

BEHOVSPRÖVAD INJEKTERING – HYDROGEOLOGISKT BASERAD METODIK FÖR IMPLEMENTERING

Peter Wilén

Sara Kvartsberg

Magnus Zetterlund

**BEHOVSPRÖVAD INJEKTERING -
HYDROGEOLOGISKT BASERAD
METODIK FÖR IMPLEMENTERING**

**Demand-assessed grouting –
hydrogeologically based methodology
for implementation**

Peter Wilén, Norconsult
Sara Kvartsberg, Norconsult
Magnus Zetterlund, Norconsult

FÖRORD

Tättningsinsatser inom skandinaviskt bergbyggnad utförs huvudsakligen genom injektering. Det är en central del i byggprocessen och utgör vanligtvis en betydande insats både vad gäller tid och kostnad. Den injektering som utförs i Sverige idag är ofta en kontinuerlig förinjektering, något som i de allra flesta fall är motiverat i tätbebyggda områden med tanke på risken för sättningar. En omgivningspåverkan som innebär grundvattensänkning kan också vara skadlig om den inte uppfyller de miljökrav som ställs i olika områden längs en tunnelsträckning. Med tanke på de stora resurser som avsätts till injektering så finns det stora besparingar att göra om man kan anpassa injekteringsinsatsen till det behov som finns avseende omgivningspåverkan.

Föreliggande projekt, som är en inledande studie, har arbetat med en strukturerad metodik som innebär att injekteringsinsatserna ska anpassas till kombinationen av platsens geologiska förhållanden, omgivningspåverkan och konsekvensen av en grundvattensänkning. De hydrogeologiska förhållandena är centrala för att kunna prognosticera framtida inläckage och dess effekter. Metodiken resulterar i en injekteringsprognos längs den aktuella tunnelsträckningen. En prognos som kan innebära varierande anpassade insatser.

I projektet har den föreslagna metodiken tillämpats i fyra fallstudier med två tunnlar i Sverige och två i Norge som är byggda. Data i fallstudierna utnyttjades för att göra en hydrogeologisk bedömning, bedöma konsekvenserna av omgivningspåverkan och slutligen ta fram en injekteringsprognos. Genom en behovsanpassad strategi kan stora belopp sparas och trots att det krävs mer utredningsarbete än normalt så bedöms att i storleksordningen 20-40% kan sparas.

Utvecklingsarbetet har genomförts av en grupp på Norconsult i Göteborg bestående av Peter Wilén, Sara Kvartsberg och Magnus Zetterlund. Den referensgrupp som har bistått gruppen med värdefulla råd och granskning under projektet bestod av Hans Hargelius (Trafikverket), Tommy Ellison (Besab), Åsa Fransson (Chalmers), Ulf Sundqvist (Cowi) och Per Tengborg (BeFo). Projektet finansierades av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo).

Stockholm i december 2014

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

Behov av tätningsinsatser för att begränsa grundvatteninläckage och omgivningspåverkan varierar vanligen längs en tunnelsträckning. Detta följer av att inläckagemängd och konsekvenser av inläckage varierar beroende på geologiska och hydrogeologiska förhållanden, men också för att miljökrav kan variera mellan olika områden. Variationerna medför att bergmassan längs vissa sträckor förmodligen är tillräckligt tät för att uppfylla miljökraven utan tätningsinsatser, men eftersom tätning av bergtunnlar i Sverige normalt utförs med kontinuerlig förinjektering sker insatser även i områden där dessa gör begränsad nytta.

Kontinuerlig förinjektering ses som fördelaktigt bland annat eftersom det ger en förutsägbar produktion och anses minska risken för kompletterande tätningsåtgärder efter berguttag. Förekommer områden där tätningsinsatser har en begränsad effekt med tillräckligt hög frekvens kan det dock vara mer resurseffektivt att övergå till ett mer flexibelt förfaringsätt där tätningsåtgärder enbart sätts in där de behövs och gör nytta, dvs. utföra behovsprövad injektering. Vid en behovsprövad tätningsstrategi utförs injekteringskärmor endast i områden där behov av tätningsinsatser prognostiseras utifrån miljöutredningar, ingenjörsgelogiska prognoser och/eller sonderingsresultat under byggskedet. På så sätt kan resursanvändning i form av tid och material minskas samtidigt som täthetskraven uppfylls.

Behovsprövad injektering förekommer i begränsad omfattning i svenska infrastruktur-tunnlar och denna inledande studie syftar till att utreda hur behovsprövad injektering skulle kunna implementeras som en strukturerad och robust injekteringsstrategi i Sverige. En hypotes är att den behovsprövide strategin bör baseras på en god förståelse för områdets hydrogeologiska förutsättningar, samt att tätningsinsatser bör koncentreras till områden som är mer genomsläppliga, alternativt känsliga för grundvattenpåverkan.

I arbetet med rapporten ingick att ta fram en strukturerad metodik för utredning av möjligheten att implementera behovsprövad injektering som uppfyller krav på omgivningspåverkan. Metodiken utnyttjar geologiska och hydrogeologiska underlag som normalt finns tillgängliga i svenska tunnelprojekt och är indelad i två delar; ett förundersökningsprogram och en

injekteringsprognos. Metodiken testades i fyra fallstudier där data från infrastruktur-tunnlar i Sverige och Norge användes för att jämföra ett prognostiserat injekteringsbehov med verkligt utförd injektering.

Resultatet av fallstudierna tyder på att behovsprövad injektering kan användas inom svenskt tunnelbyggande i högre utsträckning än vad som tillämpas idag (vid tätning för att uppfylla miljökrav). Lämpliga förhållanden för behovsprövad injektering finns i tunnlar där det är möjligt att tillämpa differentierade inläckagekrav och där eventuella inläckagekrav övervägande är i storleksordningen större än 5-10 l/min/100 m tunnel. Resultat från fallstudierna indikerar att en behovsprövad strategi skulle kunna minska injekteringsomfattningen med 40-50 %. Även om behovsprövad injektering förväntas medföra ökade kostnader för projektering, samt beslutfattande och sondering under byggskedet bedöms den totala kostnaden för injekteringsarbeten kunna minskas med 20-40 %.

För att kunna tillämpa en strukturerad behovsprövad injektering bör förundersökningsprogrammet mynna ut i en tydlig hydrogeologisk modell. Viktiga analyser i den hydrogeologiska modellen är:

- Kvantifiering av grundvattenbildning till berg.
- Tolkning av bergmassans hydrauliska beteende med hydrauliska domäner.
- Identifikation av känsliga områden baserat på potentiella skadeobjekt.

Denna studie har identifierat att fördjupade utredningar bör initieras inom frågeställningar som hanterar (i) grundvattenbildning till berg, (ii) inläckageprognoser och hantering av hydrogeologiska modeller i tillståndsprocessen, samt (iii) beställar- och entreprenörsaspekter för behovsprövad injektering rörande allt från kontrakt- och ersättningsfrågor till drift- och underhållsfrågor.

Nyckelord: behovsprövad, injektering, design, förundersökning, inläckageprognos, injekteringsbehov, tunnlar

SUMMARY

The need for water-mitigating measures to reduce groundwater inflows and avoid unacceptable impacts on surrounding groundwater aquifers varies along rock tunnels. This is because the effects of tunneling on groundwater vary in different geological and hydrogeological conditions, and because there normally are variations in the vulnerability of surrounding areas. Some areas are probably tight enough to fulfill environmental requirements without any water-mitigating measures, but the rock mass will probably be grouted anyway as continuous pre-grouting is a normal grouting procedure in Swedish tunnel projects.

Continuous pre-grouting is seen as beneficial because it provides a predictable production and reduces the risk of additional water-mitigating measures after excavation. However, if areas where pre-grouting have limited effect occur with a sufficiently high frequency, it may be more resource efficient to shift to a more flexible approach where grouting is only carried out where it is needed and beneficial, i.e. to perform “demand-assessed” grouting. In a demand-assessed strategy grouting fans are only carried out in areas where the need for water-mitigating measures are predicted from environmental studies, engineering geological prognoses, and/or probing during construction. This allows a reduced use of resources in terms of time and materials while inflow requirements are still fulfilled.

Demand-assessed grouting is rarely used in Swedish tunnels today and this initial study aims to investigate how demand-assessed grouting could be implemented as a structured and robust grouting strategy in Sweden. One hypothesis is that a demand-assessed grouting strategy should be based on a good understanding of hydrogeological conditions; another is that water-mitigating efforts should be concentrated to highly water-conductive areas and areas vulnerable to groundwater impacts.

The work with this report included to develop a structured methodology for investigating possibilities to implement a demand-assessed grouting that fulfills environmental requirements. The methodology utilizes geological and hydrogeological documentation that is normally available in Swedish tunnel projects and consists of two parts; a pre-investigation program and a grouting

prognosis. The methodology was tested in four case studies in which data from infrastructure tunnels in Sweden and Norway were used to compare a forecasted need for grouting with actual grouting carried out in the project.

The results of the case studies suggest that demand-assessed grouting can be used within Swedish tunneling to a greater extent than it is today (in order to fulfill environmental requirements). Suitable conditions for demand-assessed grouting are tunnels where it is possible to apply differentiated inflow requirements which predominantly are greater than 5-10 l /min and 100 m tunnel. Results from the case studies indicate that a demand-assessed approach could reduce the number of grouting fans by 40-50 %. While demand-assessed grouting is expected to result in increased costs for planning, decision-making and probing during the construction phase, it is estimated that the total grouting cost could be reduced by 20-40 %.

A structured demand-assessed grouting should include a pre-investigation program that produces a well-defined hydrogeological model. Important analyses in the hydrogeological model are:

- Quantification of the groundwater recharge in the bedrock.
- Interpretation of the hydraulic behavior of the rock mass presented with hydraulic domains.
- Identification of sensitive areas based on vulnerable objects in the surroundings.

Further studies should be initiated in issues that deal with (i) groundwater recharge in bedrock, (ii) groundwater inflow prognoses and managing hydrogeological models in the consultation- and permit process, and (iii) client and contractor aspects of demand-assessed grouting on everything from contractual and compensation issues to operational and maintenance issues.

Key words: demand-assessed, grouting, design, pre-investigation, inflow prognosis, need for grouting, tunnel

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	i
SAMMANFATTNING.....	iii
SUMMARY	v
INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....	vii
BETECKNINGAR.....	ix
1 INTRODUKTION.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Begreppet 'behovsprövad injektering'	3
1.3 Behovsprövad injektering i Sverige och Norge.....	5
1.4 Syfte och genomförande	5
1.5 Avgränsningar.....	6
2 FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR BEHOVSPRÖVAD INJEKTERING.....	9
2.1 Formulering av täthetskrav	9
2.1.1 Tillståndsprocessen i Sverige.....	9
2.1.2 Tillståndsprocessen i Norge.....	10
2.2 Prognostisera inläckage före och efter injektering.....	11
2.3 Kostnads- och kontraktsfrågor.....	15
3 FÖRUNDESRÖKNINGSPROGRAM	17
3.1 Innehåll i förundersökningsprogrammet.....	17
3.2 Hydrogeologisk områdesbeskrivning	19
3.2.1 Berggrundsbeskrivning	19
3.2.2 Strukturgeologisk beskrivning	20
3.2.3 Jordartsbeskrivning.....	21
3.2.4 Hydrologisk- och hydrogeologisk beskrivning	21
3.3 Hydrogeologisk modell	22
3.3.1 Grundvattenbildning till berg	23
3.3.2 Hydrauliska domäner	27
3.3.3 Inläckageberäkning	33
3.3.4 Känsliga områden.....	33
4 INJEKTERINGSPROGNOS	37
4.1 Utformning av injekteringsprognos.....	37
4.2 Täthetsklasser	39
4.3 Injekterbarhet av spricksystem	39
4.4 Injekteringsbehov.....	41
4.5 Produktionsanpassning	42

5	FALLSTUDIER.....	45
5.1	Ulvintunneln.....	46
5.1.1	Förundersökningsprogram Ulvin.....	47
5.1.2	Injekteringsprognos Ulvin.....	49
5.1.3	Utförd injektering.....	50
5.2	Hagantunneln.....	53
5.2.1	Förundersökningsprogram Hagan.....	53
5.2.2	Injekteringsprognos Hagan.....	57
5.2.3	Utförd injektering.....	57
5.3	Namntalltunneln.....	60
5.3.1	Förundersökningsprogram Namntall.....	60
5.3.2	Injekteringsprognos Namntall.....	64
5.3.3	Utförd injektering.....	65
5.4	Nygårdstunneln.....	67
5.4.1	Förundersökningsprogram Nygårdstunneln.....	68
5.4.2	Injekteringsprognos Nygårdstunneln.....	72
6	DISKUSSION.....	75
6.1	Fallstudieresultat.....	75
6.2	Tillståndsprocess och kravformulering.....	77
6.3	Hydrogeologisk modell.....	79
6.4	Förundersökningar.....	81
6.5	Uppföljning och utvärdering.....	83
6.6	Injekteringsmetodik.....	84
6.7	Ersättning och kontrakt.....	85
7	SLUTSATSER.....	87
	REFERENSER.....	91

BILAGA A – BERÄKNINGAR I FALLSTUDIER

A.1 Grundvattenbildning till berg

A.2 Hydrauliska medelkonuktiviteter för hydrauliska domäner

A.3 Inläckageprognos till oinjekterad tunnel

BETECKNINGAR

Latinska bokstäver

b	[m]	Hydraulisk apertur
H	[m]	Djup under referensyta
h	[m]	Grundvattennivå
I_{max}	[m]	Största inträngningslängd för injekteringsbruk
K	[m/s]	Hydraulisk konduktivitet
k	[-]	Formparameter för Paretofördelningen
L	[m]	Längd, mätskala
N	[-]	Totalt antal
q	[m ³ /s]	Flöde
r_t	[m]	Tunnelradie
r_w	[m]	Borrhålsradie
R_0	[m]	Influensområde
T	[m ² /s]	Transmissivitet
t	[m]	Medeltjocklek för den tätade zonen
W	[mm/år]	Grundvattenbildning

Grekiska bokstäver

ξ	[-]	Skinfaktor
-------	-----	------------

Förkortningar

MKB	Miljökonsekvensbeskrivning
MWD	Measurement While Drilling
NGU	Norges Geologiske Undersøkelse
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
SGU	Sveriges Geologiska Undersökning

1 INTRODUKTION

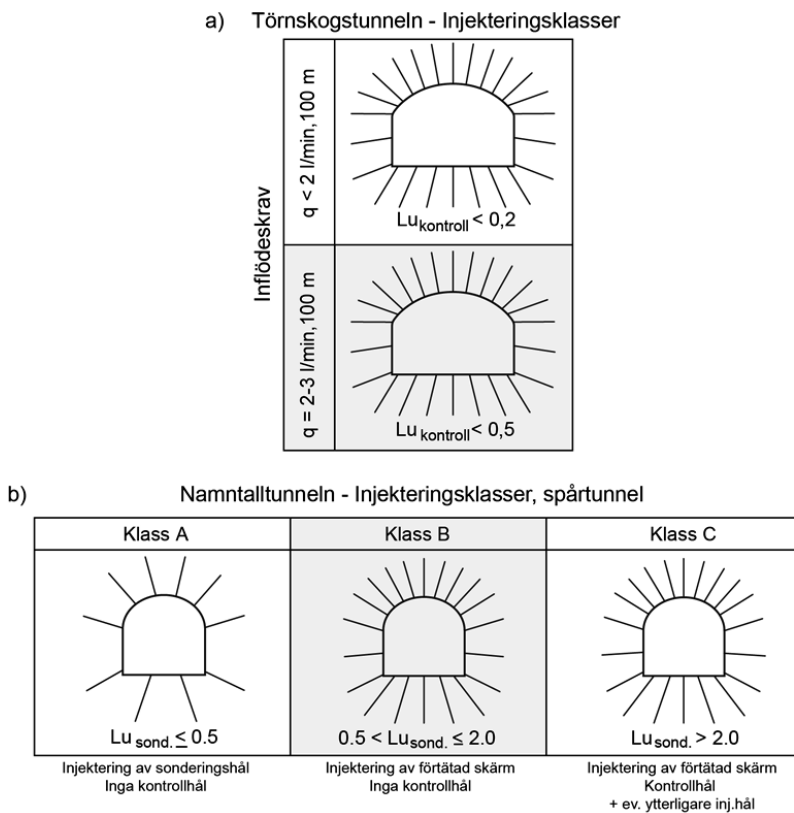
1.1 Bakgrund

Inläckage av grundvatten till en tunnel kan inverka negativt på såväl den (i) omgivande miljön som på (ii) tunnelns inre miljö och (iii) funktion under bygg- och driftskeden. Krav på att minimera inläckage av grundvatten och grundvattenavsänkningar genom att utföra vattenkontrollerande åtgärder ställs därför av både miljödomstolar och beställare. Traditionellt redovisas kraven som en maximalt tillåten mängd inläckage per någon tidsenhet, men det har blivit vanligare att ur miljösynpunkt också ange restriktioner som en maximalt tillåten avsänkning av grundvattennivåer i jord- och bergakvifärer (Hansson et al. 2010). Framförallt sker en skärpning av krav på tunnelbyggen i urbana områden och det beror på att konsekvenser av grundvattensänkningar generellt är större i tätbebyggda områden än på landsbygden. Följaktligen är tillåtet inläckage ofta lägre i urbana tunnlar ($< 5 \text{ l/min/100 m}$ tunnel ner till extremfall med krav på $< 1 \text{ l/min/100 m}$) jämfört med rurala tunnlar ($5\text{-}20 \text{ l/min/100 m}$) (Grøv et al. 2013).

Under senare år har kraven på tunnlar täthet blivit striktare och åtgärder för att hantera inläckande vatten utgör idag en stor del – ibland så mycket som hälften – av de totala produktionskostnaderna i ett tunnelprojekt (Kadefors och Bröchner 2008). Ofta utförs en kostnads- och tidskrävande förinjektering som efterföljs av installationer av underhållskrävande dräner för nästan samma kostnad (Lundman 2011). Svårigheter i att minska tätningskostnader i tunnelprojekt beror bland annat på att planeringen av vattenkontrollerande åtgärder innehåller stora osäkerheter, vilket visar sig i återkommande kostnadsöverskridningar som orsakas av oförutsedda inläckage och otillräckliga kontraktsverktyg för vattenhantering (Brantberger 2009). Möjligheterna att reducera kostnader i byggskedet är dessutom begränsade eftersom dagens kontraktsformer ger få incitament för entreprenören att genomföra en effektiv och resurssnål tätning (Lundman 2011).

Förinjektering, dvs. tätning av bergmassan innan bergguttag, är idag standard i svenska infrastrukturtunnlar och anses generellt vara den mest kostnads-effektiva metoden för att reducera inläckande vatten i tunnlar uppförda i sprickigt, kristallint berg (Dalmalm 2004). Injekteringen utförs oftast som *kontinuerlig förinjektering*, vilket innebär att bergmassan injekteras systematiskt med överlappande injekteringskärmor innan bergguttag (ibland även benämnd

systematisk förinjektering). Injekteringsens utformning definieras normalt med ett antal injekteringsklasser. Dessa specificerar olika varianter av kontrollprogram, skärngeometrier, injekteringsutförande (bruk, tryck och stoppkriterier) samt kriterier för kompletterande injektering som ska utföras i projektet (Brantberger 2009). Klasserna motsvarar olika strategier som bedöms nödvändiga för att antingen möta varierande täthetskrav längs sträckan och/eller för att kunna anpassa injekteringen till olika geologiska förhållanden (se exempel i Figur 1-1). Anpassningar kan t.ex. ske vid passage av sprickzoner eller i områden med låg bergtäckning.



Figur 1-1. Exempel på utformning av injekteringsklasser från a) Törnskogstunneln och b) Namntalltunneln, Botniabanan (modifierad från Stille och Andersson 2008). Val av injekteringsklass i Namntalltunneln baseras på vattenförluster i sonderingshål, medan i Törnskogstunneln valdes klass utifrån ställda täthetskrav.

En kontinuerlig strategi vid förinjektering medför att injektering med stor sannolikhet utförs i delar av bergmassan där insatsen gör en begränsad nytta.

Antingen för att kravspecifikationen redan är uppfylld (bergmassan är redan tillräckligt tät) eller för att insatserna inte leder till någon märkbar reduktion av inläckaget. Att strategin ändå anses vara fördelaktigt beror delvis på att onödiga injekteringsinsatser kan kompenseras av att färre resurser läggs på mätningar, utvärderingar och beslutsfattande under utförandet. Hårda krav på att tillförlitligt kunna förutsäga produktionstid och produktionskostnader i tunnelprojekt är ytterligare en orsak till att systematiska strategier föredras (Dalmalm 2004), liksom att man vill minska risken att behöva utföra kompletterande tätningsåtgärder efter tunneluttag.

Behovet av tätningsinsatser varierar vanligen längs en tunnel eftersom vissa typer av geologiska förhållanden oftare orsakar stora inläckage under tunneldrivning, kvarvarande inläckage och underhållsproblem (Wilén et al. 2007). Studier visar exempelvis att omfattande tätningsinsatser kan krävas i deformationszoner med dålig bergkvalitet (se t.ex. Ganerød et al. 2008), medan i områden med god bergkvalité är bergmassan redan tillräckligt tät för att uppnå uppsatta täthetskrav (Engström et al. 2009). Förekommer områden där tätningsinsatser kan slopas med tillräckligt hög frekvens är det förmodligen mer resurseffektivt att övergå till ett flexibelt förfaringsätt där tätningsåtgärder enbart sätts in där de behövs och gör nytta. Detta synsätt ligger till grund för vad som i denna rapport benämns *behovsprövad injektering*.

1.2 Begreppet 'behovsprövad injektering'

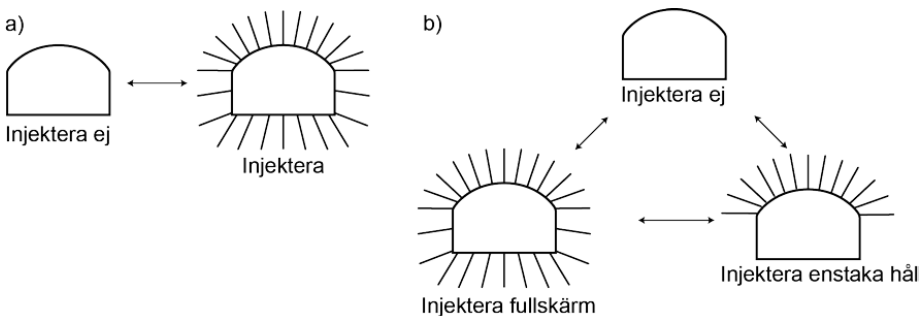
I denna studie avser begreppet behovsprövad injektering att injekteringsskärmar endast utförs i de sektioner där behov av tätningsinsatser indikeras av miljö- och tillståndsutredningar, ingenjörsgelogiska prognoser och/eller sonderingsresultat under produktionen. Förinjektering sker alltså i utvalda delar av tunnelsträckningen där oacceptabla inläckage förväntas förekomma till följd av att bergets genomsläpplighet orsakar att täthetskraven överskrids. Mellanliggande sektioner lämnas oinjekterade eftersom bergmassan redan är tillräckligt tät och uppfyller täthetskraven. På så sätt kan resursanvändning i form av tid och material minskas samtidigt som täthetskraven uppnås.

Det kan finnas olika anledningar till att behovsprövad injektering utförs i ett tunnelprojekt. I Norge finns områden där det är svårt att genomföra detaljerade förundersökningar, t.ex. genom höga fjäll eller under djupa fjordar. Behovet av injektering är därför osäkert innan produktionsstart och sonderingar under

produktionen blir avgörande för att kunna ta beslut om injektering längs tunneln.

En annan variant av behovsprövad injektering är att utföra denna som en konsekvens av att området är väl undersökt och att det innan produktionsstart har identifierats delområden med inget eller begränsat behov av injektering. I denna variant kan fler detaljerade undersökningar krävas i ett tidigt skede eftersom en god förståelse för geologiska och hydrogeologiska förhållandena behövs för att kunna bedöma hur inläckagekrav ska uppfyllas med begränsade tätningsinsatser och för att bedöma var en viss injekteringsmetod (t.ex. cementinjektering) förväntas kunna göra nytta (Emmelin et al. 2004). Insatser för undersökningar samt utredning av strategier och kontrollprogram anses kunna uppvägas av en mindre injekteringsinsats i byggskedet. Det är denna variant av behovsprövad förinjektering som är i fokus i denna studie.

Ett begrepp som används synonymt till behovsprövad injektering är *selektiv injektering*. Definition av vad som inryms under begreppet selektiv varierar. Det förekommer att selektiv injektering främst indikerar ett val mellan att injektera och ej injektera en tunnelsträcka, medan exempelvis Brantberger och Jansson (2008) beskriver hur selektiv injektering även kan innebära att i varje skärm utvärdera om ett fåtal, utvalda injekteringshål ska injekteras istället för en full skärm. Att endast utföra delar av skärmen kan exempelvis innebära att tunnelbotten lämnas oinjekterad för att reducera den hydrauliska gradienten i injekterade tunneltak och tunnelväggar. I denna studie ligger dock fokus på valet mellan att förinjektera en tunnelsträcka eller att lämna sträckan oinjekterad. Skillnaden mellan dessa synsätt illustreras i Figur 1-2.



Figur 1-2. Behovsprövad injektering kan avse a) ett val mellan att injektera/ej injektera eller b) ett val mellan att injektera fullskärmar, injektera enstaka hål eller inte injektera alls.

1.3 Behovsprövad injektering i Sverige och Norge

Behovsprövad (eller selektiv) injektering har tillämpats i Sverige under en lång tid, men de senaste 10-15 åren har kontinuerlig förinjektering varit det dominerande angreppssättet. En bidragande faktor till detta är att täthetskraven har blivit striktare som följd av strängare krav på att minska omgivningspåverkan i både urbana och rurala områden (Grøv et al. 2013). I urbana områden kan även dränering till befintliga berganläggningar påverka grundvattensituationen, vilket kan medföra att vattenbalansen är ansträngd redan innan den nya undermarksanläggningen uppförs.

Under samma tidsperiod har behovsprövad injektering varit vanligare i Norge (då benämnd *sporadisk injektering*), men utvecklingen har även där gått mot striktare täthetskrav och att i större utsträckning utföra kontinuerlig förinjektering (Grøv et al. 2013). En tumregel i Norge har varit att systematisk förinjektering bör utföras i tunnlar med inläckagekrav på 2-15 l/min/100 m, medan vid krav på >15 l/min/100 m bör förinjektering initieras genom inflödesmätningar i sonderingshål. Vanliga värden för norska tunnlar är 2-10 l/min/100 m för urbana tunnlar och känsliga miljöer, och 10-30 l/min/100 m för undervattentunnlar och landsbygdstunnlar.

1.4 Syfte och genomförande

Denna studie syftar till att utreda hur behovsprövad injektering kan implementeras som en strukturerad, robust och pålitlig förinjekteringsstrategi i svenska tunnelprojekt. I detta ingår att beskriva hur behovsprövad injektering kan utföras effektivt samtidigt som riskerna med det flexibla förfarings sättet förblir hanterbara. Målet är att presentera en strukturerad metodik för att utreda möjligheten att implementera behovsprövad injektering baserat på geologiska och hydrogeologiska underlag som normalt finns tillgängliga i tunnelprojekt.

Rapporten inleds med en litteraturgenomgång (Kapitel 2) som behandlar erfarenheter av behovsprövad injektering och beslutsmetoder för förinjektering i svenska och norska tunnelprojekt. Detta följs av en metodbeskrivning för implementering av behovsprövad injektering som är indelad i två delar:

Kapitel 3: Utformning av ett förundersökningsprogram som är anpassat för behovsprövad injektering.

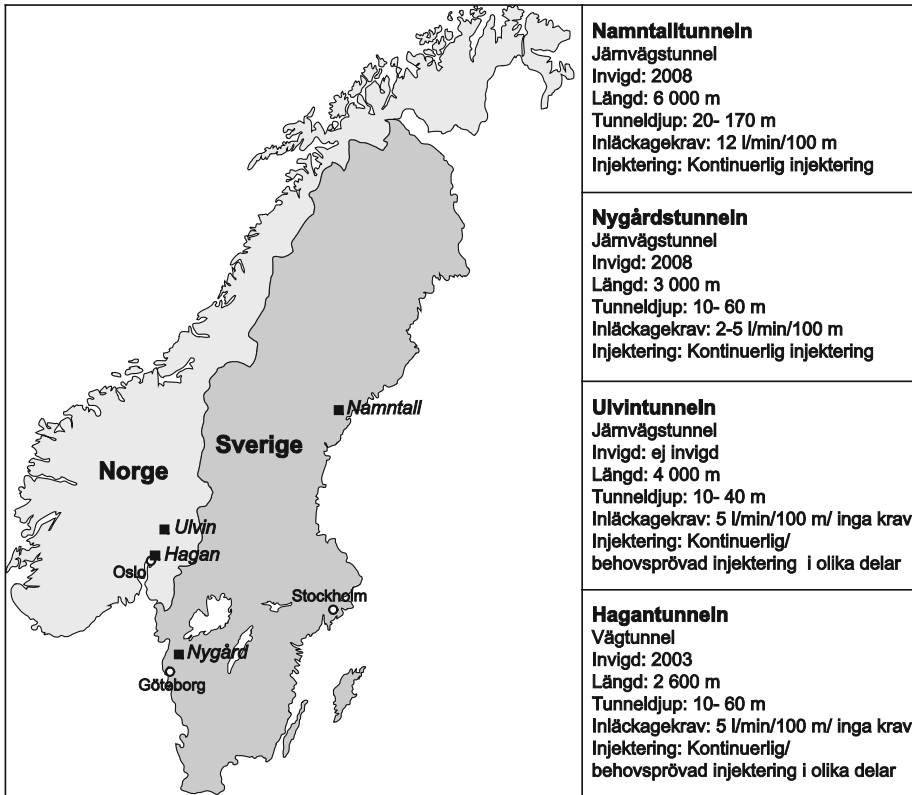
Kapitel 4: Prognos av injekteringsbehov och bedömning huruvida behovsprövad injektering är en lämplig tättningsstrategi för ett tunnelprojekt.

En hypotes är att injekteringsomfattningen i tunnelprojekt kan minskas genom att utföra en behovsprövad strategi som baseras på en god förståelse för områdets hydrogeologiska förutsättningar. Det föreslagna förundersökningsprogrammet lyfter därför fram geologiska och hydrogeologiska faktorer som behövs för att kunna förutsäga behovet av tättningsinsatser. I studien undersöks även hur tillgången på grundvatten och miljökravens utformning inverkar på möjligheterna att utföra behovsprövad injektering.

Metodbeskrivningen kompletteras av fallstudier (Kapitel 5) som exemplifierar metoden. Fallstudierna har genomförts med fyra väldokumenterade infrastrukturtunnlar från Sverige och Norge. De två svenska tunnelobjekten som använts i fallstudierna är järnvägstunnlarna *Nygårdstunneln*, Västra Götalands län, och *Namntalltunneln*, Västernorrlands län. De två norska tunnelobjekten är vägtunneln *Hagantunneln* och järnvägstunneln *Ulvintunneln*, båda i Akershus Fylke i sydöstra Norge. Projekten beskrivs kortfattat i Figur 1-3. I fallstudierna har förundersökningsdata från projekten använts för att bedöma behovet av tättningsinsatser i olika tunneldelar och för att bedöma hur injektering kan anpassas till rådande hydrogeologiska förhållanden. Den föreslagna behovsprövade injekteringsstrategin jämförs i den mån det finns underlag med utfallet för respektive tunnel, dvs. injekteringsdokumentation och resulterande vatteninläckage.

1.5 Avgränsningar

Studien fokuserar på infrastrukturtunnlar som påverkas av ytliga hydrologiska processer. Behovet av förinjekteringsinsatser bedöms utifrån täthetskrav som syftar till att uppfylla miljödomens krav på tillåtna inläckage. Detta innebär att begränsningar i lokala inläckage med hänsyn till tunnelns funktion och säkerhet, t.ex. enligt Trafikverkets tekniska krav tunnel (TRVK 2011), förutsätts hanteras med separata vattenavledningslösningar såsom inklädnad eller dräner. Ytterligare en aspekt som ej hanteras är produktionsmässiga krav på inläckage, dvs. begränsningar i tillåtet inläckage för att kunna genomföra arbeten och installationer under byggskedet.



Figur 1-3. Presentation av de fyra tunnelprojekt som ingår i fallstudien.

2 FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR BEHOVSPRÖVAD INJEKTERING

Vid behovsprövad injektering utesluts injektering i täta delar av bergmassan medan injekteringsarbeten sker i sektioner där mängden inläckande vatten och/eller omgivningspåverkan förväntas bli oacceptabel. Beslut om behovet av injekteringsinsatser påverkas därför av:

- täthetskrav som formuleras utifrån förväntad omgivningspåverkan, samt
- prognostiserade inläckage före och efter injektering

Följande avsnitt beskriver generella tillvägagångssätt för tillståndsprocesser och formulering av täthetskrav i Sverige och Norge, inläckageprognoser och beslutsmetoder för injektering, samt hur en behovsprövad injekteringsstrategi kan påverka kontraktsfrågor i tunnelprojekt.

2.1 Formulering av täthetskrav

Vid bedömning av omgivningspåverkan till följd av vattenverksamhet är effekter och konsekvenser av grundvattendräneringen viktigare än själva inläckaget till tunneln. Detta eftersom ett stort inläckage inte nödvändigtvis behöver betyda att åtgärder måste sättas in ur miljösynpunkt. Större inläckage till en tunnel skulle kunna tillåtas så länge grundvattennivåerna hålls på acceptabla nivåer, vilket exempelvis kan ske om grundvattenmagasinet fylls på naturligt från ett närliggande ytvattenmagasin. Omvänt kan låga inläckage i ett isolerat grundvattenmagasin i ett känsligt område medföra oacceptabla nivåsänkningar och därmed generera strikta inläckagekrav. Vid tillämpning av behovsprövad injektering är det viktigt att identifiera skillnader i acceptabelt inläckage mellan olika grundvattenmagasin och undvika generaliserade samband mellan omgivningspåverkan och täthetskrav. Detta eftersom att tillåta högre inläckage i vissa sektioner kan vara avgörande för att göra en behovsprövad strategi ekonomiskt fördelaktig.

2.1.1 Tillståndsprocessen i Sverige

I Sverige är allt arbete med att förändra vattnets djup eller läge, avvattna mark eller leda bort grundvatten tillståndspliktigt enligt 11 kap. miljöbalken (1998:808). Tillstånd lämnas av Miljödomstolen. Att söka tillstånd för vattenverksamhet inleds med en samrådsprocess där sökanden ska samråda

med Länsstyrelsen, remissinstanser (t.ex. SGI och SGU), berörda kommuner, samt enskilda sakägare som kan bli direkt berörda av vattenverksamheten. Detta sker för att få idéer och synpunkter inför den fortsatta processen (Länsstyrelsen 2014). Utifrån samrådsredogörelsen bedömer Länsstyrelsen om verksamheten kan antas medföra betydande miljöpåverkan eller inte. Detta påverkar om samrådet ska utökas med fler sakägare och större samrådsrets, samt om miljökonsekvensbeskrivningen (MKB) ska vara omfattande. Därefter upprättas ansökan och tillhörande MKB som lämnas till Miljöödomstolen för prövning.

I ansökan ingår att föreslå skyddsåtgärder och försiktighetsmått så att påverkan blir acceptabel och tillstånd kan ges (Hansson et al. 2010). Villkor för tillåtet inläckage av grundvatten till ett tunnelprojekt formuleras oftast antingen som en maximalt tillåten mängd inläckage eller en tillåten avsänkning av grundvattennivåer. Värden för dessa anges antingen som riktvärden eller som begränsningsvärden. Överträdelser av båda typer av villkor är straffbara, men överträdelser av riktvärden kan bedömas lindrigare om åtgärder sätts in för att förhindra framtida överträdelser (Hansson et al. 2010).

Verksamhetsutövaren ger själv förslag på lämpliga villkor i tillståndsansökan. Motivering till dessa görs utifrån underlagsmaterial i form av hydrogeologiska utredningar och miljökonsekvensbeskrivningar (Hansson et al. 2010). Ibland finns separata villkor för byggskede och driftskede. Villkoren kan även variera för olika delar av tunneln. I ansökan lämnas också förslag på kontrollprogram som ska visa domstolen att sökanden kan övervaka och kontrollera vattenverksamheten, exempelvis genom att visa hur inläckagemängder ska mätas (Hansson et al. 2010).

2.1.2 Tillståndsprocessen i Norge

I norska projekt tas krav på inläckage för tunnlar fram i projekteringskedet med underlag från hydrogeologiska undersökningar. En samverkan sker mellan hydrogeologer, geotekniker som tar hänsyn till exempelvis sättningkänslighet för ovanliggande jordar, och ingenjörsgeloger som utreder bergegenskaper. Den hydrogeologiska utredningen granskas därefter av beställare och oftast en tredjeparts konsult varefter inläckagekrav för tunneln fastställs.

Om det finns risk för långvariga grundvattenavsänkningar ska verksamhetsutövaren ansöka om koncession hos NVE (Norges Vassdrag- och Energidirektorat) som är delegerad att ge tillstånd för grundvattenbortledning. Kortfattat ska följande delar ingå i en ansökan om vattenbortledning i Norge:

- 1) Beskrivning av grundvattenförhållanden
- 2) Dagens användning, förutsättningar
- 3) Beskrivning av verksamhet och utförda undersökningar
- 4) Konsekvenser av verksamheten på omgivning (miljö, naturmiljö, geotekniska konsekvenser etc.)
- 5) Kontroller och uppföljning

Enligt rekommendationer i Statens Vegvesen (2003) så ska inläckagekrav i naturområden (ej urbant) utgå från en översiktlig sårbarhetsanalys för olika naturtyper längs planerad tunnelsträckning. För identifierade sårbara naturtyper ska därefter en fördjupad utredning utföras avseende accepterad konsekvens samt accepterad förändring av grundvattennivå. Baserat på detta sätts krav på inläckage, alternativt strategi för förändring av tunnelnivå eller tunneldrivningsteknik. För urbana tunnlar är rekommendationerna mer kopplade till sättningsproblematiken och krav ska utgå från risk för sättningar och omgivningspåverkan på grund av detta.

2.2 Prognostisera inläckage före och efter injektering

Gränsvärdet för det ur miljösynpunkt tillåtna inläckaget av grundvatten till en tunnel bedöms utifrån prognoser av tunnelinläckage och grundvattenavsänkningar. Att beräkna hur stort inläckage som förväntas uppkomma i en tunnel är emellertid svårt, oavsett om enkla analysverktyg eller komplexa numeriska modeller används. Exakta värden för inläckage kan inte erhållas och det kan vara stora skillnader mellan inläckageprognoser och verkliga utfall (Werner et al. 2012). Engström et al. (2009) konstaterar dock att det är svårare att generera siffror för vilket inläckage som ska uppkomma i en tunnel än det är att bedöma hur mycket vatten som maximalt får läcka in i tunnlar för att undvika oacceptabel omgivningspåverkan.

Inflödesskattningar kan genomföras med relativt enkla analyser och indata. Ett vanligt angreppssätt är kontinuumanalyser där bergmassans genomsnittliga vattenförande egenskaper över en viss längd representeras med en hydraulisk

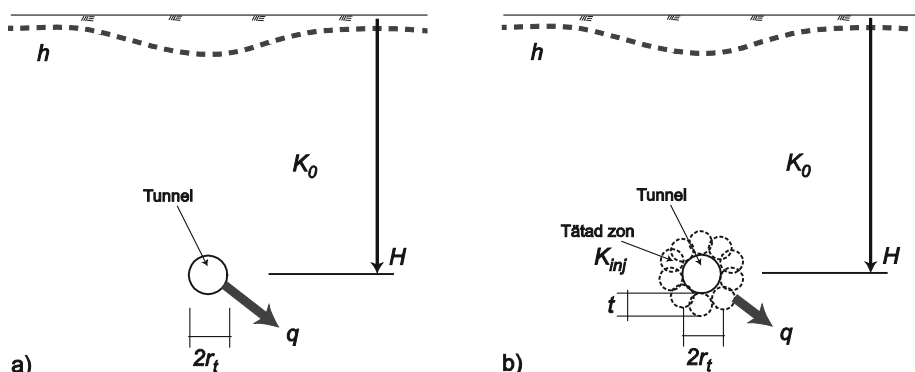
konduktivitet, K . Att beskriva bergets vattenförande förmåga med en hydraulisk konduktivitet förutsätter dock att berget kan beskrivas som ett poröst medium, vilket är mer eller mindre lämpligt beroende på i vilken skala bergmassan beskrivs. Om tunneln ses som ett förstorat horisontellt borrhål i en poröst medium kan inläckaget till en oinjekterad tunnel med radien r_t beräknas approximativt med Ekvation 2.1 (Gustafson 1986):

$$q = \frac{2\pi \cdot K_0 \cdot H}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \xi} \quad \text{Ekvation 2.1}$$

I Ekvation 2.1 motsvarar q inflöde, K_0 den hydrauliska medelkonduktiviteten och H är avståndet till grundvattennivån ovanför tunnelsulan, se Figur 2-1. Skinfaktorn ξ är en korrigeringsfaktor för avvikelser i flödesmotstånd som uppträder i den delvis vattenmättade zonen i tunnelns närhet.

I de sektioner där injektering utförs reduceras bergmassans genomsläpplighet i en zon runt tunneln, se Figur 2-1. Detta leder till en minskat inläckage som är beroende av den tätade zonen genomsläpplighet och tjocklek. Med värden på en medelkonduktivitet K_{inj} och medeltjocklek t för den tätade zonen kan inläckaget till en injekterad tunnel skattas enligt Ekvation 2.2 (Alberts och Gustafson 1983):

$$q = \frac{2\pi \cdot K_0 \cdot H / L}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \left(\frac{K_0}{K_{inj}} - 1\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{r_t}\right) + \xi} \quad \text{Ekvation 2.2}$$



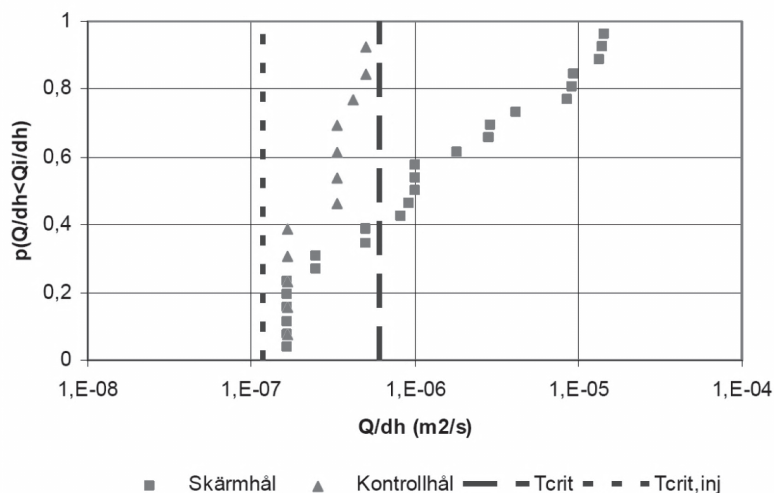
Figur 2-1. Principskiss av a) inflöde till en oinjekterad tunnel och b) inflöde till en förinjekterad tunnel (modifierad från Gustafson 2009).

I skattningen av inläckage efter injektering ingår att kunna förutsäga tjocklek och täthet i den injekterade zonen. Prognoser av inläckage är därför beroende av rimliga bedömningar av bergmassans ursprungliga genomsläpplighet och av injekteringsresultat. Detta ställer krav på att ha kunskap om hur injektering bör utföras för att uppnå en viss reducering av bergmassans genomsläpplighet, exempelvis genom val av injekteringsmedel och skärmgeometrier. Att valt utförande faktiskt leder till en önskad täthet är emellertid förenat med stora osäkerheter och det kan gå lång tid mellan injektering utförs och mätresultat ifrån inläckaget i installerade mätdammar eller respons i uppmätta grundvattennivåer erhålls. Kontroller av att injekterings-skärmar har uppnått erforderlig täthet innan berguttag kan enbart göras med indirekta, indikativa mätningar, t.ex. i sonderingsborrhål.

I svenska tunnelprojekt har det varit vanligt att utföra vattenförlustmätningar i borrhål framför tunnelfronten för att indirekt undersöka och verifiera antagna förhållanden. Före injektering kan vattenförlustmätningar i sonderingshål ge underlag för val av injekteringsutförande och efter injektering ger mätningar i kontrollhål indikationer på tätningsresultatet. I intervjuer med praktiker och forskare inom branschen har det dock framkommit att det är svårt att finna enkla samband mellan uppmätt vattenförlust, bergmassans täthet, bruksåtgång eller andra åtgärdsparametrar (Kadefors och Bröchner 2008). Ofta skattas gränsvärden för vattenförlustmätningar utifrån empiriska samband, men det finns också teoribaserade beslutsmetoder som baseras på inflödesekvationer (ekvation 2.1 och 2.2).

En beslutsmetod som har sin bas i analytiska lösningar och konfidenssannolikheter presenteras av Engström et al. (2009) och har även vidareutvecklats av Hernqvist et al. (2013). Metoden bygger på att skatta inflöden från vattenförlustmätningar. Skattningarna används både till att utvärdera vilka tunnelsträckor som behöver tätas innan berguttag och till att utvärdera genomförda injekteringar. Beräkningarna går ut på att avgöra om inläckaget för en injekteringskärm kommer att vara mindre än ett kritiskt designvärde. Med utgångspunkt från ett statistiskt resonemang skattas sannolikheten (konfidensnivån) för att lyckas. Implementering av beslutsmetoden sker genom att utföra vattenförlustmätningar i ett antal sonderingshål och utvärdera sannolikheten av att skärmens median är mindre än det uppställda inläckagekravet. I vattenförande skärmar där injektering tillämpats används därefter beslutsmetoden för att säkerställa att erforderlig tätning är uppnådd, se exempel i Figur 2-2.

Engström et al. (2009) demonstrerade metoden genom att i efterhand utvärdera injekteringsprotokoll från tre järnvägstunnlar längs Botniabanan. I studien testades om vattenförlustmätningarna kunde förutsäga om skärmen överhuvudtaget hade behövt tätas, samt ge stöd för om bergets genomsläpplighet hade reducerats efter utförd tätning. Ett av beräknings-exemplen visade att huvuddelen av tunnelsträckan inte hade behövt tätas för att uppnå täthetskraven i miljödomen på ca 5 liter/min och 100 m tunnel. Ett identifierat problem var dock att det i många fall inte var möjligt att utvärdera vilka skärmar som var tillräckligt tätade på grund av att mätnoggrannheten var för låg i förhållande till det angivna täthetskravet. Kontroller av tätningens effekt med beslutsmetoden kan alltså endast utföras om vattenförlustmätningarnas mätområde är tillräckligt noggrann i förhållande till täthetskraven.



Figur 2-2. Utovärdering av en injekteringsskärmns täthet från Engström et al. (2009). Transmissiviteterna beräknas från vattenförlustmätningar i borrhål före och efter injektering. De streckade linjerna anger den kritiska transmissiviteten för en otätad injekteringsskärm (T_{crit}) respektive en tätad injekteringsskärm ($T_{crit,inj}$). I detta exempel uppfylls täthetskraven varken före eller efter injektering.

2.3 Kostnads- och kontraktsfrågor

Val av en behovsprövad injekteringsstrategi istället för en kontinuerlig strategi baseras på en prognos att den totala kostnaden för behovsprövad injektering blir lägre under produktion såväl som under tunnelns livslängd. Enligt Dalmalm (2011) uppgår kostnader för systematisk förinjektering till ca 45 % av de totala kostnaderna för bergschakt och injektering om man inkluderar maskin- och bemanningskostnader. Ett behovsprövat angreppssätt kan dock medföra att det ställs större krav på kontroller under utförandefasen och därför måste sparade kostnader för utebliven injektering i oinjekterade sträckor överstiga kostnaden för undersökningar och beslutsfattning. Besparingar sker eftersom färre produktionstimmar och materialkostnader läggs på injektering, men också för att det sker färre tillfällen med avbruten tunneldrivning och överksam utrustning och personal, samt en kortare byggtid.

Vid behovsprövad injektering måste även riskanalyser tillämpas för att fastställa att strategin inte medför oacceptabla risker för tids- och kostnadsökningar i projektet. Ur produktionsperspektiv anses kontinuerlig injektering

ha fördel av att tid- och kostnadsuppskattningar för produktionen är lättare att förutsäga än vid behovsprövad injektering (Dalmalm 2004). Även om kontinuerlig injektering innebär en högre kostnad till följd av fler injekterade skärmar anses detta kompenseras av lägre sannolikhet för behov av extra tätningsinsatser. För behovsprövad injektering är det viktigt att kunna visa att sannolikheten att uppfylla täthetskraven är tillfredsställande även om kostnaden för injekteringen är lägre. Strategin måste även visas vara tillräckligt robust, dvs. att risken för att behovsprövad injektering behöver övergå till enbart kontinuerlig injektering under tunneldrivningen ska vara liten. Målsättningen bör vara att vid behovsprövad injektering kunna utföra tätningen med förinjektering och enbart i undantagsfall med efterinjektering.

En annan viktig faktor för att kunna utföra framgångsrik behovsprövad injektering är att kontraktsfrågor och riskfördelning mellan beställare och entreprenör är väl anpassade för det flexibla arbetssättet (Grøv och Woldmo 2010). Injekteringsarbeten identifieras ofta som ett problemområde när det gäller ersättningsformer i bergbyggande eftersom konflikter uppkommer då ersättningsformer inte fördelar riskerna på ett rättvist och effektivt sätt (Kadefors och Bröchner 2008). Den flexibla komponenten hos behovsprövad injektering bör beaktas i budget och tidplaner. Detta kan innebära att det anslås ett budgetspann som relateras till osäkerheter i injekteringsbehov längs tunnelsträckningen istället för en fast budget.

3 FÖRUNDERSÖKNINGSPROGRAM

Detta kapitel inleder metodbeskrivningen och presenterar ett förundersökningsprogram som är anpassat för att utreda möjligheterna att genomföra behovsprövad injektering i tunnelprojekt. Programmets utformning följer den konventionella etappindelningen i svenska tunnelprojekt och följer strukturen för ett hydrogeologiskt arbetssätt i förundersökningar presenterad av Gustafson (1986; 2009).

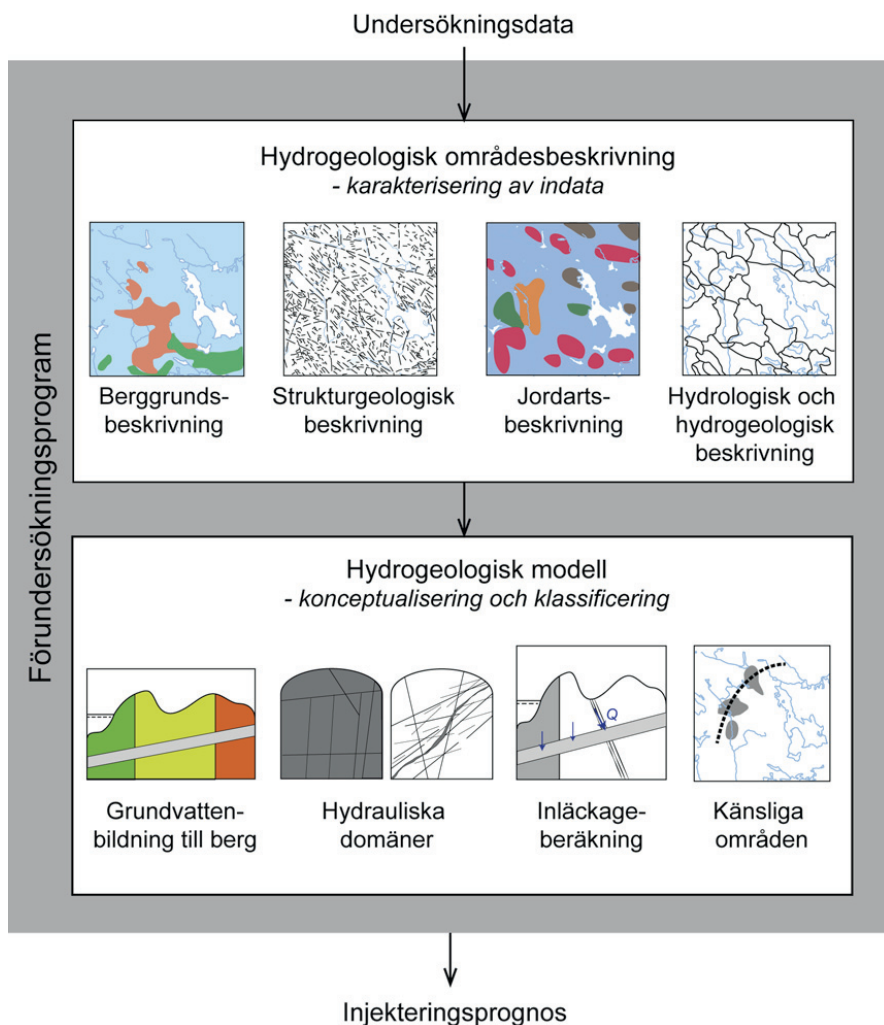
3.1 Innehåll i förundersökningsprogrammet

Förundersökningar fokuserar på geologiska förhållanden som påverkar byggande och drift och genomförs antingen före eller parallellt med arbeten att ta fram projekteringshandlingar. Målsättningen med förundersökningen är att samla in information som behövs för att kunna hantera anläggningstekniska frågeställningar. I Trafikverkets anvisningar för redovisning av förundersökningar anges att undersökningsresultat ska presenteras i förundersökningsrapporter (TRVR 2011). Baserat på förundersökningsrapporter upprättas ingenjörsgelogiska prognoser som redovisar tolkningar av data och som beskriver förhållanden som rör berg, jord och grundvatten.

Förundersökningsprogrammet som presenteras i denna studie fokuserar på att ta fram information som behövs för att kunna prognostisera injekteringsbehov längs en tunnelsträckning. Programmet är indelat i två delar där den första delen består av en *hydrogeologisk områdesbeskrivning* som innehåller en karakterisering av relevanta parametrar. Den andra delen utgör upprättandet av en *hydrogeologisk modell* som redovisar en tolkning av hydrologiska processer och bergmassans vattenförande egenskaper, se Figur 3-1. I jämförelse med Trafikverkets anvisningar skulle den hydrogeologiska områdesbeskrivningen ingå som en del av en förundersökningsrapport medan den hydrogeologiska modellen skulle utgöra en del av de tolkningar som rapporteras i en ingenjörsgelogisk prognos.

Tillvägagångssättet i förundersökningsprogrammet sker i enlighet med observationsmetoden (Peck 1969, se även Emmelin et al. 2007) såtillvida att karakterisering och tolkning av förhållanden syftar till att i ett tidigt skede fastställa troliga förutsättningar, samt förbereda för att kunna ta fram åtgärder anpassade till förutsättningarna och parametrar att observera under

byggskedet. Det är även lämpligt att tillämpa ett iterativt för-hållningssätt till undersökningarna, vilket innebär att tidiga versioner av hydrogeologiska områdesbeskrivningar och hydrogeologiska modeller kan upprättas baserat på skrivbordsstudier. När data från mer detaljerade undersökningar blir tillgängliga kan både beskrivning och modell uppdateras.



Figur 3-1. Förundersökningsprogrammet omfattas av en hydrogeologisk områdesbeskrivning och en hydrogeologisk modell.

3.2 Hydrogeologisk områdesbeskrivning

I den hydrogeologiska områdesbeskrivningen karaktäriseras berggrund, hydrogeologi och jordarter med avseende på parameterar som behövs för att kunna upprätta en hydrogeologisk modell av området. Områdesbeskrivningen delas in i ett antal underkategorier (se även Figur 3-1):

- 1) Berggrundsbeskrivning
- 2) Strukturgeologisk beskrivning
- 3) Jordartsbeskrivning
- 4) Hydrologisk- och hydrogeologisk beskrivning

Användningsområden för respektive beskrivning och lämpliga ingående parametrar presenteras nedan. Angivna parametrar är identifierade som de viktigaste, men anpassning av datainsamlingen måste ske för respektive projekt för att nå rätt detaljnivå på undersökningar.

3.2.1 Berggrundsbeskrivning

Berggrundsbeskrivningen redogör för bergmassans uppbyggnad och avser ge information om fördelningen av olika bergarter och bergartsspecifika egenskaper som påverkar vattenföringen i bergmassan. I bergbeskrivningen ingår också en redogörelse för den geologiska och tektoniska utvecklingen i området som sammanställer hur och när bergarter och strukturer har bildats/omvandlats (vilket även är användbart i den strukturgeologiska beskrivningen). Den möjliggör även upprättande av hydrauliska domäner där enskilda bergarters förekomst och vattenförande egenskaper kan konceptualiseras (se vidare i avsnitt 3.3.2).

I Tabell 1 listas parametrar som kan ingå i berggrundsbeskrivningen och i vilken del av den hydrogeologiska modellen de används. Insamling av data till berggrundsbeskrivningen sker förslagsvis från geologiska kartor, fältkartering, geofysiska mätningar, borrprogram och kärnboringar.

Tabell 1. Sammanställning av parametrar som kan ingå i en berggrundsbeskrivning.

Parametergrupp	Parametrar	Användning i hydrogeologisk modell
Bergarter och bergartsfördelning	Rumslig och procentuell utbredning, mineralogi, textur, inneslutningar gångar, homogenitet	Hydrauliska domäner
Bergspänningar	Orientering, storlek	Hydrauliska domäner
Bergytans läge	Bergtäckning	Hydrauliska domäner/ inläckageberäkning

3.2.2 Strukturgeologisk beskrivning

Den strukturgeologiska beskrivningen omfattar plastiska strukturer (veck, skjuvzoner) och spröda strukturer (sprickor, deformationszoner) i bergmassan. Beskrivningen är av direkt betydelse för att definiera hydrauliska domäner (zoner/plintar) och beskriva egenskaper hos spricksystem. Egenskaper hos spröda och plastiska strukturer kan ges generellt för bergmassan eller, om detaljerad information finns, indelat i olika zoner, bergarter och för ytligt respektive djupt berg.

En sammanställning av relevanta parametrar framgår av Tabell 2. Datainsamling till den strukturgeologiska beskrivningen kan baseras på material från lineamentstolkningar, geologiska kartor och kartbladsbeskrivningar, fältkartering, geofysiska mätningar, borrhprogram och kärnbörning.

Tabell 2. Sammanställning av parametrar som kan ingå i en strukturgeologisk beskrivning.

Parametergrupp	Parametrar	Användning i hydrogeologisk modell
Spröda strukturer: sprickor	Sprickfrekvens/blockstorlek, sprickorientering/sprickset, spricklängd, sprickfyllnadsmaterial	Hydrauliska domäner
Spröda strukturer: deformationszoner	Läge, zonbredd, zonlängd, orientering, sprickfrekvens/blockstorlek, sprickfyllnad/omvandling/ vittring	Hydrauliska domäner
Plastiska strukturer	Veck, foliation, skjuvzoners utbredning, uppbyggnad	Hydrauliska domäner

3.2.3 Jordartsbeskrivning

Jordartsbeskrivningen omfattar främst fördelning, mäktighet och sammansättning av olika jordarter och eventuella bottensediment i sjöar. En god kännedom om jordlagrens egenskaper är av betydelse för tolkningen av tillgången på vatten längs tunnelsträckningen samt bedöma olika områdets känslighet för omgivningspåverkan till följd av en grundvattendränning.

Relevanta parametrar framgår av Tabell 3. Indata till jordartsbeskrivningen kan exempelvis fås från geologiska kartor och kartbladsbeskrivningar, fältkartering, flygbildstolkning, geofysik, provtagningar och sonderingsborrningar.

Tabell 3. Sammanställning av parametrar som kan ingå i en jordartsbeskrivning.

Parametergrupp	Parametrar	Användning i hydrogeologisk modell
Jordarter och jordartsfördelning	Rumslig och procentuell utbredning, kornstorlek, sammansättning, jordlagerföljd, terrängformer	Grundvattentillgång/känsliga områden
Jorddjup	Jordarters mäktighet	Grundvattentillgång/känsliga områden

3.2.4 Hydrologisk- och hydrogeologisk beskrivning

Den hydrologiska och hydrogeologiska beskrivningen behandlar aspekter som utgör viktiga underlag för bedömning av grundvattenbildning och därmed grundvattentillgång i området. Beskrivningen behandlar även hydraulisk konduktivitet för olika bergarter och jordarter, hydraulisk anisotropi i vattenförande strukturer, hydraulisk transmissivitet i deformationszoner och observationer av grundvattennivåer i området. Dessa aspekter är av intresse både för beskrivning av hydrauliska domäner och för att avgöra grundvattentillgång.

Relevanta parametrar framgår av Tabell 4. Indata kan fås från brunnsarkiv och regional hydrologisk och meteorologiska data, samt platsundersökningar såsom hydrauliska tester, grundvattenprovtagning och nivåmätningar i brunnar och borrhål.

Tabell 4. Parametrar som kan ingå i en hydrologisk- och hydrogeologisk beskrivning.

Huvudkategori	Parametrar	Användning i hydrogeologisk modell
Avrinningsområden	In- och utströmningsområden, markanvändning, växtlighet	Grundvattentillgång/känsliga områden
Ytvattenmagasin	Vattendrag och sjöars utbredning, avrinning i vattendrag och sjöar	Grundvattentillgång/känsliga områden
Grundvatten	Effektiv nederbörd, avrinningsvägar, infiltrationskapacitet, grundvattenbildning, grundvattennivåer	Grundvattentillgång/känsliga områden
Vattenförande egenskaper	Jord: hydraulisk konduktivitet Berg: transmissivitet/hydraulisk konduktivitet Zon: transmissivitet/hydraulisk konduktivitet	Grundvattentillgång/känsliga områden/ Hydrauliska domäner/ Inläckageberäkning

3.3 Hydrogeologisk modell

Den hydrogeologiska modellen baseras på parametervärden som tolkas kvantitativt och/eller kvalitativt från den hydrogeologiska områdesbeskrivningen. Den resulterar i en konceptualisering och klassificering av hydrogeologiska förhållanden som möjliggör en prognos av *var* injekteringsbehov finns och *hur* injekteringen bör utföras (tillvägagångssättet för prognosen beskrivs i Kapitel 4). De ingående delar som konceptualiseras i modellen kan delas in i fyra analyser (se även Figur 3-1):

1. Grundvattenbildning till berg
2. Hydrauliska domäner
3. Inläckageberäkning
4. Känsliga områden

Den första analysen, grundvattenbildning till berg, tolkar den mängd grundvatten tillgänglig för inläckage utifrån hydrologiska och hydrogeologiska förutsättningar. Fokus är att prognostisera infiltration av grundvatten från jord till berg och därigenom identifiera huruvida området grundvattenbildning är begränsande för tunnelinläckaget. Den andra analysen fokuserar på klassificering av bergmassans vattenförande egenskaper. Klassificeringen presenteras med hydrauliska domäner vilka motsvarar olika geologiska enheter

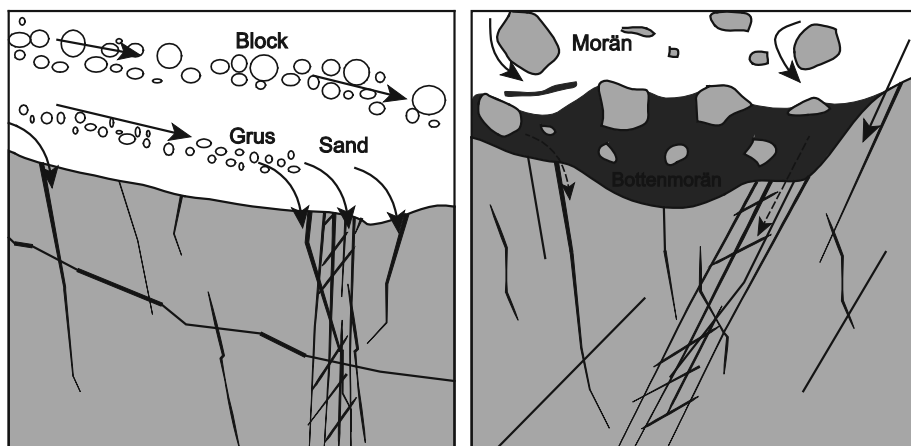
med varierande hydrauliska egenskaper (se t.ex. Rhén et al. 2003; Fransson och Hernqvist 2010; Kvarnsberg 2013). Bergmassan längs en tunnelsträckning delas förslagsvis in i zoner, bergplintar och ytberg som särskiljs från varandra eftersom de kan representera olika hydrauliska beteenden (se vidare i avsnitt 3.2.6). Del 1) och 2) i den hydrogeologiska modellen möjliggör 3) inläckageberäkningar till en oinjekterad tunnel som både tar hänsyn till vattenbalansen och bergets vattenförande egenskaper.

Den fjärde analysen omfattar att identifiera områden i tunnelns omgivning som är känsliga för grundvattenpåverkan och som kräver skyddsåtgärder till följd av förekomst av potentiella skadeobjekt. Förekomsten av potentiella skadeobjekt kan ligga till grund för att välja olika täthets- eller inläckagekrav i olika tunneldelar. En utredning av känsliga områden behöver dock inte tillhöra en injekteringsutredning utan kan tillhöra en separat utredning inför en tillståndsansökan om vattenverksamhet.

3.3.1 Grundvattenbildning till berg

Utredning av grundvattenbildning till berg avser att ta hänsyn till en problematik som bland annat diskuteras av Engström et al. (2009) - nämligen att ytligt förlagda tunnlar har en begränsad tillgång på grundvatten eftersom influensområden och täta jordarter kan begränsa vattentillförseln till berg. För tunnlar belägna på lite större djup eller i närheten av positiva hydrauliska ränder (t.ex. sjöar och vattendrag) är dock vattentillgången inte lika begränsande. Utredningar av ytliga hydrogeologiska förhållanden bör därför beaktas vid bedömning av potentiellt inläckage till en bergtunnel.

Förekomsten av grundvatten fördelar sig mellan grundvattenströmning i jordlager respektive i berggrund. Grundvattenströmningen i jordlagren är generellt betydligt större än i bergmassan och studier har visat att grundvattenflöde från jord till berg uppkommer först då permeabla jordlager står i hydraulisk förbindelse med öppna strukturer i bergmassan (Olofsson et al. 2000; Olofsson 1994). Ett lager av en tät bottenmorän på bergytan kan effektivt blockera flödet, medan bergmassans spricksystem kan bli mer styrande för flödet om jordlagren består av genomsläppliga, sorterade sand- och gruslager, t.ex. isälvsavlagringar, se Figur 3-2.



Figur 3-2. Principskiss över flöde från jord till berg vid isälvsavlagring respektive morän.

Bildningen av grundvatten i ett område är beroende av samspelet mellan klimat, topografi, vegetation, geologi och hydrologi (Knutsson och Morfeldt 1993). Den teoretiskt högsta möjliga grundvattenbildningen i ett område är lika med medelavrinningen, dvs. skillnaden mellan nederbörd och avdunstning under ett år. Den verkliga grundvattenbildningen under naturliga förhållanden är dock som regel mindre än medelavrinningen, vilket beror på ett antal faktorer (Rodhe et al. 2004).

En faktor som påverkar grundvattenbildningen är att det inte sker någon grundvattenbildning i områden med mättade markförhållanden, t.ex. i våtmarksområden. En annan faktor är jordlagrens sammansättning, där grundvattenbildningen generellt är större i grovkorniga jordarter än i finkorniga (Rodhe et al. 2004). Grundvattenbildningen är inte heller konstant, utan varierar naturligt över året. Under perioder med omfattande grundvattenbildning kan överskott av vatten uppstå och detta ger mättade förhållanden i marken och ökad ytavrinning. Grundvattenbildningen påverkas även av förändrade grundvattennivåer. En sänkning av grundvattennivån i den yt nära berggrunden kan bidra till ett ökat grundvattenflöde från jordlagren till berggrunden (Olofsson et al. 2001). Som exempel kan nämnas att Mossmark (2010) visade i en studie att uttag av grundvatten och sänkta grundvattennivåer ledde till en minskad yt- och grundvattenavrinning och en ökad grundvattenbildning motsvarande den uttagna vattenvolymen.

Tillgången på vatten i berg för tunnlar på lite större djup underskattas i många fall eftersom dessa tunnlar generellt har ett större påverkansområde. Därmed sänks grundvattentrycket i en större bergvolym och det ökar sannolikheten att inkludera områden med god hydraulisk kontakt mellan berg och jord. Detta resulterar i en ökad sammanlagd grundvattenbildning till berg vilket i sin tur leder till en ökad grundvattenströmning mot tunneln. Så länge det finns god tillgång till vatten i jordlagren (inga negativa hydrauliska gränser) medför detta att det sker en påfyllning av grundvattenmagasin i jord ifrån ett större utbredningsområde (påverkansområde) jämfört med ostörda förhållanden. En ansats till att skatta detta är att studera vattenbalansen i ett område där det totala inflödet till tunneln utgörs av dels tillgängligt vatten i närområdet kring tunneln och dels tillgängligt vatten från grundvattenbildning till jord, se även avsnitt 3.3.3.

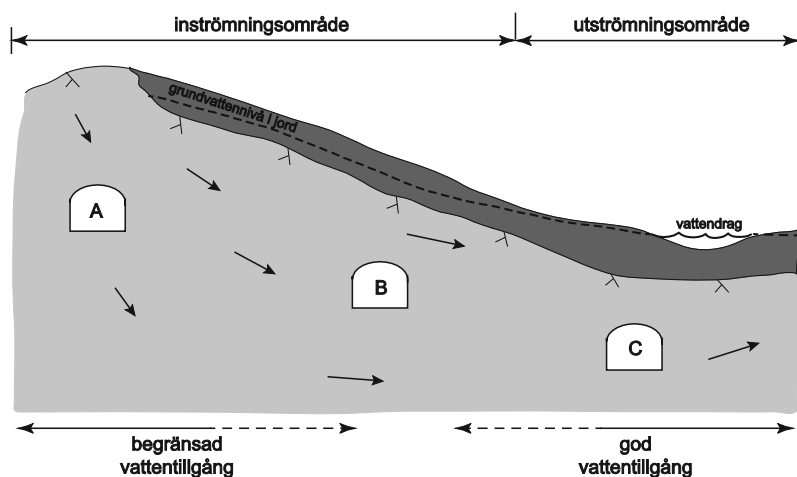
I urbana områden innebär även läckande vatten- och dagvattenledningar lokalt en grundvattenbildning som sällan finns med i beräkningsunderlagen. I praktiken är det mycket svårt att göra bedömningar om storleksordning av ledningsläckagen, men för dricksvattenledningar kan sammanställningar, statistik och aktuella uppgifter om förekommande läckage finnas hos ledningsägare.

I ytligt förlagda tunnlar är vattentillgången generellt mer begränsad, förutom när det finns god hydraulisk kontakt med ytvatten i tunnelns närhet eller via en god hydraulisk ledare. En grundvattensänkning i berget kan därmed påverka ovanliggande jordlager om kontakten mellan jord och berg och tunneln är god. Vid förekomst av bottenmorän på berget är det möjligt att det enbart sker en marginell påverkan på grundvattnet i jordlager eller närliggande våtmarker. Ett undantag kan vara extrema torrår då tillförsel av nederbörd och ytvatten är begränsad. Skillnaden mot förhållanden utan tunnel kan även i dessa fall vara marginell. Ett undantag är porttryckspåverkan i sättningskänslig lera där även mycket små inläckage kan ge påtaglig risk för sättningssskador. Detta gäller främst urbana tunnlar där det i många fall finns pågående grundvattenpåverkan från andra underjordsanläggningar som ökar känsligheten hos omgivande objekt.

Erfarenheter från utförda tunnelprojekt visar att påverkan på grundvattennivåer och ytvatten ofta är betydligt mindre än vad som prognosticerats i

förstudieskede och i samband med projektering (Werner et al. 2012). Det gäller exempelvis Södra länken, Törnskogstunneln, Citybanans bergtunneldelar (lokal påverkan vid schakter och arbetstunnlar), Ådalsbanan (Bjärholmstunneln, Snarabergstunneln, Hallbergstunneln, Murbergstunneln och Krokbergstunneln) och Åsatunneln (Werner et al. 2012). Det är ett fåtal projekt som inneburit allvarlig påverkan av ytvattenförhållanden; Hallandsås i södra Sverige och Romeriksporten i Norge är dock två välkända exempel (Olofsson 1998; Beitnes 2005). Båda dessa projekt har speciella geologiska förhållanden som skiljer sig betydligt från förhållanden som gäller för majoriten av tunnlar i Sverige.

Metoden som tillämpas i denna studie kvantifierar vattentillgången genom att analysera vilken grundvattenbildning till berg som kan förväntas längs olika delar av tunnelsträckningen (exempelvis angivet i l/min/100 m). Kvantifiering av grundvattenbildning till berg baseras på en vattenbalansstudie, en skattning av läckage från berg till jord, samt skattning av influenser av positiva och negativa hydrauliska gränser i området. I detta ingår att beakta att sänkta grundvattennivåer leder till en ökad grundvattenbildning. Områden med förväntad god eller begränsad grundvattenbildning kan därefter urskiljas (Figur 3-3).



Figur 3-3. Principskiss av grundvattenströmning från in- till utströmningsområden, samt hur vattentillgång till en tunnel kan variera mellan begränsad och god beroende på grundvatteninfiltration och hydrauliska ränder. Skissen förutsätter en god hydraulisk kontakt mellan berg och jord.

3.3.2 Hydrauliska domäner

Det är ofta möjligt att urskilja generella skillnader i hydrauliskt beteende mellan bergplintar och deformationszoner, mellan olika sprickgrupper och mellan olika bergarter. Enligt studier utförda på sex norska tunnlar av Holmøy (2013) så kunde följande generella slutsatser om bergmassans vattenföring dras:

- Centrala delarna av zoner är generellt tätare än omgivande skadegon.
- Spricksystem parallella med huvudspänningsriktningen är mer vattenförande.
- Stora inflöden sker ofta vid bergartsgränser.

Att kunna genomföra en kvantitativ och kvalitativ tolkning av bergmassans möjliga hydrauliska beteenden är viktigt för att kunna förutsäga inläckage och injekteringsbehov. Eventuella variationer i flödesegenskaper som kan finnas mellan olika geologiska enheter kan lättare urskiljas om bergmassan delas in i hydrauliska domäner, vilket är en terminologi som används av Svensk Kärnbränslehantering (SKB) för att gruppera geologiska enheter med likartade hydrauliska egenskaper, se t.ex. Rhén et al. (2003).

Indelningen av bergmassan i hydrauliska domäner kan baseras på kategorierna *bergplint*, *deformationszon* och *ytberg*. Lämpligheten i att särskilja deformationszoner från den omgivande bergmassan beror på att zoner ofta uppvisar en komplex struktur och geometri som ger dem avvikande flödesegenskaper jämfört med övrig bergmassa (Andersson et al. 2000). Att sprickzoner ger större inflöden och ökade volymer av injekteringsbruk har observerats i många fall av tunnelbyggande (Ganerød et al. 2008). Det finns också fall där det har konstaterats att zoners uppbyggnad kan medföra att zonen har lägre genomsläpplighet än omgivande bergmassa och därmed utgör en hydraulisk barriär som hindrar grundvattenströmning (Banks et al. 1992).

Den omgivande bergmassan, bergplinten, kan vara uppbyggd av olika bergarter och dessa kan representeras av olika hydrauliska domäner om det hydrauliska beteendet skiljer sig markant mellan dem. Skillnader i vattenförande egenskaper kan exempelvis vara en ökad hydraulisk konduktivitet i spröda bergarter eller längs bergartsgångar och bergartskontakter. Andra betydande bergartsspecifika egenskaper kan vara skiktade bergarter med

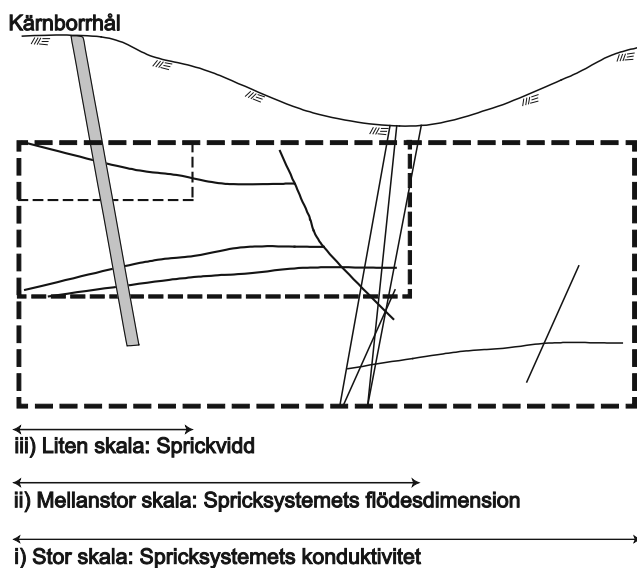
tydliga anistropa hydrauliska egenskaper och gångbergarter som är täta i förhållande till det omgivande berget (Gustafson 2009).

Bergets vattenförande förmåga i svensk, kristallin berggrund är vanligen högre ytligt än på större djup eftersom den ytliga bergmassan generellt är mer uppsprucken (Olofsson 1994). De hydrauliska egenskaperna inom samma bergart kan därför variera väsentligt beroende på vilket djup tunneln är belägen och det kan därför vara relevant att särskilja ytnära berg från bergartsbaserade domäner.

Den information som krävs för att ta fram hydrauliska domäner omfattar främst egenskaper som kan kvantifiera genomsläppligheten och beskriva geometriska egenskaper hos det vattenförande spricksystemet. Följande analyserade egenskaper föreslås ingå i ett förundersökningsprogram för behovsprövad injektering och ligga till grund för domänindelningen:

- (i) hydraulisk konduktivitet
- (ii) det vattenförande spricksystemets flödesdimension och konnektivitet
- (iii) hydraulisk sprickvidds- och transmissivitetsfördelning

Den hydrauliska konduktiviteten och transmissivitetsfördelningen representerar en vattenförande förmågan i stor respektive liten skala, men ger begränsad information om flödesvägarna för vatten eller injekteringsbruk i bergmassan. Detta beskrivs istället av det vattenförande spricksystemets flödesdimension och konnektivitet, dvs. spricksystemets geometriska förutsättningar för vattengenomströmning. Skalförhållanden (i fråga om berörd bergvolym) mellan dessa egenskaper illustreras i Figur 3-4.



Figur 3-4. Principskiss för analyserade egenskaper i olika skala som ligger till grund för indelning i hydrauliska domäner.

(i) Hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliska konduktiviteten är ett vanligt använt mått på vattengenomsläppligheten (permeabiliteten) i berg och jord (se även kapitel 2.2). Vid beräkningar med värden på bergets hydrauliska konduktivitet kan det vara relevant att reflektera över vilket värde på bergets genomsläpplighet som den utvärderade hydrauliska konduktiviteten representerar. Provpumpning eller interferenstest ger som resultat *det lägsta värdet* på K inom en viss testvolym och styrs huvudsakligen av konnektiviteten mellan sprickorna som är den trånga hydrauliska sektorn (Fransson 1998; Fransson 1999). Slugtest eller vattenförlustmätningar ger mer ett värde för enstaka sprickor nära borrhålet eller testsektionen, och överskattar generellt den hydrauliska förmågan.

(ii) Det vattenförande spricksystemets flödesdimension och konnektivitet

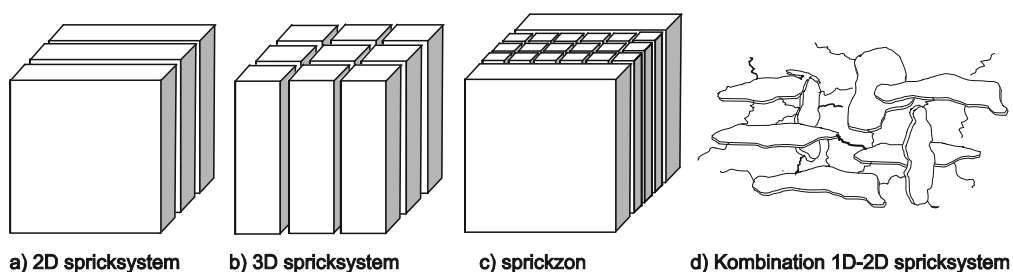
Det vattenförande spricksystemets flödesdimension och konnektivitet ska beskriva spricksystemets geometriska förutsättningar för vattenströmning. Spricksystemets konnektivitet beskriver den relativa andelen skärningspunkter mellan sprickor i ett spricksystem (NRC 1996). En högre nivå av konnektivitet mellan sprickor resulterar generellt i en högre vattengenomsläpplighet i

bergmassan. Få sprickorienteringar, begränsade spricklängder och små sprickvidder leder generellt till att konnektiviteten mellan sprickor minskar (NRC 1996). Konnektiviteten måste tolkas utifrån flera indirekta parametrar, såsom sprickintensitet, spricklängd, sprickapertur och sprickorientering.

Flödesdimensionen i en spricka reflekterar geometrin för flödesvägarna inom sprickan, där begränsningar kan få flöden att bli endimensionella (kanalflöde) medan större sprickaperturer ofta medger ett tvådimensionellt flöde.

Flödesdimensionaliteten för ett spricksystem behöver dock inte vara identiskt med flödesdimensionen i enskilda sprickor eftersom den reflekterar både sprickornas flödesvägar och konnektiviten mellan sprickorna. Fransson och Hernqvist (2010) samt Hernqvist (2011) presenterar en konceptuell struktur för att beskriva spricksystems flödesegenskaper som baseras på det vattenförande spricksystemets flödesdimensionalitet. De ingående typerna av spricksystem är *1D-dominerande flöde*, *2D-dominerande flöde*, *3D-dominerande flöde*, *sprickzoner*, och eventuella kombinationer av dessa (t.ex. 1D-2D system), se Figur 3-5.

Ett spricksystem med sprickor som domineras av kanalflöde antar en 1D-dominerad flödeskaraktär. I ett 2D-dominerat spricksystem finns åtminstone ett vattenförande sprickset och sprickorna är i allmänhet glest konnekterade. Spricksystem av typen 1D, 2D eller en kombination av 1D-2D (se Figur 3-5) ger glest konnekterade spricknätverk med få kopplingar mellan hydrauliskt aktiva sprickor. Flödesmönstret är vanligtvis förknippas med anisotropi och flödesbegränsningar ('hydraulic chokes', se t.ex. Black et al. 2007). I ett 3D-spricksystem finns åtminstone två vattenförande sprickset och sprickorna är vanligen väl konnekterade med ett stort antal sammankopplingar mellan vattenförande sprickor.



Figur 3-5. Konceptuell modeller för olika typer av spricksystem, baserat på flödesdimensioner (från Hernqvist 2012). a) 2D spricksystem, b) 3D spricksystem, c) sprickzon, d) en kombination av 1D och 2D flödessystem.

Fransson och Hernqvist (2010) och Hernqvist (2011) diskuterar även konsekvenser för injektering för de olika typerna av spricksystem. När en stor del av bergmassan omfattas av 1D-flöde (flödeskanaler i sprickorna) kan borrhål ha svårt att träffa vattenförande kanaler och ge tillräcklig spridning av injekteringsbruk. Om nyttan med injektering i ett 1D-2D system är låg kan det därför vara diskutabelt att överhuvudtaget genomföra systematisk injektering. Behovsprövad injektering bedöms vara fördelaktigt att utföra i ett 2D-system där tunnelorienteringen är vinkelrät mot det mest vattenförande spricksystemet och möjligheten att sondera och injektera konduktiva strukturer bedöms vara god (om orienteringen är gynnsam). I välkonnekterade system finns generellt fler flödesvägar för vatten att nå tunneln vilket måste beaktas vid tillämpning av behovsprövad injektering så att risken att flytta vatten mellan tätade och otätade områden minimeras. Ett relativt uppsprucket spricksystem dock ha låg genomströmning till följd av låg konnektivitet mellan sprickor eller låga flödesdimensioner inom sprickorna (kanalflöden).

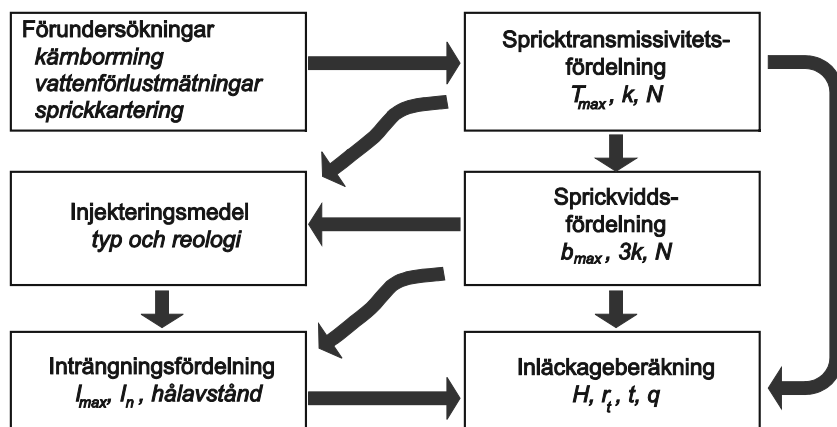
Sprickzoner domineras av 2D eller 3D-flöde beroende på dess strukturella uppbyggnad, t.ex. sprickfyllnader och konnektivitet mellan sprickor. En viktig aspekt är att sprickzoner kan fungera som en "hydraulic backbone", dvs. en större vattenledare som förser konnekterade sprickor med vatten (Hernqvist et al. 2008). I ett mer glest konnekterat spricknätverk medför tätningen av en sådan sprickzon att flödet minskar även till otätade sprickor eftersom de förlorar sin tillförsel (vilket är fördelaktigt för behovsprövad injektering). Ur injekteringssynpunkt har även glest konnekterade spricksystem fördelen att flödesrestriktioner kan begränsa effekten av tillförsel från zonen om avståndet

mellan zonen och tunneln är tillräckligt stor. I välkonnekterade spricksystem bryts tillförseln inte av flödesrestriktioner i lika stor utsträckning.

(iii) Hydraulisk sprickvidds- och transmissivitetsfördelning

Vid injekteringsdesign finns ofta ett behov av en bra förståelse för vilka sprickor som behöver tätas och vilket injekteringsbruk som kan ta sig in i sprickorna (Gustafson 2009). Viktiga frågeställningar vid projekteringen kan därför vara genomsläppligheten hos de största sprickorna och hur stor andel av sprickorna som kan tätas med valda tryck och bruk. Att upprätta fördelningar av spricktransmissivitet och sprickvidder i bergmassan utgör ett sätt att beskriva hydrauliska egenskaper hos sprickor och kunna besvara ovanstående frågeställningar (Gustafson 2009).

Den hydrauliska sprickviddsfördelningen utgör viktig indata till designprocessen för injektering (Gustafson et al. 2004), se Figur 3-6. Indata till fördelningarna fås främst från olika typer av hydrauliska mätningar, t.ex. vattenförlustmätningar. Liksom hydraulisk konduktivitet samt konnektivitet och flödesdimension föreslås sprickviddsfördelningar utvärderas separat för olika hydrauliska domäner. Eventuella skillnader i sprickvidds- och transmissivitetsfördelningar mellan olika domäner kan nämligen indikera att injektering kan behöva utföras med olika angreppssätt i olika domäner.



Figur 3-6. Analysprocess för injekteringsdesign (modifierad från Gustafson et al. 2004).

3.3.3 Inläckageberäkning

Beräkningar av prognostiserat inläckage av grundvatten till en bergtunnel bör ta hänsyn till ett antal faktorer som påverkar storleken på inläckaget (Axelsson och Follin 2000):

- 1) anläggningens djup, volym, geometri och byggnads- och driftperiod
- 2) berggrundens hydrauliska egenskaper
- 3) grundvattenbildning och dess variation i tiden
- 4) kontakt med ytliga vattenmagasin som sjöar, bäckar, våtmarker, etc.
- 5) befintliga anläggningar som påverkar grundvattenförhållanden

Berggrundens hydrauliska egenskaper beskrivs med hjälp av de hydrauliska domänerna (avsnitt 3.2.6). Förutom att ange en hydraulisk medelkonduktivitet för olika typer av bergenheter kan de hydrauliska domänerna även underlätta att urskilja förekomster av negativa hydrauliska gränser i bergmassan som skulle kunna begränsa tillgången på vatten till en tunnel, exempelvis bergartsgränser till sprickfattigt berg och leromvandlade zoner. Det kan även finnas positiva hydrauliska gränser som ökar tillgången, t.ex. högkonduktiva sprickzoner.

Grundvattenbildning, hydrauliska kontakter och befintliga anläggningar beaktas i det föreslagna förundersökningsprogrammet genom att utvärdera grundvattenbildning till berg (avsnitt 3.2.5). Detta kan jämföras med det förväntade inläckaget som beräknas utifrån bergmassans hydrauliska medelkonduktivitet. Beräkningar av inläckage kan antingen utföras med hjälp av analytiska modeller eller med numeriska modeller.

För att öka detaljnivån i beräkningarna av inläckaget bör bergmassan delas in i olika delområden och beräkningar utföras separat för varje delområde.

3.3.4 Känsliga områden

Dräneringen till en undermarksanläggning kan orsaka sänkningar av grundvattnets tryckhöjder i jord och berg och påverkar därmed olika typer av vattenverksamheter i närheten av anläggningen (Knutsson och Morfeldt 1993). Grundvattenberoende objekt (byggnader, ledningar, natur, brunnar etc.) som kan skadas av effekter av grundvattenavsänkningen benämns som skadeobjekt. Om konsekvenserna för skadeobjekten bedöms vara allvarliga krävs ofta skyddsåtgärder i form av långtgående tätning eller infiltration. Detta medför

ofta att tillåtet inläckage till en tunnel är lägre i skadeobjektens omgivning än i områden utan skadeobjekt.

Känsliga, även för mindre inläckage, är områden med normalkonsoliderad lera i kombination med god kontakt mellan jord och berg. Under vissa förutsättningar kan allvarliga konsekvenser inträffa även vid mycket små inläckage – samtidigt kan i dessa fall infiltration vara en effektiv metod eftersom det är små flöden som behöver infiltreras för att upprätthålla trycken. Det finns även exempel på relativt stora inläckage men som enbart ger en marginell påverkan på grundvattennivåer eller där en lokal grundvattensänkning inte innebär några påtagliga följder. I en studie av de viktigaste parametrarna för att ange risk för påverkan i lera ifrån en dränering av en tunnel anger Persson (2007) att det är genomsläpligheten på friktionsjorden/moränen som är den viktigaste parametern. Det är därför viktigt att känsliga områden blir tydligt beskrivna ur hydrogeologisk synvinkel och att rätt skyddsåtgärder identifieras för varje fall.

I denna studie är *känsliga områden* definierade som delområden som kräver skyddsåtgärder till följd av förekomst av potentiella skadeobjekt. Om omfattningen av skyddsåtgärder varierar för olika känsliga områden kan dessa särskiljas med olika känslighetsklasser. I det föreslagna förundersökningsprogrammet ingår att lokalisera känsliga områden genom att inventera potentiella skadeobjekt, alternativt använda separata utredningar inför t.ex. miljödomsansökan. Inventeringen sker genom att utvärdera exempelvis markanvändning, markslag, vattenbalans och vattenkemi.

Effekter och konsekvenser som kan uppkomma till följd av en grundvattensänkning och som därmed behöver utvärderas är (Werner et al. 2010):

- Minskad tillrinning till ytvattendrag och öppna/övra magasin.
- Ökade nivåvariationer och sänkning av medelgrundvattennivå i slutna/undre magasin.
- Minskad mängd växttillgängligt vatten.
- Marksättningar i organogena jordar och kohesionsjordar.
- Minskade uttagsmöjligheter och ändrad vattenkvalitet i dricksvattenbrunnar.
- Minskat energiutbytet i djupborrade energibrunnar.

- Uppträngning och inträngning av salt grundvatten.
- Spridning av markföroreningar.

Potentiella skadeobjekt som kan påverkas av denna typ av konsekvenser är:

- Brunnar för vatten- och energiförsörjning.
- Byggnader och infrastruktur i sättningskänslig jord.
- Områden som skadas av mobiliserade föroreningar.
- Naturobjekt i utströmningsområden; bäckar, våtmarker och blöta/fuktiga skogspartier.
- Jordbruk, skogsmark/-bruk.

Risk för skador förekommer främst inom sättningskänslig mark där byggnader och anläggningar med känslig grundläggning kan skadas, här finns höga ekonomiska värden eller byggnader som har lagstadgat skydd.

4 INJEKTERINGSPROGNOS

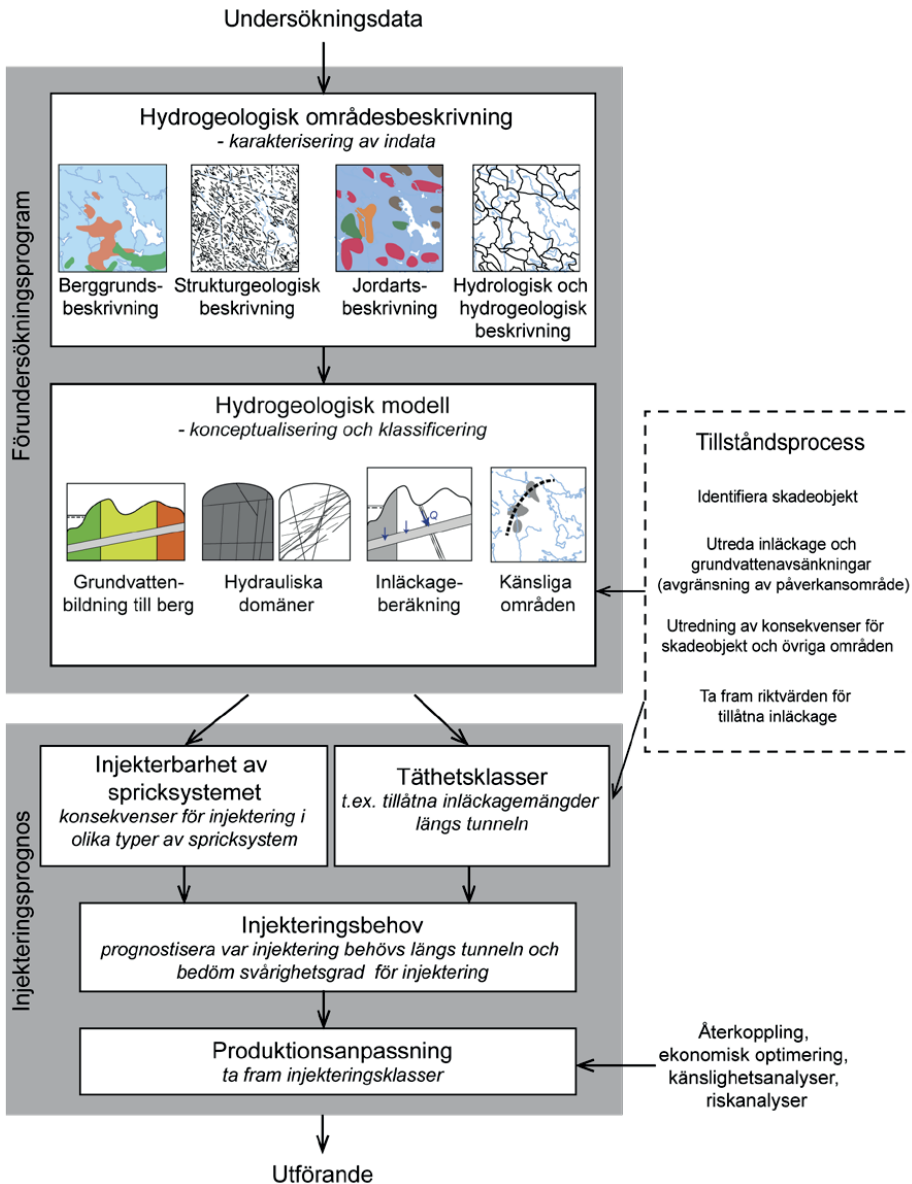
Projektering av behovsprövad injektering i ett tunnelprojekt omfattar en process som inleds med förundersökningar och som mynnar i en design som kan utföras under byggskedet. I denna studie beskrivs denna process ett antal steg som illustreras i flödesschemat i Figur 4-1. Den del av processen som avser utreda *om* behovsprövad injektering är lämplig i ett tunnelprojekt och i så fall utreda *var* och *hur* tätningsåtgärderna ska utföras ryms under begreppet injekteringsprognos.

4.1 Utformning av injekteringsprognos

Det som främst skiljer design av behovsprövad injektering från design av konventionell, kontinuerlig injektering är att projekteringen bör innehålla en utredning av *injekteringsbehov* där det tydligt framgår längs vilka tunneldelar injektering krävs och vilken reduktion i bergmassans genomsläpplighet som ska uppnås i injekterade sektioner. När detta behov blivit klarlagt kan tätningsinsatserna produktionsanpassas, exempelvis genom att ta fram injekteringsklasser och utföra ekonomisk optimering.

En central faktor i utredningen av injekteringsbehov är att jämföra ett prognostiserat inläckage utan injektering med inläckagekraven. Det prognostiserade inläckaget tas fram i förundersökningsprogrammet (se avsnitt 3.2.7). Inläckagekraven kan beskrivas med *täthetsklasser* som beskriver en önskad vattengenomsläpplighet (hydraulisk medelkonduktivitet) i bergmassan runt tunneln eller tillåtna inläckagemängder.

En annan faktor som bör påverka utformningen av den behovsprövade injekteringen är vad som i denna studie definieras som *injekterbarhet av spricksystemet*. Injekterbarheten beskriver vilken typ av injekteringsinsatser som förväntas krävas i ett spricksystem för att uppnå en önskad täthet i bergmassan. Genom att identifiera områden där traditionell cementinjektering förväntas vara en effektiv tätningsåtgärd är det möjligt att koncentrera injekteringsinsatserna till områden där dessa gör störst nytta.



Figur 4-1. Ingående delar i processen för att utföra projektering av behovsprövad injektering.

4.2 Täthetsklasser

Täthetsklasser som anges längs en tunnel indikerar hur krav relaterade till omgivningspåverkan ska kunna uppfyllas och uttrycks ofta som en tillåten inläckagemängd eller en hydraulisk medelkonduktivitet som ska uppnås i den injekterade bergmassan. Bedömningar av vilka krav som ska ställas (täthet, alternativt tillåten grundvattennivåsänkning) utgör ofta en central del av utredningen inför ansökan om tillstånd för grundvattenbortledning och tillståndsprocessen utgör därmed en viktig del i processen att ta fram täthetsklasser.

I utredningar inför tillståndsprocessen ingår bland annat att identifiera känsliga områden och utifrån beräkningar av vattenbalanser och inläckage till tunnelns olika delar skatta påverkansområdets utbredning. Med påverkansområdet avses det område i jord och berg inom vilket grundvattnets tryckhöjder (eller grundvattenyta) sänks till en viss nivå till följd av grundvattenbortledning från tunneln under bygg- och driftsskedet. Utifrån prognoser av påverkansområdets utbredning kan effekter och konsekvenser till följd av avsänkningar bedömas. Exempel på konsekvenser är skador på byggnader till följd av marksättningar samt minskat energiuttag i bergvärmebrunnar (se kapitel 3.2.8).

Genom en sammanvägd bedömning av påverkansområdets utbredning och godtagbara konsekvenser kan tillåtna inläckage och krav på tunnelns slutliga täthet tas fram. Dessa preciseras som täthetsklasser längs sträckningen. Behovet av injektering styrs därefter av en avvägning mellan täthetsklasser och bergets ursprungliga genomsläpplighet.

4.3 Injekterbarhet av spricksystem

Bedömningen av injekterbarheten av ett spricksystem görs utifrån information om spricksystemets geometriska förutsättningar, såsom sprickviddsfördelning, sprickorienteringar, konnektivitet och flödesdimension. En sammanvägning av dessa parametrar indikerar vilken reduktion i bergmassans genomsläpplighet som förväntas uppnås i olika hydrauliska domäner till följd av en vald injekteringsdesign.

Utvärdering av injekterbarheten av spricksystem längs en tunnel ska underlätta identifieringen av delsträckor där det finns goda möjligheter att uppnå en hög tätningseffekt i bergmassan. En bakgrund till detta är att ska vara möjligt att

tillåta högre inläckage längs sträckor där konventionell förinjektering ger liten effekt, och att ställa högre krav uppnådd täthet på sektioner eller delsträckor där injektering bedöms vara en effektiv åtgärd. Detta möjliggör en fokusering av injekteringsinsatser i tunnelsektioner där tätningseffekten, dvs. den relativa minskningen av bergmassans genomsläpplighet till följd av injektering (se t.ex. Stille 2012) är hög med konventionell injektering.

Definition av "hög tätningseffekt" bör bedömas individuellt för varje projekt. Generellt ger förinjektering en högre tätningseffekt i sektioner med hög genomsläpplighet än i områden med låg genomsläpplighet (Eriksson och Stille 2005). Injektering har ofta en begränsad tätningseffekt när bergets hydrauliska konduktivitet är låg eftersom spricksystem som resulterar i en låg vatten-genomsläpplighet ofta domineras av små sprickvidder och/eller att sprickors kontinuitet och konnektivitet är begränsad. Tätningseffekten kan också vägas samman med en bedömd svårighetsgrad för injektering. Svårighetsgraden kan erfarenhetsmässigt bedömas utifrån krav på tätningseffekt och en bedömd erforderlig hydraulisk konduktivitet, se Tabell 5.

Tabell 5. Strategi för bedömning av svårighetsgrad för injektering utifrån krav på tätningseffekt och krav på konduktivitet i den injekterade zonen (från Eriksson och Stille 2005).

		Bedömd erforderlig tätningseffekt		
		<90 %	90-99 %	>99 %
Bedömd erforderlig konduktivitet	>10 ⁻⁷ m/s	Lätt injektering	Lätt injektering	Medelsvår injektering
	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸ m/s	Lätt injektering	Medelsvår injektering	Svår injektering
	<10 ⁻⁸ m/s	Medelsvår injektering	Svår injektering	Svår injektering

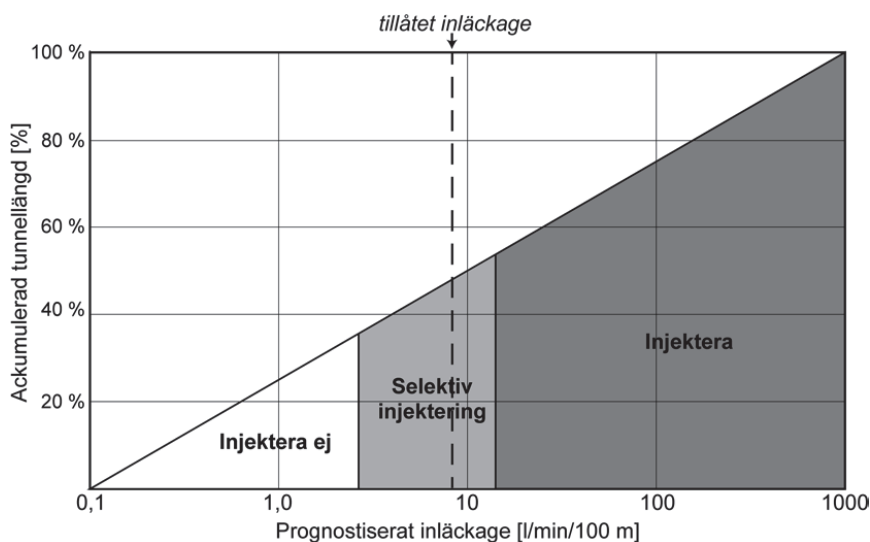
4.4 Injekteringsbehov

En utredning av injekteringsbehovet ska besvara frågan om behovsprövad injektering är en lämplig injekteringsstrategi i ett tunnelprojekt och i så fall var behov av injektering finns, antingen genom att ange specifika områden eller genom att ange vid vilka hydrogeologiska förhållanden injektering ska initieras.

Bedömningen om var behov av injektering genomförs utifrån (i) vilket inläckage som kan tillåtas längs tunnelsträckningen (från *täthetsklasser*) och (ii) var inläckaget bedöms överskrida tillåtna nivåer utan injektering (från *inläckageberäkningar*). Detta vägs samman med (iii) *injekterbarheten av sprick-system* för att identifiera om det finns sektioner där injekteringsinsatser bör koncentreras med hänsyn till effektivitet. Därefter är det möjligt att utvärdera huruvida behovsprövad injektering är en lämplig injekteringsstrategi för ett projekt, baserat på en kostnadsjämförelse mellan den uppskattade mängden injektering (och tillhörande undersökningar) vid en behovsprövad strategi och en motsvarande mängd för kontinuerlig injektering.

Angivelser om i vilka områden eller vid vilka förhållanden injektering ska utföras kan ske baserat på inläckageskattningar. Injektering utförs därmed i områden där prognostiserat inläckage överstiger ett visst gränsvärde och utförs ej om det understiger gränsvärdet (se Figur 4-2).

Detta kompletteras av ett gränsområde (grå zon i Figur 4-2) där det råder en osäkerhet om inläckagekraven kan uppfyllas utan injektering. I dessa områden bör sonderingsborrning med utvärdering utföras som beslutsunderlag för om injektering ska utföras innan bergguttar (s.k. selektiv injektering). Hydrauliska tester i sonderingshålerna avgör om tätningsinsatser behövs framför tunnelfronten och vilken injekteringsklass som i så fall ska tillämpas. Antal, längd och orientering på sonderingshål kan dock anpassas efter vilka vattenförande strukturer som förväntas vara viktigast att identifiera. Behovet av kontroll och uppföljning av gränsområdet kommer att variera beroende på omfattning av exempelvis synliga läckage som karteras eller inläckage i salvhål.



Figur 4-2. Princip för beslut om när injektering ska utföras. Exemplet illustrerar prognostiserat inläckage längs andel tunnallengd och hur detta kan användas för att kvantifiera injekteringsbehov längs andelen tunnel. Värdet på andelen tunnel med ett prognostiserat behov av injektering utgör ett viktigt underlag till en kostnadsjämförelse mellan kontinuerlig och behovsprövad injektering.

Det är viktigt att uppnå en god tätningseffekt i utförda injekteringskärmar. Om önskad tätningseffekt ej uppnås kommer sannolikt inläckagekravet ej uppnås, vilket kan innebära att en större andel av efterföljande bergvolym måste injekteras som kompensation. Detta leder till fler injekteringsomgångar och att injekteringsstrategin övergår till en mer systematisk karaktär.

För att kunna utvärdera tätningseffekten behövs verktyg för att följa upp resulterande inläckage efter berguttag. Det är alltså viktigt att även följa upp inläckage oavsett om injektering utförs eller ej.

4.5 Produktionsanpassning

I byggskedet är det viktigt att det finns färdigställda, tydliga riktlinjer för beslut angående injekteringsklass (injekteringsutförande) samt om injektering ska utföras eller ej. Entreprenören ska i kontrakt och handlingar ha redskap för att dels kunna tolka rådande geologiska förhållanden och dels för kunna utföra rätt injekteringsinsatser, dvs. en lämplig verktygslåda. Verktygslådan kan utgöras av

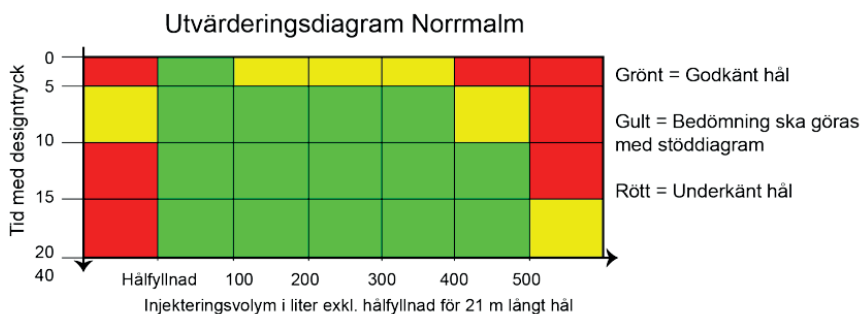
t.ex. injektering i flera omgångar, en injekteringsomgång och eventuellt kompletterande hål eller ingen injektering.

Sträckor med selektiv injektering bör utföras så att man i möjligaste mån undviker att läckage flyttas mellan sektioner (vilket kan leda till att efterinjektering). Selektiv injektering bör därför utföras med minst två sammanhängande skärmar när behov av injektering identifieras.

Det är viktigt att kontrakt mellan beställare och entreprenör utformas så att ersättning erhålls för utfört arbete och att entreprenör och beställare delar på riskerna. Detta kan till exempel innebära att kontrakten innehåller detaljerade mängdbeskrivningar för injekteringsarbeten (såsom i Norge), alternativt entreprenadformer med incitament för kritiska moment (t.ex. uppnådd täthet för viss delsträcka). En viktig del i införandet av behovsprövad injektering är att man tillåter injektering att ta tid och att man verkligen ser till att täta där det behövs. För att detta ska vara möjligt måste entreprenören få ersättning för injekteringstid och inte enbart för injekterad volym.

Det är vanligt att valet av injekteringsklass är kopplat till vattenförluster i sonderingshål i injekterings-skärmen, vilket även kan kompletteras med fler parametrar såsom geologiska förhållanden och resultat från tidigare utförda injekterings-skärmar (Brantberger 2009). Det pågår också utvecklingsarbete med såväl insamling av borrhdata som är kopplat till bergkvalité (MWD, Measurement While Drilling, se t.ex. Schunnesson 1998) samt flödesdimensioner (RTGC, Real Time Grouting Control, se t.ex. Gustafson och Stille 2005; Stille B et al. 2009) vilka utgör möjliga verktyg för beslut.

Riktlinjer för åtgärder baserat på observationer under byggskedet ska kunna utvärderas vid stufv och finnas till hands för utföraren (entreprenören). En enkel metod för att bestämma åtgärder under byggskedet kan vara att använda översiktliga utvärderingsdiagram som ska finnas med vid stufv. I Figur 4-3 och Figur 4-4 redovisas exempel på sådana utvärderingsdiagram vilka togs fram vid projektering av Norrmalmstunneln, Citybanan (Vattenfall Power Consultant 2010). Utgående från injekterad volym samt utförda mätningar i sonderingshål kunde beslut tas om behov för kompletterande hål.



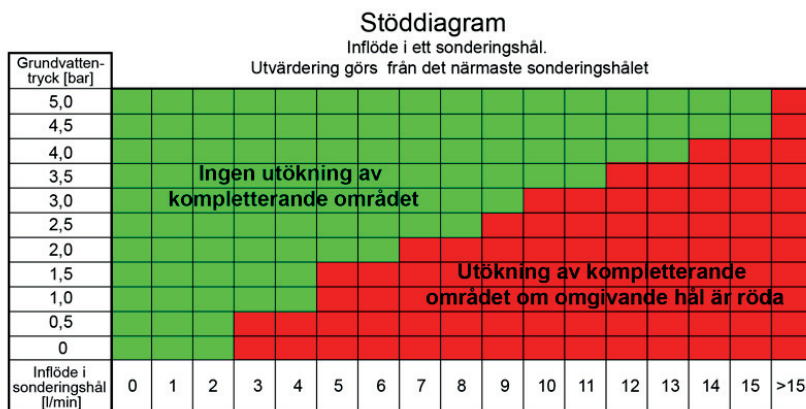
Volym för varje injektionshål ska registreras enskilt. Hål med samband där två eller fler hål inte uppnått hälfyllnad ska betraktas som rött hål.

För att bestämma omfattning av komplettering för hål i gula fält i Utvärderingsdiagrammet används ett Stöddiagram.

Kompletterande hål ska utföras i sulan: Vid 2 eller fler röda hål

Kompletterande hål ska utföras i övriga delar av skärmen: Vid 3 eller fler röda hål

Figur 4-3. Huvudutvärderingsdiagram för injektionskärrmar i Norrmalm, Citybanan, framtaget av Vattenfall Power Consultant, daterat 100524.



Tolkning av färger i Utvärderingsdiagram + Stöddiagram

Gult + Rött, Angränsande till enbart gröna hål innebär ingen utökad komplettering

Gult + Rött, Angränsande till röda hål innebär utökad komplettering

Gult + Grönt, Ingen utökning

Figur 4-4. Stödutvärderingsdiagram för Norrmalm, Citybanan, framtaget av Vattenfall Power Consultant 2010.

5 FALLSTUDIER

I detta avsnitt presenteras resultat från fyra fallstudier som exemplifierar den föreslagna processen för att utföra förundersökningsprogram och injekteringsprognos för behovsprövad injektering i tunnelprojekt. Avsnittet ger en sammanfattning av hydrogeologiska områdesbeskrivningar, hydrogeologiska modeller och injekteringsprognoser för respektive tunnel. En mer detaljerad redogörelse för beräkningar och antaganden ges i Bilaga A.

Fallstudierna har fokuserat på att presentera ett utvärderat *injekteringsbehov* längs tunnarna, dvs. *var* injektering förväntas behövas och i viss mån även hur injekteringen bör utföras i olika typer av geologiska förhållanden. Den efterföljande delen av injekteringsprognosen, dvs. produktionsanpassningen, ingår ej i utvärderingen. För att bedöma rimligheten i det utvärderade injekteringsbehovet görs en jämförelse med utförd injekteringsomfattning i projekten. Även om utförd injektering är ett trubbigt mått på injekteringsbehovet (som exempelvis beror på täthetskrav och injekteringsstrategi) så ger det en övergripande bild över vilka delar av tunnelsträckningen som var injekterbar och där behov för injektering förelåg.

Injekteringsbehovet har bedömts utifrån följande kriterier (i) befintliga täthetsklasser, (ii) områden med risk för höga inläckage och (iii) områden med bedömd risk för omgivningspåverkan (känsliga områden). Behovet uttrycks därefter med tre strategier:

Injektering (röd kategori): Injektering utförs som systematisk förinjektering (flera på varandra följande skärmar) enligt ett framtaget injekteringskoncept.

Selektiv injektering (gul kategori): Injekteringsbehovet avgörs under tunneldrivningen med på förhand väldefinierade utvärderingskriterier. Detta kan t.ex. utgöras av geologiska karteringar och MWD-utvärdering för att verifiera hydrauliska domäner, eller sonderingsborrningar med vattenförlustmätningar för att utvärdera bergmassans genomsläpplighet. Behovet måste kopplas mot eventuella inläckagekrav samt uppnådd täthet i tidigare uttagna delar. Om inläckaget på tidigare uttagna delar är lägre än prognosiserat kan det finnas en buffert som ska ingå i utvärderingen.

Ingen injektering (grön kategori): Inget injekteringsbehov anses föreligga. Dock måste en uppföljning av inläckage utföras och en beredskap för förändrat koncept finnas. Injektering ska kunna utföras om förhållanden avviker från prognosen.

Underlag till fallstudierna utgörs av den för oss tillgängliga data som redovisas för respektive tunnel. Fallstudierna för *Ulvintunneln*, *Hagantunneln* och *Namntalltunneln* baseras på information med något lägre detaljeringsgrad än den information som fanns tillgänglig för *Nygårdstunneln*. De två norska tunnarna samt Namntalltunneln kan därför anses motsvara en förprojektering, medan Nygårdstunneln kan motsvara en något högre detaljeringsgrad. Det tillgängliga underlaget är inte fullt ut likvärdigt med det underlag som används vid projektering av respektive projekt utan vi har utgående från detta gjort egna antaganden, tolkningar och analyser. Därmed ska fallstudierna och dess resultat inte ses som utvärderingar av projekten utan enbart som exempel tillämpning av föreslagen metodik för behovsprövad injektering.

5.1 Ulvintunneln

Ulvintunneln är en 3,8 km lång norsk järnvägstunnel som är en del av utbyggnaden av Dovrebanan öster om sjön Mjösa, mellan Oslo och Lillehammer, det s.k. Fellesprojektet. Tunneln är en dubbelspårstunnel och bergarbetena för tunnel utfördes främst under 2012-2013. Driftsättning är planerad till 2015.

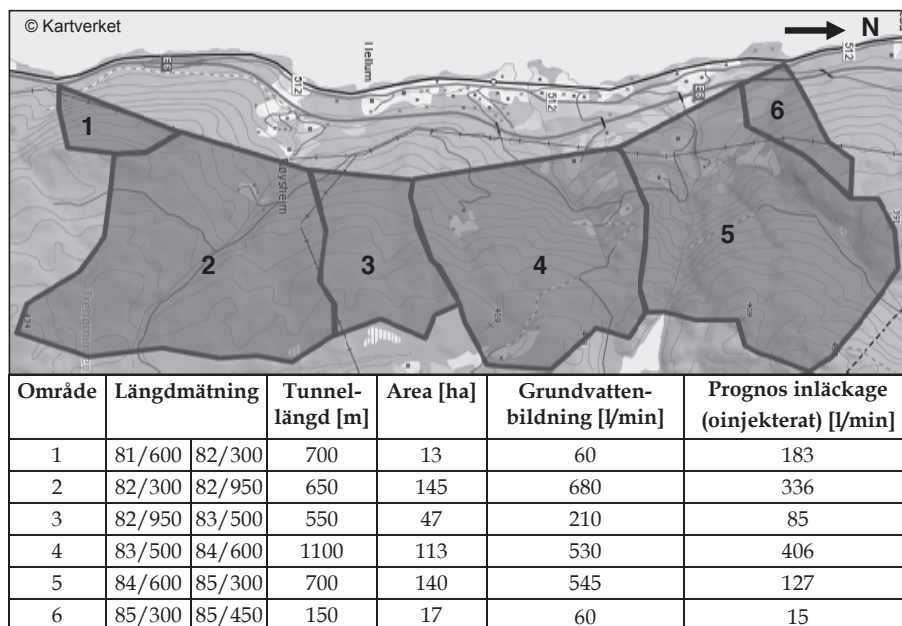
Hela topografin i området utgör en brant sluttning ner mot Mjösas östra strandlinje med höjdskillnader på ca 200-300 m. Dominerande bergarter är gabbro och granitisk gnejs, och generellt är bergtäckningen mellan 50-100 m, med undantag för de nordligaste 1,5 km där bergtäckningen uppgår till ca 10-40 m. Tunneln har en "bananform" med inledande riktning mot NO vilken svänger mot N och därefter mot NV, se Figur 5-2.

Underlaget för denna fallstudie utgörs data från Norges Geologiske Undersøkelse (NGU 2014a; b; c) och av en ingenjörsgelogisk och hydrogeologisk rapport med tillhörande bilagor upprättad av Norconsult AS (2011). Undersökningar som presenteras i rapporten inkluderar fältkartering, kärnbörning, geofysiska undersökningar, geotekniska borrningar samt loggningar av befintliga och nya bergborrade brunnar.

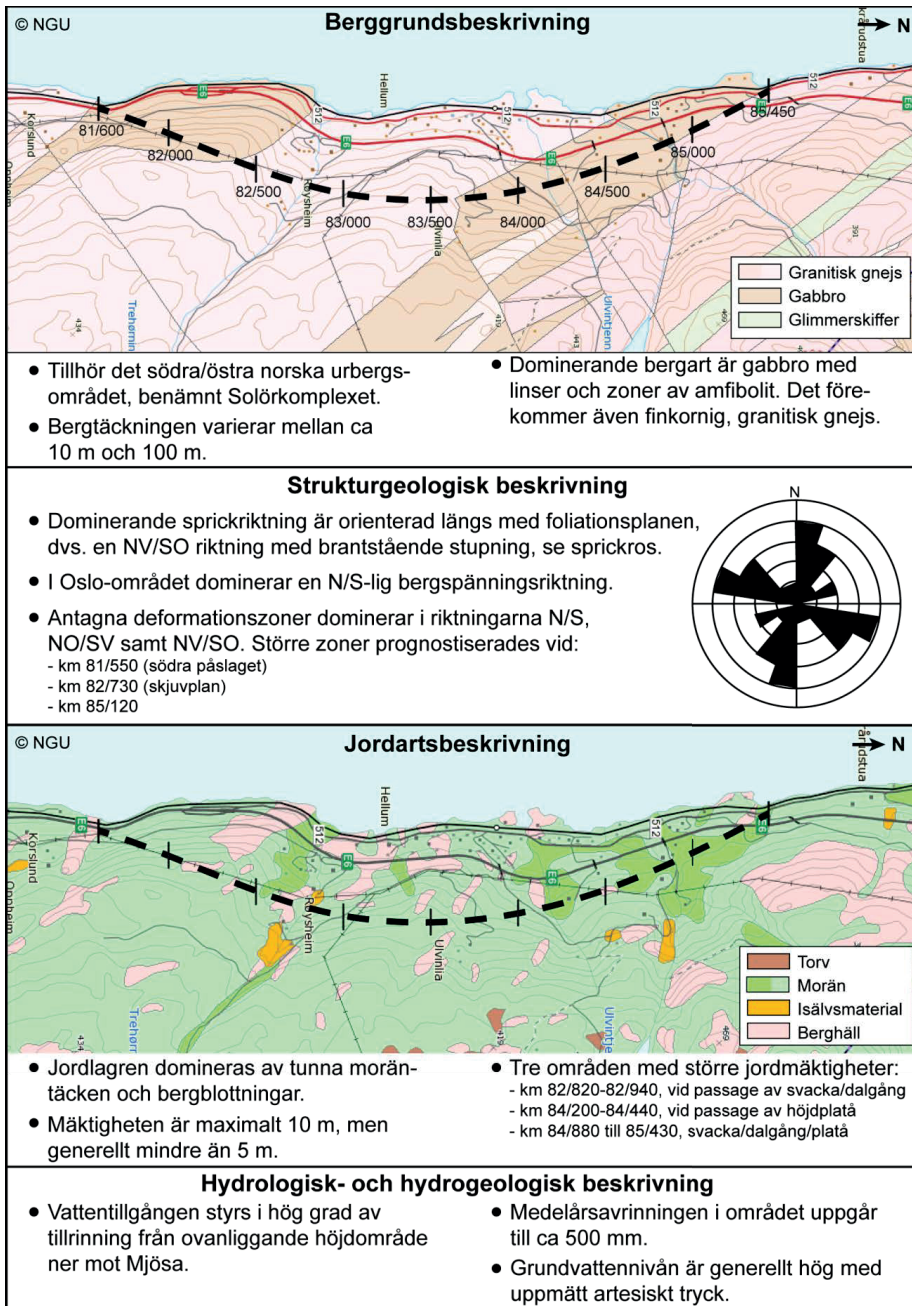
5.1.1 Förundersökningsprogram Ulvin

Den hydrogeologiska områdesbeskrivningen för Ulvintunneln (dvs. beskrivningar av bergarter, jordarter, strukturer och hydrogeologi) har tagits fram inom ramen för denna studie och sammanfattas i Figur 5-2. Fallstudien omfattar även en hydrogeologisk modell med beräkning av grundvattenbildning till berg, indelning av bergmassan i hydrauliska domäner, samt inläckageberäkningar. En bedömning av känsliga områden har utgått från befintliga täthetsklasser som tagits fram i projektet.

Potentiell grundvattenbildning till berg har beräknats för sex grundvattenbildningsområden som definierats utifrån topografiska förhållanden (Figur 5-1). Skattningarna resulterade i ett årsgenomsnitt på ca 10-100 l/min, 100 m tunnel.



Figur 5-1. Grundvattenbildning till berg för definierade grundvattenbildningsområden längs Ulvintunneln. För områdena visas även inläckageprognoser till en oinjekterad tunnel (se beräkningar i Bilaga A).



Figur 5-2. Sammanfattad hydrogeologisk områdesbeskrivning för Ulvintunneln innehållande en översikt av berggrundsgeologi, strukturgeologi, jordarter och hydrogeologi.

Bergmassans vattenförande egenskaper har utvärderats utifrån bedömd genomsläpplighet (hydraulisk konduktivitet) som baseras på brunnldata. Grundvattentransporten antas framför allt ske uppsprucket ytligt berg, i deformationszoner samt i kontaktzoner mellan olika bergartsstrukturer. Högre hydrauliska konduktiviteter har därför ansatts i ytligt berg och vid deformationszoner. Baserat på förväntade skillnader i hydrauliska egenskaper har fyra hydrauliska domäner definierats:

- A. *Gnejs*. Bedömd hydraulisk medelkonduktivitet 4×10^{-8} m/s. Två sprickriktningar antas dominera varav en är parallell/subparallell med tunneln.
- B. *Gabbro*. Bedömd hydraulisk medelkonduktivitet 2×10^{-8} m/s. Två sprickriktningar antas dominera varav en är parallell/subparallell med tunneln.
- C. *Zon*. Deformationszon med prognostiserad risk för höga inflöden alternativt bergartskontakt med risk för större inflöde. Bedömd hydraulisk medelkonduktivitet är 2×10^{-7} m/s. Alla zoner har getts samma vattenförande egenskaper, oavsett bergart.
- D. *Gabbro med liten bergtäckning*. Bedömd hydraulisk medelkonduktivitet är 1×10^{-7} m/s.

De ansatta variationerna i hydraulisk konduktivitet och grundvattentryck har använts i inläckageberäkningen (Ekvation 2.1) för en oinjekterad Ulvintunnel. Inläckaget längs tunneln antas variera mellan ca 5-120 l/min, 100 m. Av jämförelsen mellan tillgänglig mängd vatten från grundvattenbildning och beräknat inflöde utan injektering (se Figur 5-1) framgår att det framför allt är inom delområde 1 som tillgänglig mängd vatten i ett längre perspektiv skulle kunna vara begränsande för inläckaget.

5.1.2 Injekteringsprognos Ulvin

I injekteringsprognosen ingår en bedömning av injekterbarheten av olika domäners spricksystem. I domänerna A (gabbro) och B (gnejs) dominerar två sprickgrupper varav den ena är parallell/sub-parallell med tunneln. Med beaktande av dominerande N/S spänningsriktning kan den parallella N/S-gruppen anses vara den mest vattenförande sprickriktningen. Detta kan medföra problem med att träffa vattenförande sprickor vid injektering. Dock är prognostiserade zonerna (domän C) orienterade i en fördelaktig riktning då de skär tunneln med tvär vinkel. Injekterbarheten bedöms generellt som "normal", dock med beaktande att det kan vara svårt att träffa vattenförande sprickor.

I injekteringsprognosen ingår även att ta hänsyn till täthetsklasser som representerar kravformuleringar relaterade till omgivningspåverkan. Denna fallstudie har nyttjat en befintlig täthetsklass som projekterats för Ulvintunneln. Täthetsklassen bygger på en bedömning av hydrogeologisk sårbarhet och är formulerad som ett tillåtet inläckage på mindre än 5 l/min, 100 m tunnel (Norconsult AS 2011). Täthetsklassen gäller längs tre delsträckor. Längs övriga sträckor har inga krav ansatts med hänsyn till omgivningspåverkan.

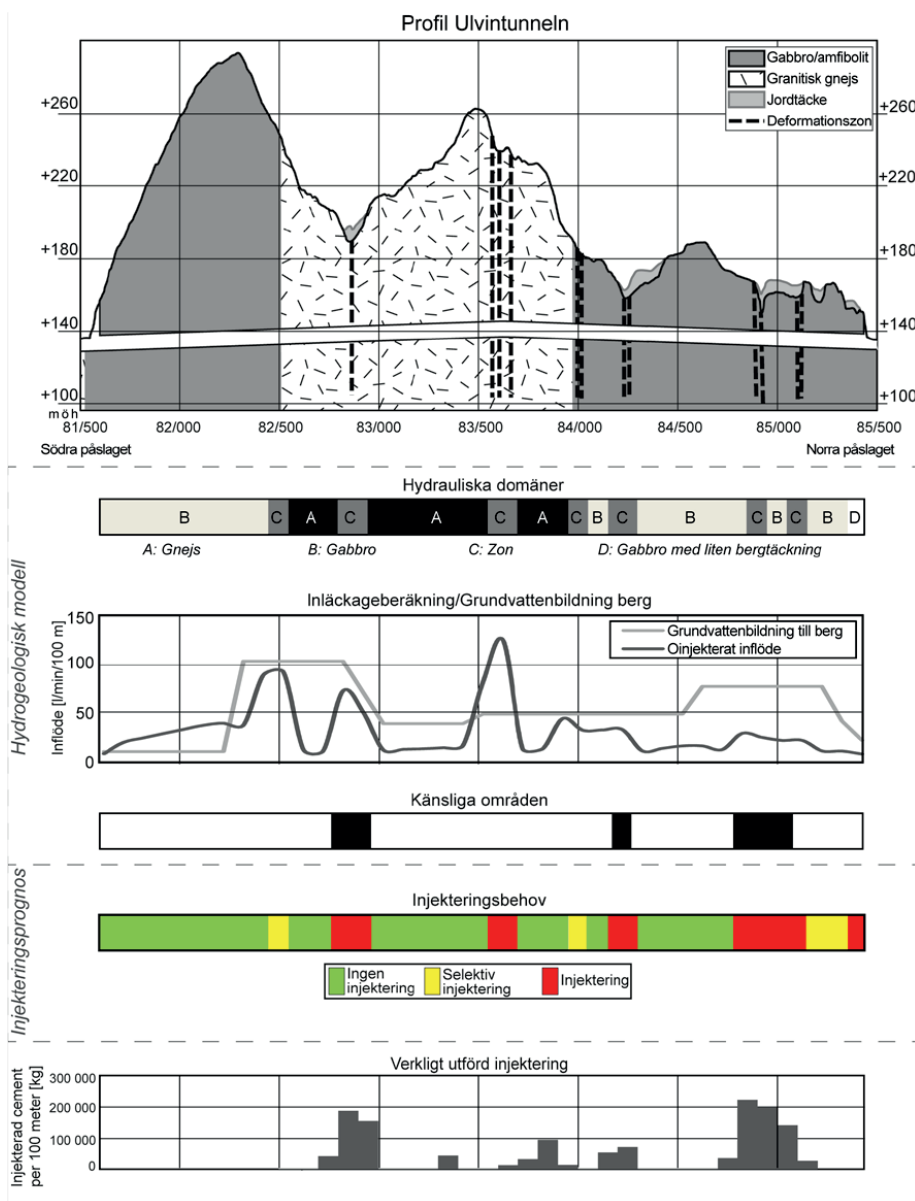
Det bedömda injekteringsbehovet och injekteringsklasser för Ulvintunneln redovisas i Figur 5-3. I figuren presenteras även ingående delar i den hydrogeologiska modellen (grundvattenbildning utjämnat till enheten l/min, 100 m, hydrauliska domäner och inläckageberäkning). Då krav på täthet enbart föreligger längs en mindre del av Ulvintunneln har analys av injekteringsbehov även utgått från områden med prognosierad risk för högre inläckage i kombination med en god injekterbarhet. Injekteringsbehovet har delats in i kategorierna *injektering*, *selektiv injektering* och *ingen injektering*. Totalt prognostiseras att systematisk injektering behövs längs 1130 m, selektiv injektering längs 420 m och ingen injektering längs 2280 m.

5.1.3 Utförd injektering

Vid verkligt utförd projektering i projektet projekterades systematisk förinjektering längs tre sträckor med täthetsklasser. På övriga sträckor utfördes sonderingsborrning vid förmodade och prognostiserade svaghetszoner. Detta innebär att systematisk förinjektering projekterades för 600 m av totalt 3825 m. Under projektet utfördes injektering mellan km 82/772 till km 85/140, se Figur 5-3. Totalt injekterades drygt 800 m av tunnelsträckningen.

I Tabell 6 redovisas inläckagekrav, injekteringsmetod samt utförda antalet skärmar uppdelad på olika delsträckor längs Ulvintunneln. Vid jämförelse mellan fallstudien av injekteringsbehov och verkligt utförd injektering så är det tydligt att injektering främst utförts i områden med täthetskrav. Inom samtliga områden med vårt prognostiserat injekteringsbehov utfördes injektering, förutom vid det norra påslaget där injektering föreskrivs i denna studie till följd av närliggande bebyggelse, men ingen injektering utfördes i projektet. Det fanns även sektioner i område där ingen injektering prognostiserats i fallstudien

där injektering faktiskt utfördes. Orsak till detta är inte känd men beror förmodligen på stora inläckage.



Figur 5-3. Illustration av den hydrogeologiska modellen och prognos av injekteringsbehov längs Ulvintunneln. Underst i figuren redovisas verkligt utförd injektering för Ulvintunneln, vilket kan jämföras med det prognostiserade injekteringsbehovet.

Tabell 6. Krav på inläckage samt antalet verkligt utförda skärmar längs Ulvintunneln.
Underlag från Norconsult AS med tillstånd av Jernbaneverket.

Längdmätning	Inläckagekrav [l/min, 100 m]	Injekteringsmetod	Antal utförda skärmar
81/600-82/770	-	Sporadisk (selektiv)	0
82/770-82/970	5	Systematisk	12
82/970-84/170	-	Sporadisk (selektiv)	22
84/170-84/270	5	Systematisk	5
84/270-84/770	-	Sporadisk (selektiv)	0
84/770-85/070	5	Systematisk	21
85/070-85/450	-	Sporadisk (selektiv)	7

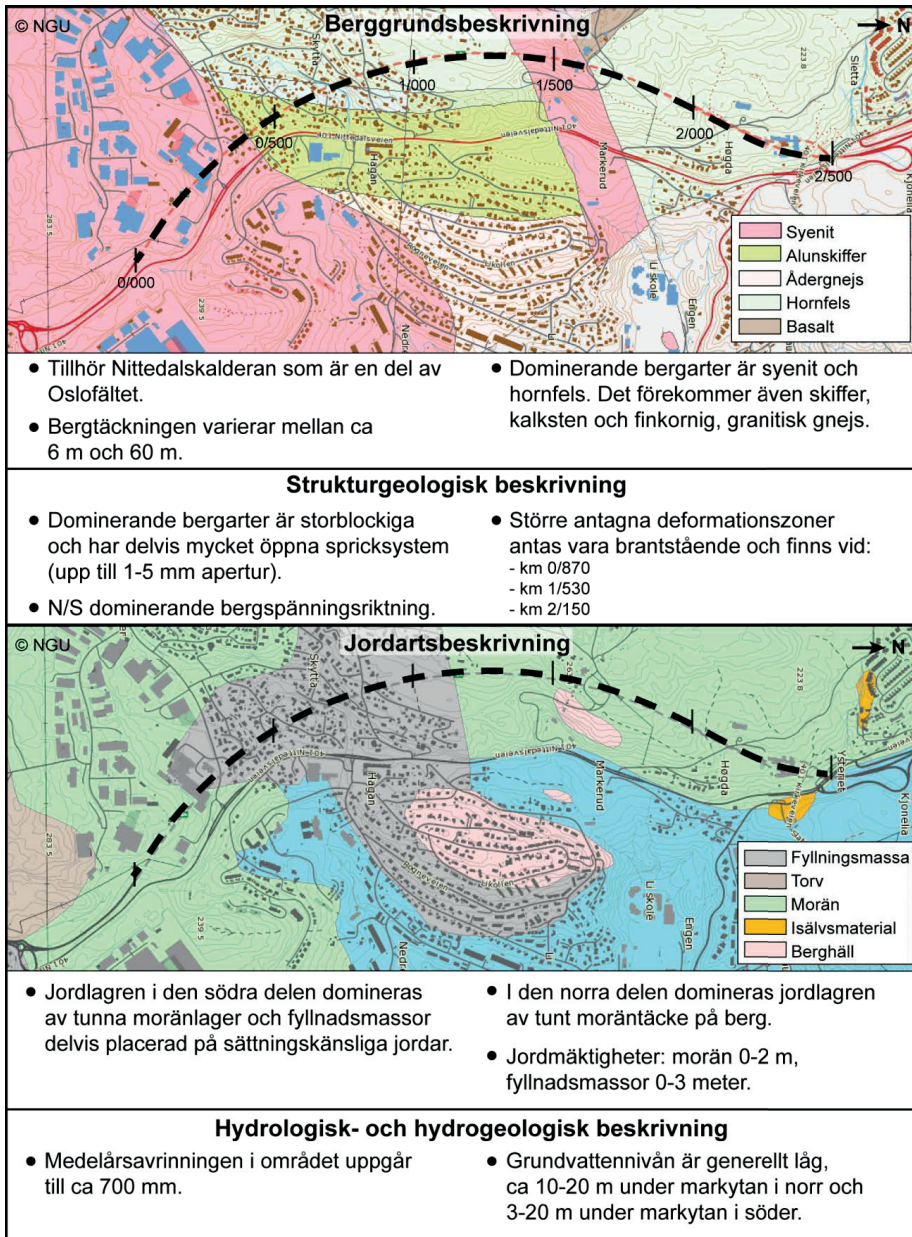
5.2 Hagantunneln

Hagantunneln är en ca 2,5 km lång vägtunnel belägen nordost om Oslo. Tunneln byggdes mellan 2001-2002, förutom 530 m i den norra delen som togs ut i samband med behov av bergmaterial för ett vägprojekt 1990.

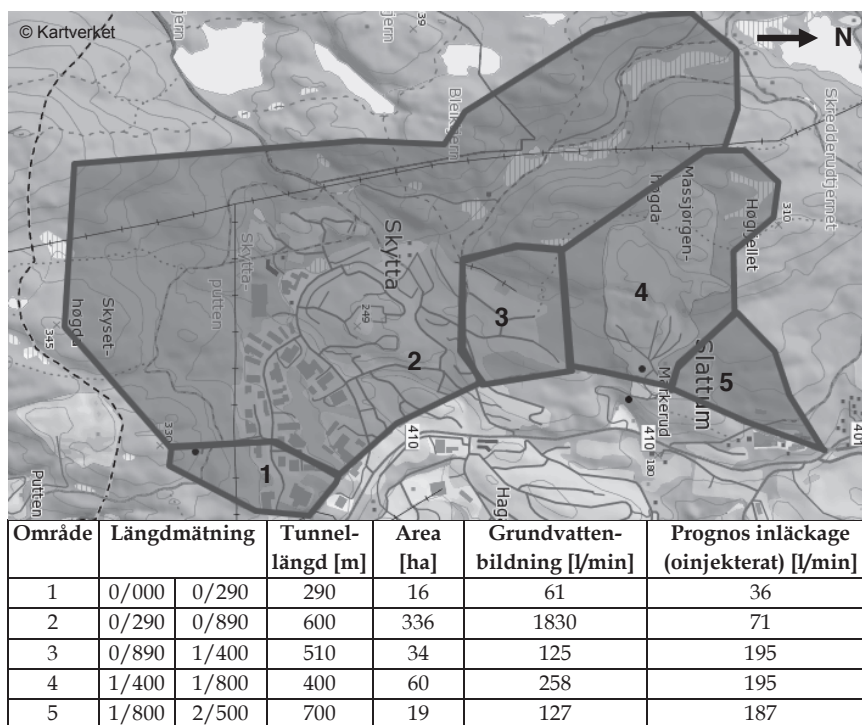
Området består av en ostlig sluttning ner mot älven Nitelva. Tunneln lutar mot norr och bergtäckningen är i genomsnitt ca 25 m, men varierar mellan 6-60 m. Bergtäckningen är lägst i de södra delarna av tunneln. I de södra delarna finns även bebyggelse ovanför tunneln, medan skogsmark dominerar i den norra delen. Berggrunden består av dels metamorfa bergarter (hornfels), sedimentära (skifferar, kalksten) samt intrusiva, magmatiska bergarter (syenit). Analyser i denna studie har främst utförts utgående från geologiskt kartmaterial (NGU 2014a; b) och uppföljning av injektering (Andersson och Lindstrøm 2003).

5.2.1 Förundersökningsprogram Hagan

I Figur 5-4 presenteras en sammanfattning av den hydrogeologiska områdesbeskrivningen för Hagantunneln. Den hydrogeologiska modellen för Hagantunneln omfattar beräkning av grundvattenbildning till berg, indelning i hydrauliska domäner, inläckageberäkning, samt identifiering av känsliga områden. Potentiell grundvattenbildning till berg har beräknats för fem stycken grundvattenbildningsområden som definierats utifrån topografiska förhållanden (Figur 5-5). Grundvattenbildningen inom respektive område har beräknats utgående från procentuell andel av avrinning som bidrar till grundvattenbildning i respektive jordart och motsvarar ca 20-300 l/min, 100 m tunnel utjämnat per tunnelsträcka inom varje område.



Figur 5-4. Sammanfattning av en hydrogeologisk områdebeskrivning för Hagantunneln, med översikt av berggrundsgeologi, strukturgeologi, jordarter och hydrogeologi.



Figur 5-5. Grundvattenbildning till berg för grundvattenbildningsområden längs Hagantunneln. I figuren visas även inläckageprognoser till en oinjekterad tunnel.

Utgående från brunnsdata (NGU 2014c) har en hydraulisk medelkonduktivitet skattats för bergarterna syenit, hornfels och skiffer/kalksten. Enligt Statens Vegvesen (2004) tillhör syeniten en bergtyp som generellt karakteriseras av en bergmassa med öppna, vattenförande sprickor. Hornfelsen karakteriseras av hög andel lerfyllda sprickor och små sprickvidder. I kalksten/skiffer beskrivs uppsprickningen generellt som måttlig, men det kan finnas vattenförande lager mellan de olika skikten i avlagringarna.

Nedan följer en sammanfattning av de sex hydrauliska domäner som definierats för Hagantunneln (i denna studie):

- A. *Syenit*. Består av ett välkonnekterat spricksystem med öppna, ofta stora, sprickor. Den storblockiga uppsprickningen tolkas som två huvudsakliga

- sprickorienteringar och flödet är typiskt 2D. Den skattade hydrauliska medelkonduktiviteten är ca 1×10^{-7} m/s.
- B. *Hornfels*. En generellt tät bergmassa med små sprickvidder som domineras av kanalflöden. Sprickfyllning av lera ger en låg genomsläpplighet. Skattad hydraulisk medelkonduktivitet är ca 5×10^{-8} m/s.
- C. *Ytlig hornfels*. Uppsprucken bergmassa bestående av delvis lerfyllda sprickor med små sprickvidder. Beroende på konnektering kan spricknätverket antas vara 1D (kanalflöde) till rena 3D-flöden i områden med öppna sprickor. Bedöms ha flertalet dominerande sprickriktningar. Hydraulisk medelkonduktivitet skattas till 1×10^{-7} m/s.
- D. *Skiffer/kalksten*. Är en förmodat relativt täta bergarter, men skikt mellan avlagringarna kan vara mer vattenförande. Uppvisar generellt ett 2D-flöde och hydraulisk medelkonduktivitet skattas till 1×10^{-8} m/s.
- E. *Deformationszon i hornfels*. Ingen information finns angående zonerna, men de antas vara brantstående och generellt innehålla lerfyllda sprickor med måttlig genomsläpplighet. Hydraulisk medelkonduktivitet skattas till 1×10^{-7} m/s.
- F. *Deformationszon i syenit*. Ingen information finns angående zonerna, men då syenit generellt är uppsprucken antas dessa ha hög genomsläpplighet. Hydraulisk medelkonduktivitet skattas till 5×10^{-7} m/s.

Skattningen av hydrauliska medelkonduktiviteter för de olika hydrauliska domänerna har utnyttjats i inläckageberäkningen. Enligt beräkningen kan inläckaget förväntas variera mellan ca 1 – 90 l/min, 100 m. Av jämförelsen mellan grundvattenbildning och beräknat inläckage framgår att skattat inläckage till en oinjekterad tunnel generellt är lägre än tillgången på grundvatten, se Figur 5-5. Lokalt kan dock tillgången ändå vara begränsad, exempelvis i de södra delarna där täta jordarter kan täcka bergytan.

Två områden längs tunnelsträckningen har utifrån kartmaterial bedömts som känsliga områden. Det första området är en passage av bebyggelse grundlagd på fyllningsmassor vilka bitvis är sättningskänsliga, mellan ungefärlig längdmätning km 0/300-1/000. Det andra området är beläget vid det norra påslaget, mellan km 2/400-2/600. Där passerar tunneln under befintliga byggnader och infrastruktur i anslutning till närliggande lerområden.

5.2.2 Injekteringsprognos Hagan

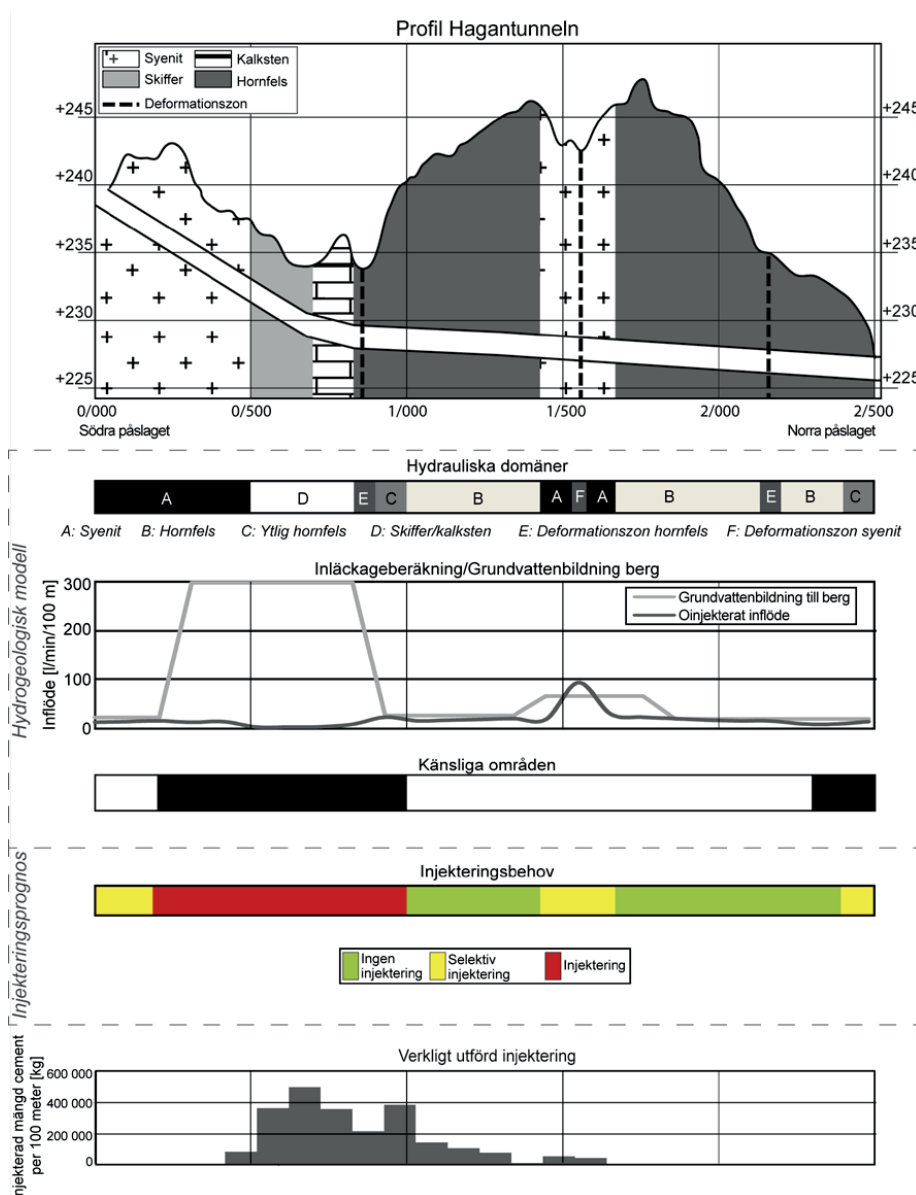
De hydrauliska domänerna A (syenit) och D (skiffer/kalksten) bedöms vara relativt enkla att injektera eftersom spricksystemen antas vara välkonnektade, förutsatt att dominerande sprickriktningar kan träffas. Domän C (ytlig hornfels) medför en besvärlig injektering då det förväntas små sprickvidder som domineras av 1D-flöde och delvis lerfyllda sprickor. Domän B (hornfels) kan anses motsvara en tätare bergplint och injektering krävs enbart vid mycket strikta inläckagekrav. Gällande deformationszonerna så föreligger ett större injekteringsbehov för domän F (zon i syenit), medan domän E (zon i hornfels) kan vara besvärlig att täta till följd av lerfyllda sprickor.

Uppdelningen av tunnelsträckningen i kategorierna *ingen injektering*, *selektiv injektering* och *injektering* har främst baserats på känsliga områden och områden med risk för högre inläckage i kombination med en god injekterbarhet. Med beaktande av risk för påverkan på bebyggelse grundlagd på fyllningsmassor så antas injektering krävas mellan längdmätning 0/300-1/000. Från de södra påslaget fram till km 0/300 bör beslut om injektering grunda sig på sonderingar, detsamma gäller vid passage av zon samt syenitstråk mellan km 1/530-1/800 samt i anslutning till det norra påslaget vid km 2/400-2/500. Övriga sträckor bedöms ej kräva injektering.

I Figur 5-6 presenteras ingående delar i den hydrogeologiska modellen (grundvattenbildning, hydrauliska domäner, inläckageberäkning, känsliga områden) och det prognostiserade injekteringsbehovet.

5.2.3 Utförd injektering

Injekteringen av Hagantunneln utfördes mellan km 0/470-1/584, se Figur 5-6. Observera att data endast gäller den ca 2 km långa sträcka som togs ut i samband med bergarbeten under 2001-2002. För de nordligaste 500 m som togs ut i ett tidigare skede finns inga tillgängliga data. I Tabell 7 redovisas inläckagekrav, injekteringsmetod samt utförda antalet skärmar uppdelad på olika delsträckor.



Figur 5-6. Illustration av Hagantunnelns hydrogeologiska modell och prognos av injekteringsbehov. Underst redovisas utförd injektering angivet i injekteringsmedelsåtgång per 100 meter.

Tabell 7. Sammanfattning av krav, injekteringsmetod samt verkligt utförda injekterings-skärmar för Hagantunneln. Längs sträckor med sporadisk (selektiv) injektering utfördes injektering om det sammalagda flödet från sonderingshålen överskred det ansatta gränsvärdet.

Längdmätning	Inläckagekrav [l/min, 100 m]	Injekterings- metod	Beslutsmetod/ gränsvärde	Antal skärmar
0/000-0/200	-	Sporadisk (selektiv)	Injektering om $q > 10$ l/min i sonderingshål	0
0/200-0/400	10	Sporadisk (selektiv)	Injektering om $q > 5$ l/min i sonderingshål	11
0/400-1/000	5	Systematisk	-	24
1/000-1/700	10	Sporadisk (selektiv)	Injektering om $q > 5$ l/min i sonderingshål	16
1/700- 2/500	-	Sporadisk (selektiv)	Injektering om $q > 10$ l/min i sonderingshål	0

Vid jämförelse mellan vår injekteringsprognos och utförd injektering så har vi bedömt att injektering krävs för en större del av området med bebyggelse medan den faktiska injektering enbart utfördes för en mindre del. Detta kan bero på en konservativ bedömning av det känsliga områdets utbredning då vi saknar information angående exempelvis grundläggning av byggnader. Det är även intressant att injektering utfördes i stor del av den hydrauliska domänen B fram till passage av bergartsgräns och förmodad deformationszon vid längdmätning ca 1/500. Injekteringsmängderna minskar dock successivt och kan till viss del bekräfta antagandet om att det är en svårinjekterad bergart. Den zon som prognostiserats vid längdmätning 1/500 visar dock inte på några anmärkningsvärda injekteringsmängder vilket tyder på att dess egenskaper är tätare än prognostiserat i fallstudien.

Uppföljning av inläckage visar att mellan sektion 0/480-1/000 var inflödet 4 l/min, 100 m medan det mellan sektion 1/000-1/650 var 19 l/min, 100 m och därmed uppfylldes inte kravet på 10 l/min, 100 m för denna delsträcka.

5.3 Namntalltunneln

Namntallstunneln är en 6 km lång järnvägstunnel som ingår i Botniabanans sträckning mellan Kramfors och Örnsköldsvik. Tunneln uppfördes mellan 2003 och 2008 med konventionell tunneldrivningsmetodik och består av en enkelspårig huvudtunnel och en parallell servicetunnel.

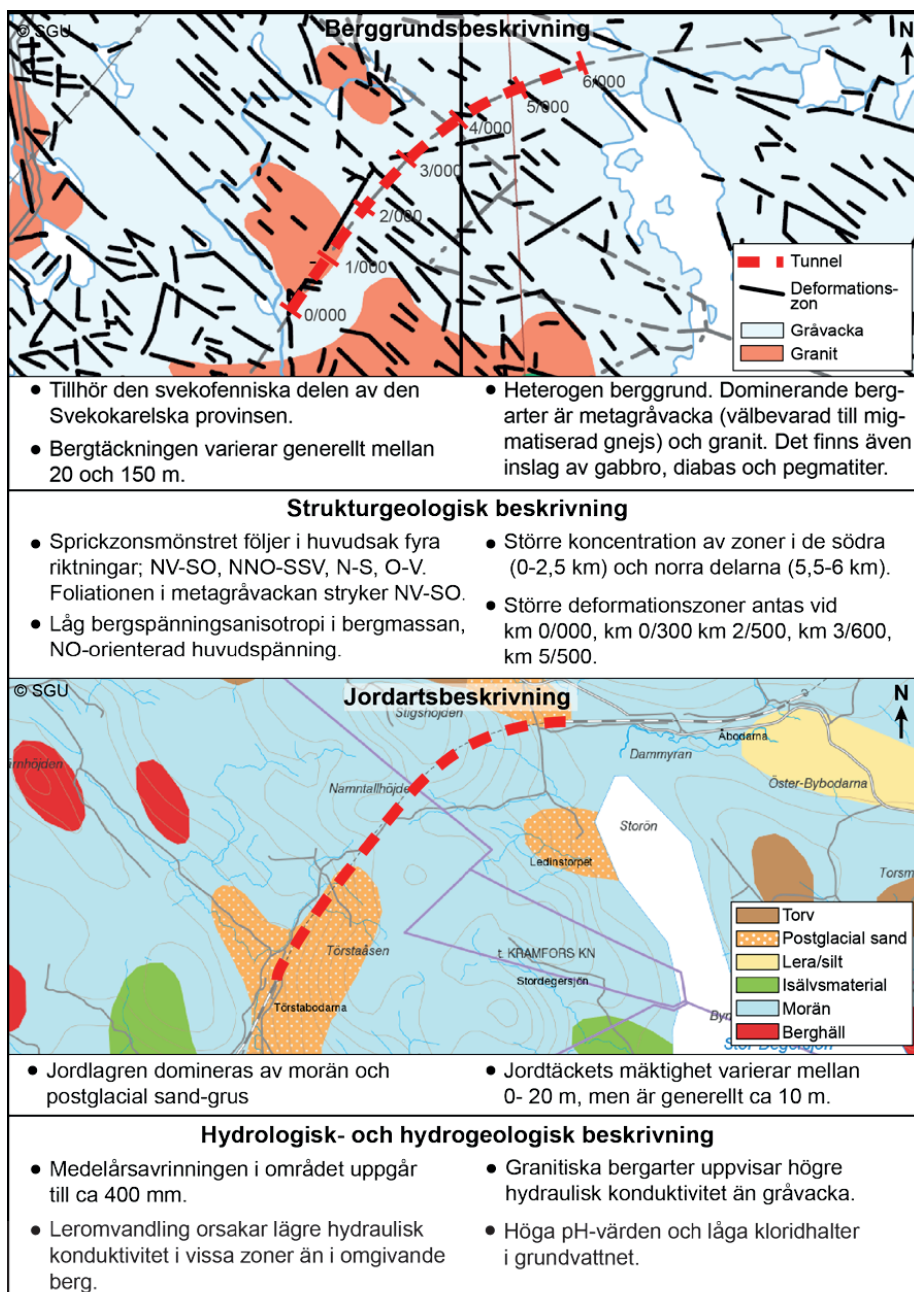
Tunneln löper genom ett storkuperat landskap med tätt liggande berghöjder. Området ovanför tunneln domineras av skogsmark med inslag av några mindre våtmarker och vattendrag. Berggrunden tillhör den Svekokarelska provinsen och domineras av metamorfa sedimentära bergarter och djupbergarter. Bergtäckningen uppgår maximalt till 172 m vid passering under Namntallhöjden som når nivån 400 m ö.h. Tunneln har vid det södra påslaget en inledande riktning mot NNO och böjer sedan av mot ONO.

Underlaget för fallstudien utgörs av geologiskt kartmaterial från Sveriges Geologiska Undersökning (Lundqvist et al. 1990; SGU 2014), hydrologisk data från SMHI (2014) och VISS (2014), samt information från förundersökningar från projektet som rapporterats i Stille och Andersson (2008). SKB har utfört undersökningar vid Gideå, några mil norr om Namntall, och information dessa undersökningar (Ahlbom et al. 1990) har också vävts in i följande analys.

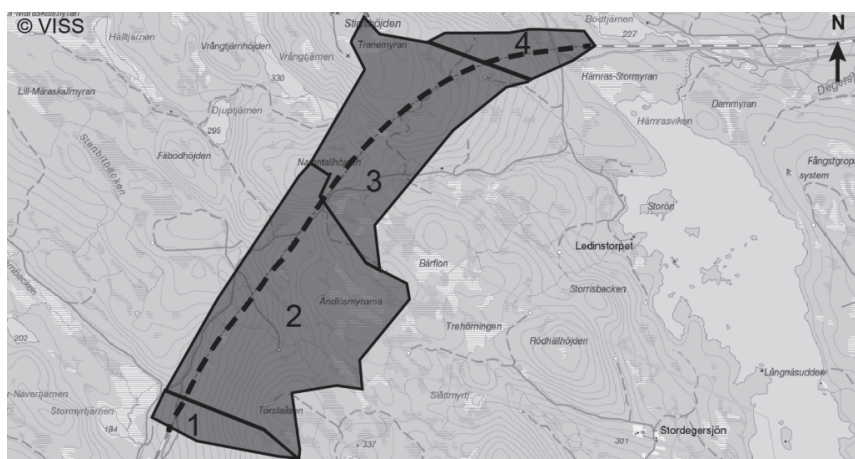
5.3.1 Förundersökningsprogram Namntall

Den hydrogeologiska områdesbeskrivningen för Namntalltunneln sammanfattas i Figur 5-7. Ingående delar i den hydrogeologiska modellen beskrivs nedan. Den omfattar beräkning av grundvattenbildning, indelning i hydrauliska domäner, inläckageberäkning och identifikation av känsliga områden.

Den potentiella grundvattenbildningen till berg har beräknats för fyra grundvattenbildningsområden som definierats utifrån topografiska förhållanden och skattad influensradie för grundvattenpåverkan runt tunneln, se Figur 5-8. Grundvattenbildningen inom respektive område beräknades utgående från procentuell andel av avrinning som bildar grundvatten för respektive jordart och motsvarar ca 10-140 l/min och 100 m tunnel.



Figur 5-7. Sammanfattning av en hydrogeologisk områdesbeskrivning för Namntalltunneln, med översikt av berggrundsgeologi, strukturgeologi, jordarter och hydrogeologi.



Område	Längdmätning		Tunnel- längd [m]	Area [ha]	Grundvatten- bildning [l/min]	Prognos inläckage (oinjekterat) [l/min]
1	0/000	0/375	375	40	270	150
2	0/375	2/750	2375	325	1840	835
3	2/750	5/000	2250	225	1060	540
4	5/000	6/000	1000	40	220	540

Figur 5-8. Skattad grundvattenbildning till berg för Namntalltunneln, indelat i fem grundvattenbildningsområden utifrån bedömt influensområde och topografiska förhållanden. För respektive område finns även en prognos på inläckage för oinjekterade förhållanden.

Berggrunden i området kan karakteriseras som relativt inhomogen till följd av stora variationer i bergarternas ursprung (sedimentärt, magmatiskt och metamorft ursprung), varierande grad av omvandling, samt förekomst av stora mängder gångbergarter. Spricksystemet i bergplintarna förväntas uppvisa ett relativt välkonnekterat spricksystem eftersom kartering visar att det finns två till tre sprickset som kan konnektera systemet, inklusive horisontella sprickor med stor lateral utbredning. Bergspänningsmätningar indikerar dessutom en låg spänningsanisotropi, vilket reducerar sannolikheten att endast en sprickorientering dominerar flödesbilden. Områden med metagråvackor kan dock kunna uppvisa en tydligare hydraulisk anisotropi i NO-SV-lig riktning till följd av foliation.

Utvärdering av bergets genomsläpplighet från brunnnsdata och borrhålstester (från Gideå) indikerar att berget har en relativt låg hydraulisk konduktivitet med lägst hydraulisk medelkonduktivitet i metagråvackorna. De granitiska

djupbergarterna uppvisade en generellt högre konnektivitet och högre hydraulisk konduktivitet än metagråvackorna.

NV-SO-liga strukturer dominerar längs tunnelsträckningen och i förundersökningen prognostiserades flera brantstående deformationszoner med uppsprucket, vittrat och leromvandlat berg. Leromvandling och lermineral i öppna sprickor har även identifierats i plintar utanför zonerna, exempelvis vid diabasgångar. Inom vissa sprickzoner och i samband med förekomst av diabasgångar förväntas därför vittrad och leromvandlad bergmassa förekomma som kan skapa hydrauliska barriärer.

Den ovan beskrivna konceptualisering kan sammanfattas med fyra hydrauliska domäner;

- A. *Metagråvacka*. Bedömd hydraulisk medelkonduktivitet är 2×10^{-8} m/s. Välbevarad metagråvacka uppvisar småsprickighet och skiffriighet, vilket saknas i metagråvacka som omvandlats till migmatiserad gnejs.
- B. *Granit/granitintrusioner*. Granitiska bergarter uppvisar högre sprickfrekvens och högre hydraulisk medelkonduktivitet än gråvackorna (ca 1×10^{-7} m/s).
- C. *Zon utan hydraulisk barriär*. Omfattar konduktiva deformationszoner utan tät zonkärna och uppspruckna bergartskontakter mellan olika bergarter. Bedömd hydraulisk medelkonduktivitet är 5×10^{-7} m/s.
- D. *Zon med hydraulisk barriär*. Omfattar konduktiva deformationszoner med tät zonkärna (t.ex. södra påslaget). Bedömd hydraulisk medelkonduktivitet är ca 1×10^{-7} m/s. Även brantstående diabasgångar tillhör denna typ av domän.

Inläckageberäkningen till en oinjekterad Namntalltunnel har tagit hänsyn till skattade medelkonduktiviteter för olika domäner och varierande grundvattentryck längs tunnelsträckningen. Enligt beräkningarna kan inläckaget förväntas variera mellan ca 4-150 l/min, 100 m. Av jämförelsen mellan grundvattenbildning och beräknat inläckage framgår att skattat inläckage till en oinjekterad tunnel generellt är lägre än tillgången på grundvatten, med undantag för norra påslaget där grundvattentillgången i ett längre perspektiv kan vara begränsande för inläckaget om området lämnas oinjekterat.

Känsliga områden längs Namntalltunneln har bedömts utifrån kartmaterial från VISS (2014) och Skogsstyrelsen (2014). Närmaste naturreservat ligger ca 6 km öster om tunneln och den närmaste nyckelbiotop ligger på ca 1 km avstånd från tunneln. På markytan längs tunnelsträckningen finns ett flertal områden med mindre vattendrag och våtmarker. Dessa naturtyper bedöms i många fall generellt ha en hög känslighet med risk för påverkan, men erfarenheter från byggda anläggningar visar att det endast i undantagsfall är hög känslighet, se kapitel 3.2.8. I detta fall har vi valt att inte klassa Namntalls våtmarksområden som potentiella skadeobjekt och de ligger därmed inte till grund för restriktioner i inläckage.

5.3.2 Injekteringsprognos Namntall

I bergplintarna (domän A och B) förväntas relativt välkonnekterade spricksystem med förekomst av två till tre sprickgrupper. Den ena av dessa (NO-SV) förväntas vara parallell/sub-parallell med tunnelorienteringen. En skillnad mellan gråvackorna (A) och granitiska bergarterna (B) är att i gråvackorna förmodas en högre förekomst av leromvandling och lermineral i sprickor. Detta ger en lägre genomsläpplighet i spricksystemet och förväntas försvåra inträngning av injekteringsmedel. Sektioner med granitiska bergarter eller inslag av granitiska bergarter förväntas uppvisa större andel öppna sprickor, högre sprickfrekvens och högre genomsläpplighet, vilket indikerar en bättre inträngning med konventionell cementinjektering än i gråvackorna.

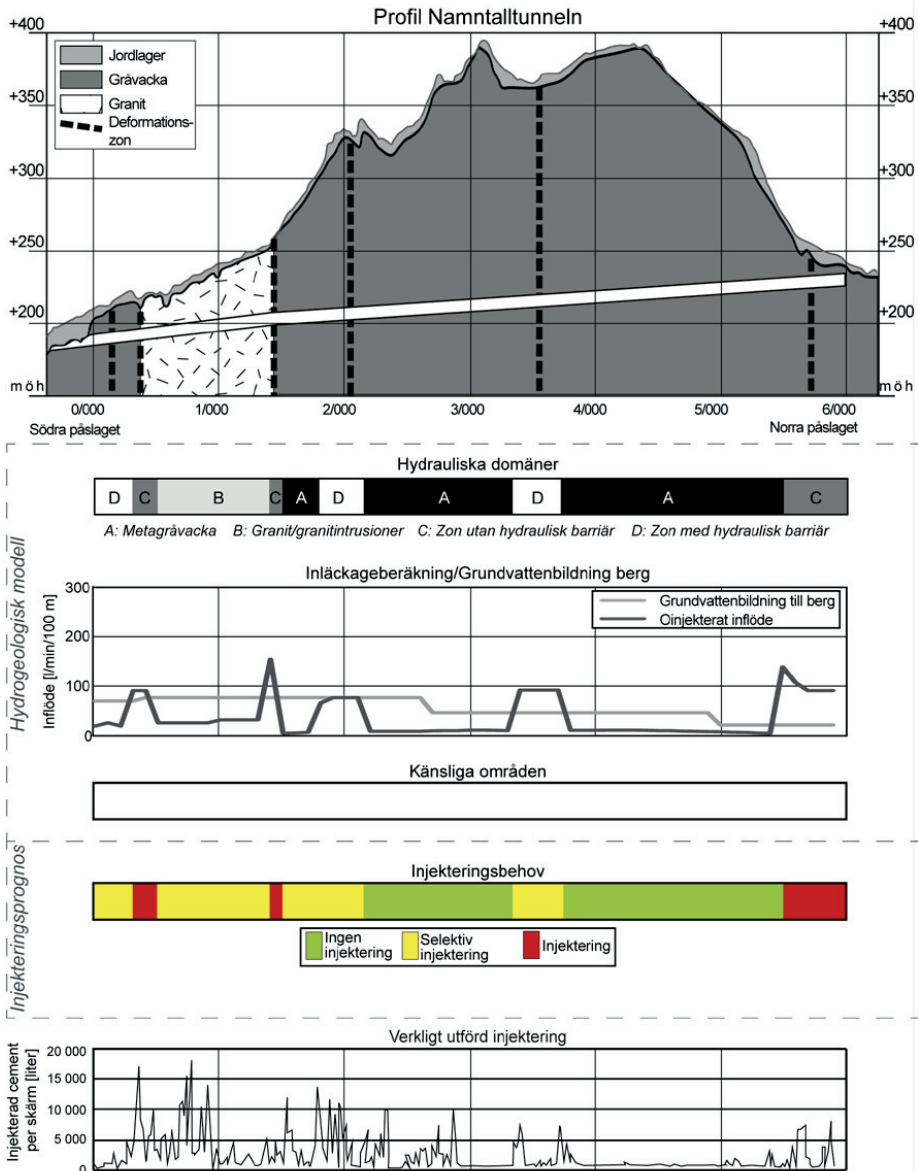
Domänerna C och D klassas som zon-domäner. Förutom deformationszoner med och utan tydliga tätkärnor ingår i dessa domäner även inhomogena områden med uppspruckna bergartskontakter och diabasgångar. I fokus är att representera zoner med två olika hydrauliska beteenden. Dels zoner *med* hydraulisk barriär (leromvandling eller uppsprickningsmönster som ger stora kontraster i genomsläpplighet), och dels zoner *utan* barriär (högre sprickfrekvens och/eller större sprickaperturer som ger en generellt hög genomsläpplighet). Generellt förväntas tätning krävas vid båda dessa typer av zoner, men de kan också av olika anledningar innebära besvärliga förhållanden för konventionell cementinjektering. Merparten av de prognostiserade deformationszonerna passeras dock en relativt tvär vinkel vilket underlättar möjligheten att korsa dem med injekteringsborrhål vilket ökar möjligheten att uppnå god täthet.

I Figur 5-9 presenteras ingående delar i den hydrogeologiska modellen och ett prognostiserat injekteringsbehov för Namntalltunneln. Det förekommer inga känsliga områden ovanför tunneln som indikerar injekteringsbehov. Dock har grundvattendräneringens storlek har satts i relation till andel av beräknad potentiell grundvattenbildning, och i domäner där dräneringens storlek förväntas vara stor i förhållande till mängden tillgängligt vatten ska injektering utföras. Injekteringsbehovet längs tunnelsträckningen har även bedömts utifrån förekomst av hydrauliska domäner med risk för höga inläckage, samt domäner där god injekterbarhet förväntas. I domän C förväntas stora inläckage och därför systematisk injektering, medan det i framför allt hydrauliska domän A föreligger ett mindre tätningsbehov. Totalt prognostiseras systematisk injektering längs 800 m, selektiv injektering längs 2300 m och ingen injektering längs 2900 m.

I Figur 5-9 redovisas även verkligt utförd injekteringsinsats i form av injekterade cementmängder per injekteringskärm.

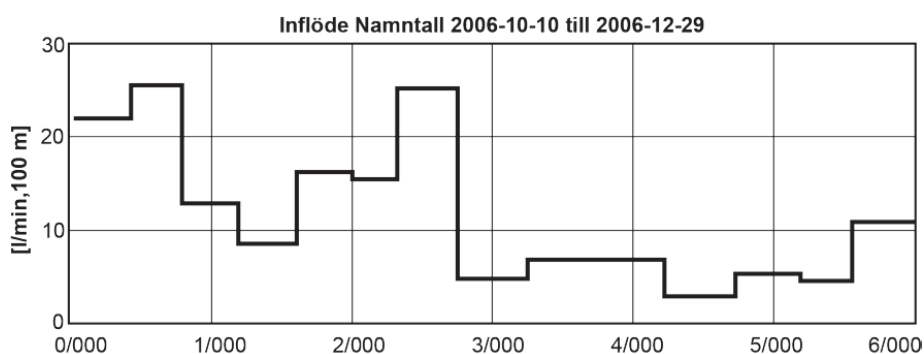
5.3.3 Utförd injektering

Inläckagekravet för Namntalltunneln blev i miljödomstolen satt till 12 l/min, 100 m. För att uppfylla kravet beslutades att genomföra traditionell, systematisk förinjektering längs hela tunnelsträckningen. Antalet injekterings- och sonderingshål anpassades efter bergmassans vattenförande egenskaper genom att utföra vattenförlustmätningar i sonderingshål i varje injekteringskärm. Borrplaner och gränsvärden justerades under entreprenaden och den slutgiltiga designen innebar att tre injekteringsklasser definierades och att gränsvärden för klasserna baserades på den maximalt uppmätta vattenförlusten i varje injekteringskärm, se Figur 1.



Figur 5-9. Sammanfattning av hydrogeologisk modell och prognos av injekteringsbehov för Namntalltunneln. I figuren redovisas även injekterade mängder per injekterings-skärm (från Stille B och Gustafson 2010).

Vid jämförelse mellan det i denna studie prognostiserade injekteringsbehovet och verkligt utförd injektering i projektet så tyder den stora mängd injektering som utfördes i de södra delarna att en stor del av den selektiva injekteringen förmodligen hade inneburit utförda skärmar. Dock ser det ut som att de områden som prognostiserats utan injekteringsbehov generellt hade liten injekteringsmedelsåtgång. Uppmätta inläckage från den injekterade Namntalltunneln (Figur 5-10) visar även att resulterande inläckage generellt blev lägre i de områden där injekteringsmedelåtgången var låg, jämfört i områden med hög åtgång. Detta indikerar att vissa områden var relativt täta redan innan injektering.



Figur 5-10. Totalt uppmätt inflöde till Namntalltunneln (spårtunnel och servicetunnel) under perioden 2006-10-10 till 2006-12-29 (från Stille B och Gustafson 2010).

5.4 Nygårdstunneln

Nygårdstunneln är ca 3 km lång järnvägstunnel på Norge/Vänernbanan belägen strax norr om Lödöse i Lilla Edets kommun. Tunneln öppnades för trafik 2008 och består av en dubbelspårig huvudtunnel och en parallell servicetunnel.

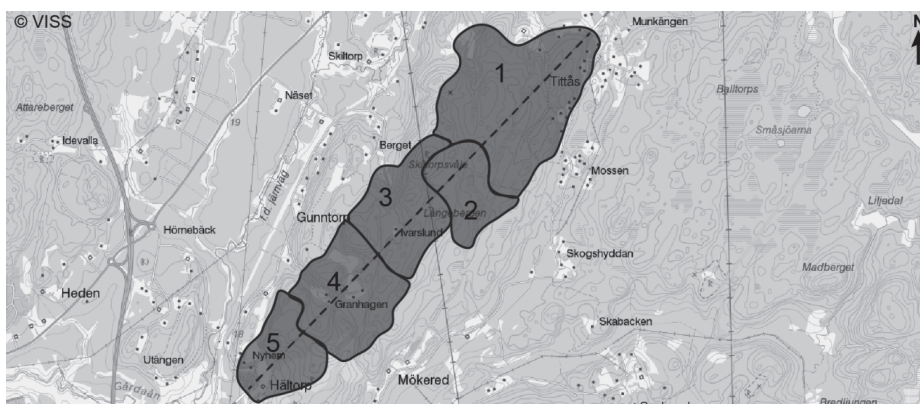
Tunneln löper genom en höjdrygg med NNO-SSV-lig utsträckning. Marken ovanför tunneln domineras av skogsmark med ett antal mindre våtmarksområden. Omkring påslagen förekommer ett antal fastigheter med egna brunnar och det förekommer även dricksvattenbrunnar uppe på höjdryggen. Bergtäckningen varierar mellan ca 7-60 m och berggrunden består gnejser som är typiska för Västsverige.

Underlaget för fallstudien utgörs av geologiskt kartmaterial från SGU (2014), hydrogeologisk data från SMHI (2014) och VISS (2014), samt information från förundersökningar som rapporterats i en geologisk och bergteknisk beskrivning utförd av Bergsäker Konsult AB (1999). För Nygårdstunneln saknas information om injekterade mängder och inläckagemätningar, och därmed saknas jämförelsen mellan prognos av injekteringsbehov och utförd injektering.

5.4.1 Förundersökningsprogram Nygårdstunneln

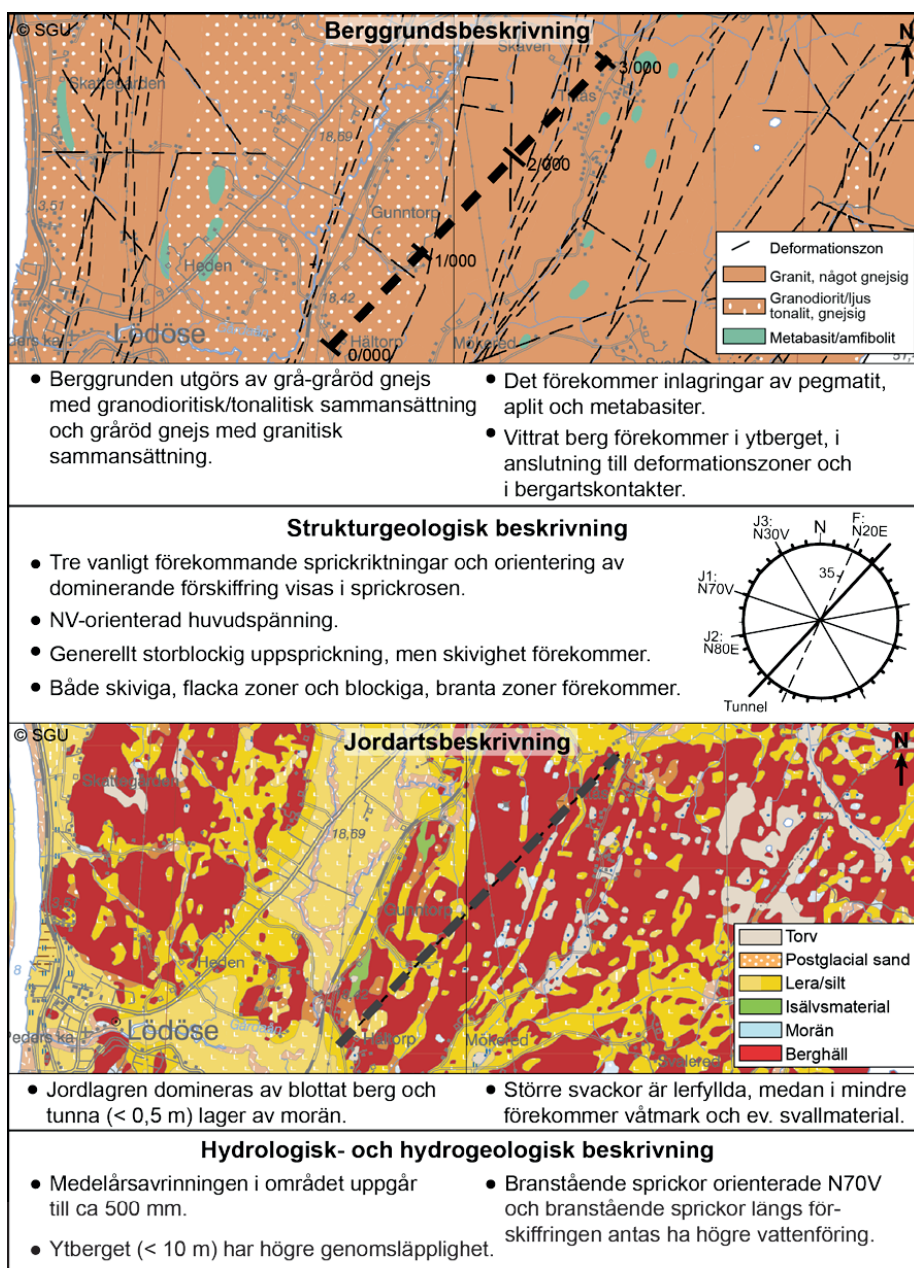
Den hydrogeologiska områdesbeskrivningen för Nygårdstunneln sammanfattas i Figur 5-12. Den hydrogeologiska modellen har omfattat beräkning av grundvattenbildning, indelning i hydrauliska domäner, samt inläckageberäkningar. Känsliga områden har identifierats i projektet inför miljödomsansökan och har utgjort underlag för att beskriva känsliga områden i denna studie.

Den potentiella grundvattenbildningen till berg har beräknats för fem grundvattenbildningsområden som definierats utifrån topografiska förhållanden (Figur 5-11). Den skattade grundvattenbildningen motsvarar ca 20-30 l/min, 100 m tunnel.



Område	Längdmätning		Tunnel-längd [m]	Area [ha]	Grundvatten-bildning [l/min]	Prognos inläckage (oinjekterat) [l/min]
1	434/560	435/550	990	60	290	143
2	435/550	435/920	370	20	95	52
3	435/920	436/420	500	30	145	83
4	436/420	437/130	710	35	170	141
5	437/130	437/590	460	20	100	123

Figur 5-11. Skattad grundvattenbildning till berg för Nygårdstunneln, indelat i fem grundvattenbildningsområden utifrån bedömt influensområde och topografiska förhållanden. För respektive område finns även en prognos på inläckage för oinjekterade förhållanden.



Figur 5-12. Sammanfattning av en hydrogeologisk områdesbeskrivning för Nygårdstunneln, med översikt av berggrundsgeologi, strukturgeologi, jordarter och hydrogeologi.

Berggrundens vattenförande egenskaper har utvärderats utifrån vattenförlustmätningar, brunnndata samt beskrivningar av spricksystemets vattenförande egenskaper i bergplintar och deformationszoner. Följande fem hydrauliska domäner har identifierats för Nygårdstunneln:

- A. *Homogen gnejs*. Omfattar båda typer av gnejs och karakteriseras av få inslag av inlagrade bergarter. Bedömd hydraulisk medelkonduktivitet är 2×10^{-8} m/s. I huvudsak förekommer två sprickgrupper, och spricksystemet antas ha ett 2D-dominerat flödessystem med de mest vattenförande sprickorna orienterade vinkelrätt mot tunneln.
- B. *Inhomogen gnejs*. Omfattar områden med blockig gnejs och hög andel bergartskontakter. Ett mer konnekterat spricksystem förväntas än i homogen gnejs, men vittrat berg (som t.ex. förekommer i kontakt gnejs/metabasit) ger en mer komplex flödesbild. Hydraulisk medelkonduktivitet skattad till 5×10^{-8} m/s.
- C. *Ytberg*. Områden där bergtäckningen understiger 10 m. Högre grad av vittring och öppna sprickor med stor sprickvidd. Hydraulisk medelkonduktivitet skattad till 5×10^{-7} m/s.
- D. *Skiviga zoner*. Vanligast förekommande zonerna är flacka, tunnskiviga zoner längs förskiffringen. Ofta smala (< 5 m). Vattenföring bedöms som måttlig och planparallella sprickor ger upphov till ett 2D-dominerat flöde. Hydraulisk medelkonduktivitet skattad till 1×10^{-7} m/s.
- E. *Blockiga zoner*. De branta, blockiga zonerna stryker vanligen vinkelrätt mot tunnelorienteringen. Helt eller delvis krossade partier kan förekomma, liksom leromvandling. Förväntas ha ett välkonnekterat 3D-flödessystem som kan ge måttlig till stor vattenföring. Hydraulisk medelkonduktivitet skattad till 5×10^{-7} m/s.

Huvuddelen av inläckagen till tunneln förväntas ske i anslutning till förekommande branta, blockiga svaghetszoner, samt i ytnära berg. I inläckageberäkningen skattas potentiellt inläckage till en oinjekterad Nygårdstunnel variera mellan 5-65 l/min, 100 m tunnel. I jämförelsen med tillgänglig mängd vatten, dvs. grundvattenbildning till berg, framkommer att grundvattenbildningen i ett längre perspektiv kan vara begränsande för inläckaget i de södra delarna av tunneln. Dock kommer dessa områden inte kunna lämnas oinjekterade med hänsyn till känsliga områden.

I den södra delen av tunnelsträckningen finns fastigheter grundlagda helt eller delvis på lera och utspritt längs tunneln förekommer fastigheter med egna dricksvattenbrunnar. Grundvattensänkningar i dessa områden kan leda till sättningsskador på befintliga fastigheter och påverkade brunnar. Det finns ett antal mindre våtmarker belägna längs tunnelsträckningen. Dessa räknas dock ej till potentiella skadeobjekt eftersom våtmarkerna i tidigare undersökningar indikerade att de är relativt täta i botten och utbytet mellan grundvatten i jord och berg kan antas vara begränsad i dessa.

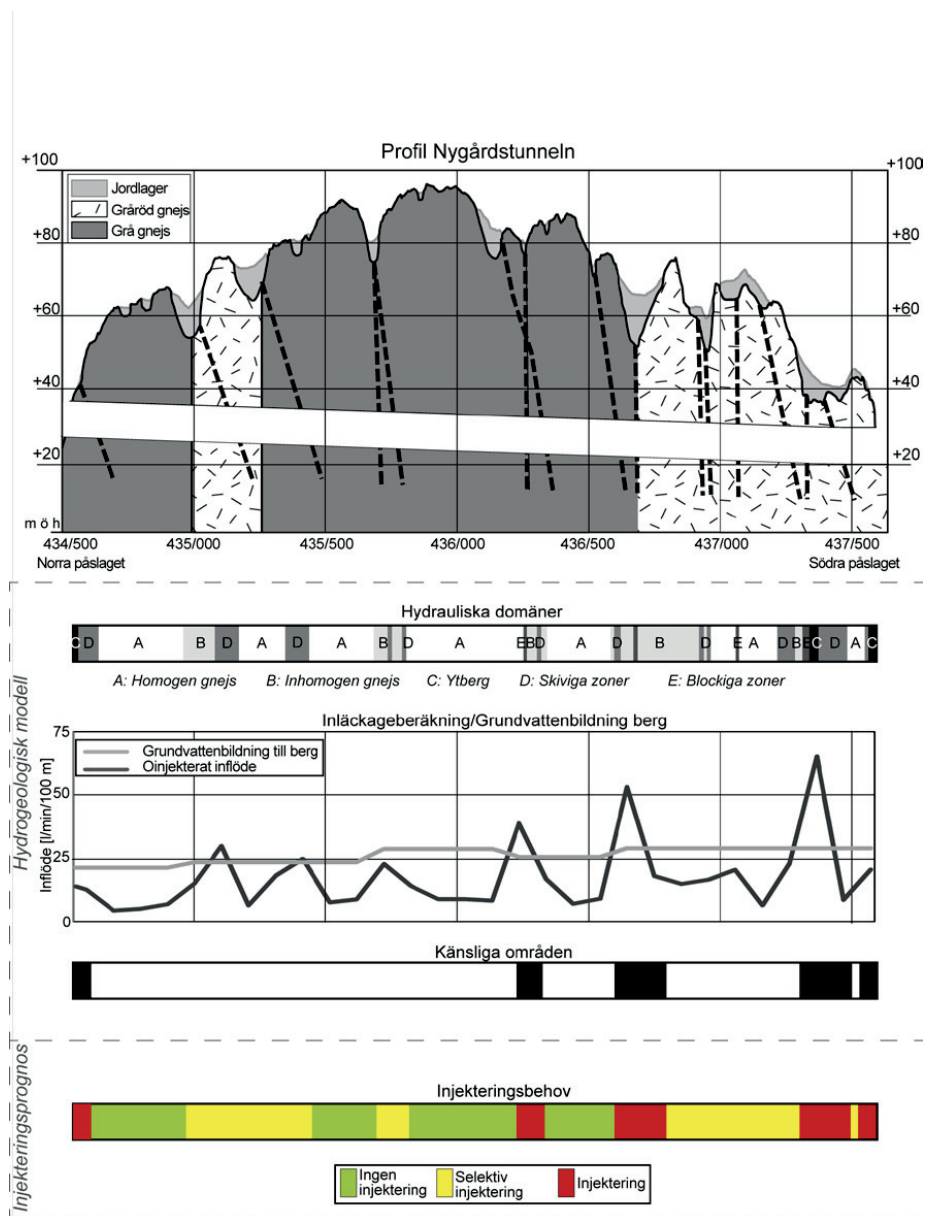
5.4.2 Injekteringsprognos Nygårdstunneln

I gnejsdomänerna (A och B) förväntas två sprickgrupper dominera vattenföringen, varav den ena är parallell med förskiffringen och även subparallell med tunneln. Spricksystemet förmodas vara ett 2D-dominerat flödessystem och injekterbarheten bedöms generellt som "normal" med beaktande att sonderings- och injekteringsborrhål bör orienteras så att de med stor sannolikhet korsar vattenförande sprickor. I inhomogen gnejs (domän B) förväntas en större andel vittringsmaterial och även ett mer frekvent uppsprickningsmönster. Detta leder till fler flödesvägar och en större andel 1D-flöden.

Ytberg (domän C) förmodas ha högre sprickfrekvens, större andel stora sprickor och även större andel leromvandlade sprickor än motsvarande bergarter på större djup. Injektering av ytberg bedöms vara nödvändigt med hänsyn till inläckage, men kan också innebära att en annan injekteringsstrategi än vid gnejsdomänerna ska tillämpas. I deformationszoner förväntas de blockiga zonerna (domän E) vara av större vikt att identifiera och täta än de flacka, skiviga zonerna (domän D). Injekteringsmetodiken kan dock behöva anpassas för att täta de olika typerna på ett effektivt sätt (borrhålsorientering, förväntad inträngning etc.).

I Figur 5-13 visas den hydrogeologiska modellen samt ett prognostiserat injekteringsbehov för Nygårdstunneln. I områden som betraktas som känsliga med hänsyn till fastigheter grundlagda på lera och dricksvattenbrunnar antas injektering krävas. I områden med passage av inhomogen gnejs och deformationszoner bör beslut om injektering grundas på sonderingar.

Injektering prognostiseras för 530 m, 1250 m avgörs genom selektiv injektering och för 1250 m prognostiseras inget injekteringsbehov.



Figur 5-13. Sammanfattning av hydrogeologisk modell och prognos av injekteringsbehov för Nygårdstunneln.

Det finns projekterade täthetsklasser/inläckagekrav för Nygårdstunneln som varierar mellan 2-5 l/min, 100 m tunnel i driftskede. Prognostisering av injekteringsbehovet i denna fallstudie har dock inte vägts in de projekterade täthetsklasserna i prognosen då det inte går att utesluta att dessa gäller både miljökrav och funktionskrav. Istället baseras prognosen på en mer generell beskrivning av känsliga områden och förekomst av hydrauliska domäner vilka indikerar områden med god injekterbarhet och områden med risk för höga flöden. Hur de projekterade, strikta inläckagekraven påverkar möjligheten att utföra behovsprövad injektering i Nygårdstunneln diskuteras dock i Kapitel 6.

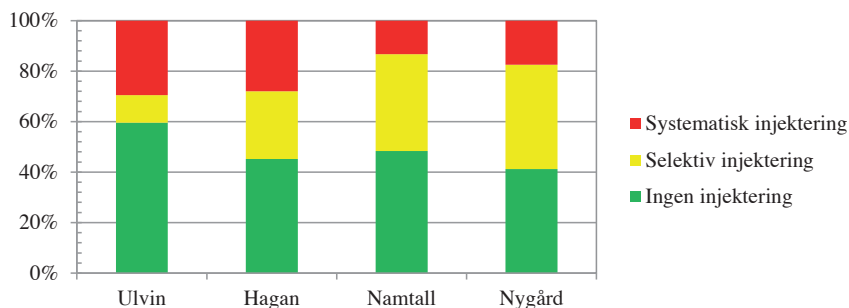
6 DISKUSSION

I avsnitten som behandlar metodik för förundersökningsprogram (Kapitel 3), injekteringsprognos (Kapitel 4) och tillämpning i fallstudier (Kapitel 5) har ett flertal frågeställningar presenterats vilka kräver ytterligare fördjupning. I detta kapitel diskuteras inledningsvis resultaten från fallstudierna. Därefter diskuteras förutsättningarna för implementering av en behovsprövad injekteringsmetodik, vilka förändringar som krävs i dagens utredning-, och undersökningsmetodik samt de främsta problemen/osäkerheterna som identifierats. Detta görs med utgångspunkt från strukturen i rapporten, från förundersökning och tillståndprocess till injekteringsprognos och injekteringsutförande.

6.1 Fallstudieresultat

Fallstudierna utgör en implementering av metodiken och visar hur förutsättningar för behovsprövad injekteringsdesign kan tas fram i ett inledande utredningsskede. Fallstudierna indikerar vilken fördelning av injekteringsinsatser (ingen-, selektiv-, eller systematisk injektering) som kan förväntas i huvudsak rurala tunnlar där en flexibel kravställning tillåts.

I Figur 6-1 redovisas en sammanställning av prognostiserat injekteringsbehov för de fyra fallstudietunnlarna. För tre av tunnlarerna uppskattas att längs 40-50 % av tunnelsträckningen skulle ingen injektering krävas. För Ulvin är den siffran 60 %. Andelen där det föreslås behovsprövad injektering varierar mellan 10-40 % medan delar som antas kräva systematisk förinjektering är mellan 13-30 %. Siffrorna bygger på en del antaganden, särskilt gällande tillåtna inläckage där vi för de svenska tunnlarerna har gjort avsteg från specificerade krav i projektet och tillåtit en mer differentierad kravsättning (se nedan). Fallstudierna visar ändå på potentialen som finns inom behovsprövad injektering.



Figur 6-1. Fördelning av prognostiserat injekteringsbehov för de fyra studerade fallstudierna.

Viktigt att poängtera är dock att vissa delar i de hydrogeologiska modellerna och injekteringsprognoserna innehåller stora osäkerheter till följd av begränsningar i underlagsmaterialet. Inläckageberäkningar och indelning i hydrauliska domäner baseras bland annat på skattade hydrauliska konduktiviteter. Men det saknas ofta information som är relevant för skattning av hydraulisk medelkonduktivitet. I fallstudierna har främst brunndata och resultat från vattenförlustmätningar använts. Även grundvattenbildningen till berg uppfattades som svår att skatta till följd av begränsad information om kontakt mellan jord och berg och värden på grundvattenflöden i jord som infiltreras ned i berg (vid både tunna och mäktigare jordlager).

I fallstudierna var det tydligt att möjligheten att implementera behovsprövad injektering i hög utsträckning påverkas av inläckagekravens utformning. För de svenska tunnarna bedömdes injekteringsbehovet endast utifrån förekomst av känsliga områden, områden med risk för höga inläckage och områden med bedömd god injektebarhet. Valet att inte ta hänsyn till befintliga täthetsklasser berodde på att den befintliga kravformuleringen inte överensstämde särskilt väl med den mer differentierade kravsättning på inläckage som är önskvärd vid behovsprövad injektering. I fallet med Nygårdstunneln var de befintliga inläckagekraven mycket strikta och för att uppnå dessa behövs troligtvis den strategi som faktiskt utfördes för projektet, dvs. systematisk förinjektering med åtgärder för dropp tätning. I fallstudien genomfördes istället en bedömning av injekteringsbehov som baserades på ett mer varierande inläckagekrav, där strikta krav enbart förelåg i områden med potentiella skadeobjekt bestående av fastigheter.

6.2 Tillståndsprocess och kravformulering

Nivåer för tillåtna inläckage som anges i svenska miljödomsansökningar är relevant att ta upp i en diskussion om behovsprövad injektering. Vid jämförelse av krav ställda på de referenstunnlar som ingått i denna studie så är det generellt strängare och snävare krav för de svenska projekten jämfört med de norska projekten. Ingen delsträcka i de svenska fallstudierna tillät ett inläckage större än 12 l/min/100 m tunnel. I de norska projekten fanns däremot ett spann från 5 l/min/100 m tunnel till sträckor utan krav. Detta väcker frågan om man i Sverige inte skulle kunna utnyttja den hydrogeologiska kunskapen och differentiera inläckagekraven mer för tunnlar. I detta arbete har enbart fyra tunnlar studerats och för att få ett bättre underlag till en analys och jämförelse av kravformuleringar för tillåtet inläckage bör ett större antal tunnlar ingå. Förslagsvis inkluderas tunnlar från de nordiska länderna med likvärdiga geologiska förutsättningar.

Tillståndsprocessen sker idag i ett tidigt skede när det generellt finns ett begränsat underlag i form av utförda undersökningar. Detta kan leda till stora osäkerheter i prognoser av omgivningspåverkan, och det finns en risk att osäkerheterna hanteras med konservativa antaganden vilket leder till slutresultat på "säkra sidan". En utredning av kravformuleringar för tillståndsansökan om vattenverksamhet ingår inte i denna studie. För att möjliggöra en utveckling mot behovsprövad injektering har det dock identifierats ett behov av att frångå konservativa antaganden och anta en mer differentierad kravsättning för inläckage till tunnlar. Främst handlar det om att behålla strikta krav i känsliga områden, men att i större grad undersöka möjligheterna att sänka kraven i mindre känsliga områden. Exempelvis kan ett projekt söka för en totalsumma för tillåtet inläckage för en hel tunnel, men inom projektet ställa striktare krav på entreprenören vid känsliga områdena. Hanteringen av krav skulle därmed kunna ändras från att vara försiktig och på "säkra sidan" till att istället reflektera en tålighet, samt ange hur känsliga objekt ska skyddas.

En studie av Werner et al. (2012) har visat att det kan vara stora skillnader mellan prognoser för påverkansområdets utredning och verkligt utfall. Ofta har det visat sig att påverkan på grundvattennivåer från tunnelprojekt blir lägre än prognostiserat under planeringsstadiet. Svårigheter att förutsäga

konsekvenser av inläckagen medför troligtvis att täthetskraven blir onödigt högt ställda, vilket påverkar behovet av tätningsarbeten. Påverkansområdets utbredning bör utgå från rimliga och välgrundade analyser och det finns exempel på så väl överskattningar (vilket för med sig onödigt omfattande avgränsningar av sakägarkretsen) som snäva och begränsade område (medför risk för påverkan utanför ansatt påverkansområde och därmed överskridande av miljödömdom). Alltför snäva avgränsningar av påverkansområdet kan även innebära onödigt högt ställda täthetskrav då en större mängd grundvatten egentligen finns att tillgå för vattenbalansstudier.

Vid bedömning av täthetskrav är potentiella skadeobjekt en viktig fråga. Till potentiella skadeobjekt hör exempelvis byggnader i sättningssänsliga jordar, brunnar och naturmiljö. För sättningssänsliga jordar så finns det generellt små marginaler gentemot att tillåta större inläckage och det krävs ofta strikta krav. I vissa områden är risken för sättningar stor även vid mycket små inläckage vilket leder till höga täthetskrav som kan vara svåra att uppnå. I sådana fall kan infiltration med begränsade infiltrationsflöden för upprätthålla portrycken vara ett kostnadseffektivt alternativ. Gällande närliggande brunnar så krävs utredning för att bedöma konsekvensen av en grundvattensänkning i varje enskilt fall. Det kan dock finnas fall där det är mer ekonomiskt att ersätta påverkade brunnar med en ny brunn, om möjligt, jämfört med att utföra omfattande tätningsinsatser.

För påverkan på naturmiljöer så anges det i en utredning av Statens Vegvesen (2003) att det främst är våta naturmiljöer med naturligt hög grundvattennivå, såsom myr och sumpskog, som påverkas av en grundvattenavsänkning. Detta motverkas dock till viss del att det är en låg mobilitet på grundvattnet och det vanligtvis är ett lågt utbyte mellan jord och berg i dessa områden. Detta bör undersökas i projekten för att minimera onödigt höga täthetskrav. I övrigt visar utförda undersökningar att effekten av en avsänkning runt en tunnel främst visar sig i ökade nivåfluktuationer och att effekten av torrår blir mer påtaglig. Vegetationen visade sig till stor del inte vara grundvattenberoende, utan att det är markvattnet i den omättade zonen som är viktig.

Högre tillåtna inläckagenivåer påverkar tekniska installationerna och förstärkningssystemen i tunneln. Enligt Lindblom (2009) så utgör inläckande vatten den dominerande orsaken till ett ökat underhållsbehov för tunnlar.

Därför måste inläckagefrågan även kopplas mot vilket inklädnadsalternativ som väljs samt vilka tekniska krav som ställs på tunnelmiljön. För att kunna använda mer differentierade inläckagenivåer är det även viktigt att inklädnadssystemet för vatten- och frostsäkring är tillräckligt robust för att kunna hantera kvarstående inläckage. Med beaktande av att de funktionskrav som gäller för spår- och vägområde i Sverige är 0,05 ml/minut så måste inklädningslösningar projekteras. En metod som använts i Centraleuropa och även i Ulvintunneln är en dränerad, motgjuten lining. Den motgjutna liningen syftar till att uppnå de funktionskrav som ställs, och förinjektering utförs för att hantera miljökraven.

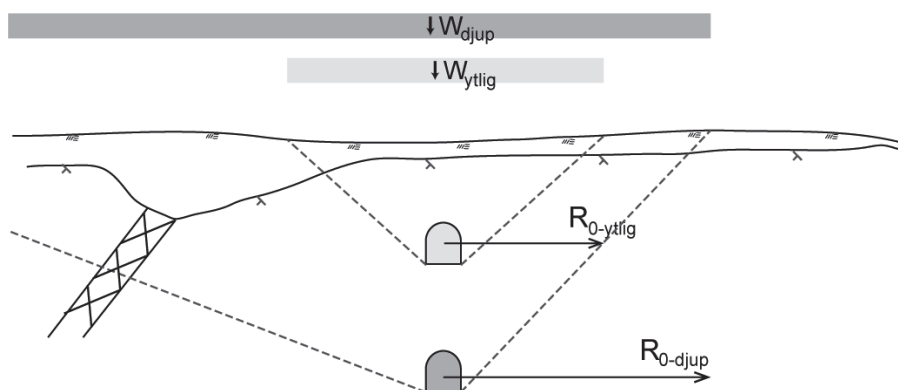
6.3 Hydrogeologisk modell

Behovsprövad injektering kräver ökad förståelse för bergets hydrauliska beteende eftersom det är viktigt att veta var och i vilken omfattning inläckage uppstår. En problematik som måste tas hänsyn till är osäkerheter som kan uppstå till följd av att det ofta är skillnad i bergvolymsskala mellan förundersökningsdata och tunnelinläckage från färdig anläggning. De vanligaste undersökningarna, t.ex. vattenförlustmätningar och slug-test undersöker egenskaper lokalt i bergvolymen. Dessa egenskaper förstoras därefter upp till att gälla i en "tunnelskala".

En parameter som är problematisk att skatta i uppskalning från borrhål till tunnel är spricksystemets konnektivitet. Denna parameter styrs främst av sprickorientering (sannolikheten att sprickor korsas), spricklängd (hur uthållig en spricka är), sprickfrekvens (förekomst av sprickor) men även hur öppna sprickplanen är (sannolikhet för att sprickorna korsas i öppna punkter). Konnektiviteten är en viktig parameter i beskrivning av en bergmassas hydrauliska konduktivitet. Flödesvägar och därmed tillgången till vatten styrs av sprickors konnektivitet vilket resulterar i en hydraulisk konduktivitet. Som visats av Gustafson (2009) så är medelvärdet av den hydrauliska konduktiviteten skalberoende. För att erhålla bättre underlag på den hydrauliska konduktiviteten bör hydrotesterna omfatta en större bergvolym. Det kan göras som provpumpning eller mellanhålstester alternativt vattenförlustmätningar över längre tid. Resultatet ger mer relevanta värden då det även inkluderar inverkan från konnektiviteten mellan sprickor.

En ytterligare svår effekt att hantera är den ökade grundvattenbildning som sker vid en grundvattenavsänkning runt en tunnel. Influensområdet (påverkansområde) för grundvattenbildningen ökar och det kan t.ex. innebära att den når en hydraulisk gräns. Om detta t.ex. är en vattenförande zon eller en mer genomsläpplig friktionsjord så innebär detta att tillgången på vatten är större än vad som prognostiserats och effekterna av avsänkning runt tunneln blir mindre. Om influensområdet däremot når en negativ hydraulisk gräns i en riktning kan det lokalt ge en stor avsänkning samtidigt som influensområdets storlek ökar betydligt i en annan riktning. Detta innebär att det är en svår uppgift att prognostisera exakt utbredning av influensområdet runt en tunnel.

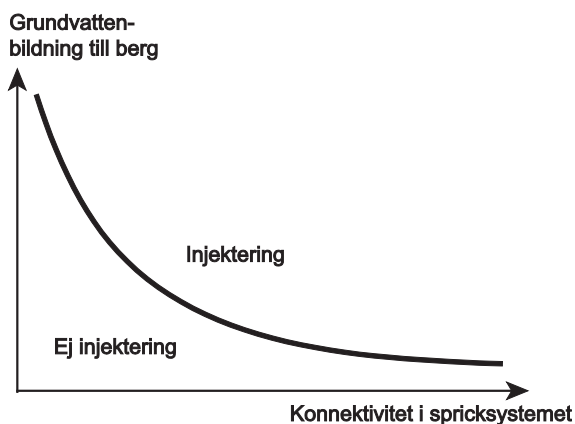
Det innebär att för en relativt ytligt förlagd tunnel som har kontakt med en begränsad bergvolym är risken för en lokal grundvattenpåverkan betydligt större än för en djupare förlagd tunnel vars spricksystem har betydligt större sannolikhet att vara konnekterad med hydrauliskt positiva gränser och därmed en större tillgång på grundvatten, se Figur 6-2. Inläckagen i det fallet kan tillåtas vara högre utan att oacceptabel grundvattenpåverkan sker.



Figur 6-2. Schematisk illustration av influensområden för ytlig, respektive djupare förlagd tunnel där den djupare tunneln har kontakt med en positiv hydraulisk gräns.

Injekteringsbehovet styrs bl.a. av grundvattenbildning till berg (tillgång till vatten) samt spricksystemets konnektivitet. Detta samband redovisas schematiskt i Figur 6-3. I de fall det är en begränsad grundvattenbildning samt en begränsad konnektivitet föreligger inget injekteringsbehov och tvärtom. Mer problematiska förhållanden utgörs t.ex. av en begränsad grundvattenbildning men med en god konnektivitet. Detta kan uppstå vid tät bottenmorän

överlagrande en sprickrik berggrund. I detta fall kan påverkansområde bli stort och man måste analysera vilka konsekvenser detta kan medföra.



Figur 6-3. Schematiskt injekteringsbehov som funktion av grundvattenbildning till berg och spricksystemets konnektivitet (utan hänsyn till omgivningspåverkan).

6.4 Förundersökningar

För att få underlag till en behovsprövad injekteringsstrategi föreslås förändringar i dagens konventionella utformning av förundersökningar och tolkningar av data. För att testa hydraulisk konduktivitet i berget är vattenförlustmätningar i 3 m långa sektioner, ofta under 2-5 min, den vanligaste metoden. Detta ger som ovan nämnts ett test av sprickornas egenskaper närmast borrhålet. För att få en bättre bild av den hydrauliska konduktiviteten i större skala bör tester i längre mätsektioner och under längre tid utföras som ett komplement. Andra alternativ på tester som möjliggör undersökningar i större skala är tryckkuppbyggnadstest samt interferenstester mellan borrhål.

Det är viktigt att ställa kostnaden av undersökningarna mot nyttan. Exempelvis så kanske vattenförlustmätningar inte behöver utföras i samtliga kärnborrhål i ett projekt. Kostnaderna för detta skulle istället kunna användas på ett mer optimalt sätt med andra tester som ger mer information om den storskaliga hydrogeologin (t.ex. pumptest). Kostnader för att utföra vattenförlustmätningar med hög noggrannhet i 3 m långa sektioner hamnar snart i storleksordningen ett par 100 000 kronor och man bör i varje enskilt fall avgöra nyttan av detta och fundera på optimalt utnyttjande av förundersökningsresurserna. Ett alternativ

till att utföra sektionsvisa vattenförlustmätningar är att enbart utföra hel- och halvhålstester.

Egenskaperna hos jordlagren (oftast morän) som ligger närmast bergytan undersöks generellt i liten utsträckning. För att få en ökad förståelse av grundvattenbildningen till berg och tillgängligt grundvatten är egenskaperna för jordlagren dock viktiga. De parametrar som främst bör undersökas är sammansättning och hydraulisk konduktivitet. För att få en övergripande bild över moränens sammansättning är det viktigt att man ser till områdets geologi där man kan få information från de karteringar som SGU utför. Moränens egenskaper beror t.ex. av hur den bildats och berggrundens sammansättning i området och nivå jämfört med högsta kustlinjen (om moränen har utsatts för svallprocesser). I SGUs beskrivningar till jordartskartor (små- och storskaliga) finns i många fall jordlagerföljder och beskrivning av moräners sammansättning som ger bra underlag för bedömning av kontakten mellan jord och berg.

För att testa egenskaper i övergången mellan jord och berg bör provpumpningar i bergbrunnar med mätningar i grundvattenrör i friktionsjorden på berg kunna nyttjas. Dock kräver både detta och t.ex. interferenstester en noggrann planering för att placera brunnar och hål så att efterfrågad data kan erhållas.

Om lagret närmast berg överlagras av mäktiga jordlager är det svårt att kunna utföra provtagningar. En metodik som kommit de senare åren är Sonic-borring vilken innebär att man vibrerar ner ett rör i vilket man kan ta upp ett i det närmaste ostört prov. Metoden har vissa begränsningar i kompakta jordar och utförs generellt med 65 mm rör vilket innebär att större fraktioner inte kommer med. Detta är dock ingen teknikbegränsning utan enbart en maskin- och utförandebegränsning vilken kan utvecklas. I övrigt är de vanligaste metoderna att man blåser eller spolat upp jordmaterial och därefter gör siktanalyser. Det kan dock vara problem med att säkerställa att samtliga fraktioner finns med, särskilt finmaterialet. En utveckling skulle kunna vara att man samlar in allt uppspolat material i t.ex. containers eller bassänger där man låter det sedimentera. Därefter utförs siktanalyser på det sedimenterade materialet.

6.5 Uppföljning och utvärdering

Behovsprövad injektering innebär generellt att det kommer att finnas fler alternativ att hantera i beslutsprocessen under tunneldrivningen jämfört med en kontinuerlig injekteringsprocess. Förutom beslut angående injekteringsklasser kommer det att tillkomma krav på beslut om injektering ska utföras. Detta bör hanteras genom tydliga observations- och beslutskriterier under drivning.

Generellt gäller att desto färre undersökningar som utförts i tidiga skeden desto större krav på undersökningar och mätningar under drivning bör finnas. Detta beror på att en viss nivå av tillförlitlighet i prognoserna bör uppnås och om det utförts få undersökningar finns det oftast större kvarstående osäkerheter i byggskedet. Beslut om omfattning och när i projekt som undersökningar ska utföras är inget som denna rapport behandlar men det är viktigt att kunna hantera de osäkerheter som finns.

Det är viktigt att det för varje mätning som utförs under drivning finns definierat vad som är ett förväntat beteende och när avvikelsen är så stor att anpassning krävs. Utifrån observationerna ska det också finnas en tydlig koppling till åtgärder. Vid beslut om vilka undersökningar som ska utföras under drivning ska en analys finnas färdig som underlag för en bedömning av kostnad/nytta av olika undersökningar för möjliga situationer i projektet. Kostnaderna för undersökningarna inklusive eventuell kostnad för stillestånd under tiden undersökningarna utförs bör vara lägre än kostnaderna för en injekteringsskärm för att kunna motivera att de utförs. Denna analys kan även inkludera en värdering av nyttan med undersökningarna, exempelvis genom beräkningar av datavärdesanalys och nyttan av undersökningar som t.ex. presenterats av Zetterlund (2014).

Hur mycket som undersöks samt vilka parametrar som undersöks under drivning bör kopplas till vilka osäkerheter som finns och vilka undersökningar som utförts i förundersökningsskedet. I Tabell 8 redovisas en princip för bedömning av osäkerhet (konfidens) från förundersökningar och utgående från detta förslag på hur man följer upp detta under drivning av tunnel. Detta är ett principförslag som är till för bedömning av konfidens. Den bör vidareutvecklas, t.ex. genom statistiska metoder.

Tabell 8. Underlag för bedömning av osäkerhet i förundersökningsskedet och exempel på uppföljning under drivning vid behovsprövad injektering.

Bedömd konfidens för prognos	Exempel på underlag	Förslag på undersökningsnivå under drivning
Mycket trolig	Undersökningar i flera olika skalor	Uppföljning av inläckage Grundvattennivåmätningar Utvärdering av utförd injekteringsskärm
Trolig	Begränsade undersökningar i en eller flera olika skalor	Sonderingshål med MWD alternativt hydrauliska mätningar – på sträckor med inläckagebegränsningar
Vag	Undersökningar i en skala	Sonderingshål i injekteringsskärmslängd med hydrauliska mätningar – på sträckor med inläckagebegränsningar
Liten	Inga eller mycket begränsade undersökningar	Långa undersökningshål med hydrauliska mätningar – på sträckor med inläckagebegränsningar

Fotnot: De angivna förslagen på undersökningsnivå innebär att man bör utföra undersökningar i ovanliggande konfidensnivåer. T.ex. om man har bedömt konfidensen för prognosen till Vag bör undersökningsnivåer för Vag, Trolig och Mycket trolig ingå.

6.6 Injekteringsmetodik

Huruvida behovsprövad injektering är ekonomiskt fördelaktigt i ett tunnelprojekt bör klargöras i ett tidigt skede. En sådan bedömning kan baseras på en uppskattning av förväntade injekteringssinsatser för att uppfylla täthetskraven. Att kunna reducera tättningsinsatserna i lågkonduktiva, sprickfattiga områden är en förutsättning för få en lönsam behovsprövad injektering och i berganläggningar med mindre strikta inläckagekrav kan detta innebära att tätningen begränsas till större vattenförande strukturer. En viktig förutsättning för att kunna avstå från injektering i vissa områden är att kunna visa att sannolikheten att klara täthetskraven är tillräckligt hög, vilket hänger ihop med risken för kostnadsöverskridningar.

Ökade möjligheter att anpassa injekteringen till det faktiska behovet ges genom att definiera olika injekteringsklasser och låt dem som motsvarar olika strategier (åtgärder) anpassade till både täthetskrav och förekommande geologiska förhållanden. Detta synsätt är även något som eftersträvas vid implementering av observationsmetoden. Exempel på en injekteringsklass kan

vara att i områden med prognostiserad stor tillgång till vatten samt begränsningar i inläckage eller låg konnektivitet utföra flera injekteringsomgångar och ha krav på en uppnådd täthet i kontrollhål innan fortsatt drivning får ske.

I en sektion där injektering krävs kan det vara fördelaktigt att exempelvis utföra en injekteringsomgång som fokuserar på de mest konduktiva sprickorna (färre hål, styvare bruk). Sedan utförs en skärm som fokuserar på de mindre konduktiva sprickorna (tätare hålplacering och fintättningsbruk). Detta istället för att injektera så många hål som möjligt i en skärm. Man bör i dessa skärmar även studera möjligheterna att anpassa stick och stickvinkel för att kunna träffa de dominerande sprickorienteringarna samt utföra de olika rundorna med olika stick. Resultat från injektering i Hallandsåstunneln presenterade av Funehag (2007) visar exempelvis att reduktion av den hydrauliska konduktiviteten i en injekteringsomgång som mest uppgick till 10-50 gånger det högsta värde som uppmättes innan injektering. Genom att utföra en design som anpassas efter uppnådd täthet kan det vara möjligt att efter två till tre rundor minska den hydrauliska konduktivitet med en faktor 100-1 000. Högre reduceringsfaktor förutsätter ett genomsläppligt berg där injektering utförs i flera omgångar.

6.7 Ersättning och kontrakt

Vid införande av behovsprövad injektering är det viktigt att man upprättar ersättningsformer som är anpassade för metodiken. Detta innebär att man bör upprätta mer specifika ersättningsposter för injekteringsarbetena där det finns möjlighet att reglera varje enskilt moment som kan krävas i en besluts- och utförande process. Detta kan t.ex. innebära att ersättning ges för:

- Sonderingsborrning
- Hydrauliska tester i sonderingshål
- Detaljerad ersättning för samtliga ingående moment i injekteringen, såsom:
 - Etablering av borrh- respektive injekteringsrigg
 - Injekteringsborrning
 - Injekteringshål
 - Injekteringsmedel
 - Injekteringstid

- Kontrollhål
 - Mätningar i kontrollhål
 - Kompletterande hål/kompletterande omgång
- Väntetid

Detta är liknande de ersättningsformer som är vanliga i norska projekt. Utgående från detta så kan man under projektet besluta om större injekteringsinsats i de områden som det verkligen behövs. Det är dock viktigt att kontrakt utformas så att man undviker spekulation och "taktisk" prissättning med beaktande av injekteringsomfattning. Utgångspunkten bör vara att beställaren står för risker gällande förutsättningar (geologi) och entreprenören står för risker gällande utförandet och kvalitet.

En studie genomförd av Lundman (2011) visar att det förekommer stora variationer mellan slutlig och kontrakterade kostnader för tätningståtgärder även i projekt med kontinuerlig injektering. Detta demonstrerar en generell svårighet att skatta mängden injektering (och dränerings- och frostinstallationer) under planeringsstadiet, och denna är svår att komma ifrån oavsett om kontinuerlig eller behovsprövad injektering utförs. En minskning av osäkerheten för kostnaderna skulle kunna vara att välja en inklädnadslösning som tar hand om inläckande vatten och minimerar underhållet, t.ex. en motgjuten lining.

7 SLUTSATSER

Denna rapport presenterar en strukturerad metodik för implementering av behovsprövad injektering i tunnelprojekt. Analyser av fallstudier genomförda med den framtagna metodiken tyder på att behovsprövad injektering kan användas inom svenskt tunnelbyggande i högre utsträckning än vad som tillämpas idag (vid tätning för att uppfylla miljökrav).

En grundläggande strategi vid behovsprövad injektering är att injekteringen ska utföras där den gör som mest nytta och där effekten av tätningen är som störst. Detta synsätt baseras på att det finns många exempel på tunnlar där ej injekterade sträckor (i bra bergförhållanden) läcker mindre än delsträckor i sämre berg med omfattande injektering. Tätningsinsatserna ska koncentreras till områden som är mer genomsläppliga, alternativt är känsliga för en påverkan av grundvattennivån. Inom övriga områden kan ett lokalt högre inläckage tillåtas.

Lämpliga förhållanden för behovsprövad injektering finns i tunnlar där det är möjligt att tillämpa differentierade inläckagekrav och där större delen har krav i storleksordningen större än 5-10 l/min/100 m tunnel. Differentierade inläckagekrav innebär att det i högre grad än vad som tillämpas idag finns olika krav på täthet längs tunneln, t.ex. att i områden med liten risk för påverkan tillåta relativt stora inläckage och ha strikta krav i känsliga områden. För tunnlar som byggs i områden med övervägande andel strikta miljökrav kommer dock kontinuerlig förinjektering förmodligen fortsätta vara det mest kostnadseffektiva alternativet. De i fallstudien ingående norska tunnlarerna där det faktiskt utfördes behovsprövad injektering varierade inläckagekraven mellan 5 l/min/100 m tunnel till inget krav.

Utgående från resultat från fallstudierna skulle ett behovsprövat förfarande kunna minska injekteringsomfattningen med 40-50 %, med villkoret att differentierade krav tillämpas på tillåtet inläckage och utan att oönskad påverkan sker på grundvattennivåerna. Även inkluderade kostnaden för utvärdering och sondering bedöms den totala kostnaden för injekteringsarbeten kunna minskas med 20-40 %. Kan större inläckage tillåtas kan besparingen bli ännu större.

För att kunna tillämpa en strukturerad behovsprövd injekteringsmetodik bör förundersökningsprogrammet mynna ut i en tydlig hydrogeologisk modell.

Viktiga parametrar i modellen är:

- Kvantifiering av grundvattenbildning till berg.
- Definition, beskrivning och utbredning av hydrauliska domäner.
- Identifikation av känsliga områden baserat på potentiella skadeobjekt.

Underlag till modellen bör inkludera undersökningar i flera olika skalor och inkludera hydrogeologiska förhållanden i såväl jord som i berg och övergången mellan jord och berg. I berg bör enskilda sprickors transmissivitet undersökas, liksom spricksystems konnektivitet och bergets hydrauliska konduktivitet. I jord är det framförallt det vattenförande jordlagret närmast berg som bör undersökas med avseende på sammansättning och genomsläpplighet. Övergången mellan jord och berg kan testas t.ex. genom provpumpning i bergbrunnar och uppföljning av grundvattennivåer i jord. Jordakviferens vattenbalans bör undersökas för att kunna utvärdera tillgången på vatten och för identifiering av känsliga områden.

Att ta hänsyn till den faktiska grundvattenbildningen till berg är viktig eftersom det kan finnas en större generell tillgång på vatten än vad som tidigare ansatts i hydrogeologiska utredningar. Framförallt är det viktigt att försöka förutsäga vad som händer med grundvattenbildningen vid påverkade förhållanden.

Denna studie visar på möjligheter med behovsprövd injektering, men fördjupade utredningar kan behöva initieras inom följande frågeställningar:

- *Grundvattenbildning till berg:* Hur ska den kvantifieras och hur hanteras den idag inom tillstånds- och byggprocessen? Hur förändras grundvattenbildningen vid påverkade grundvattenförhållanden?
- *Hydrogeologiska modeller i tillståndsprocessen:* Tas tillräcklig hänsyn till tillgängligt grundvatten i inläckagemodeller? Kan större inläckage tillåtas lokalt längs tunnlar i rural miljö? Hur skattas inläckage till tunnlar?
- *Tillämpning av behovsprövd injektering i praktiken:* Utveckling av metodiken i ett praktiskt fall ifrån projektering till byggnation. Viktigt att

få in beställar- och entreprenörsaspekter på allt från kontrakt- och ersättningsfrågor till drift- och underhållsfrågor.

REFERENSER

- Ahlbom, K., Albino, B., Carlsson, L., Nilsson, G., Olsson, O., Stenberg, L., Timje, H. 1983: *Evaluation of the geological, geophysical and hydrogeological conditions at Gideå*. SKBF Technical report 83-53. Svensk kärnbränsleförsörjning AB
- Alberts C., Gustafson G. 1983: *Undermarksbyggande i svagt berg: 4 Vattenproblem och tättningsåtgärder*. BeFo 106. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Andersson, H., Lindström, M. 2003: *Injektjon: Erfaringer fra Hagantunnelen. Intern rapport 2325. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*. Rapport 31. Statens Vegvesen.
- Andersson, J., Ström, A., Svemar, C., Almén, K-E., Ericsson, L. O. 2000: *What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation*. SKB TR-00-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Axelsson, C-L., Follin, S. 2000: *Grundvattensänkning och dess effekter vid byggnation och drift av ett djupförvar*. SKB R-00-21. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Banks, D., Solbjerg M. L., Rohr-Torp, E. 1992: Permeability of fracture zones in a Precambrian granite. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 25, 377-388.
- Beitnes, A. 2005. Lessons to be learned from Romeriksporten. *Tunnels and Tunnelling Int.* 37 6, 36-38.
- Bergsäker konsult AB. 1999: *Geologisk och bergteknisk beskrivning, Nygårdstunneln*. Banverket.
- Black, J. H., Barker, J. A., Woodman, N. D. 2007: *An investigation of 'sparse channel networks' Characteristic behaviours and their causes*. SKB R-07-35. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brantberger, M., 2009: *Förfrågningsunderlag för injekteringsarbeten i en utförandeentreprenad*. BeFo Rapport 92. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Brantberger, M., Janson, T. 2009: *Underground Design Forsmark, Layout D2: Grouting*. SKB R-08-114. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dalmalm, T. 2004: *Choice of grouting method for jointed hard rock based on sealing time predictions*. Doktorsavhandling, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Dalmalm, T. 2011: *Planerad injekteringsforskning*. Presentation som del av PIA – Produktivitet- och Innovationsutveckling inom Anläggningsbranschen. Trafikverket
- Emmelin, A. Eriksson, M. Fransson, Å. 2004: *Characterisation, design and execution of two grouting fans at 450 m level, Äspö HRL*. R-04-58. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Emmelin, A., Brantberger, M., Eriksson, M., Gustafson, G., Stille, H. 2007: *Rock grouting: Current competence and development for the final repository*. R-07-30. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engström, A., Persson, K., Gustafson, G. 2009: *Nyttan av vattenförlustmätningar vid tätning av tunnlar*. BeFo Rapport 91. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.

- Eriksson, M., Stille, H. 2005: *Cementinjektering i hårt berg*. SveBeFo Report K22. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning.
- Fransson, Å., 1998: *Transmissivity as a tool to predict grout take in fractured rock, an analytical and numerical study*. The Fifth South American Conference in Rock Mechanics and Second Brazilian Conference in Rock Mechanics 1998, Santos, Brasilien.
- Fransson, Å., 1999: *Grouting predictions based on hydraulic tests of short duration: analytical, numerical and experimental approaches*. Licentiatuppsats, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Fransson, Å., Hernqvist, L., 2010: *Geology, water inflow prognosis and grout selection for tunnel sealing: Case studies from two tunnels in hard rock, Sweden*. World Tunnel Congress, May 2010, Vancouver, Canada.
- Ganerød, G., Braathen, A., Willemoes-Wissing, B. 2008: Predictive permeability model of extensional faults in crystalline and metamorphic rocks; verification by pre-grouting in two sub-sea tunnels, Norway. *Journal of Structural Geology*, 308., 993–1004.
- Grøv, E., Funehag, J., Janson, T. 2013: *Rock mass grouting in Sweden and Norway: A matter of cultural differences or factual causes?* Proceedings of 7th Nordic Grouting Symposium, Göteborg, Sverige 2013.
- Grøv, E., Woldmo, O. 2010: Pre-excavation grouting – prevention is better than cure. *Tunnelling journal*.
- Gustafson, G. 1986: *Geohydrologiska förundersökningar i berg. Bakgrund - metodik - användning*. BeFo 84:1/86. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Gustafson, G. 2009: *Hydrogeologi för bergbyggare*. Stockholm, Forskningsrådet Formas T2:2009.
- Gustafson, G., Fransson, Å., Funehag, J., Axelsson, M., 2004: Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering. *Väg- och vattenbyggaren* 2004:4.
- Gustafson G., Stille H. 2005: Stop criteria for cement grouting. *Felsbau*, Vol. 23, No. 3.
- Hansson, K., Svensson, T., Möller, A., Larch, P., Åhlen, B. 2010: *Mätning av inläckande vatten till bergtunnlar*. BeFo Rapport 104. Stiftelsen bergteknisk forskning.
- Hernqvist, L. 2011: *Tunnel Grouting: Engineering Methods for Characterization of Fracture Systems in Hard Rock and Implications for Tunnel Inflow*. Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Hernqvist, L., Gustafson, G., Fransson, Å., Norberg, T. 2013: A statistical grouting decision method based on water pressure tests for the tunnel construction stage – A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33 0., 54-62.
- Hernqvist, L. 2012: *Characterization of Rock in 2D and 3D for Grouting*. Proceedings Eurock 2012 ISRM International Symposium, Stockholm, Sverige.

- Holmøy, K.H. 2008: *Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels*. Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Kadefors, A., Bröchner, J. 2008: *Observationsmetoden I bergbyggande: Kontrakt och samverkan*. SveBeFo Rapport K28. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning.
- Knutsson, G., Morfeldt, C-O. 1993: *Grundvatten: teori & tillämpning*. AB Svensk Byggstjänst.
- Kvartsberg, S. 2013: *On the Use of Engineering Geological Information in Rock Grouting Design*. Licentiatuppsats, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Lindblom, U. redaktör: 2009: *Underhåll av berganläggningar, Etapp II*. Slutrapport SBUF Utvecklingsprojekt 11884. FoU Väst Göteborg
- Lundman, P. 2011: *Cost Management for Underground Infrastructure Projects: A Case Study on Cost Increase and its Causes*. Doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- Lundqvist, T., Gee, D.G., Karis, L., Kresten, P., Kumpulainen, R. 1990: *Beskrivning till berggrundskartan över Västernorrlands län*. Rapport Ba 31. Sveriges geologiska undersökning.
- Länsstyrelsen. 2014: *Att söka tillstånd till vattenverksamhet*. Elektroniskt dokument. Länsstyrelsen i Stockholms län. Tillgänglig 2014-05-06: http://www.lansstyrelsen.se/stockholm/SiteCollectionDocuments/Sv/miljo-och-klimat/vatten-och-vattenanvandning/vattenverksamhet/Att_soka_tillstand_vattenverksamhet_070405.pdf
- Mossmark, F. 2010: *Groundwater chemistry affected by underground construction activities*. Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- NGU. 2014a: *Berggrunn, Nasjonal berggrunnsdatabase*. Kartdatabas. Tillgänglig: 2014-03-16: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/>
- NGU. 2014b: *Løsmasser, Nasjonal berggrunnsdatabase*. Kartdatabas. Tillgänglig: 2014-03-16: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>
- NGU. 2014c: *Grunnvann, Nasjonal berggrunnsdatabase*. Kartdatabas. Tillgänglig: 2014-03-16: <http://geo.ngu.no/kart/granada/>
- Norconsult AS. 2011: *Ingeniørgeologisk og hydrogeologisk rapport for tunneler; Fellesprosjektet E6 – Dovrebanan i Eidsvoll og Stange, parsell FP2 Brøhaug – Strandlykkja*. Upprättad 2011-11-14. Statens Vegvesen, Jernbaneverket
- NRC 1996: *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Academy Press, Washington, DC.
- Olofsson, B., Jacks, G., Knutsson, G., Thunvik, R. 2001: *Groundwater in hard rock – a literature review*. In Nuclear waste, state-of-the-art-reports 2001. SOU 2001:35. KASAM, Swedish National Council for Nuclear Waste.

- Olofsson, B. 1994: Flow of groundwater from soil to crystalline rock. *Applied Hydrogeology*, vol 2, nr 3, s 71-83.
- Olofsson B 1998b. *Hallandsås-alternativ tunneldesign, grundvattenpåverkan. Grundvattenpåverkan i jordlager. Analys av grundvattenförhållanden på Hallandsås.* KTH Avd. för mark- och vattenresurser 1998-11-30, Stockholm
- Peck R.B. 1969: Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotechnique* 19: 171-187.
- Persson, J. 2007: *Hydrogeological methods in geotechnical engineering.* Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Rhén, I. Follin, S., Hermanson, J. 2003: *Hydrogeological Site Descriptive Model – a strategy for its development during Site Investigations.* R-03-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J., Pers, C. 2004: *Grundvattenbildning i svenska typjordar - översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell.* Uppsala University. Department of Earth Sciences. Report Series A No. 66.
- Schunnesson, H. 1998: Rock Characterisation using Percussive Drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining* 35 6: 722-725.
- SGU. 2014: Berggrundskarta, Jordartskarta. Sveriges geologiska undersökning. Tillgänglig: 2014-01-15: http://maps2.sgu.se/kartgenerator/maporder_sv.html
- Skogsstyrelsen. 2014: Skogens pärlor. Tillgänglig: 2014-05-10: <http://minasidor.skogsstyrelsen.se/skogensparlor/>
- SMHI. 2013: Klimatdata, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut. Tillgänglig 2013-12-12: <http://www.smhi.se/klimatdata>
- Statens Vegvesen. 2003: *Undersökelse og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø.* Publikation 103.
- Statens Vegvesen. 2004: *Berginjeksjon i praksis.* Publikasjon 104.
- Stille, B., Andersson, F. 2008: *Injeksjon - tillämpning av injeksjonsforskning i fält.* SveBeFo report 79. Swedish Rock Engineering Research.
- Stille, B., Stille, H., Gustafson, G., Kobayashi, S. 2009: Experience with the real time grouting control method. *Geomechanics and Tunneling*, 2.
- Stille, B., Gustafson, G. 2010: A review of the Namntall Tunnel project with regard to grouting performance. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 346-356.
- Stille H. 2012: *Rock grouting in tunnel construction – models and design.* Proceedings Eurock 2012 ISRM International Symposium, Stockholm, Sverige.
- TRVK 2011: *TRVK Tunnel 11: Trafikverkets tekniska krav Tunnel.* TRV publ nr 2011:087.
- TRVR 2011: *TRVR Tunnel 11: Trafikverkets tekniska råd Tunnel.* TRV publ nr 2011:088.
- Vattenfall Power Consultant. 2010. *Bygghandling Citybanan, Kompletterings-PM injeksjon.* Banverket, daterat 100524.

- Werner, K., Onkenhout, J., Löv, Å. 2012: *Effekter på Grund-och Vattenförhållanden vid Grundvattenbortledning från Berganläggningar: Steg 1 - Förstudie*. BeFo Rapport 117. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Werner, K., Hamrén, U., Collinder, P. 2010: *Vattenverksamhet i Forsmark del I: Bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle*. R-10-14. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wilén, P., Danielsson, P., Wägerud, A. 2007: *Dräner i tunnlar för vatten och frostsäkring - Del 2: Kalkylering av mängd och placering av dräner*. SveBeFo Rapport 83. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning.
- VISS. 2014: *Vattenkartan, Vatteninformationssystem Sverige*. Tillgänglig 2014-05-06: <http://viss.lansstyrelsen.se/MapPage.aspx>
- Zetterlund, M.S. 2014: *Value of information analysis in rock engineering investigations*. Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg

BILAGA A - BERÄKNINGAR I FALLSTUDIER

I denna bilaga redovisas förutsättningar och beräkningsantaganden för de fyra fallstudietunnlarna, Ulvin, Hagan, Namntall och Nygård. Beräkningarna som har genomförts är:

- Grundvattenbildning till berg
- Hydrauliska medelkonduktiviter för hydrauliska domäner
- Inläckageprognos till oinjekterad tunnel

Tillvägagångssättet gäller för samtliga tunnlar och är i denna bilaga exemplifierad med Ulvintunneln.

A.1 Grundvattenbildning till berg

Beräkningen av grundvattenbildning till berg har följt följande beräkningsgång:

- 1) Dela in tunnelsträckning i grundvattenbildningsområden och beräkna potentiell area för grundvattenbildning. Indelningen är genomförd utifrån topografi. Detta innebär att delområden identifieras utifrån vattendelare, att markytans läge ligger högre än tunnelnivå, samt att ytan för grundvattenbildning ligger inom ett rimligt influensområde (ca 3-5 ggr tunneldjup, se t.ex. Gustafson, 2009).
- 2) Beräkna en procentuell jordartsfördelning i respektive grundvattenbildningsområde baserat på jordartskartor.
- 3) Identifiera medelårsavrinning för området. I fallstudierna användes värden från SMHI och NVE.
- 4) Skatta procentuell andel av avrinning som bildar grundvatten för respektive jordart. I studien har erfarenhetsbaserade värden ansatts då inga referensvärden finns att tillgå.
- 5) Ta hänsyn till eventuella positiva hydrauliska ränder, såsom sjöar och större vattendrag.
- 6) Beräkna potentiell grundvattenbildning till berg.

Nedan presenteras beräkningsantaganden och resultat för grundvattenbildning i berg som exempel för Ulvintunneln.

Medelårsavrinning, Ulvin
500 mm

Grundvattenbildningsfaktorer, Ulvin	
Morän	50%
Berg	20%
Isälvsmaterial	100%
Torv	80%

Beräknad grundvattenbildning, Ulvin									
Område	Längdmätning		Area [ha]	Morän Berg Isälvsmttrl Torv				Grv.bildning	Grv.bildning
								[l/min]	[l/min/100 m]
1	81/600	82/300	13	95 %	5 %		60	9	
2	82/300	82/950	145	92 %	6 %	2 %	679	104	
3	82/950	83/500	47	90 %	10 %		210	38	
4	83/500	84/600	113	83 %	10 %	2 %	532	48	
5	84/600	85/300	140	62 %	35 %	2 %	543	78	
6	85/300	85/450	17	60 %	40 %		61	41	

A.2 Hydrauliska medelkonduktiviter för hydrauliska domäner

Hydrauliska medelkonduktiviter för de hydrauliska domänerna i fallstudierna har beräknats utifrån följande indata:

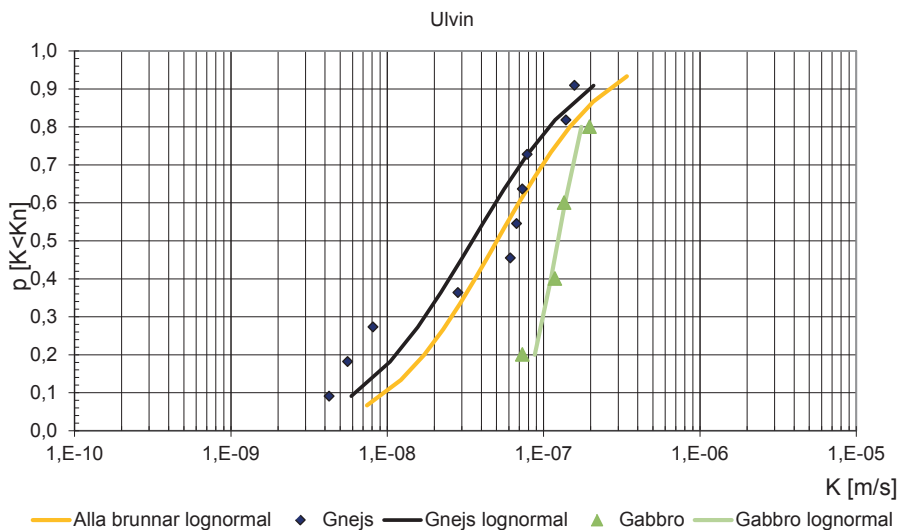
- Brunnsdata från brunnar i närheten av tunneln.
- SGU/NGUs skattning som baseras på ett stort antal brunnar över ett större område.
- Sektionsvisa vattenförlustmätningar i borrhål (om sådana data finns).

Beräkning av hydraulisk medelkonduktivitet, baserat på brunnar i närheten av tunneln, visas nedan för Ulvintunneln. Utvärderingen av transmissiviteten från brunnskapacitet har utförts med följande formel som utgår från Thiems brunnsekvation (Gustafson, 2009):

$$T = \frac{Q}{dh} \cdot \ln\left(\frac{R_0}{r_w}\right) / 2\pi$$

Hydraulisk konduktivitet från brunndata, Ulvin					
Brunn	Bergart	Flöde [l/tim]	Djup	T [m ² /s]	K ₀ [m/s]
1	Gnejs	1500	60	9,5E-06	1,6E-07
2	Gabbro	2000	62	1,2E-05	2,0E-07
3	Gabbro	4000	151	1,1E-05	7,3E-08
4	Gabbro	1200	62	7,3E-06	1,2E-07
6	Gabbro	250	25	3,4E-06	1,4E-07
9	Gnejs	1500	99	6,1E-06	6,1E-08
10	Gnejs	150	120	5,1E-07	4,3E-09
11	Gnejs	1000	120	3,4E-06	2,8E-08
13	Gnejs	2000	105	7,7E-06	7,3E-08
14	Gnejs	300	150	8,4E-07	5,6E-09
15	Gnejs	5000	178	1,2E-05	6,7E-08
16	Gnejs	1000	70	5,5E-06	7,9E-08
17	Gnejs	300	123	1,0E-06	8,1E-09
18	Gnejs	3600	102	1,4E-05	1,4E-07

Hydraulisk medelkonduktivitet (K_{median}), Ulvin	
Gabbro, ytlig	1E-07 m/s
Gnejs	4E-08 m/s
Alla	5E-08 m/s



A.3 Inläckageprognos till oinjekterad tunnel

Inläckaget till de oinjekterade fallstudietunnlarna har utförts med följande ekvation (Gustafson, 1986):

$$q = \frac{2\pi \cdot K_0 \cdot H}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \xi}$$

Nedan redovisas inläckageberäkningen för Ulvintunneln. Denna genomfördes sektionsvis för 100 m långa sektioner, där värden på (K_0) och grundvattentryck (H) varierade beroende på antagen hydraulisk domän och medelgrundvattentryck för varje sektion. Antagen tunneldiameter (r_t) är 6,3 m², och antagen skinfaktor (ξ) är 2.

Inläckageberäkning, Ulvin													
Längd-mätning	81600	81700	81800	81900	82000	82100	82200	82300	82400	82500	82600	82700	82800
Hydraulisk domän	B	B	B	B	B	B	B	B	B/C	C/A	A	A	C
K_0	4E-08	4E-08	4E-08	4E-08	4E-08	4E-08	4E-08	4E-08	1E-07	1E-07	2E-08	2E-08	2E-07
H	15	60	80	100	120	140	150	140	110	90	70	60	45
q [l/min, 100 m]	6,4	18,3	23,1	27,6	32,1	36,4	38,6	36,4	89,6	92,6	10,3	9,1	72,8

Längdmätning	82900	83000	83100	83200	83300	83400	83500	83600	83700	83800	83900	84000	84100
Hydraulisk domän	C/A	A	A	A	A	A	A/C	C	A	A	A/C	C/B	B/C
K_0	1E-07	2E-08	2E-08	2E-08	2E-08	2E-08	1E-07	2E-07	2E-08	2E-08	1E-07	1E-07	1E-07
H	60	70	75	80	90	110	110	90	80	80	50	35	25
q [l/min, 100 m]	50,3	10,3	10,9	11,5	12,7	14,9	82,2	126,8	11,5	11,5	43,5	31,1	31,5

Längdmätning	84200	84300	84400	84500	84600	84700	84800	84900	85000	85100	85200	85300	85400
Hydraulisk domän	C	B	B	B	B	B	B/C	C/B	B/C	C/B	B	B/D	D
K_0	2E-07	4E-08	4E-08	4E-08	4E-08	4E-08	1E-07	1E-07	1E-07	9E-08	4E-08	8E-08	1E-07
H	15	25	35	45	45	30	25	20	20	25	25	10	10
q [l/min, 100 m]	31,8	9,3	12,0	14,6	14,6	10,6	27,8	23,5	20,4	20,4	9,3	9,1	6,0

BeFo



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

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

ISSN 1104-1773