har fått utgöra referensvärde. Därefter har delmängder slumpats fram av det totala antalet sektioner. För vardera delmängder om 125, 100, 75, 50, 25 och 10 sektioner har 10 beräkningar utförts. Resultat av realiseringar av delmängder med dessa dataset presenteras i Figur 3-5.



**Figur 3-5.** Resultande formfaktor vid variation av antal sektioner i normalberg. Från det kompletta datasetet slumpas sektioner till 10 realiseringar. Resultatet från varje realisering visas med en cirkel eller romb. Medelvärde av realiseringar +/- en standardavvikelse ges med streckad/punktade linjer.

*Figure 3-5. Resulting Pareto distribution parameters for variation in the number of sections in host rock. From each complete dataset 10 realizations with a randomly selected subset of sections are used. Each realization is presented with a circle or a diamond. Mean values, and  $\pm$  standard deviations are presented with dotted lines.*

I analysresultatet erhålls en förväntad spridning som växer med minskat antal sektioner i analysen. För Äspö-data kan konstateras att 50, 75, 100 och 125 sektioner ger likartade värden med likartad spridning. Detta kan tolkas som att den noggrant utförda undersökningen i Äspös väl avgränsade hydrogeologiska domän är stabil redan vid 50 sektioner. För datasetet från Förbifart Stockholm (normalberg) sjunker spridningen till likartade nivåer vid 75 sektioner. I exemplet Förbifart Stockholm har även sammanslagningar av data studerats (blandade domäner med ytberg, zon och normalberg i olika typer av berggrund), se Figur 3-6.



**Figur 3-6.** Resultande Paretoformfaktor vid variation av antal sektioner för ett ej domänindelade dataset. Varje realisering visas med en kvadrat, medelvärde av realiseringar +/- en standardavvikelse ges med streckad/punktade linjer.

*Figure 3-6. Resulting Pareto distribution parameter for variation in the number of sections in a dataset with no domain division. Each realization is presented with a square. Mean values, and  $\pm$  standard deviations are presented with dotted lines.*

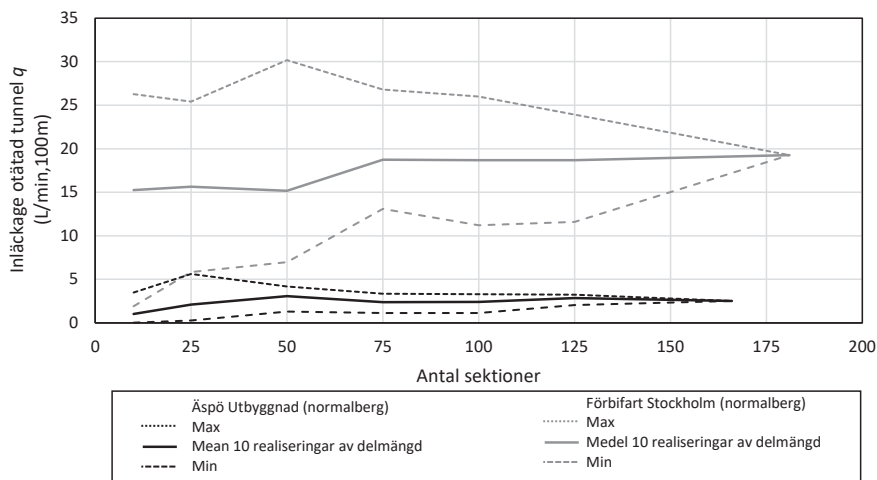
I det sammanslagna datasetet är spridningen större än vid analys av normalberg, och det finns även indikationer på att analysen blir stabil vid ett högre antal sektioner.

Om vi antar att hela dataseten sektioner fullständigt beskriver en hydrogeologisk domän, kan vi konstatera att om så lite som 10–25 sektioner används blir det slumpen som avgör om denna delmängd lyckas beskriva domänen representativt, och resultatet bör hanteras med stor försiktighet och omfattande känslighetsanalys. 75–100 sektioner är betydligt mer stabilt, men även här kan ses att viss spridning uppvisas, och att känslighetsanalys bör utföras.

Vilken inverkan en begränsad mängd data kan få vid tillämpning av beräkningsmetoden illustreras i Figur 3-7 med teoretiskt tunnelinläckage till en otätad tunnel. I exemplet redovisas min, medel och max av 10 realiseringar av slumpmässigt valda delmängder av data från Äspö och Förfärd Stockholm. Spridningen i resulterande beräknat inläckage ökar med ett minskande antal sektioner, även om medelvärdet för 10 realiseringar av delmängd är relativt stabil. Resultatet indikerar att det vid inläckageanalys baserat på få sektioner riskerar att uppkomma betydande över- eller underskattningar av inläckage, men vid 75 sektioner är spridningen betydligt lägre.

När borrprogram planeras kan inte den exakta fördelningen mellan olika hydrogeologiska domäner förutses. Ej heller antalet sektioner som uppvisar nollflöde kan förutses. Båda dessa faktorer påverkar hur många sektioner som bidrar till precisionen i beräkningen (se vidare under avsnitt Mätgränser). Med bakgrund i detta går det inte att på förhand säga

hur många sektioner som behöver testas. Resultatet av hittills utförda analyser indikerar att varje hydrogeologisk domän bör vara testad med minst ca 75 sektioner som ligger inom mätgränserna.



**Figur 3-7.** Beräknat inläckage till en otätad tunnel baserat på realiseringar av slumpade delmängder av data presenterade i Figur 3-5.

*Figure 3-7. Estimated tunnel inflows based on realizations of randomly selected subsets of data presented in Figure 3-5.*

### **Sammanfattande kommentarer för erforderligt antal sektioner:**

- Dataset om 10 till 20 sektioner utgör inte ett stabilt underlag för en Paretofördelning som ligger till grund för injekteringsdesign.
- Paretofördelningar bör passas till dataset som omfattar åtminstone 75 sektioner i samma domän.

### **3.3 Sektionslängd**

Vanliga sektionslängder vid hydrauliska tester är 3 m till 6 m. Ju längre sektionslängd som används desto fler sprickor omfattas av varje testintervall. Detta innebär att det blir mindre sannolikt att de tätare delarna av bergmassan blir korrekt representerade och mindre sannolikt att den största sprickan i varje sektion dominerar sektionen. Längre sektioner innebär också att uppmätta värden närmar sig bergmassans medelkonduktivitet och att mätutrustningens övre mätgräns behöver vara högre och att en högre pumpkapacitet kan behövas. En längre sektionslängd ger också färre sektioner ur ett givet borrhål, vilket i föregående avsnitt visades vara ogynnsamt. En kortare sektionslängd är generellt att föredra framför en längre.

### 3.3.1 Indata

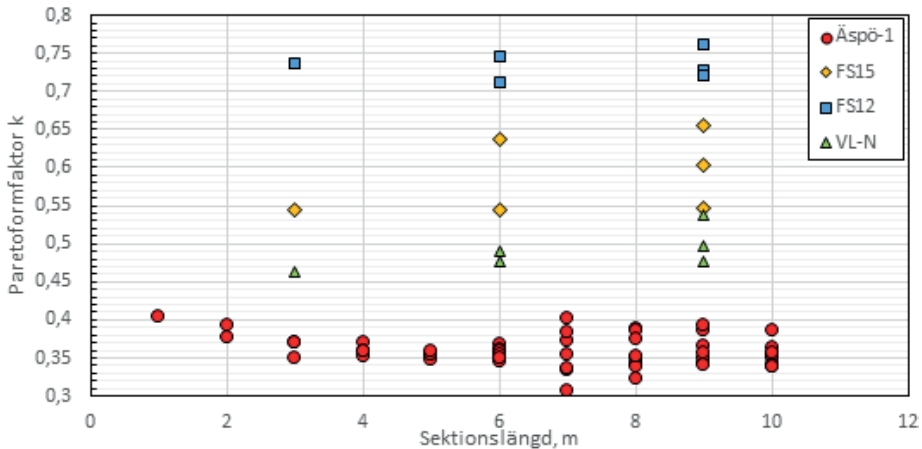
Följande dataset har nyttjats för analysen av sektionslängd:

- *Äspö Utbyggnad*: PFL-mätningar från kärnbrorhålet KA2051A01 (260 m) med data angivet i 1 m långa sektioner. Data innehåller företrädesvis normalberg och ses som en enhetlig domän.
- *Förbifart Stockholm*: Injektionstester i 3 m långa sektioner, uppdelat i kärnbrorhål från norra delen (FS15, 4 kärnbrorhål, 65 sektioner) och kärnbrorhål från södra delen (FS12, 8 kärnbrorhål, 131 sektioner). Data innehåller flera domäner (normalberg, zonberg och ytberg).
- *Västlänken*: Injektionstester i 3 m långa sektioner från 8 kärnbrorhål (totalt 95 sektioner, väster om Mölndalsån). Data innehåller flera domäner (normalberg och ytberg).

### 3.3.2 Resultat

Analys av sektionslängdens inverkan på resultat har här gjorts genom att aggregera intilliggande sektioner i dataset med korta sektionslängder, för att konstruera dataset med längre sektionslängder. Alltså har antal sprickor och vattenförlust i sektion 1–2 m och 2–3 m adderats för att konstruera 1–3 m och så vidare. Om data har varit tillgänglig i 3 m långa intervall har data motsvarande längderna 3, 6, och 9 m konstruerats, och för 1 m data har varje meter 1–10 m konstruerats.

Då faktiska data aggregeras för att beräkningsmässigt åstadkomma längre sektioner kan detta göras flera gånger enligt principen 123, 234, 345, etc. Detta motsvarar ungefär hur mätdata skulle variera för olika startpunkter för manschettläge om en lång sektionslängd används. Alla kombinationer av aggregering har utförts; i Figur 3-8 visas därför exempelvis 10 realiseringar av samma dataset när 1 m-data aggregerats till 10 m långa sektioner.



**Figur 3-8.** Beräknad formfaktor vid variation av sektionens längd för fyra dataset. Data från 3 m långa sektioner aggregeras till 6 m och 9 m, medan upplösning 1 m aggregeras upp till 10 m.

*Figure 3-8. Resulting Pareto distribution parameter for varying section lengths in four datasets. Datasets with 3 m long sections are aggregated to 6 m and 9 m, and 1 m long sections are aggregated up to 10 m.*

Av de fyra behandlade dataseten (Äspö, Förbifart norra, Förbifart södra och Västlänken) är Västlänken och Äspö väl domänindelade, medan domänindelning för de båda dataseten för Förbifart Stockholm inte har utförts i samma grad. Detta kan vara bidragande till att mycket stor spridning ses i FS15 vid aggregering till 6 m-sektioner. För Äspö ses en i huvudsak tilltagande spridning upp till 10 m. Det kan även ur Figur 3-8 urskiljas att formfaktorn i huvudsak ökar med längre sektionens längd, vilket kan hänga ihop med att sannolikheten för endast en dominerande spricka i en sektion minskar med längre sektionens längd. Det blir även med lång sektionens längd svårare att beskriva den tätare delen av berget.

Det är svårt att ur analysen skilja om den större spridningen främst beror på längre sektioner, eller att aggregeringen även resulterar i färre sektioner. I praktisk tillämpning löser dock test med kortare sektionens längd problemet oavsett. Vid kortare sektionens längd ökar vikten av tillräckligt långa manschettgummi för att andelen sprickor som bidrar till läckage förbi manschett inte ska bli orimligt stort. Tryckmätning både under, över och i mätsektionen möjliggör *identifiering* av sådana läckage, men problemet bör förstås även *begränsas* med långa gummi.

### **Sammanfattande kommentarer för sektionens längd:**

- Med ökande sektionens längd tenderar formfaktorn  $k$  att bli högre, vilket kan bero på att sannolikheten för endast en dominerande spricka i en sektion minskar med längre sektionens längd. Det kan också bero på att aggregering av data leder till färre



sektioner och leder till osäkerheter som diskuteras under ”Erforderligt antal sektioner”.

- Sektionslängder som är 5 m eller kortare rekommenderas för tillämpning av Paretofördelningar vid injekteringsdesign.

### 3.4 Antal sprickor

Beräkningsmetoden är uppbyggd kring att genom en statistisk simulering fördela det uppmätta vattenflödet över det antal sprickor som bedömts vara vattenförande. Antalet öppna sprickor som anges av exempelvis karterande geolog blir därför en osäkerhetskälla.

#### 3.4.1 Indata

Följande dataset har nyttjats för analysen:

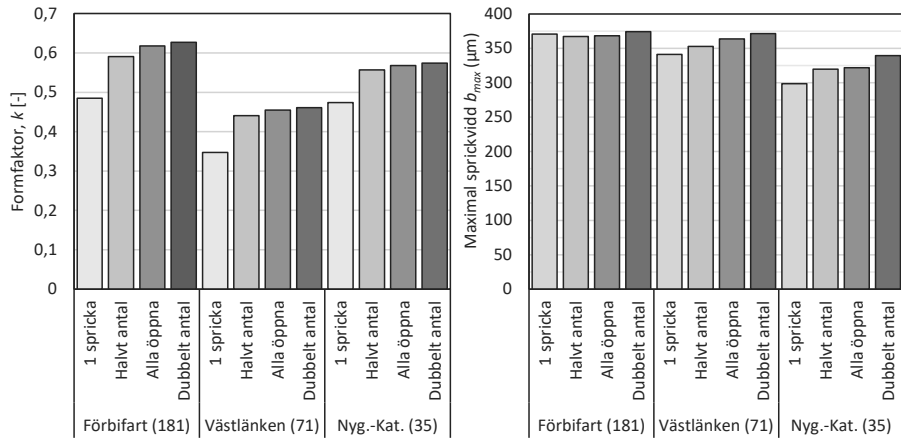
- *Förbifart Stockholm*: Indata utgörs av injektionstester i 3 m långa sektioner från sammanlagt tio kärnbrorhål (totalt 181 sektioner). Data omfattar enbart domän normalberg (”ytberg” och ”zonberg” är exkluderat).
- *Västlänken*: Injektionstester från 3 m långa sektioner i 6 kärnbrorhål (Väster om Mölndalsån, 71 sektioner) Data tillhörande domänerna ”ytberg” har tagits bort och består enbart av ”normalberg”.
- *Nygårdstunneln och Kattlebergstunneln*: Injektionstester från 3 m långa sektioner (35 sektioner). Data tillhör domänen ”normalberg” (”ytberg” och ”zon” har filterats bort).

#### 3.4.2 Resultat

I analysen har antal sprickor varierats i fyra steg. Alla dataset har körts med:

- 1) det karterade antalet öppna sprickor,
- 2) antaget 1 spricka per sektion,
- 3) halverat antal öppna sprickor,
- 4) dubbelt antal öppna sprickor.

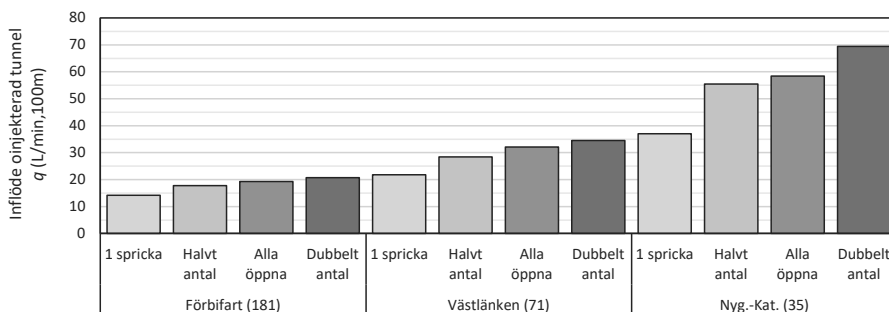
Resultatet av analyser av formfaktor och största simulerade sprickvidd presenteras i Figur 3-9.



**Figur 3-9.** Formfaktor och största simulerade sprickvidd vid variation av antalet sprickor per sektion. Siffran inom parentes anger antal sektioner i analysen. Alla dataset tillhör domänen ”normalberg”.

*Figure 3-9. Calculation of Pareto distribution parameter and maximum fracture aperture with differentiation in the number of open fractures. Numbers within brackets represent number of analysed sections in each dataset. All datasets are categorised as host rock.*

Formfaktorn ökar i värde för ökande sprickantal eftersom de enskilda sektionernas flöde omvandlas till hydrauliska sprickvidder för ett större antal sprickor. Skillnader i hydraulisk sprickvidd mellan sprickor blir därmed mindre och  $k$ -faktorn ökar. Detta syns entydigt i analyserade dataset. I Figur 3-9 ses även en trend att storleken på den största sprickan ökar med större sprickantal. Sammantaget medför dessa parametrar att det beräknade flödet till en otätad tunnel underskattas om sprickantalet anges till 1 i analysen, se Figur 3-10. Det är dock i analysen generellt små skillnader i resulterande värde för formfaktorn (<25% för analyserade dataset) och för simulerade största sprickvidd är skillnaderna inom respektive dataset <7%.



**Figur 3-10.** Beräknat inläckage till en otätad tunnel för olika sprickantal. Siffran inom parentes anger antal sektioner i analysen.

*Figure 3-10. Calculation of tunnel inflow for different fracture counts. Numbers within brackets represent number of analysed sections in each dataset.*

Ovan redovisad analys har enbart utförts med bergmassa karakteriserad som normalberg. I fallet med svaghetszoner där karterande geolog exempelvis har angivit 60 sprickor är det mycket sannolikt att dessa inte är oberoende, och likt tidigare resonemang hanteras sannolikt svaghetszoner effektivast deterministiskt. För antal sprickor blir därför även frågan om domänindelning aktuell.

Det kan uppstå felkällor och osäkerheter vid kartering av sprickantal från borrhämlor, exempelvis gällande hur små sprickor som karteras, om borrhämlor inducerade sprickor identifieras, eller om vattenförande eller öppna eller läkta sprickor särredovisas. Karterande personal bör därför göras uppmärksamma på att parametern ”antal öppna sprickor” används i injekteringsdesign och att det därför föreligger behov av enhetlig kartering av öppna sprickor. Av utförda analyser verkar dock små variationer i karterat sprickantal ha en begränsad påverkan på resulterande fördelning. Att ange sprickantal till 1 då verklig sprickkartering saknas kan dock få konsekvenser att inläckage eller erforderlig tätningseffekt underskattas. Identifiering av domäner med avvikande hydrauliskt beteende, såsom zonberg eller ytberg, verkar dock vara av större betydelse än en noggrann kartering av antalet och placering av öppna sprickor längs borrhålen.

### **Sammanfattande kommentarer för antal sprickor:**

- Antagande om 1 spricka per sektion underskattar värdet för utvärderad formfaktor, men skillnaderna minskar när sprickantalet närmar sig det karterade antalet öppna sprickor.
- En väl utförd kartering av öppna sprickor bör eftersträvas för att minska osäkerheten i den resulterande Paretofördelningen.
- Kartering av sprickor behöver särskilja på öppna sprickor och inducerade eller läkta sprickor för att ett korrekt antal sprickor ska kunna nyttjas i Paretoanalysen.

### 3.5 Mätgränser

Dataserier från hydrauliska tester är oftast trunkerade vid låga flöden, dvs. det saknas mätvärden i de lägre intervallen och s.k. nollflöden registreras. Som Gustafson (2009) påpekar är det inte sannolikt att alla dessa intervall är helt täta, utan anger endast att intervall som saknar mätvärden är tätare än den mätgräns utrustningen ger. Registrerade mätvärden nära den undre gränsen riskerar även att ha betydande mätfel. Enligt Funehag och Emmelin (2011) ger en flödesmätare som registrerar flöden mellan 0,1 l/min och 50 l/min successivt högre mätfel för flöden under 5 l/min och vid flöden under 1 l/min kan mätfelet uppgå till mer än 100%. Omsorg bör därför läggas vid val av mätutrustning, och tillhörande datablad. Datablad ska ange vid vilka flöden som mätfelet förväntas överstiga mätarens tolerans (vanligen i intervallet 5 % till 0,5 %)

Mätutrustning kan också ha begränsningar vid hantering av stora flöden. Flödesmätaren registrerar i sådana fall ett maximalt flöde som inte motsvarar aktuellt flöde och med okänt mätfel. Denna typ av mätfel kan vara svårare att upptäcka än ett noll-flöde då flödesmätare som används över maxkapacitet ändå kan ge siffrvärden. Om systematiska avvikelser från datas rätlinjighet förekommer i övre eller undre änden kan problem med mätgränser dock misstänkas. I detta arbete hanteras detektionsgräns (där flödesmätaren visar 0) och nedre mätgräns (där mätfelet är inom specifikation) gemensamt genom användning av räkneverktygets mätgräns-funktion.

Flödesmätarens mätintervall med dess nedre och övre mätgräns är viktiga parametrar vid insamling av hydrauliska data för analys av bergmassans egenskaper. Ett stort bortfall av data till följd av ett snävt mätintervall leder till att fördelningsparametrarna blir osäkrare, och stora mätfel kan leda till felaktiga slutsatser om bergets genomsläpplighet.

Vidare bidrar även tryckmätare i systemet för vattenförlustmätning till mätosäkerhet. Digital eller loggande tryckmätare ger vanligen god uppfattning om totalt tryck i mätsektionen. Analysen kräver dock övertryck, varför det opåverkade trycket även måste bestämmas. I bestämning av tryck förekommer fel framför allt i uppskattningar kopplade till antagen grundvattennivå, snarare än felmätning i en tryckmätare. Om vattenförlustmätning utförs endast med manuell avläsning av manometer föreligger mycket stora osäkerheter både i avläst värde, tryckförluster fram till mätsektion samt bestämning av förhållandet mellan referenstryck och övertryck.

#### 3.5.1 Indata

I analysen av mätgränser har följande projekt nyttjats:

- *Åspö Utbyggnad*: PFL-mätningar för borrhålen KA2051A01 och KA3007A01, insamlade i 1 m långa intervall, men för analysen sammanslaget till 2 m långa sektioner (totalt 166 sektioner). Mätområdet för PFL-utrustningen ligger mellan ca 30 ml/h och 300 000 ml/h (5 l/min).

- *Förbifart Stockholm*: Injektionstester i 3 m långa sektioner i tio kärnbrorhåll (totalt 231 sektioner). Detta dataset är även reducerat till domän normalberg (181 sektioner). Nedre mätgräns ca 5 ml/min och övre mätgräns ca 60 l/min.
- *Västlänken*: Injektionstester i 3 m långa sektioner från åtta kärnbrorhåll belägna i området väster om Mölndalsån (totalt 95 sektioner), delmängden ”normalberg” utgör 71 sektioner. Övre och undre mätkapacitet för mätutrustningen är ca 5 ml/min, respektive ca 47 l/min.
- *Nygårds- och Kattlebergstunneln*: Injektionstester i 3 m långa sektioner från åtta kärnbrorhåll (totalt 91 sektioner). Övre och undre mätkapacitet för mätutrustningen är ca 0,1–0,3 l/min, respektive ca 50 l/min.

Respektive projekts förfarande vid val av utrustning och metod för insamling av data skiljer sig åt framför allt med avseende på flödesmätarens mätområde.

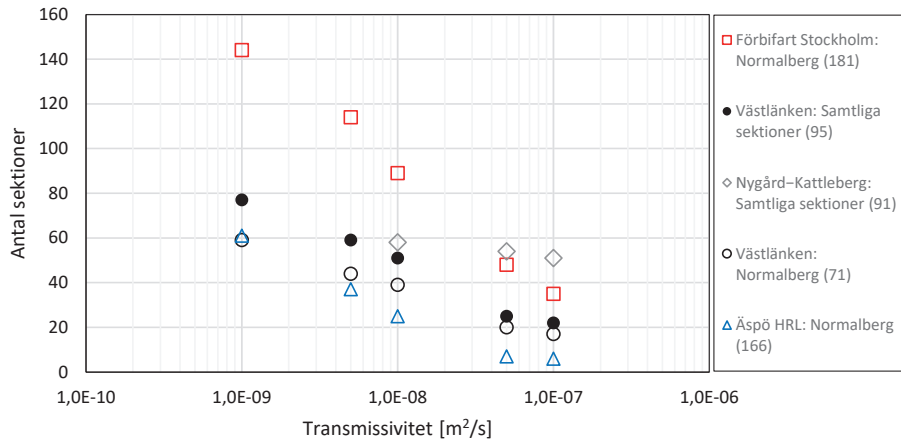
### 3.5.2 Resultat nedre mätgräns

Analys för att utvärdera hur nedre mätgräns påverkar den resulterande Paretofördelningen har utförts genom att justera detektionsgränsen. Respektive dataset har trunkerats i olika steg och uppmätta flöden under trunkeringsvärdet har satts lika med noll. Följande fem trunkeringssteg har använts:

$$1 \times 10^{-9}, 5 \times 10^{-9}, 1 \times 10^{-8}, 5 \times 10^{-8}, \text{ och } 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Trunkeringen motsvarar att en flödesmätare med sämre detektionsgräns (vilket korrelerar med nedre mätgräns) används och vid flöden under mätgränsen registreras noll-flöden. Transmissivitet  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  i en 3 m lång sektion motsvarar ett flöde på ca 0,30 l/min vid ett övertryck på ca 0,3 MPa. Konventionella flödesmätare har i allmänhet nedre mätgräns vid denna nivå eller bättre, varvid detta utgör den övre gränsen för trunkeringsstegen. Transmissivitet  $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  i en 3 m lång sektion motsvarar ett flöde på ca 0,003 l/min vid ett övertryck på ca 0,3 MPa.

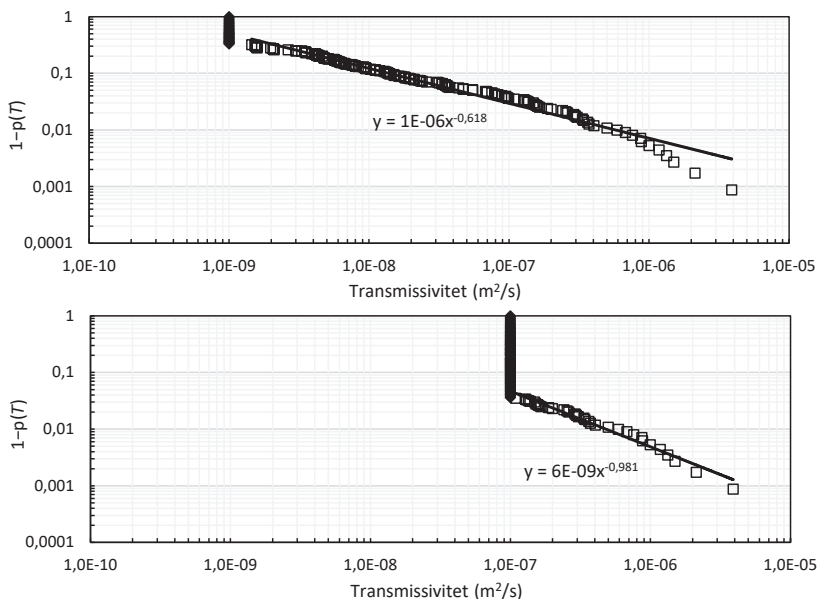
Analysen inkluderar en beräkning utan någon trunkering (dvs. utrustningens ursprungliga mätgräns). Med ökande trunkering minskar antalet sektioner med data som återfinns inom mätintervallet, vilket innebär att data för Paretofördelningens passning minskar med ökad trunkering, se Figur 3-11. Alla dataset innehåller inte registrerade flöden motsvarande de lägsta trunkeringsstegen ( $1 \times 10^{-9}$ – $5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Därför visas enbart resultat från de trunkeringssteg som resulterar i faktisk trunkering av respektive dataset.



**Figur 3-11.** Antal sektioner för Paretofördelningens passning vid trunkering av nedre mätgräns. Totalt antal sektioner för varje dataset ges inom parentes.

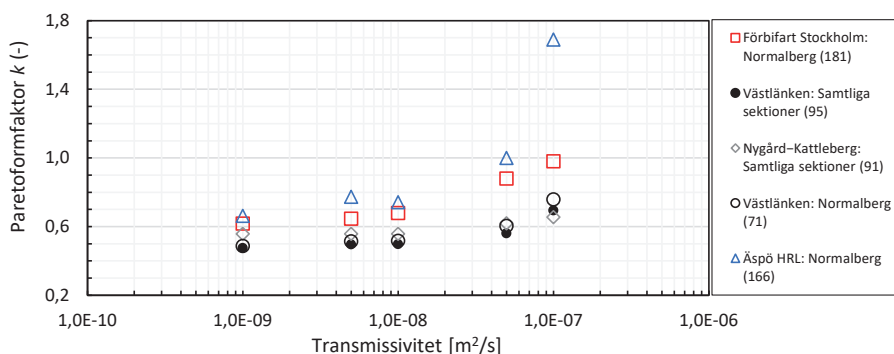
*Figure 3-11. Number of sections used for the fitting of the Pareto distribution for lower truncation. Numbers within brackets are the total number of sections in each dataset.*

Trunkering av den nedre mätgränsen överensstämmer med slutsatsen gällande erforderligt antal sektioner för en analys. Om data trunkeras innebär detta att färre sektioner har ett flöde som kan mätas vilket i sin tur resulterar i ett färre antal sektioner ligger till grund för passningen av Paretofördelningen, se exempel i Figur 3-12. De sektioner som ingår i analysen kommer därmed även från ett snävare intervall. En linjär passning till ett dataset över fyra tiopotenser är robustare än om endast en till två tiopotenser finns tillgängliga i data. Dessa effekter leder sammantaget till en större osäkerhet och spridning av resultatet för formfaktorn (se Figur 3-13) och följaktligen även den resulterande sprickviddsfördelning som ska nyttjas i injekteringsdesignen.



**Figur 3-12.** Exempel på passning av Paretofördelning till Förbifart Stockholm (normalberg). Överst: 145 sektioner av totalt 181 sektioner har värden inom mätgränser som Paretofördelningen passas till. Nederst: Trunkering  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  innebär att enbart 35 värden kvarstår inom mätgränserna och passningen skiljer sig väsentligt från det kompletta datasetet.

Figure 3-12. Example of fitting of a Pareto distribution to data from Stockholm Bypass (host rock). Top: 145 sections of a total of 181 sections have values within measurement limits to which a distribution is fitted. Bottom: Truncation  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  means that only 35 sections remain within measurement limits giving a completely different fitting.



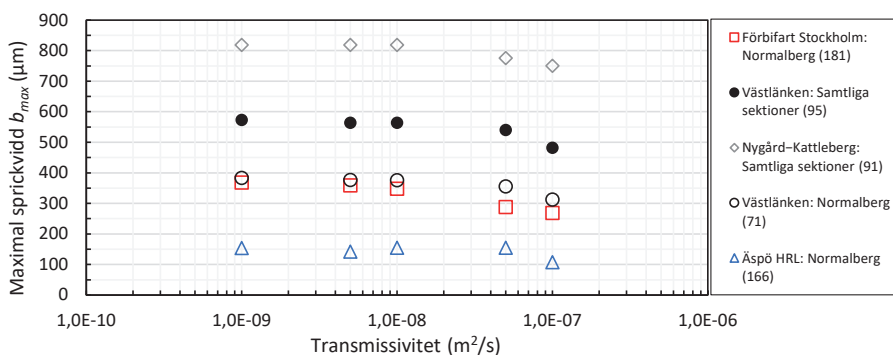
**Figur 3-13.** Resultande formfaktor för trunkeringssteg av nedre mätgräns.

Figure 3-13. Resulting Pareto distribution parameter for truncation of the lower measurement limit.

I Figur 3-14 kan det noteras att största beräknade sprickvidd börjar påverkas när dataseten trunkeras vid nivå  $5 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, likaså gäller formfaktorn i Figur 3-13. Resultatet från analyser antyder att data bör mätas ner till åtminstone en transmissivitet på ca  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, vilket motsvarar ett flöde i storleksordning 3 centiliter per minut vid ett övertryck på 0,3 MPa i en 3 m lång sektion. En spricktransmissivitet i storleksordningen  $1 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s motsvarar en hydraulisk sprickvidd på ca 25 µm.

För datasetet från Äspö, som har en övre mätgräns på ca  $3 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, sker en betydande avvikelse redan vid  $1 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s vilket indikerar att insamlad data även bör omfatta ett visst flödesspann och därmed sektionsdata som omfattar minst två, men helst minst tre tiopotenser. Det räcker inte att ha en nedre mätgräns motsvarande ca  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s om även den övre mätgränsen är begränsad jämfört med vad som förekommer i bergmassan.

Den nedre mätgränsen bör vara tillräckligt låg för att säkerställa att tillräckligt många sektioner med data samlas in. Insamling av data bör även vara anpassad efter inläckagekrav och hydrogeologiska förhållanden. Om en förväntad förutsättning är bergmassa med låg hydraulisk konduktivitet eller strikta krav på inläckage leder detta till behov av lägre mätgränser eftersom Paretofördelningens beskrivning av små sprickvidder blir mer osäker om dataunderlaget till analysen inte inkluderar små flöden.



**Figur 3-14.** Största beräknade sprickvidd för trunkeringssteg av nedre mätgräns.  
*Figure 3-14. Calculated maximum fracture aperture for truncation of the lower measurement limit.*

### 3.5.3 Resultat övre mätgräns

Analys har även utförts för att utvärdera hur övre mätgräns hos en flödesmätare kan påverka en resulterande Paretofördelning. Dataset har producerats genom att trunkera data i följande sju trunkeringssteg:

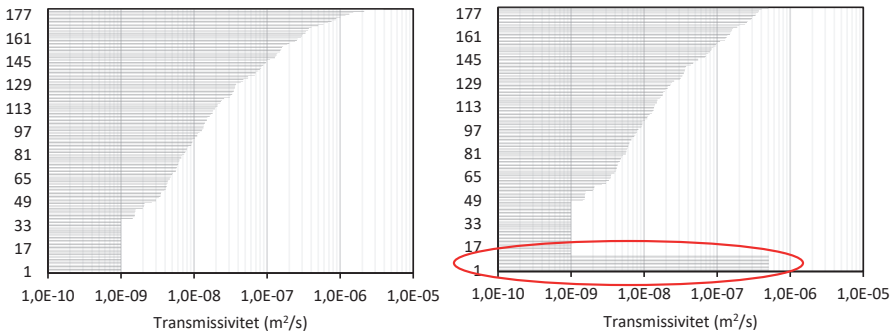
$$1 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-6}, 1 \times 10^{-6}, 5 \times 10^{-7} \text{ och } 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Transmissivitet  $1 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s i en 3 m lång sektion motsvarar ett flöde på ca 0,3 l/min vid ett övertryck på ca 0,3 MPa. Det är inte rimligt att anta att konventionella flödesmätare



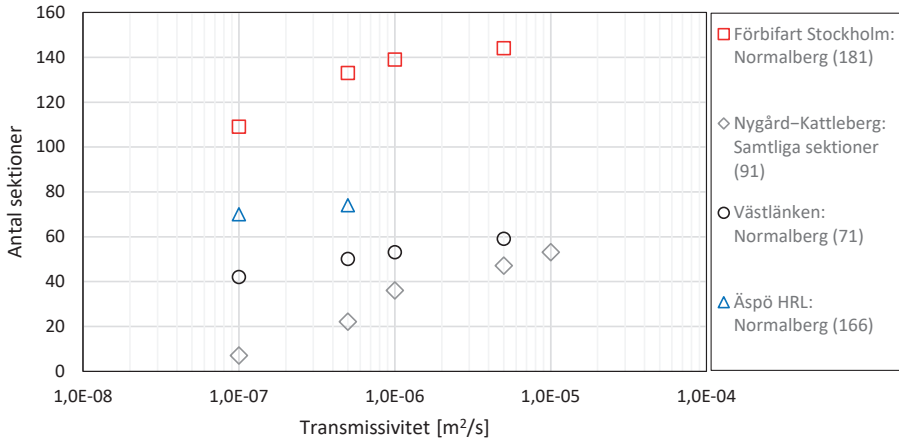
har en övre mätgräns som är begränsad till denna låga nivå varvid detta utgör den nedersta gränsen för analysen. Alla dataset innehåller inte registrerade flöden motsvarande det högsta trunkeringssteget ( $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) och därför visas enbart resultat från de trunkeringssteg som resulterar i faktisk trunkering av respektive dataset.

Trunkeringen motsvarar att en flödesmätare med sämre övre mätgräns används och vid flöden över mätgränsen registreras maxflöde. Ett exempel på hur datasetet modifieras ges i Figur 3-15 där data från Förbifart Stockholm trunkeas vid  $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  och 20 sektioner blir maxflödessektioner. Dessa sektioner ges ett nytt värde på  $5,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Trunkeringen innebär även att antalet sektioner ligger till grund för passningen av Paretofördelningen minskar med varje trunkeringssteg, se Figur 3-16.



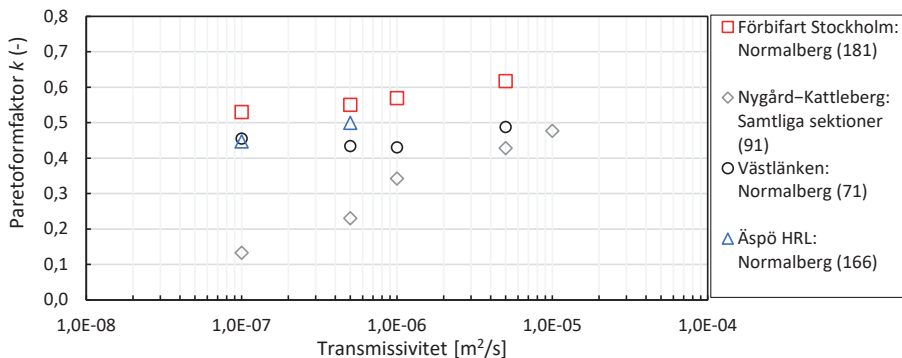
**Figur 3-15.** Dataset från Förbifart Stockholm (normalberg) med storleksorterade sektionstransmissiviteter. Vänster: Endast undre trunkering. Höger: Övre trunkering vid  $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  med 20 sektioner (inom röd linje) ändrade från ursprunglig transmissivitet till  $5,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

*Figure 3-15. Dataset from Stockholm Bypass (host rock) with size-sorted section transmissivities. Left: Only lower truncation. Right: Upper truncation step at  $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  with 20 sections (within red line) being changed from original transmissivity to  $5,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .*



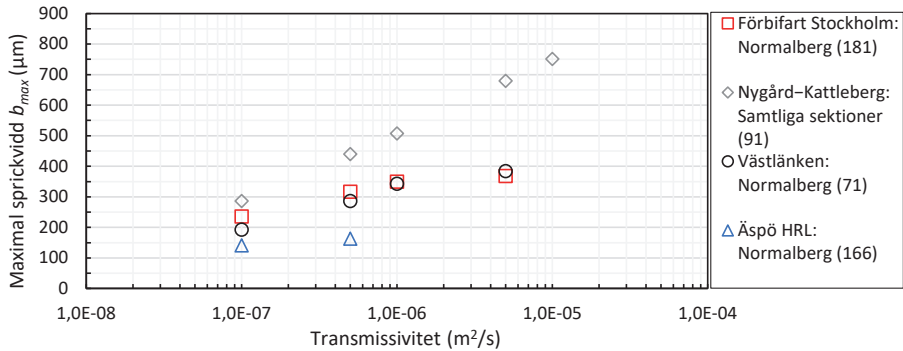
**Figur 3-16.** Antal sektioner för passning av Paretofördelningen vid respektive övre trunkeringsnivå. Totalt antal sektioner för varje dataset ges inom parentes.  
*Figure 3-16.* Number of sections used for the fitting of the Pareto distribution for upper truncation. Numbers within brackets are the total number of sections in each dataset.

Trunkering av den övre mätgränsen har analyserats med avseende på formfaktorn, se Figur 3-17. För de flesta dataset har den övre mätgränsen en begränsad påverkan på resulterande sprickviddsfördelning. Detta beror sannolikt på att det endast är ett fåtal sektioner som trunkeras bort och att kvarvarande datamängd är tillräckligt för att producera en stabil statistisk fördelning. De kvarvarande datapunkterna representerar därmed sannolikt bergvolymen på ett korrekt sätt. Ett undantag ses i datasetet för Nygård-Kattleberg där den nedre mätgränsen är hög och det blir mycket få datapunkter kvar inom analyserat intervall när även de höga flödena trunkeras bort.



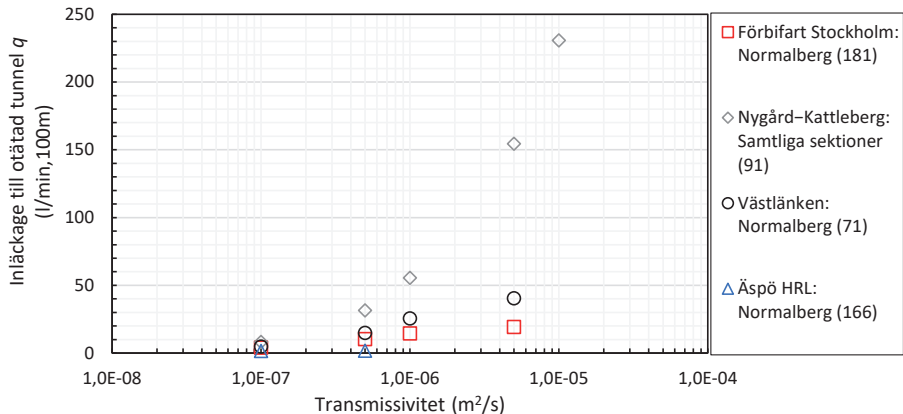
**Figur 3-17.** Beräknad formfaktor för trunkering av övre mätgräns.  
*Figure 3-17.* Calculated Pareto distribution parameter for upper data truncation.

För varje dataset analyseras beräknad största sprickvidd och beräknat inflöde till en otätad tunnel, se Figur 3-18 och Figur 3-19. Dessa analyser visar att den resulterande fördelningen i mycket hög grad påverkas av storleksordningen på de högsta uppmätta flödena och det är en effekt som ses tydligt för samtliga dataset. Detta beror på att transmissiviteten för den största spricka,  $T_{max}$ , analyseras ur den summerade transmissiviteten för uppmätt för sektionerna,  $T_{tot}$ . Paretofördelningens skattning av största sprickvidd, och följaktligen skattningar av flöde innan injektering och tätningseffekt, utgår från det högsta uppmätta sektionsflödet och om flödesmätaren inte kan motsvara storleksordningen för det högsta flödet blir beräkningsresultaten missvisande.



**Figur 3-18.** Största beräknade sprickvidd för trunkering av övre mätgräns.

*Figure 3-18. Calculated maximum fracture aperture for truncation of the upper measurement limit.*



**Figur 3-19.** Beräknat inflöde till en otätad tunnel för trunkering av övre mätgräns.

*Figure 3-19. Calculated inflow to an un-grouted tunnel for truncation of the upper measurement limit.*

**Sammanfattande kommentarer för mätgränser:**

- Om den undre mätgränsen är för hög kommer datainsamling i fält inte mäta små vattenflödande sprickor. För få antal vattenflödande sektioner ingår då i passningen och berggrunden representeras inte på ett korrekt sätt.
- Tillförlitliga data bör samlas in åtminstone motsvarande en sektionstransmissivitet på ca  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, vilket motsvarar ett flöde i storleksordning 3 centiliter per minut vid ett övertryck på 0,3 MPa. Dock bör data omfatta sektionstransmissiviteter som spänner över flera tiopotenser. Om bergmassan förväntas ha en låg hydraulisk konduktivitet kan alltså lägre mätgräns än  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s vara befogad.
- För dataset med låg nedre mätgräns förblir formfaktorn stabil när datasetet trunkeas för höga flöden eftersom Paretofördelningen kan passas mot en stor mängd kvarvarande data.
- Den övre mätgränsen för flödesmätaren är avgörande för att analyser av största sprickvidd och inflöde/tätningseffekt ska bli representativ. Flödesmätaren bör kunna mäta samma storleksordning som flödet från den största sprickan.

## 4. FALLSTUDIER

I detta kapitel sammanfattas beskrivningar av tidigare presenterade fallstudier. Gemensamma nämnare för projekten är att resultaten har publicerats i forskningsrapporter eller konferensartiklar och att det från presenterade resultat varit möjligt att ta fram och utvärdera egenskaper för resulterande statistiska fördelningar. Indata till analyserna, såsom hydrauliska tester och kärnkarteringar, har också presenterats i sådan detalj att det är möjligt att analysera egenskaper hos indata (mätkvaliteter) och vilken inverkan dessa kan ha på resulterande Paretofördelningar.

Publicerad litteratur med utförda Paretofördelningar har sammanställts och utvärderats med hänsyn till kvalitet hos indata och Paretofördelningarnas egenskaper. För indata har följande egenskaper studerats;

- 1) sektionslängd,
- 2) mätgräns,
- 3) antal sektioner, och
- 4) antal mätpunkter till vilka en Paretofördelning har passats.

En sammanställning av data från de olika projekten ges i Bilaga 1.

### 4.1 Studieobjekt

Nedan följer en beskrivning av nio projekt där Paretofördelningar nyttjats för hydrogeologisk karakterisering för injekteringsdesign. De studerade projekten utgörs av:

- 1) *Hallandsåstunneln*, Båstad kommun. Järnvägstunnel. Paretoanalys utfördes som del av ett forskningsprojekt med silica sol som injekteringsmedel. Försöket utfördes i ett avsnitt av nordvästra tunneln där berggrunden dominerades av gnejs med inslag av amfibolit och gnejsgranit. Rapporterad i Funehag och Gustafson (2004).
- 2) *Törnskogstunneln*, Sollentuna kommun. Vägtunnel. Paretoanalys utfördes i ett forskningsprojekt med silica sol-injektering. Försöket genomfördes i ett tunnelavsnitt i ena tunnelröret där dominerande bergart var en mestadels medelkornig granit. Rapporterad i Funehag och Gustafson (2005).
- 3) *Nygårdstunneln*, Lilla Edets kommun. Järnvägstunnel. Paretoanalys utfördes i ett forskningsprojekt där en kortare sektion av tunneln fick en specifik design för att minimera dropp. Berggrunden domineras av gnejs med inslag av amfibolit. Rapporterad i Butron m.fl. (2008).
- 4) *TASS-tunneln i Äspölaboratoriet*, Oskarshamns kommun. Tunnelavsnitt i undermarksanläggning. Paretoanalys utförd i ett fintättningsprojekt med cementbaserat låg-PH bruk och silica sol. Berggrunden domineras av äspödiorit med mindre mängd av finkornig diorit/gabbro, samt pegmatit- och finkorniga granitgångar. Rapporterad i Funehag och Emmelin (2011).

- 5) *Sjökullentunnlarna*, Vänersborgs kommun. Järnvägstunnlar. Paretoanalysen nyttjades i ett tunnelavsnitt där det nyttjades en alternativ design med syfte att minimera dropp. Dominerande bergart är gnejs med inslag av amfibolit och bandad gnejs. Rapporterad i Butron m.fl. (2012).
- 6) *KBS-3H i Äspölaboratoriet*, Oskarshamns kommun. Tunnelavsnitt i undermarksanläggning. Paretoanalys utfördes som del av ett forskningsprojekt för hydrogeologisk karakterisering av silica sol-injektering. Berggrunden domineras av äspödiorit med mindre mängd av finkornig diorit/gabbro, samt pegmatit- och finkorniga granitgångar. Rapporterad i Kvartsberg och Fransson (2013).
- 7) *Förbifart Stockholm*, Stockholm stad. Öppet schakt tillhörande vägtunnelpåslag i ytberg dominerad av gnejs. Paretoanalys utfördes för diskussion kring användbarhet av analysen vid design av ridåinjektering. Rapporterad i Runslätt m.fl. (2013).
- 8) *Västlänken*, Göteborg stad. Järnvägstunnel. Paretoanalys utfördes i ett forskningsprojekt för att jämföra kvalitet i indata vid hydrogeologisk karakterisering för injekteringsdesign. Berggrunden domineras av granitiska till tonalitiska gnejser. Rapporterad i Thörn m.fl. (2016).
- 9) *Namntalltunneln*, Sollefteå och Örnköldsviks kommun. Järnvägstunnel. Paretoanalys utfördes i ett forskningsprojekt för att pröva teorin med sprickfördelning och jämföra med motsvarande analys av vattenförlustmätningar som utförts vid injekteringsborrning. Berggrunden domineras av metamorfa sedimentära bergarter och djupbergarter. Rapporterad i Stille och Andersson (2008).

Majoriteten av de ovan listade projekten nyttjar flera olika dataset och Paretofördelningar. För de nio projekten finns därför sammanlagt 20 dataset med tillhörande statistiska fördelningar.

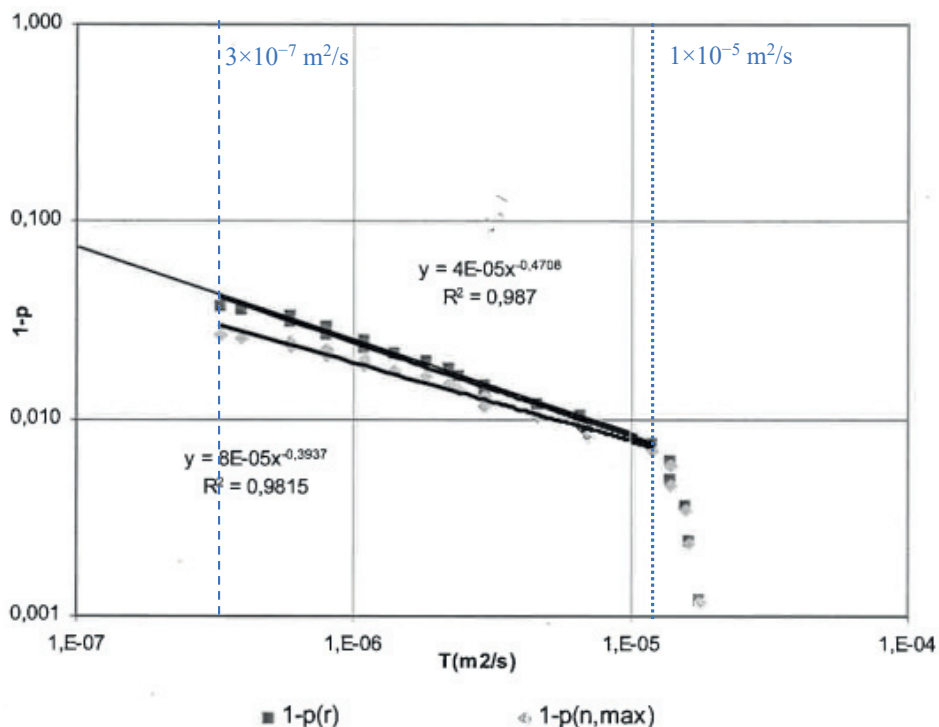
## 4.2 Sektionslängd

Indata till studerade Paretofördelningar utgörs till största delen av injektionstester i 3 m långa sektioner. Undantag är dels Hallandsås-studien där indata utgörs av inflödesmätningar, dels KBS-3H-projektet där sektionslängd för injektionstesterna är 5 m.

Alla projekt uppfyller således rekommenderad sektionslängd på maximalt 5 m.

## 4.3 Mätgränser

Den undre mätgränsen har inte angivits i alla studier. I de fall där ett angivet mätvärde saknas har diagram för passad Paretofördelning studerats och en mätgräns har skattats. Exempel på en passning till data från Törnskogstunneln ses i Figur 4-1. Sammanställda undre mätgränser (rapporterade eller antagna passade ur diagram) varierar mellan  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  och  $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ .

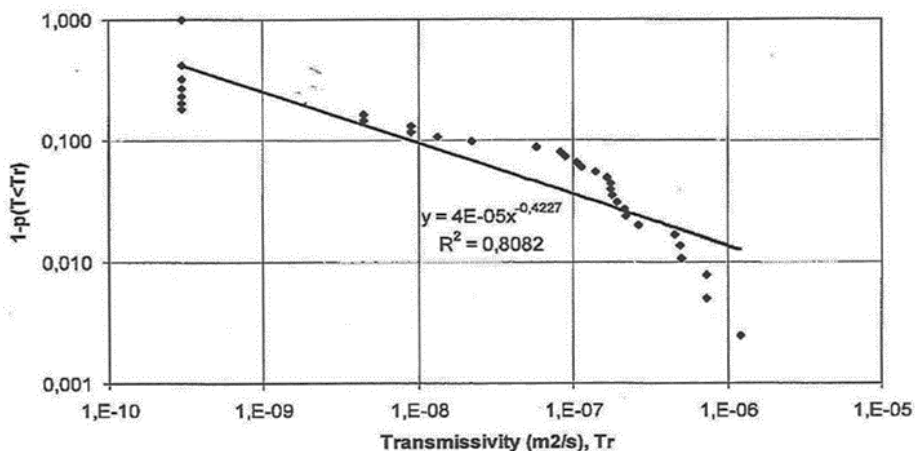


**Figur 4-1.** Passning av Paretofördelningar till sektionsdata från borrhål KBH971 i Törnskogstunneln. Modifierad från Funehag och Gustafson (2005). Antagen undre mätgräns i streckad linje och antagen övre mätgräns med prickad linje.

*Figure 4-1. Fitting of Pareto distributions to section data from borehole KBH971 in the Törnskog tunnel. Modified from Funehag and Gustafson (2005). Estimated lower measurement limit is presented with a dashed line, the upper with a dotted.*

I exemplet från Törnskogstunneln kan även ses att passningen exkluderat data från de mest genomsläppliga sektionerna. Detta beror troligen på att de mest genomsläppliga sektionerna ej omfattas av flödesmätarens övre mätkapacitet och då antas ge missvisande flöde. Mätaren visar då maxflöde men inte den faktiska flödeskapaciteten i berget. Törnskogstunneln är det enda av de studerade projekten där övre flöden har exkluderats från Paretopassningen, i övriga har den högsta utvärderade transmissiviteten (som ligger mellan  $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  och  $4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) ingått i passningen.

I ett flertal projekt har även datapunkter som ligger under mätgränsen ingått i passningen, se exempel från Nygårdstunneln i Figur 4-2. Där har den linjära regressionen beräknats även för de sju sektioner som uppvisade nollvärden och som antagits motsvara en undre mätgräns på  $4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .



**Figur 4-2.** Passning av Paretofördelning till data från fyra borrhål i Nygårdstunneln (Butron m.fl. 2008). Linjär regression har passats till samtliga 33 sektioner i datasetet, inklusive de sektioner som ligger under den nedre mätgränsen.

*Figure 4-2. Fitting of a Pareto distribution to data from four boreholes in the Nygård tunnel (Butron et al. 2008). The linear regression has used all 33 sections in the dataset, including those below the measurement limit.*

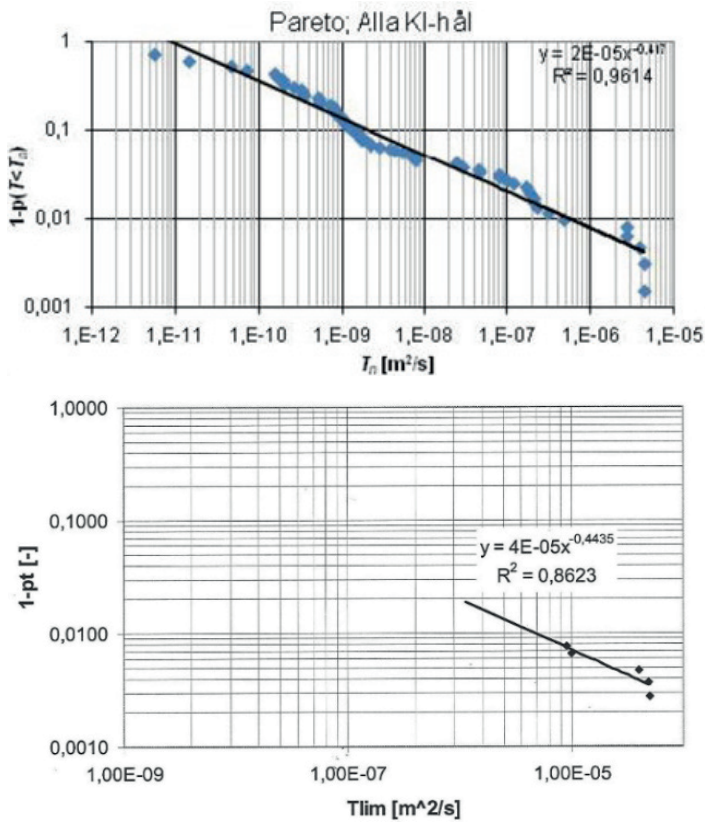
#### 4.4 Antal sektioner

Paretopassning har i ungefär hälften av projekten baserats på mätsektioner från ett kärnborrhål och i den andra hälften på mätsektioner från flera kärnborrhål, dvs. sammanslagning av data. Den totala antal sektioner som ingår i analyserna, och som därmed ligger till grund för den hydrogeologiska karakteriseringen, varierar mellan 7 och 95 sektioner. Det innebär att i det minsta antalet data omfattar 21 m kärnborrhål och den största mängden data är 285 m kärnborrhål.

#### 4.5 Antalet passningsmätpunkter

En faktor som kan indikera om indata har god kvalitet är antal passningsmätpunkter. Dessa motsvaras av antalet punkter liggandes på mätgränsintervallet som Paretofördelningens funktion passas till i ett lin-logdiagram. Flest punkter inom mätgränsintervallet erhöles i sammanslagningen av kärnborrhål i TASS-tunneln (74 st.) och lägst antal i Hallandsås (5 st.), se Figur 4-3.

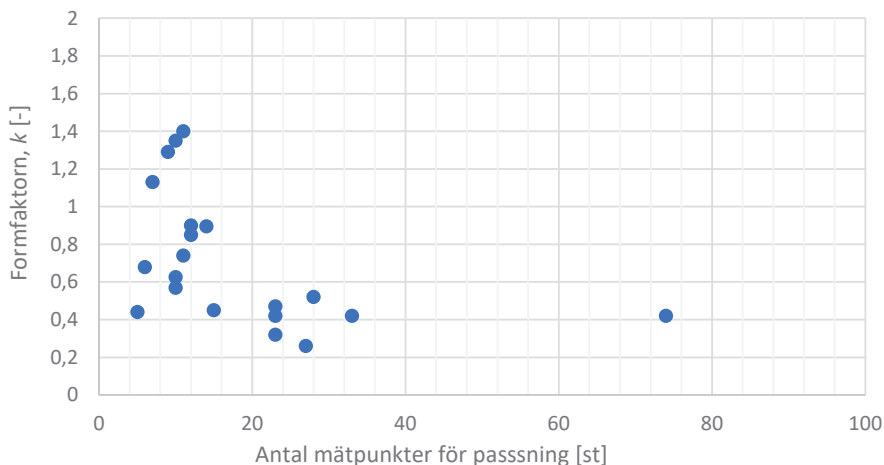




**Figur 4-3.** Exempel på passningar av Paretofördelningar. Överst: Data från TASS med 74 sektioner inom mätgränserna (Funehag och Emmelin 2011). Underst: Data från Hallandsås med 5 sektioner inom mätgränserna (Funehag och Gustafson 2004).  
*Figure 4-3. Examples of Pareto distribution fittings. Top: Data from TASS with 74 sections within measurement limits (Funehag and Emmelin 2011). Bottom: Data from Hallandsås with 5 sections within measurement limits (Funehag and Gustafson 2004).*

I Figur 4-4 jämförs antalet mätpunkter som nyttjats för passning av Paretofördelningen med resulterande formfaktor  $k$ . Jämförelsen visar att en större spridning i formfaktor när antalet mätpunkter för passning är färre än 20 sektioner., än när antalet sektioner inom mätgränsintervallet överstiger 20 sektioner.

Gustafson (2009) anger en gängse tumregel att för normalsprickigt svenskt berg är formfaktorn  $k$  mindre än 0,5. Detta innebär att den största sprickan dominerar flödet i respektive sektion. Denna regel stämmer bättre för data när antalet mätpunkter inom mätgränsintervallet överstiger 20 punkter.



**Figur 4-4.** Jämförelse mellan beräknad formfaktor och antalet mätpunkter till vilka en Paretofördelning har passats.

*Figure 4-4. Comparison of calculated Pareto distribution parameter and the number of sections to which a Pareto distribution has been fitted.*

#### 4.6 Passning av Paretofördelning till data

I Emmelin och Funehag (2011) presenteras en metod för att kontrollera Paretofördelningens noggrannhet. I korthet handlar det om att jämföra förhållandet mellan uppmätta sektionstransmissiviteter med fördelningens beräknade sektionstransmissiviteter. Uppmätta data utgörs av den summerade totala sektionstransmissiviteten för kärnborrhålsdata dividerat med den uppmätta största sektionstransmissiviteten;  $T_{tot,uppm}/T_{max,uppm}$ . Motsvarande teoretiska data utgörs av den Pareto-summa som beräknats,  $T_{tot,förd}/T_{max,förd}$ . Om uppmätt kvot stämmer överens med teoretisk kvot indikeras en god överensstämmelse mellan fördelning och indata. Dålig överensstämmelse kan bero beräkningsmässiga misstag vid Paretofördelningens passning, men studerade projekt verkar indikera att det är vanligare att dålig överensstämmelse beror på bristande kvalitet i indata.

Avvikelser mellan mätdata och Paretofördelning kan uppkomma om mätutrustningen har en för låg övre mätgräns, vilket uppkommer vid en dålig flödesmätare för höga flöden. Då kommer mätdata inte kunna representera flödet från den största sprickan. Ett tydligt exempel på detta ses i data från Törnskogstunneln i Figur 4-1 där flera sektioner uppnår maxflöde vid en sektionstransmissivitet motsvarande ca  $1 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s. Kvoten mellan uppmätt största transmissivitet och den totala uppmätta blir hög ( $T_{tot,uppm}/T_{max,uppm} = 7,0$ ) eftersom det i data saknas en dominerande sektion och istället ser ut att vara fem jämnstora sektioner som bidrar till ett högt totalflöde. I Paretofördelningen är dock den största sprickans transmissivitet beräknad till  $8 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, och teoretisk kvot är därför

lägre ( $T_{tot,förd}/T_{max,förd} = 1,5$ ). I exemplet från Törnskogstunneln bedöms Paretopassningen och den låga överensstämelsen mellan uppmätt och beräknad kvot framför allt bero på att mätutrustningen inte förmår återge stora sprickvidder korrekt. Paretofördelningen bedöms dock ge en tillfredställande beskrivning av mindre sprickvidder och kan därför nyttjas i analyserna. I detta fall kan Paretofördelningen alltså nyttjas trots att överensstämmelse mellan uppmätt och beräknad transmissivitetskvot är låg.

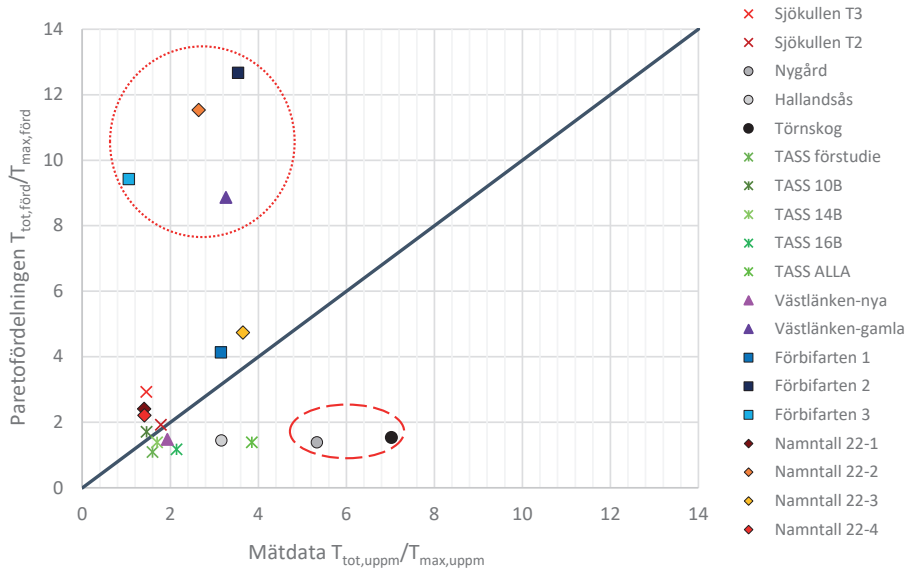
Ett annat exempel på avvikelser uppkommer är om mätutrustningen har en för hög undre mätgräns, dvs. en dålig flödesmätare vid låga flöden. Detta kan bidra till att Paretopassningen blir osäker och passad med tonvikt på några få höga flöden, vilket i flera studerade fall har inneburit att formfaktorn blivit hög och fördelningens Paretosumma hög, vilket inte ses i det uppmätta dataunderlaget. Ett exempel på detta ses i initiala mätningar i projekt Västlänken. Kvoten mellan uppmätt största transmissivitet och den totala uppmätta är visserligen något förhöjd jämfört med kvoter som normalt ses i normalsprickigt berg ( $T_{tot,uppm}/T_{max,uppm} = 3,3$ ), vilket kan bero på flödesmätarens övre mätgräns. Men för den passade Paretofördelningen, vilket har gjorts till enbart sju mätpunkter, är kvoten betydligt högre ( $T_{tot,förd}/T_{max,förd} = 8,9$ ). Detta indikerar att Paretofördelningen överskattar antalet sektioner med hög transmissivitet. För Västlänken finns dessutom injektionstester för motsvarande borrhål genomförda med bättre flödesmätare och för dessa uppvisar kvoterna bättre överensstämmelse: mätdata  $T_{tot,uppm}/T_{max,uppm} = 1,9$  jämfört med fördelning  $T_{tot,förd}/T_{max,förd} = 1,5$ .

En sammanställning av uppmätta och teoretiska kvoter ges i Figur 4-5. I ungefär hälften av studerade datamängder ligger punkterna nära linjen för ideal överensstämmelse (1:1). I de fall punkterna ligger högt över linje 1:1, dvs. när  $T_{tot,förd}/T_{max,förd} > T_{tot,uppm}/T_{max,uppm}$  beror det på felaktig Paretoberäkning och/eller att fördelningen baseras på indata med hög undre mätgräns och få mätpunkter att passa fördelningen till. I dessa fall bedöms Paretofördelningen ge en missvisande beskrivning av bergets hydrogeologiska egenskaper. I de fall punkterna i Figur 4-5 ligger långt under linje 1:1 ( $T_{tot,uppm}/T_{max,uppm} > T_{tot,förd}/T_{max,förd}$ ) bedöms det bero på flödesmätarens otillräckliga kapacitet för höga flöden. Paretofördelningen bedöms dock ändå kunna ge en god beskrivning av bergets egenskaper.

Paretosumman för de flesta av de studerade exempel (10 av 16) hamnar inom 1,0 och 2,0, vilket motsvarar en formfaktor mellan 0,26 och 0,57. Ett exempel som hamnar över intervallet är KBS-3H-projektet där analysen är genomförd för cementinjekterad bergmassa vilket rimligtvis borde innebära att de mest vattenförande sprickorna är tätade och att kvarvarande sprickor har mer homogen storlek ( $k = 0,90$ , Paretosumma 4,1). För övriga projekt kan höga Paretosummor härledas till otillräckliga indata med få mätpunkter och begränsad flödesnoggrannhet.

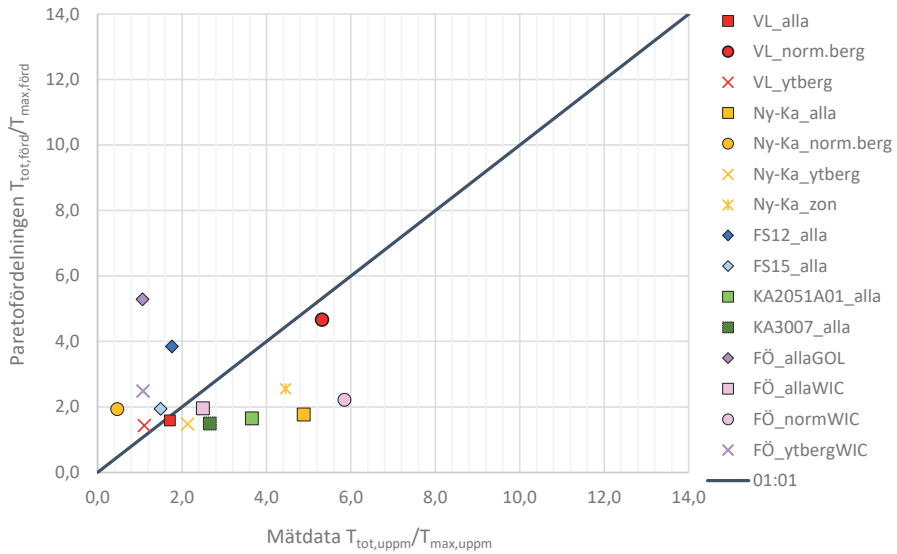
Motsvarande analys har även genomförts för andra dataset som sammanställts och bearbetats i denna studie, dvs. från Västlänken, Förbifart Stockholm, Nygård-Kattleberg och Äspö Utbyggnad, se Figur 4-6. Jämförelsen mellan kvot  $T_{tot}/T_{max}$  för uppmätta och statistiskt beräknade data är i huvudsak god, även om vissa dataset uppvisar större

avvikelser. I Äspö utbyggnad har differensflödesloggningen en låg övre mätgräns på 5 l/min, vilket skulle kunna förklara indikationen att data är trunkeerad för höga flöden. Även zon-data och all-data från Nygård–Kattleberg uppvisar en trend som kan bero på att flödesmätarens kapacitet inte är tillräcklig hög i genomsläppligt berg.



**Figur 4-5.** Jämförelse mellan kvot  $T_{tot}/T_{max}$  för mätdata och korresponderande Paretofördelning utvärderad från samma mätdata. Ideal överensstämmelse representeras av svart linje (1:1). Datapunkter inom prickad linje indikerar dataset där det skett en dålig Paretopassning. Datapunkter inom streckad linje indikerar dataset med trunkeerade data för höga flöden.

*Figure 4-5. Comparison between the ration  $T_{tot}/T_{max}$  for measurement data and the corresponding Pareto distribution evaluated from the same dataset. Ideal conformity is represented by the black line (1:1). Data within the red dotted line are examples of bad fitting of the distribution. Data within the red, dashed line are examples where truncation of high flows may have impacted the fitting.*



**Figur 4-6.** Jämförelse mellan kvot  $T_{tot}/T_{max}$  för mätdata och korresponderande utvärderad Paretofördelning för dataset nyttjade i Avsnitt 3. Vid ideal överensstämmelse hamnar prickarna på svart linje (1:1).

*Figure 4-6. Comparison between ratio  $T_{tot}/T_{max}$  for measurements and corresponding evaluated Pareto distribution for datasets used in Chapter 3. Ideal conformity is represented by the black line (1:1).*



## 5. UPPDATERING AV RÄKNEVERKTYG

Inom projektet har även räkneverktyget för passning av Paretofördelningar till dataset uppdaterats. Funna fel har bearbetats. I Tabell 5-1 ges en förteckning av de förändringar som gjorts i verktyget fram till aktuell version 2.00. Ej listade mellanliggande versioner är interna arbetsversioner vilka inte ska användas.

**Tabell 5-1.** Revisionslogg.

*Table 5-1. Log of revisions.*

Version	Rubrik, Beskrivning av förändringar sedan förra versionen.
0.80	<b>Alfatest</b> Första publika versionen.
0.81	<b>Uppdaterad Alfatest</b> Beräkningstidmätare togs bort då den inte fungerade med vissa systemkonfigurationer.
0.94	<b>Betatest</b> Fler kontroller, ändrat utseende i både start- och konditioneraflik. Buggfixar.
1.00	<b>Den publikt lanserade versionen</b> Det är för denna version den tryckta rapporten gäller.
1.01	<b>Uppdaterad publik version</b> Smärre ändring beträffande $T_{max}$ . Ompaketerat med den publicerade rapporten.
2.00	<b>Uppdaterad publik version</b> Experimentell ML-beräkning av trendlinje borttagen. Ny metod för beräkningsupplösning för att säkerställa att minst 20 iterationer genomförs, upplösning redovisas i statusfältet under beräkning. Stöd för sektionsvisa mätgränser borttaget. Beräkning av $T$ eller $K$ med Ylinens formel implementerad. Buggfixar.

Den iterativa beräkningsmetoden för att skatta spricktransmissiviteter utförs genom att kombinera två ekvationer och lösa dessa med iteration. Metoden för beräkningsupplösning vid iterationer i verktyget är uppdaterad i version 2.00. I tidigare versioner nyttjades en konstant upplösning. Från version 2.00 används 0,01 som inledande upplösning. Om antalet iterationer som behövs för att lösa de kombinerade ekvationerna till ett fel mindre än upplösningen är färre än 20, så divideras upplösningen med 10 och görs om tills minst 20 iterationer erhålls. Beräkningsupplösningen för varje sektion redovisas i statusraden under körning.

För användande av verktyget hänvisas till manualen som finns i Thörn m.fl. (2015). Observera att den tryckta versionen (Thörn m.fl. 2015) gäller version 1.00.





## 6. DISKUSSION

### 6.1 Domänindelning

Undersökningsborrhål bör i huvudsak planeras för att identifiera svaghetszoner och andra geologiska enheter som kan utgöra relevanta hydrogeologiska domäner i projektet. Ett basfall kan vara att dela in i data i tre domäner; ytberg, zonberg och normalberg. Dessa domäner kan sedan underindelas efter platsspecifik geologi. Vidare bör borrhålen borras i olika riktningar för att kunna ta hänsyn till eventuell hydraulisk anisotropi i bergmassan, hänsyn bör även tas till riktning och djup på tänkt anläggning.

Svaghetszoner bör inte ingå i en sprickviddsfördelning framtagen med Paretofördelningen eftersom flera av de antaganden som ligger till grund för den statistiska fördelningen har mindre stöd i väl konnekterad och uppsprucken bergmassa. En ingenjörsmässig bedömning behöver utföras i de fall zonberg väljs att inkluderas i Paretoanalysen.

Kartering av borrhärlar bör resultera i en tydlig beskrivning av läge för mindre och större svaghetszoner för att lättare kunna exkludera dessa ur underlaget till beräkningarna. Denna studies utförda uppdelning av data i hydrogeologiska domäner visar att det finns en tydlig risk att det görs en onödigt konservativ design för normalberg om ytberg och zonberg inte exkluderas ur dataunderlaget. De hydrogeologiska domänerna som tas fram baserat på datainsamlingen kan ligga till grund för de injekteringsklasser som tas fram i detaljprojekteringskedet.

### 6.2 Kvantitet och kvalitet hos insamlade data

För att möjliggöra framtagande av sprickviddsfördelningar och minska osäkerheten i resulterande fördelning krävs att en tillräcklig mängd representativa data samlas in.

Antal sektioner som behövs för statistisk analys behöver studeras vidare. Preliminära resultat är att efter indelning i hydrogeologiska domäner bör åtminstone 80 sektioner med mätdata inom mätgräns kvarstå i de domäner som injekteringsdesign ska utföras för. Praktiska begränsningar finns i beräkningsverktyget när över 250–300 sektioner används. I praktiken går det sannolikt att underindela sina hydrogeologiska domäner geografiskt eller per djup om antalet sektioner inom en domän överstiger 300 sektioner. Beräkningsverktygets begränsning är dock beroende av antalet sektioner med registrerade noll-flöden i dataunderlaget. Vid minskande mängd noll-flöden ökar beräkningskapaciteten i programvaran och fler sektioner kan analyseras.

Hydrauliska tester rekommenderas utföras med sektionslängd 3 m eftersom detta är väl etablerat och utgör en rimlig avvägning mellan kvantitet och kvalitet hos insamlade data. En 3 m lång sektion innebär även fler sektioner på samma mängd borrhål, vilket är fördelaktigt för att nå det eftersträlvade antalet sektioner per analyserad domän.

Det finns en mängd olika aktörer på marknaden som tillhandahåller tjänsten injektionstest. Det kan dock vara stora skillnader i kvaliteten hos producerade data, dels till följd av variationer i utförande, dels för att kvaliteten i utrustningens ingående komponenter varierar. Utrustningen ska ha kapacitet för förväntat flödesintervall och bör utföras med tryckmätning ovan, inom och under mätsektionen. Kontroll på flödesmätarnas övre och undre mätgränser liksom ostört grundvattentryck bör göras både före och efter vattenförlustmätningen. I varje tillämpning förväntas ett minsta flöde motsvarande transmissivitet om  $1 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s (ca centiliter per minut) kunna mätas. Vid tillämpningar med förväntat stränga krav på inläckage, eller tät bergmassa där många sektioner kan falla under mätgräns behövs lägre transmissivitet, motsvarande  $1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s.

Den övre mätgränsen på utrustningen är viktig för att tillförlitligt kunna skatta de största sprickvidderna i bergmassan. Flödesmätaren bör kunna mäta samma storleksordning som flödet från den största sprickan. I normalberg verkar en gräns på 50 l/min uppfylla denna rekommendation, men i ytberg kan högre flödeskapacitet än så vara önskvärt.

Utförda analyserar indikerar även att insamlad data bör omfatta ett visst flödesspann och därmed sektionsdata som omfattar minst tre tiopotenser. Det räcker alltså inte att ha en låg nedre mätgräns om även den övre mätgränsen är strypt till låga flöden. Ett scenario är att bergmassan har naturligt låg genomsläpplighet och att flödesmätaren i sådana fall behöver kunna mäta låga flöden för att reducera antalet sektioner med noll-flöden och erhålla ett brett flödesspann. Sammanställningen av data från tidigare utförda sprickviddsanalyser visar att antalet mätpunkter inom mätgränsintervallet måste överstiga en viss mängd för att ge rimlig passning.

Studier av sprickantal visar att kartering av borrhärnor bör utföras med omsorg beträffande läge och antal öppna eller vattenförande sprickor samt inkludera identifiering av zoner och eventuella underindelningar av normalberget. Parametern sprickantal är dock av mindre betydelse än exempelvis antal sektioner och mätgränser.

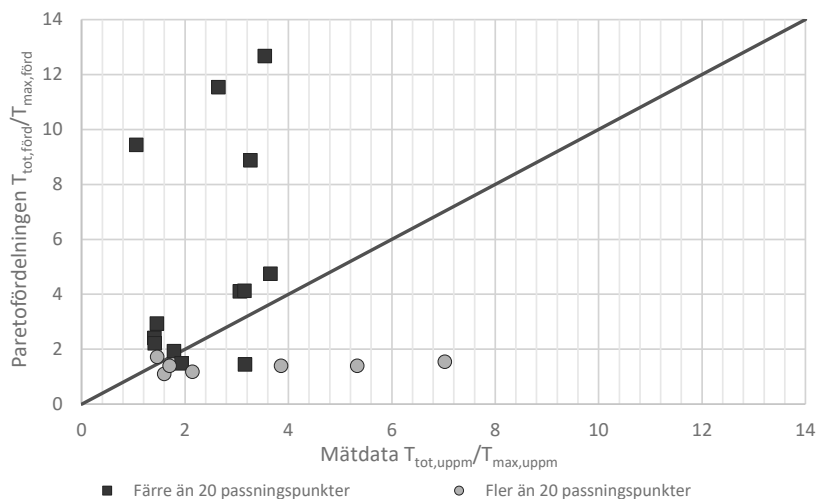
### 6.3 Känslighetsanalyser

Beräkningsmässig stabilitet och rimlighet i resulterande paretofördelningar bör alltid undersökas innan vidare beräkningar och projektering utförs. Känslighetsanalyser bör därför utföras på insamlade data såsom tryck, flöde och antal sprickor, samt tolkningar av domäner och mätgränser. I analyser av erforderligt antal sektioner noteras en spridning på ca 0,05 hos  $k$  om  $k$  är 0,3–0,5 och ca 80 sektioner analyserats. En rimlig känslighetsanalys är att variera  $k$  med ungefär  $\pm 0,05$  och undersöka eventuellt påverkan av detta i efterföljande beräkningar.

En föreslagen metod för att utvärdera kvalitén på indata är att jämföra förhållandet mellan utvärderade transmissiviteter från mätning med Paretofördelningens beräknade sektions-transmissiviteter. Jämförelsen sker genom att beräkna den summerade totala sektionstransmissiviteten för data och dividera den med den största sektions-

transmissiviteten ( $T_{tot}/T_{max}$ ) för mätdata respektive data från den statistiska fördelningen. Denna analys kan indikera om mätutrustningen har en för låg övre mätgräns eller om för få mätpunkter har nyttjats vid passning till Paretofördelningen.

I Figur 6-1 redovisas de dataset från litteraturstudien där data är uppdelat mellan datapunkter med färre och fler än 20 mätpunkter nyttjade för Paretofördelningens passning. Samtliga av de projekt som uppvisar en hög kvot för Paretofördelningen tillhör dataset där få mätpunkter nyttjats för passning.

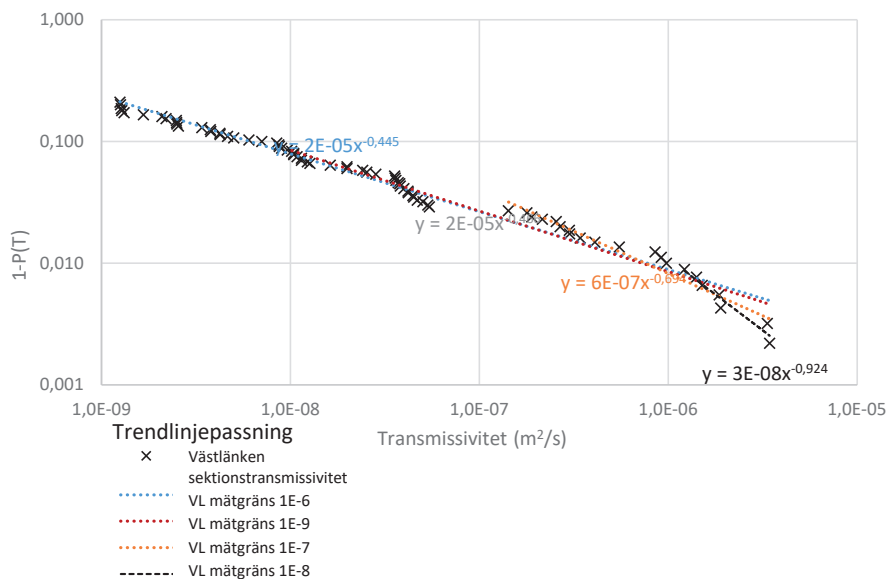


**Figur 6-1.** Jämförelse mellan kvot  $T_{tot}/T_{max}$  för mätdata och korresponderande kvot för Paretofördelningar med data från fallstudier i Avsnitt 4. Uppdelning mellan dataset där färre och fler än 20 mätpunkter nyttjats för passning.

Figure 6-1. Comparison between ratio  $T_{tot}/T_{max}$  for measurements and corresponding evaluated Pareto distribution for datasets used in Chapter 4, separating datasets where more than or less than 20 sections are used for distribution fitting.

En tydligare illustration av orsaken till avvikelser i jämförelsekvoter kan ses vid studier av mätgränstrunkering av ett dataset från Västlänken (alla, 95 sektioner.). I Figur 6-2 illustreras hur Paretofördelningens ekvation passas till olika angivelser för nedre mätgräns på samma dataset. Vid mätgräns  $1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s passas ekvationen till 76 mätpunkter från nära fyra tiopotenser, medan vid mätgräns  $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s passas ekvationen till 7 mätpunkter från mindre än en hel tiopotens. Vid passning mot få punkter ges en stor vikt åt de högsta uppmätta sektionstransmissiviteter, vars värden antas vara mer osäkra då de är i samma storleksordning som mätutrustningens övre mätgräns. Dessa mätpunkter antas därför inte utgöra en god representation av bergmassans faktiska hydrogeologiska egenskaper. Det bör påpekas att det kan finnas geologiska förklaringar till att mätpunkterna inte hamnar på en rät linje i diagrammet. Förekomst av sprickfyllnad

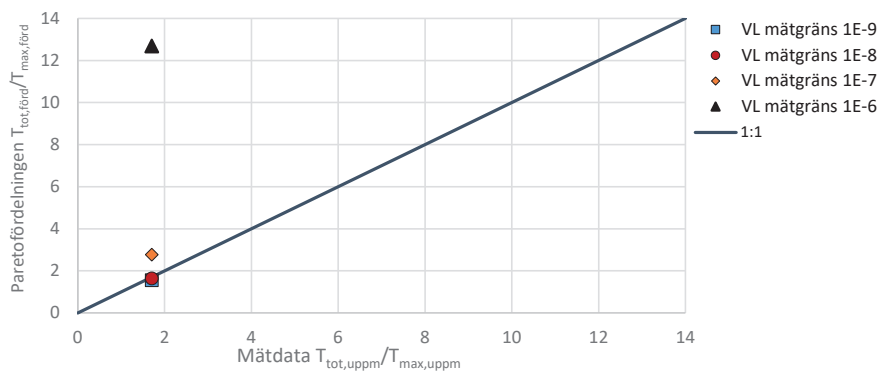
i de största sprickorna eller hydrauliska gränser (strypningar) skulle kunna leda till att punkterna uppvisar lägre flöden och förskjuts åt vänster i Figur 6-2.



**Figur 6-2.** Passningar av Paretofördelningar till sektionstransmissiviteter från Västlänkens samtliga sektioner. Här visas fyra passningar till fyra olika nedre mätgränser ( $1 \times 10^{-9}$ ,  $1 \times 10^{-8}$ ,  $1 \times 10^{-7}$  och  $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s).

*Figure 6-2. Fittings of Pareto distributions to section transmissivities from the West link project. Illustrated are four fittings to different data truncations of the lower measurement limit ( $1 \times 10^{-9}$ ,  $1 \times 10^{-8}$ ,  $1 \times 10^{-7}$  and  $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s).*

Avvikelsen ger sig känna i jämförelsen mellan kvoten  $T_{tot}/T_{max}$ , se Figur 6-3. Vid mätgränser  $1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s och  $1 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s ligger fördelningens och mätdatas kvoter nära linjen 1:1, men för mätgräns  $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s hamnar punkten långt över 1:1, vilket är karakteristiskt för dålig fördelningspassning. Det beräknade inläckaget till en teoretisk, otätad tunnel skiljer sig även markant för de resulterande fördelningarna. Inläckaget uppgår till 28–30 l/min, 100 m för fördelningarna utgående från dataset med mätgräns  $1 \times 10^{-9}$  till  $1 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, men 65 l/min, 100 m för data med mätgräns  $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.



**Figur 6-3.** Jämförelse mellan kvot  $T_{tot}/T_{max}$  för mätdata och korresponderande kvot för utvärderad Paretofördelning för Västlänkendata presenterad i Figur 6-2.

*Figure 6-3. Comparison of ratio  $T_{tot}/T_{max}$  for measurement data and corresponding Pareto distribution for the West link project data presented in Figure 6-2.*



## 7. SLUTSATSER

Sprickviddsfördelningar enligt Paretoanalys kan nyttjas vid injekteringsprojektering för att kvantifiera parametrar såsom erforderlig tätningseffekt, inträngning och spridning av injekteringsmedel, samt inflödesskattning för olika typer av bruksblandningar. Framtagandet av dessa fördelningar är beroende av ändamålsenliga indata, vilket innebär att en tillräcklig och representativ datamängd måste samlas in, samt att data tolkas och hanteras lämpligt i beräkningsprocessen. Det är svårt att specificera vad som är en tillräcklig datamängd eftersom krav på täthet, geologiska faktorer och mätutförande påverkar varandra och resulterande fördelningar. Vanliga anledningar till att hydrogeologiska data blir oanvändbara för sprickviddsanalyser är att för få testade bormeter utförts, långa testsektioner, en för hög nedre mätgräns på flödesmätare eller att trycket är dåligt dokumenterat.

Att inte prioritera en god datakvalitet i tidiga projektskedan kan leda till merkostnader både i form av kompletteringsbehov och en orimligt hög och svårdokumenterad projektriskkostnad. Det kan därför vara betydelsefullt att ha en genomtänkt strategi för vilka data som behövs vid injekteringsprojektering för att undvika förgäveskostnader. Tills en ändamålsenlig standard eller metodbeskrivning finns att tillgå är ett sätt att förbättra kvalitén på erhållna data att en projektör som ska utföra sprickviddsanalys får möjlighet att ge inspel till en kravlista på utförandet. En utgångspunkt för en sådan kravlista är att specificera:

- Sektionslängd 3 m,
- Antal sektioner per hydrogeologisk domän ( $\geq 75-80$ ),
- Utformning av kärnkarteringsprotokoll med tydlig redovisning av sprickantal, sprickors läge och läge för svaghetszoner,
- Mätgränser för flödesmätare (t.ex. motsvarande sektionstransmissivitet mellan  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  och  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ),
- Kvalitetssäkring av flödesmätare genom kontrollmätning av flöde och tryck,
- Upplägg för tryckmätning, och
- Utförande av test för att uppnå stationära förhållanden.

När data från undersökningarna mottagits och kan analyseras statistiskt finns även ett antal kontrollsteg som projektören bör utföra för att få bättre kunskap om osäkerheter i den hydrogeologiska karakteriseringen. Dessa inkluderar:

- Uppdelning av data i hydrogeologiska domäner med känslighetsanalys av klassificeringen.
- Jämförelsen av  $T_{tot}/T_{max}$  för mätdata och statistisk fördelning för att identifiera indikationer på dålig passning av Paretofördelningen.
- Vid inläckageberäkning bör lämplighet av indata utvärderas och eventuell hänsyn tas till hur medelvärdesbildning utförs i beräkningarna.

## 7.1 Förslag till vidare studier

De analyser som utförts inom ramen för detta projekt omfattar ett begränsat antal dataset. De analyser som utförts kan med fördel vidareutvecklas och omfatta fler och större dataset, framför allt rekommenderas detta för antal sektioner, men också övre och undre mätgränser.

Det behövs även uppföljande studier av hur injekteringsdesign utförd baserad på sprickviddsfördelningar har presterat i byggprojekt. Sådana studier kan omfatta en utvärdering av exempelvis skattningar av sprickviddsfördelningar baserat på resultat från vattenförlustmätningar i injekteringsborrhål, erhållen täthet baserat på kontrollhål och inläckage till tätad tunnel. För denna helhet kommer representativitet hos indata och medelvärdesbildning av bergmassans genomsläpplighet att vara central. Vidare med fördelningar för både tätad och otätad bergmassa kan principerna för tätning ned till dimensionerande sprickvidd undersökas. Dessa parametrar kan alla relateras tillbaka till sprickviddsfördelningar baserade på förundersökningsdata.

Programvaran bör testas och användas av fler användare för att undersöka behovet av att förbättra gränssnitt och instruktioner samt undersöka de tekniska begränsningarna.



## REFERENSER

- 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.
- 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.
- Fransson Å. 2002. "Nonparametric Method for Transmissivity Distributions Along Boreholes." *Ground Water*, 40 (2), 201–204.
- Fransson, Å. 1999. Grouting Predictions Based on Hydraulic Tests of Short Duration: Analytical, Numerical and Experimental Approaches. Licentiate thesis. Gothenburg, Chalmers University of Technology.
- Fransson, Å., Hernqvist, L. 2010. Geology, water inflow prognosis and grout selection for tunnel sealing: Case studies from two tunnels in hard rock, Sweden. Proceedings, ITA-AITES World Tunnel Congress, Vancouver, May 14-20.
- 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.
- 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.
- Funehag J, Emmelin A. 2011. "Injekteringen av TASS-tunneln Design, genomförande och resultat från förinjekteringen." R-10-39. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gustafson G, Fransson Å, Funehag J, Axelsson M. 2004. "Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering." *Väg och Vattenbyggaren* 4, Stockholm
- Gustafson G, Fransson Å. 2005. "The use of Pareto distribution for fracture transmissivity assessment." *Hydrogeology Journal*, 14, 15–20.
- Gustafson G. 2009. "Hydrogeologi för bergbyggare." Forskningsrådet Formas.
- 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.
- Hernqvist L, Einarsson V, Höglund A. 2014. "Dominerar den största sprickan vattenflödet?" Föredrag vid Bergmekanikdag i Stockholm, 10 mars 2014.

- Hämäläinen, H. 2013. "Monitoring Hydraulic Conductivity with HTU at Eurajoki, Olkiluoto, Drillholes OL-KR31 and OL-KR32 in 2011." Working report 2013–07.
- Johansson E, Stenberg L, Olofsson I, Karlzén R. 2015. "Utbyggnaden av Äspölaboratoriet 2011–2012. Karakterisering, projektering och tunneldrivning." R-13-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moye D G. 1967. "Diamond drilling for Foundation Exploration." *Civil Engineering Transactions*, April 1967, pp 95-100.
- Runslätt E, Creütz M, Hässler H. 2013. "Groutability of the rock mass using fracture statistics." Nordic Grouting Symposium 2013. Göteborg, Sverige.
- Runslätt E, Thörn J, Fransson Å, Kvartsberg S. 2017. "Statistical evaluation of groutability using data from hydraulic tests and fracture mapping. Case studies from Sweden." Grouting 2017, Grouting, Deep Mixing, and Diaphragm Walls, July 9-12, 2017 Hawaii USA.
- Stille H. 2015. "Rock grouting – Theories and Applications." BeFo. Stockholm.
- Stille H. 2012. "Rock grouting in tunnel construction – models and design." Proceedings of Eurock 2012 ISRM International Symposium, Stockholm, Sweden.
- Stille B, Andersson F. 2008. "Injektering - tillämpning av injekteringsforskning i fält." SveBeFo rapport 79. Stiftelsen Bergteknisk forskning.
- Stille B. 2016. "Grouting Theory and Grouting Practice – Distribution of hydraulic properties and rock mass response with regards to grouting aspects and seepage into tunnels." Licentiatuppsats vid Chalmers tekniska högskola. Division of GeoEngineering.
- Thörn J, Kvartsberg S, Runslätt E, Almfeldt S, Fransson Å. 2015. "Beräkningsverktyg för bergkarakterisering vid injekteringsdesign – teori och användarhandledning." BeFo rapport 143. Stiftelsen Bergteknisk forskning.
- Thörn J, Kvartsberg S, Runslätt E, Fransson Å. 2016. "Calculation tool for hydraulic characterization during grouting design." Nordic Grouting Symposium 2016. Oslo, Norway.
- Trafikverket. 2016. "Ansökan om tillstånd enligt miljöbalken för anläggandet av Västlänken och Olskroken planskildhet, PM Hydrogeologi." TRV 2016/3151. 2016-02-10.
- Trafikverket. 2021. "Krav TRVINFRA-00233 Tunnelbyggande." Version 1.0. 2021-01-11.
- 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.

## BILAGA 1

I denna bilaga presenteras fördelningsparametrar för de dataset som utgör grund för analyserna i Kapitel 4 (Fallstudier).

**Tabell 1.** Sammanställning av dataset från studerade projekt i Kapitel 4.

*Table 1. Compilation of datasets studied in Chapter 4.*

Projekt	Undre mätgräns* $T$ [ $m^2/s$ ]	Övre mätgräns* $T$ [ $m^2/s$ ]	Sektionslängd $L_S$ [m]	Borrhålslängd $L_B$ [m]	Antal sektioner	Antal sprickor, $N$	Antal punkter för passning	Referens
Sjökullen T3	3E-08	>1E-6	3	33	11	127*	11*	Butron m.fl. (2012)
Sjökullen T2	3E-08	>7E-6	3	57	19	183*	10*	
Nygårdstunneln	4E-09	>1E-6	3	99	33	406	33*	Butron m.fl. (2008)
Hallandsås	1E-06	>4E-5	1	74	74	1112	5*	Funehag och Gustafson (2004)
Törnskogstunneln	3E-07	1E-05	3	165	55	858	23*	Funehag och Gustafson (2005)
TASS-Förstudie	1E-11	>3E-7	5	141	28	58	27	Funehag och Emmelin (2011)
TASS 10B	1E-11	>3E-6	3	94	31	195	28	
TASS 14B	1E-11	>3E-6	3	94	31	276	23	
TASS 16B	1E-11	>3E-6	3	94	31	189	23	
TASS-Alla hål	1E-11	>3E-6	3	282	94	660	74	
Åspö: KBS-3H	3E-08	>9E-7	5	90	18	86	12	Kvartsberg och Fransson (2013)
Västlänken-nya	2E-09	>1E-6	3	285	95	955	15	Thörn m.fl. (2016)
Västlänken-gamla	9E-08	>6E-7	3	102	34	339	7	
Namntall 22-1	<1E-07	>7E-6	3	21	7	56	6*	Stille och Andersson (2008)
Namntall 22-2	<1E-06	>2E-5	3 och 9	39	11	180	10*	
Namntall 22-3	<5E-07	>2E-5	3, 6 och 9	54	15	300	14*	
Namntall 22-4	<1E-07	>2E-5	3	36	12	184	10*	
Förbifarten 1	1E-09	>8E-7	3	36	12	255	12	Runslätt m.fl. (2013)
Förbifarten 2	2E-08	>8E-7	3	60	20	187	11	
Förbifarten 3	2E-08	>8E-7	3	63	21	171	9	

\*Återskapad data utifrån siffror i diagram. Generellt är undre och övre mätgränser skattade ur diagram.

**Tabell 2.** Sammanställning av utvärderade fördelningsparametrar för Paretofördelningar från studerade projekt i Kapitel 4, Fallstudier.

*Table 2. Compilation of evaluated distribution parameters for Pareto distributions of projects studied in Chapter 4.*

Projekt	Formfaktor, $k$ [-]	Fördelningens beräknade $T_{max}$ [m <sup>2</sup> /s]	Fördelningens beräknade $T_{tot}$ [m <sup>2</sup> /s]	Fördelningens beräknade $T_{tot}/T_{max}$	Mätdata $T_{tot}$ [m <sup>2</sup> /s]	Mätdata $T_{max}$ [m <sup>2</sup> /s]	Mätdata $T_{tot}/T_{max}$
Sjökullen T3	0,74	5,5E-06	1,6E-05	2,9	1,6E-05**	1,1E-05**	1,5
Sjökullen T2	0,57	1,6E-05	3,1E-05	1,9	2,5E-05**	1,4E-05**	1,8
Nygårdstunneln	0,42	6,0E-05	8,4E-05	1,4	6,4E-06	1,2E-06	5,3
Hallandsås	0,44	4,0E-05	5,8E-05	1,4	1,6E-04**	5,0E-05**	3,2
Törnskogstunneln	0,47	7,8E-04	1,2E-03	1,5	1,3E-04**	1,9E-05**	7,0
TASS-Förstudie	0,26	1,2E-05	1,3E-05	1,1	2,4E-06	1,5E-06	1,6
TASS 10B	0,52	2,2E-06	3,8E-06	1,7	3,8E-06	2,6E-06	1,5
TASS 14B	0,42	5,4E-06	7,5E-06	1,4	7,5E-06	4,4E-06	1,7
TASS 16B	0,32	1,3E-05	1,5E-05	1,2	1,5E-05	7,0E-06	2,1
TASS-Alla hål	0,42	5,1E-06	7,1E-06	1,4	2,7E-05	7,0E-06	3,9
Äspö: KBS-3H	0,90	1,2E-06	4,7E-06	4,1	2,6E-06	8,5E-07	3,1
Västlänken-nya	0,45	3,5E-05	5,2E-05	1,5	5,9E-05	3,1E-05	1,9
Västlänken-gamla	1,13	6,1E-07	5,4E-06	8,9	1,1E-06	3,4E-07	3,3
Namntall 22-1	0,68	6,4E-06	1,5E-05	2,4	9,8E-06**	7,0E-05**	1,4
Namntall 22-2	1,35	1,4E-05	1,6E-04	11,5	4,4E-05**	1,7E-05**	2,6
Namntall 22-3	0,90	3,0E-05	1,4E-04	4,7	6,3E-05**	1,7E-05**	3,7
Namntall 22-4	0,63	1,6E-05	3,5E-05	2,2	2,9E-05**	2,1E-05**	1,4
Förbifarten 1	0,85	1,9E-07	7,8E-07	4,1	6,3E-07	2,0E-07	3,2
Förbifarten 2	1,40	3,9E-07	4,9E-06	12,7	1,7E-06	4,8E-07	3,5
Förbifarten 3	1,29	6,2E-07	5,8E-06	9,4	5,4E-05	5,1E-05	1,1

\*\*Skattad sektionstransmissivitet utifrån diagram





Box 55545  
SE-102 04 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org  
Besöksadress: Sturegatan 11, Stockholm

ISSN 1104-1773