



CHALMERS



Viktiga faktorer vid tätning med injektering vid bergtunnelbyggnad

En översiktlig beskrivning av den planerade höghastighetsjärnvägen mellan Mölnlycke och Bollebygd

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

SIMON LARSSON
SOFIA LØSETH
CHRISTOFFER ROOS
JAKOB WAHL
ALEXANDER ZIMMERMAN

KANDIDATARBETE 2018:37

Viktiga faktorer vid tätning med injektering vid bergtunnelbyggnad

En översiktlig beskrivning av den planerade höghastighetsjärnvägen
mellan Mölnlycke och Bollebygd

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

Simon Larsson
Sofia Løseth
Christoffer Roos
Jakob Wahl
Alexander Zimmerman



CHALMERS

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2018

Viktiga faktorer vid tätning med injektering vid bergtunnelbyggnad
En översiktlig beskrivning av den planerade höghastighetsjärnvägen mellan Mölnlycke och Bollebygd

Simon Larsson, Sofia Løseth, Christoffer Roos, Jakob Wahl, Alexander Zimmerman

© Simon Larsson, Sofia Løseth, Christoffer Roos, Jakob Wahl, Alexander Zimmerman, 2018.

Handledare: Johanna Merisalu, Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, avdelningen för geologi och geoteknik

Examinator: Mats Karlsson, Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, avdelningen för geologi och geoteknik

Kandidatuppsats 2018:37

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telephone +46 31 772 1000

Omslagsbild: Tunnel Construction. Hämtad från Encyclopedia Britannica ImageQuest. http://quest.eb.com/search/115_88443/1/115_884433/cite

Typsnitt L^AT_EX

Göteborg, Sverige 2018

Sammanfattning

Studien beskriver övergripande de förutsättningar, risker samt möjligheter med fokus på hydrogeologi som föreligger i området för den planerade höghastighetsjärnvägen mellan Mölnlycke-Bollebygd. Studien erbjuder både en sammanfattning av offentliga fakta, såväl som en analys och sammanställning av litteratur och kunskap inom området tunnelbyggnad med fokus på tätning. Information framtagen för projektet Västlänken har använts i studien då den anses representativ även för området mellan Mölnlycke och Bollebygd. Detta då den geologiska historien överensstämmer i de två projekten. Vidare redovisas värdefulla kommentarer och erfarenheter från en rad yrkespersoner verksamma inom berg- och tunnelbyggnation. Resultatet är en kombination av en litteratursammanställning och ett hydrogeologiskt PM för projektet. En tidig hypotes var att mycket forskning och utveckling inom injekterings- och tätningsområdet fortfarande behövs.

Vidare har studien identifierat den tunnel längs sträckningen Mölnlycke-Bollebygd som utifrån undersökningar och analyser anses vara mest problematisk avseende exempelvis naturvärden samt inläckage. Från detta resultat har studien med utgångspunkt i observationsmetoden idealiserat miljön där den kritiska tunneln dras. Denna idealisering har resulterat i tre olika zoner där studien utifrån kunnigt branschfolk föreslår lösningar på injekterings- och tätningsdesign.

Studiens avslutande diskussion och slutsats påvisar att den inledande hypotesen i viss utsträckning var fel. Vad studien visat är snarare att tätning av tunnlar kan effektiviseras främst med hjälp av bättre reglerade och skrivna kontrakt och samarbetsformer. Studien visar även att byggnationen av aktuell infrastruktur inte torde innebära några extraordinära svårigheter då berggrunden är av god kvalitet och kunskap från liknande projekt finns i branschen. Vidare styrks detta antagande av enkla idealiserade beräkningar som visar att injekteringsinsatserna som föreslås gör att tunneln klarar de täthetskrav som ställts av Miljödomstolen i liknande infrastrukturprojekt. På sträckan Mölnlycke-Bollebygd finns ännu ingen ansökan om miljötillstånd och således ingen miljödom.

Nyckelord: Injektering, Observationsmetoden, Tunnelbyggnad, Hydrogeologi, Infrastruktur, Deformationszon, Övergång mellan jord och berg, Inläckage, Tätning.

Abstract

The study describes on an overall plan what conditions, risks and opportunities that exist for the planned high-speed rail link between Mölnlycke-Bollebygd. By doing this, the study offers both a summary of public facts with a focus on hydro geological problems about the project, as well as an analysis and compilation of literature and knowledge in the field of tunnel construction, focusing on sealing and grouting. Information developed for the West Link Project, has been used in the study as it is considered representative also for the area between Mölnlycke and Bollebygd. This since geological history is similar in the two projects. Furthermore, valuable comments and experiences from a number of professionals in the field of rock construction are offered. The result is a combination of a literary composition and a hydrogeological PM for the project. An early hypothesis was that much research and development in the injection and sealing area is still needed.

Furthermore, the study has identified the tunnel along the entire Mölnlycke-Bollebygd route, which, based on investigations, should be considered the most problematic, for example regarding, natural values and leakage. From this result, the study, based on the observation method, has idealized the environment where the tunnel is drawn. This idealization has resulted in 3 different classified environments or mountain ranges where the study by knowledgeable industry professionals, proposes solutions to the grouting and seal design.

The final discussion and conclusion shows in some sense that the initial hypothesis was wrong. What the study has shown is that sealing of tunnels can be streamlined primarily using better regulated and written contracts and forms of cooperation. The study also shows that the construction of the current infrastructure does not imply any extraordinary difficulties as the bedrock is of good quality and knowledge from similar projects is in the industry. Furthermore, this assumption of simple idealized calculations shows that the injection efforts proposed will enable the tunnel to meet the density requirements imposed by the Swedish environmental Court in similar projects in infrastructure. For the Mölnlycke-Bollebygd route there is no application for environmental permits yet and as a result no environmental court judgment.

Keywords: Grouting, Observational Method, Tunnel construction, Hydrogeology, Infrastructure, Deformation Zone, Soil-rock interface, Tunnel inflow, Sealing.

Erkännanden

Något som vi berg- och infrastrukturintresserade upplever är en brist i grundutbildningen på Chalmers är just en introduktion till bergbyggandet, liknande karaktären av denna studie. Genom aktuellt arbete har vi fått chansen att på ett övergripande plan lära oss väldigt mycket om bergbyggandets förutsättningar och möjligheter. I arbetsbeskrivningen för ett kandidatarbete på Chalmers brukar ett vanligt mantra vara ”Ni ska skriva som att ni försöker förklara ämnet för ert december jag”. Vi har lärt oss otroligt mycket under studiens gång, och utan hjälp från såväl handledare och yrkespersoner i branschen som avsatt tid för att, svara på våra frågor, lära oss och guida oss rätt, hade vi inte kommit hälften så långt och inte heller lärt oss hälften av vad vi lärt oss.

Till alla er vill vi rikta ett stort tack!

Framförallt Johanna Merisalu, vår dedikerade handledare
Åsa Fransson, tidigare Chalmers Tekniska Högskola, nu Golder Associates AB
Sofia Lander, Platschef vid Veidekke Entreprenad AB
Johan Collinder, Projektledare vid Trafikverket
Gustav Cederholm, Affärsområdeschef vid BESAB AB
Linn Ödlund Eriksson, Hydrogeolog vid Sweco Environment AB
Calle Carlsson vid Chalmers Tekniska Högskola, Fackspråk
Marco Shirone vid Chalmers Tekniska Högskola, Bibliotek
Johan Thörn och Johanna Lithén, hydrogeologer vid Bergab AB
Veli Taatila, VD och Tunnelldrivningsledare vid BBEAB AB

Simon Larsson
Sofia Løseth
Christoffer Roos
Jakob Wahl
Alexander Zimmerman
Göteborg, juli 2018

Ord- och förkortningslista

HÄR LISTAS DE FÖRKORTNINGAR AV ÄMNESSPECIFIKA TERMER SOM HAR ANVÄNTS I STUDIEN, SAMT SYMBOLER OCH BETECKNINGAR FRÅN EKVATIONER.

- **Abduktion** - en term besläktad med både induktion och deduktion, där forskaren rör sig mellan teori och empiri.
- **Akvifer** - Geologisk bildning med grundvatten som kan utvinnas i användbar mängd.
- **Alkalisk miljö** - En basisk miljö där vattenlösningar har ett pH högre än 7.
- **Amorfa material** - Material som har en icke-kristallin atomär uppbyggnad.
- **Anisotrop** - Egenskap hos ett ämne eller material. Betyder att ämnet eller materialet har olika fysikaliska egenskaper i olika riktningar.
- **Artesiskt grundvatten** - Då grundvattentrycket är högre än magasinets övre täta gräns föreligger ett artesiskt tryck, ibland når detta tryck över markytan.
- **Avdunstning** - Vatten i flytande form avgår till vattenånga.
- **Avrinningsområde** - Av vattendelare avgränsat område varifrån all nederbörd rör sig mot ett särskilt vattensystem, exempelvis en viss å med biflöden.
- **Bank** - Uppfyllnad ovan naturlig marknivå på vilken väg eller järnväg byggs.
- **Bergart** - Definieras av ingående mineraler, på vilket sätt den har bildats samt dess kemiska sammansättning. Indelas efter bildningssätt i sedimentära, magmatiska och metamorfa bergarter.
- **Berggrund** - Jordskorpans fasta del, till skillnad från lösa jordlager.
- **Betong-lining** - Liningen består av armerade betongelement vilka installeras i tunneln och följer dess form. Elementen kontaktinjekteras mot berget. Betong-liningen reducerar inläckage samt minskar miljöpåverkan.
- **Borrkax** - Det krossade berg som erhålls vid borrhning.
- **Brunnsarkivet** - Statlig verksamhet med uppgift att dokumentera information framtagen vid brunnborrningar och grundvattenundersökningar.
- **Deformationszon** - Svaghetszon till följd av att berggrunden pressats mot

varandra.

- **DoU** - Drift och Underhåll.
- **Dragning** - Dragningen är den mer exakta lägesbestämningen av exempelvis ett järnvägsspår som befinner sig i en korridor. Korridoren för järnvägsspåret är en grov uppskattning av sträckningen för järnvägen. I detta fall är sträckningen Mölnlycke-Bollebygd.
- **Foliation** - Innebär att mineralen i en bergart ligger parallellt mot varandra. Innefattar primär lagring, klyvbarhet, gnejsighet och förskiffring. Foliationen kännetecknas av att skiktmineral orienterar sig i skikt.
- **Friktionsjord eller Friktionsmaterial** - En grovkornig jord som i huvudsak består av sand och grus. Dess hållfasthet byggs upp av friktionskrafter mellan kornen. Numera kritiserad beskrivning, därför strävar studien till att beskriva jordens egenskaper med jordart och kornstorlek, exempelvis grovkornig morän.
- **Förskärning** - Bergskärning som utförs som ett öppet schakt för att kunna påbörja en tunnel.
- **Gelningstid** - Tid det tar för partiklar att aggregera och bilda en gel.
- **Geoteknisk kategori** - Vid byggande av geokonstruktioner görs en kategorisering beroende på hur svår den är att bygga samt vilka risker byggandet medför. De kategorier som finns är GK1, GK2 samt GK3. De olika kategorierna har olika krav när det kommer till projektering, dimensionering och krav.
- **Grundvatten** - Vatten som förekommer i vattenförande jordlager samt i poröst och sprickigt berg där hålrummen är vattenfyllda.
- **Grundvattenbildning** - Vattentillförsel till akviferen, sker ofta över stora ytor.
- **Grundvattendelare** - En idealiserad linje i terrängen som avgränsar det område från vilket grundvatten strömmar till en viss punkt, exempelvis en tunnel eller brunn.
- **Grundvattenmagasin** - En grundvattenförande geologisk bildning som kan betraktas som en hydraulisk enhet.
- **Grundvattenströmning** - Beskriver hur vattnet strömmar eller rör sig i marken. Ofta följer grundvattenströmmningen markytans lutning.
- **Hydraulisk konduktivitet** - Ett materials, exempelvis en jord eller bergarts,

vattengenomsläpplighet. Har enheten m/s.

- **Hydrostatisk portrycksfördelning** - Det ovanliggande vattnets tyngd motsvarar portrycket på alla nivåer under grundvattenytan.
- **Infiltration** - När en vätska tränger ner i ett poröst material eller sprickor.
- **Infrastruktur** - Anordningar för transporter samt el-och vattenförsörjning.
- **Injektering** - Åtgärd för att fylla ut hålrum med ett flytande ämne som sedan stelnar och antar fast form.
- **Jordart** - Beteckning på jord med vissa egenskaper avseende sammansättning eller bildningssättet. Exempelvis morän, lera, sand, grus och torv.
- **Kolloidalt** - En mycket finfördelad form av ett material.
- **Kompakt berg** - Betecknar här relativt opåverkat urberg. Normalt sett finns en mindre andel sprickor som utgör hydrauliska svagheter, vilka kan ge upphov till vattentransport i berget.
- **Konsortium** - Inom byggsektorn har det ofta förekommit att flera entreprenörer går samman i ett konsortium för att genomföra större bygg- och anläggningsprojekt. Ett konsortium är vanligen av tillfällig natur och upplöses efter viss tid, eller när den affär som föranlett konsortialbildningen är avslutad.
- **Kristallin bergart** - Magmatisk eller metamorf bergart, vanligt förekommande i Sverige.
- **Lera** - Minst 15 % av viktinnehållet utgörs av partiklar med diameter mindre än 0,002 mm, det som kallas för lerpartiklar.
- **Läkt spricka** - Läkta sprickor är sprickor som är fyllda med kristalliserade mineraler, exempelvis kvarts eller kalcit.
- **Morän** - Osorterad jordart. En geologisk avlagring bildad i direkt anslutning till en glaciär eller inlandsis. Innehåller en jämn fördelning av många kornstorlekar, i motsats till exempelvis sand som i huvudsak består av fraktionen sand.
- **Mylonitzonen** - Deformationszon som går från Halland och genom Värmland upp till den norska gränsen.
- **Mäktighet** - Den vertikala tjockleken av ett jord- eller bergartslager.

-
- **Naturvärde** - Ett geografiskt område som betingar ett biologiskt värde.
 - **Neurotoxiskt** - En störning som uppstår i nervsystemet efter exponering av nervgifter. Nervgiftet förändrar den normala verksamheten i nervsystemet.
 - **Partialkoefficient** - Beaktar systematiska skillnader mellan laboratorieprover och förväntad verklighet, för att därefter beräkningsmässigt kompensera för dessa. Det kan exempelvis handla om volym-, fukt- eller temperatureffekter.
 - **Partneringsamarbete** - Kontrakt mellan de aktörer som samarbetar för ett upphandlat projekt. Överenskommelsen tas fram gemensamt och innehåller bestämmelser om hur projektet ska bedrivas. En viktig del är att samarbetet medger ekonomisk vinning för alla aktörer då projektet röner framgång.
 - **Perkolation** - Efter att vätskan infiltrerats i ett poröst eller sprickigt material tar gravitationen över transporten i materialets porsystem. Denna långsamma rörelse i gravitationens riktning kallas perkolation.
 - **Permeabilitet** - Ämnes genomsläpplighet för gaser och vätskor. Har enheten m/s.
 - **Plint** - Bergstopp som representerar kompakt berg.
 - **Polymerisation** - En kemisk reaktion vid vilken små molekyler, monomerer, sammankopplas till en större kedjemolekyl, en polymer.
 - **Polymerisera** - En kemisk reaktion där korta molekyllängder sammankopplas till längre kedjor.
 - **Portryck** - Det tryck som porvattnet utövar. I friktionsjord är det ofta det hydrostatiska trycket.
 - **Portrycksfördelning** - Hur portrycket i ett material varierar med djupet.
 - **Primärt tillrinningsområde** - Den del av tillrinningsområdet vilken står för en övervägande del (i storleksordning 90 % eller mer) av grundvattenuttaget.
 - **Processvatten** - Vatten som används för rengöring eller ingrediens vid tillverkning i samband med industriella processer. I bergbyggnadssammanhang räknas även det inläckande vattnet i tunneln under byggfasen in.
 - **Påslag eller Tunnelpåslag** - Den lodräta bergytan där man påbörjar tunneldrivning.
 - **Ortofoto** - Flygplansbild av markytan som omprojicerats för att ha samma skala över ett större område.

-
- **Risk** - En sammanvägning av sannolikheten för en oönskad konsekvens av en händelse samt konsekvensens storlek.
 - **Tillrinningsområde** - Det område inom vilket vatten rör sig mot ett definierat grundvattenmagasin med en grundvattenförekomst.
 - **Transmissivitet** - Förmåga hos ett jord- eller berglager att leda grundvatten.
 - **Schaktning** - Uttag av jord eller berg vid anläggningsarbeten.
 - **SGU** - Statens Geologiska Undersökning, den statliga myndighet som arbetar med geologi. Har till ansvar att arbeta med frågor kring jord, berg och grundvatten.
 - **Silt** - Mineraljordspartiklar med kornstorlek 0,002-0,063 mm.
 - **Skärning** - Konstgjort snitt i öppen dag, genom berg eller jord, för exempelvis byggnation av väg eller järnväg.
 - **Spricka** - En öppning eller ett brott i ett fast material eller i berggrunden. Avståndet mellan diskontinuitetsytorna kan mätas, och har ingen eller låg draghållfasthet.
 - **Sprickfyllnad** - Det fasta material som finns mellan sprickväggarna, kan vara helt eller delvis fylld.
 - **Strykning** - Används för att ange sprickor eller bergartslagers orientering. Stryknigen är orienteringens avvikelse från norr i grader.
 - **Stupning** - Används för att ange sprickor eller bergartslagers orientering, en vågrät yta har ingen stupning medans en lodrät har 90 graders stupning.
 - **Sula** - Inom bergtekniken beskriver ordet botten eller golv i bergrum, tunnlar och gångar.
 - **Vattendelare** - Den idealiserade linje eller gräns som skiljer två avrinningsområden, ofta en höjdrygg eller bergskedja.
 - **Viskositet** - Egenskap hos fluider som beror på inre friktion. Kan beskrivas som en vätskas segghet.
 - **Undermarkskonstruktion** - En konstruktion uppförd under marknivån. Typiska konstruktioner är tunnlar, bergrum, källare och gruvor. En typisk karakteristika för dessa konstruktioner är att de ofta uppförs under grundvattennivån. På grund av detta behöver de även utstå hydrogeologiska påfrestningar.

Om inte annat anges är definitionerna i enlighet med Nationalencyklopedin eller andra fackmässiga källor.

Innehåll

Figurer	xxi
Tabeller	xxiii
1 Inledning	1
1.1 Problemformulering	5
1.1.1 Syftesformulering	5
1.2 Data	6
1.3 Metod	7
2 Teori	9
2.1 Områdesbeskrivning	9
2.1.1 Berggrundens historia	9
2.1.2 Geologisk historia	10
2.1.3 Nederbörd samt avdunstning för området	13
2.1.4 Sjöar och vattendrag i området	13
2.1.5 Tillrinningsområde	14
2.2 Hydrogeologisk påverkan vid tunnelbyggnad	15
2.2.1 Grundvatten	15
2.3 Konsekvenser av en grundvattenavsänkning	17
2.4 Infiltration	18
2.5 Naturvärden	19
2.5.1 Km15-km16	20
2.5.2 Km17-km18	20
2.5.3 Km20-km20+400	20
2.5.4 Km23+300-km26	20
2.5.5 Km25+500-km25+600	20
2.5.6 Km36-km36+300	21
2.5.7 Km37+700-km38+900	21
2.6 Samhällets krav	21
2.6.1 Eurokod och konstruktionsmässigt regelverk	21
2.6.2 Miljöprövning	23
2.7 Markundersökningar	25
2.8 Observationsmetoden och aktiv design	26
2.8.1 Vad är observationsmetoden?	26

2.8.2	Varför observationsmetoden?	27
2.8.3	Att arbeta med observationsmetoden	28
2.8.4	Begreppsförvirringen kring observationsmetoden	29
2.9	Tunnelbyggnation	30
2.9.1	Sprängning	30
2.9.2	Borrning	31
2.10	Injektering vid tunnelbyggnation	32
2.10.1	Injekteringsmetoder	32
2.10.2	Injekteringsmedel	34
2.10.2.1	Suspensioner	34
2.10.2.2	Kemiska injekteringsmedel	35
3	Metod	39
3.1	Vetenskaplig metod	40
3.2	Kritisk tunnelsträckning	41
3.3	Zonindelning	41
3.3.1	Kompakt berg med sprickbildning	41
3.3.2	Berg med deformationszoner	42
3.3.3	Övergång mellan jord och berg	42
3.4	Hydrogeologisk beskrivning	42
3.4.1	Grundvatten	42
3.4.2	Hydrauliska gränser	43
3.5	Beräkning av inläckage i tunnel	43
3.5.1	Beräkning för deformationszon samt kompakt berg	43
3.5.2	Beräkning för övergång mellan jord och berg	44
3.5.3	Beräkning efter injektering	45
3.6	Injekteringslösningar	45
4	Resultat	47
4.1	Val av kritisk tunnelsträckning	47
4.2	Zonindelning	48
4.2.1	Kompakt berg med sprickbildning	49
4.2.1.1	Vittrat material	51
4.2.1.2	Klorit	51
4.2.1.3	Kalcit	52
4.2.1.4	Lera	52
4.2.2	Berg med deformationszoner	52
4.2.3	Övergång mellan jord och berg	54
4.3	Områdets hydrogeologi	55
4.3.1	Grundvatten	55
4.3.2	Hydrauliska gränser	57
4.4	Beräkning av inläckage i tunnel	58
4.4.1	Beräkning av inläckage för deformationszon samt kompakt berg	58
4.4.2	Beräkning av inläckage för övergång mellan jord och berg	60
4.4.3	Beräkning efter injektering	62
4.5	Injekteringslösningar	63
4.5.1	Injekteringslösning för kompakt berg med sprickbildning	63

4.5.2	Injekteringslösning för berg med deformationszoner	64
4.5.3	Injekteringslösning för övergång mellan jord och berg	65
5	Diskussion	67
5.1	Problemformulering och syftesformulering	67
5.2	Miljö	68
5.3	Historisk utveckling	69
5.4	Ekonomiska aspekter	70
5.5	Observationsmetoden ur ett ekonomiskt perspektiv	71
5.6	Observationsmetoden och aktiv design	71
5.7	Val av kritisk tunnelsträckning	74
5.8	Injekteringslösningar	75
5.9	Lagar och tidigare miljödomar	77
6	Slutsats	81
	Bibliography	83
A	Appendix	I
A.1	Intervju med Linn Ödlund Eriksson, Hydrogeolog vid Sweco Envi- ronment AB	XI
A.2	Intervju med Johan Thörn och Johanna Lithén vid Bergab AB	XV
A.3	Intervju med Veli Taatila, VD och ägare på BBEAB AB	XXI

Figurer

1.1	Sveriges planerade stamnät med korridorsbredder som indikerar varje sträckas planeringsskede [18].	1
1.2	Delsträcka Mölnlycke-Bollebygd [18].	2
1.3	Topografi för sträcka Mölnlycke station-Landvetter södra. Figur från Trafikverket [18].	3
1.4	Topografi för sträcka Landvetter södra-Rågdalsvägen. Figur från Trafikverket [18].	3
1.5	Topografi för sträcka Rågdalsvägen-Ulvåsen. Figur från Trafikverket [18].	3
1.6	Topografi för sträcka Ulvåsen-Ramsjön. Figur från Trafikverket [18].	4
2.1	Högsta kustlinjen för Rävlanda.	11
2.2	Jordartskarta från Mölnlycke till Landvetter.	11
2.3	Jordartskarta från Landvetter till Ryamotet.	12
2.4	Jordartskarta från Ryamotet till Bollebygd.	12
2.5	Visualisering av sjöar och vattendrag längs järnvägsdragningen mellan Mölnlycke och Bollebygd.	14
2.6	Principiell skiss över infiltrationsbrunn i tvärsnitt [3].	18
2.7	Planerad järnvägsdragning mellan Mölnlycke och Bollebygd med tunnelsträckor markerade.	19
2.8	Principiell skiss över Lugeon testet.	26
2.9	Flödesschema för observationsmetoden enligt Implementeringskommissionen [9].	29
2.10	Borrhålstyper i tunnelsalva [2].	30
2.11	Principiell skiss över förinjektering.	33
4.1	Delsträcka Mölnlycke-Bollebygd, där grön färg avser tunnelbyggna- tion [18].	47
4.2	Konceptuell figur över zonindelning. Lagerföljden är baserad på de brunnborrningar som gjorts vid övergången mellan jord och berg.	49
4.3	Höjddprofil över Rävlandatunneln.	50
4.4	Sammanställda sprickriktningar från Västlänken, där grönt streck motsvarar tunneldragningen.	50
4.5	Sammanställda sprickfyllnadsfördelningen från Västlänken.	51
4.6	Brunn med kapacitet på 25000 liter/timme, vilket anses spegla kapaciteten i svaghetszonerna.	53

4.7	Visualiserad antagen jordlagerföljd utmed Rävlandatunneln.	54
4.8	Förtydligande var varje typområde, kompakt berg med sprickbildning, deformationszoner samt övergång mellan jord och berg, finns i Rävlandatunneln.	55
4.9	Visualisering av valda brunnar i anslutning till Rävlandatunneln. Blå brunnar representerar grundvattennivå för det undre magasinet medan röda brunnar representerar grundvattennivå i berg.	56
4.10	Höjddprofil samt jorddjup över Rävlandatunneln. Rött indikerar höjden på berggrundens överyta och svart indikerar höjden på markytans överyta. Skillnaden där emellan är alltså jorddjupet. . . .	58
4.11	Tunnelbitar som använts vid beräkning.	58
4.12	Visualisering av valda brunnar vid beräkning.	60
4.13	Höjddprofil samt jorddjup över Rävlandatunneln. Rött indikerar höjden på berggrundens överyta och svart indikerar höjden på markytans överyta. Skillnaden där emellan är alltså jorddjupet. . . .	65
5.1	Flödesschema för aktiv design vid byggnation av Citybanan [76]. . . .	72
A.1	Jordartskarta över området mellan Mölnlycke och Bollebygd	II
A.2	Berggrundskarta över området mellan Mölnlycke och Bollebygd . . .	III
A.3	Beräkning av transmissivitet samt konduktivitet	IV
A.4	Värden för beräkning av inläckage i tunnel	V
A.5	Valda brunnar vid beräkning av inläckage	VI
A.6	Illustrering av de omkringliggande vattendragen för Rävlandatunneln	VII
A.7	Jordarter kring Rävlandatunneln	VIII
A.8	Högsta kustlinjen i området Mölnlycke-Landvetter	IX
A.9	Högsta kustlinjen i området Landvetter-Rävlanda	X

Tabeller

4.1	Jordlagerföljd utmed Rävlandatunneln, baserad på SGU:s brunnsarkiv	54
4.2	Grundvattennivå för det undre magasinet belägen under lera. Höjdsystemet RH2000 används.	56
4.3	Grundvattennivå för brunnar i berg. Höjdsystemet RH2000 används.	56
4.4	Transmissivitet samt konduktivitet för deformationszon	59
4.5	Transmissivitet samt konduktivitet för kompakt berg	59
4.6	Inläckage i liter/min·100m för kompakt berg	59
4.7	Inläckage i liter/min·100m för deformationszon	59
4.8	Jordlagerföljd för valda brunnar i anslutning till övergång mellan jord berg	60
4.9	Uppskattad transmissivitet för jord i övergång mellan jord och berg .	61
4.10	Beräknat inläckage efter injektering. Den återstående transmissiviteten efter injektering antas vara $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	62

1

Inledning

Stora delar av Sveriges stambanor har blivit omoderna. Det finns därför ett behov av en uppdatering av järnvägsnätet. Det planeras för sträckor med höghastighetsjärnväg mellan Göteborg-Stockholm och Malmö-Stockholm. Delsträckan Mölnlycke-Bollebygd ingår i det planerade stamnätet och på längre sikt är tanken att knyta ihop Sveriges tre största städer med höghastighetsjärnväg, vilket syns i figur 1.1. Målet med det nya stamnätet är att kunna ta sig från Göteborg och Stockholm på mindre än 2 timmar och mellan Malmö och Stockholm under 2,5 timmar. För att klara denna tidsram är Trafikverkets mål i dagsläget att dimensionera de nya järnvägssträckorna för en hastighet på 320 km/h [18].



Figur 1.1: Sveriges planerade stamnät med korridorsbredder som indikerar varje sträckas planeringsskede [18].

Järnvägsnätet planeras att trafikeras av höghastighetståg och snabbare regionaltåg [18]. Detta leder till en lägre hastighetsdifferens än vad som finns på järnvägsnätet i dagsläget. En högre kapacitet på nätet kommer därmed uppnås. Delsträckorna i detta projekt är i olika faser [18]. Vissa sträckor har i stort sett bestämda dragningar, och är redo att lämnas över till projektering på detaljnivå. Andra sträckor är i tidiga projekteringskedan för vilken korridor som ska väljas.

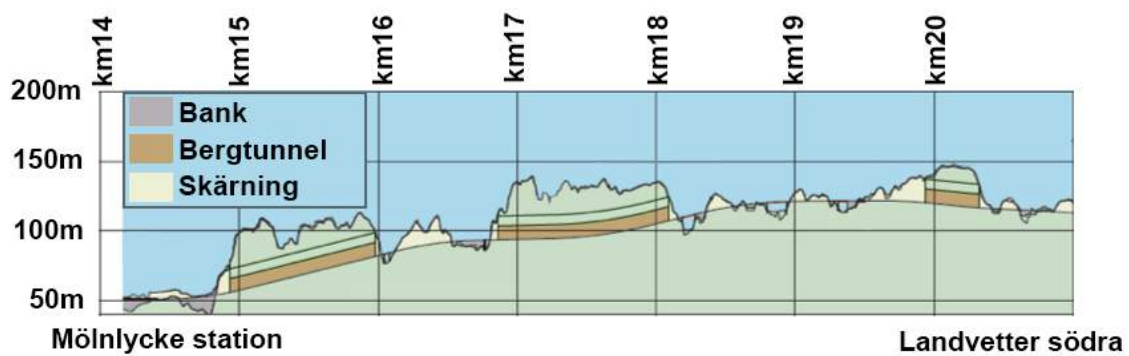
Kust till Kustbanan ska byggas ut med ett dubbelspår mellan Göteborg och Borås, via Landvetter flygplats. Utbyggnaden är en för regionen strategiskt viktigt projekt. Denna utbyggnad kommer återigen göra rälstrafiken till ett konkurrenskraftigt färdmedel. Dels lokalt, då det kommer binda ihop regionens största städer, Borås och Göteborg, men också i ett nationellt perspektiv då den i ett senare skede kommer förbinda Stockholm och Göteborg med höghastighetståg [8].

Sträckan Mölnlycke-Bollebygd är en av tre etapper som ingår i delen Göteborg-Borås, vars dragning kan ses i figur 1.2. Sträckan befinner sig i järnvägsplanskedet, vilket liknas vid en detaljplan. Delsträckan har studerats i denna rapport eftersom det finns mycket material framtaget som anses användbart. Projektet Mölnlycke-Bollebygd fick inte budgetstöd av regeringen då andra delar av den planerade stambanan prioriterades i den nationella plan som togs fram för 2018. Delsträckorna som prioriterades var Ostlänken och sträckan Lund-Hässleholm [105]. Materialet som hittills tagits fram för delsträckan Göteborg-Bollebygd hanteras på ett sådant sätt att paketering för användning i framtiden ska kunna göras.

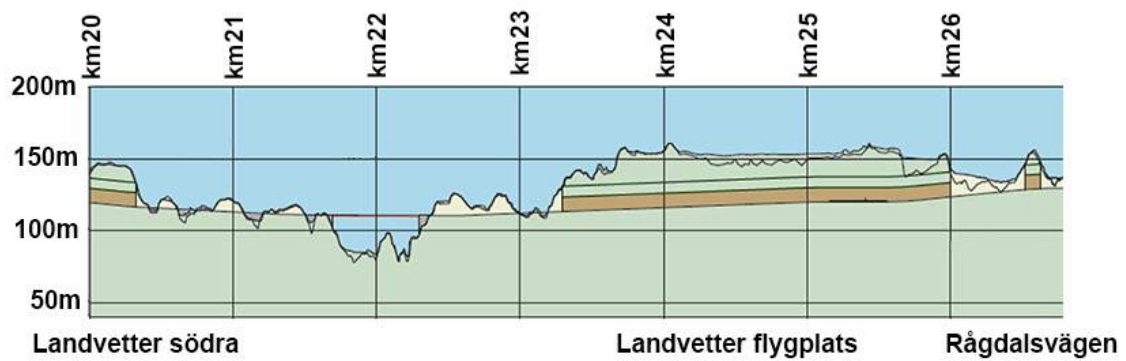


Figur 1.2: Delsträcka Mölnlycke-Bollebygd [18].

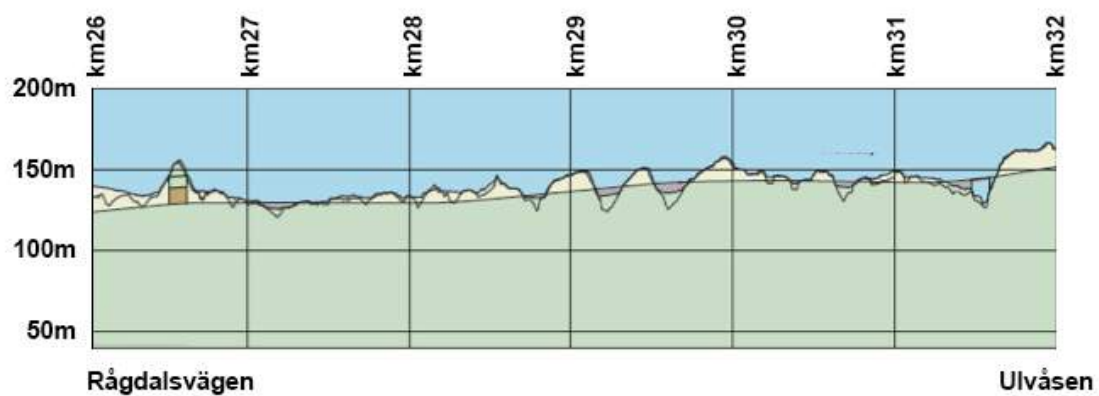
Topografin för järnvägskorridoren, som är planerad att gå i öst-västlig riktning, karaktäriseras av ett varierande kuperat landskap med både topografiska sänkor och höjder. I figurerna 1.3, 1.4, 1.5 samt 1.6 redovisas sträckan Mölnlycke-Bollebygd i genomskärning. Den visar bland annat att den maximala höjddifferensen uppgår till cirka 100 m. Figurerna visar den stora mängd tunnlar, skärningar, bankar och broar som behöver konstrueras i den nuvarande utformningen. Förslag på att lägga spåren djupare syns i figur 1.6, vilket innebär mer spår i tunnel, men även ökade kostnader. Dessa förslag har därför inte gått att motivera då de inte är ekonomiskt försvarbara [18].



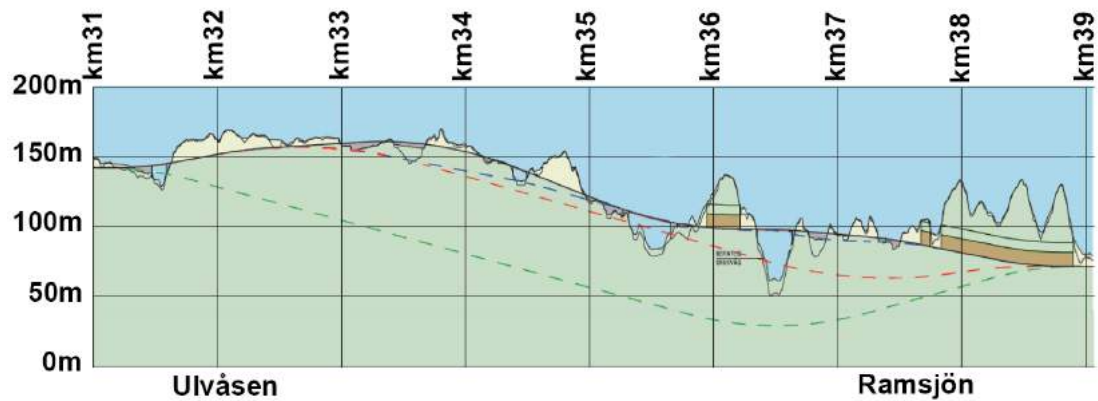
Figur 1.3: Topografi för sträcka Mölnlycke station-Landvetter södra. Figur från Trafikverket [18].



Figur 1.4: Topografi för sträcka Landvetter södra-Rågdalsvägen. Figur från Trafikverket [18].



Figur 1.5: Topografi för sträcka Rågdalsvägen-Ulvåsen. Figur från Trafikverket [18].



Figur 1.6: Topografi för sträcka Ulvåsen-Ramsjön. Figur från Trafikverket [18].

Höghastighetståg ställer höga krav på svag lutning, därför utesluts en spårdragning längs markytan [49]. Den ovan redovisade djupprofilen är framtagen av konsulter på beställning av Trafikverket. Djupprofilen anses i studien vara gällande.

Fokuset som läggs på injektering i samband med tunnelbyggnation grundar sig i ett miljömässigt hållbarhetsperspektiv. Tunnelbyggnation påverkar grundvattnet, som i sin tur påverkar kringliggande natur och miljö. En tunneldragning kan komma att påverka fyra av de sexton uppsatta miljömål Sveriges regering tagit fram till 2020. De fyra miljömålen som kan komma att påverkas redovisas nedan [69]:

- grundvatten av god kvalitet [46].
- ett rikt odlingslandskap [19].
- levande skogar [5].
- ett rikt växt och djurliv [102].

Valet av injekteringsmedel kan påverka kvalitén på grundvattnet då ämnen i dessa tätningsmedel kan leda till förorening av grundvattnet. Ett exempel är användandet av tätningsmedlet Rhoca-Gil år 1997 i projektet Hallandsåstunneln [54]. Detta resulterade i att flera djur och växter dog. Något som eventuellt kunnat förhindras genom noggranna förundersökningar och övervägande av tätningsmaterial.

Utöver de miljömässiga kraven ställs även funktionskrav för att erhålla en fungerande tunnel. Dessa funktionskrav bygger på att tåg ska kunna framföras på ett säkert och effektivt sätt. Ett inläckage bidrar till att detta inte kan säkerställas. För att uppnå miljömålen samt funktionskraven för tunneln är det därför viktigt att använda injektering för att tätta tunneln. I kombination med injektering är det vanligt att infiltrationsanläggningar anläggs som en ytterligare skyddsåtgärd för att hålla grundvattennivåer på en kontrollerad nivå.

Val av injekteringsmetod i ett bergtunnelprojekt bygger på att bergstypen ofta varierar över tunnelsträckningen. Det kan finnas exempelvis deformationszoner och jord-berg övergångar med olika stor utbredning. Därför görs indelningar av berget där zoner klassificeras utefter zonens egenskaper. Därefter bestäms optimal injekteringsmetod för varje definierad zon. Denna projekteringsmetod kallas observationsmetoden.

1.1 Problemformulering

- Vilka hydrogeologiska problem förväntas vid tunneldragning för delsträckan Mölnlycke-Bollebygd?
- Vilken tunneldragning på delsträckan Mölnlycke-Bollebygd anses mest problematisk ur injekteringssynpunkt?
- Vilka injekteringsmetoder bör tillämpas vid de två vanligaste bergtypsfallen samt vid jord-berg övergång för den mest problematiska tunneln på sträckan Mölnlycke-Bollebygd vid tillämpning av observationsmetoden?
- Behövs ytterligare skyddsåtgärder utöver injektering med avseende på grundvatten i miljöerna kring den mest problematiska tunneln på sträckan Mölnlycke-Bollebygd?

1.1.1 Syftesformulering

Rapportens syfte är att genom tillämpning av observationsmetoden klassificera berget utifrån dess hydrogeologiska egenskaper, för en bergtunnel på sträckan Mölnlycke-Bollebygd, samt att definiera injekteringsmetoder för varje fastställd zon utifrån identifierade omkringliggande skyddsobjekt samt hydrogeologiska egenskaper i området.

1.2 Data

Nedan redovisas data som använts i rapporten för att generera figurer samt karakterisering områden. Detta är en sammanställning, datan återkopplas på respektive del där de använts.

- Brunnsdata från SGU (Produkt: Brunnar)
 - Har använts vid bestämmande av grundvattnets nivå under markytan, beräkning av transmissivitet samt vid studering av jordartsföljder.
- Vattendrag från Lantmäteriet (Produkt: Fastighetskartan - Hydrografi)
 - Har använts vid visualisering av positiva hydrauliska gränser i området.
- Flygfoto från Lantmäteriet (Produkt: GSD-Ortofoto)
 - Har använts vid visualisering av området och delsträckan Mölnlycke-Bollebygd.
- Höjddata från SGU (Produkt: GSD-Höjddata, grid 2+)
 - Har använts vid beräkning av tillrinningsområde, beräkning av absoulthöjd hos grundvattnet samt vid framtagning av topografibilder.
- Berggrundskartor från SGU (Produkt: Berggrund 1:50 000 - 1:250 000)
 - Har använts vid visualisering av berggrunden i området.
- Jordartskartor från SGU (Produkt: Jordarter 1:25 000 - 1:100 000)
 - Har använts vid visualisering av jordarterna i området samt vid lokalisering av brunnar i särskilda jordarter.
- Jorddjup från Lantmäteriet
 - Har använts vid visualisering av jorddjupet i sektionen över Rävlanda-tunneln.
- Högsta kustlinjen från SGU (Produkt: Högsta kustlinjen)
 - Har använts vid analysering och visualisering av högsta kustlinjen.

1.3 Metod

Arbetet består till största del av litteraturanalys hämtad från redovisade källor. Genom dessa källor har information om tunnelbyggnation och specifikt injektering i tunnlar tagits fram.

Hydrogeologi i området har undersökts med hjälp av kartmaterial. Brunnsarkivet från SGU använts för att ta reda på hydrogeologiska egenskaper i området. Brunnsarkivet grundas på befintliga brunnar i området. Genom detta har exempelvis en uppskattning av grundvattenförhållanden samt permeabilitet kunnat kartläggas.

De analyser som gjorts bygger på den data som tidigare nämnts. Metoder som är rimliga för arbetet med fokus på tunneltätning har använts.

Utifrån de problem som har uppkommit i projektet har tekniska lösningar tagits fram. Dessa har baserats på litteraturstudier samt liknelser i verkliga projekt och deras lösningar på liknande problem.

2

Teori

2.1 Områdesbeskrivning

2.1.1 Berggrundens historia

Hela sektionen ligger i den så kallade Sydvästsvenska gnejssträngen, vilken även kallas Svekonorvegiska bergskedjebildningen eller orogenen [10]. Under högt tryck och upphettning omvandlades berggrunden i samband med en bergskedjebildning för 1000-1150 miljoner år sedan. Innan detta hade området varit utsatt för upprepade metamorfoser, vilket är en omvandling av bergets mineral under höga tryck- och temperaturförhållanden [64]. De upprepade metamorfoserna har orsakat den tämligen komplexa uppbyggnaden av berggrunden [10]. Det är även dessa som orsakat gnejsigheten i området.

Den Svekonorvegiska bergskedjebildningen delas in i två huvudsakliga delar med olika egenskaper; Idefjordsterrängen samt Östra segmentet [10]. Sträckningen Mölnlycke-Bollebygd ligger i sektionen Idefjordsterrängen. I höjd med Bollebygd separeras de två delarna av Mylonitzonen, vilket är en nord-sydlig regional deformationszon. Den består av flackt liggande zoner med hårt deformerade bergarter och sträcker sig flera kilometer. De plastiska deformationszonerna i sektionen ligger mestadels parallellt med gnejsigheten, medan de spröda deformationszonerna skär med varierande vinkel genom gnejsigheten [10].

Idefjordsterrängen består mestadels av 1600 miljoner år gamla bergarter vilka tillhör göteborgssviten som domineras av tonalit och granodiorit [10]. Dessa bergarter är ofta ådrade och kraftigt gnejsiga.

Figur A.2 visar berggrunden i sektionen. Den består av:

- Sur intrusivbergart, såsom granit, granodiorit och monzonit.
- Sur intrusivbergart som är porfyrisk eller ögonförande.
- Ultrabasisk, basisk och intermediär intrusivbergart såsom gabbro, diorit och diabas.

- Porfyrisk och ögonförande kvarts-fältspatrik omvandlad bergart såsom gnejs och granitisk gnejs.

2.1.2 Geologisk historia

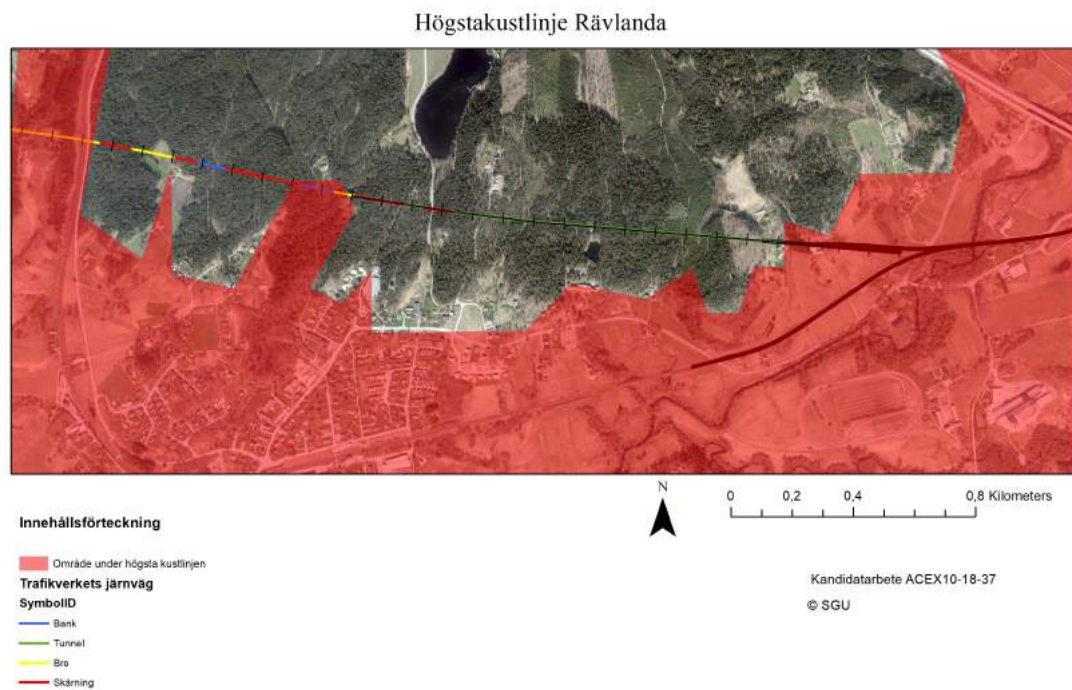
Efter istiden var Sverige nedtryckt under den då rådande havsytan. Landet började sedan successivt höjas då trycket på jordskorpan reducerades i och med den smältande isen [81]. Det är en process som fortfarande pågår. I och med landhöjningen finns det i Sverige stora områden som har torrlagts.

Högsta kustlinjen kallas den nivå som havet nådde då det stod som högst under eller efter den senaste istiden [60]. Högsta kustlinjen varierar i landet, och i Göteborg ligger den på cirka 97 m.ö.h. [26]. De östra delarna av sektionen ligger under högsta kustlinjen [8]. Det betyder att materialet utsatts för svallning och omlagring, samt att det här återfinns marint avsatta leror.

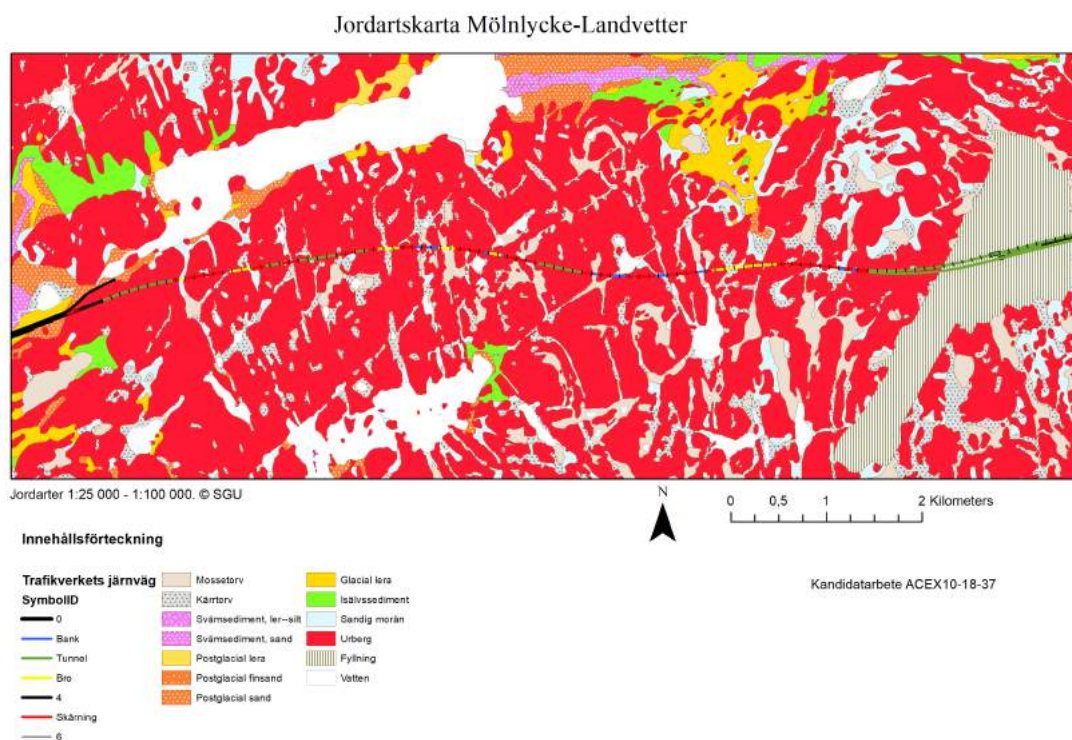
Den morän som återfinns under högsta kustlinjen är ofta omlagrad av de vattenvågor som påverkat materialen [81]. Då vattnet kunnat transportera och sedimentera finkornigt material tenderar dessa områden att ha en mer komplex jordlagerföljd. Regioner under högsta kustlinjen har tidigare varit täckta av vatten, där betydande mängder lera och silt avsatts på de lägst belägna nivåerna. Moränen blir då täckt av finkorniga jordarter i lager med olika mäktighet. Sedimenten består av yngre postglaciala sediment som avsatts efter att inlandsisen lämnat området samt av äldre glaciala sediment som transporterats av smältvattnet från inlandsisen. Då dessa områden torrlagts utgörs de idag av lerslätter med hög vattenhållande förmåga. Längs vattendrag och kuster, där vågor och strömmar eroderar jordarterna, sker det fortfarande en omlagring och avsättning av jordarter.

För noggrannare kartläggning av högsta kustlinjen i området Mölnlycke-Bollebygd, se figur A.8 samt figur A.9.

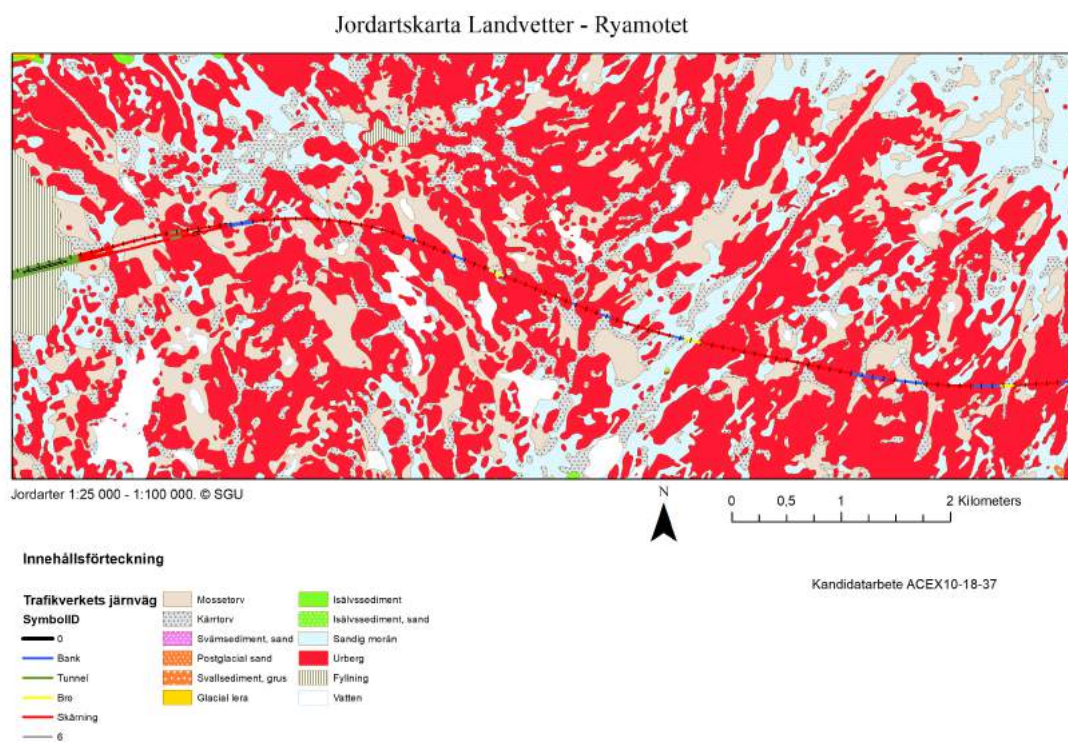
Figur 2.2, 2.3 samt 2.4 visar jordartskartorna för sträckan Mölnlycke-Bollebygd. Figurerna visar att området mestadels består av urberg, kärrtorv och mosstorv med inslag av olika slags moräner. Moränerna och isälvs materialet återfinns till stor del i områdets stora topografiska sänkor. En jordartskarta över hela sektionen finns redovisad i figur A.1.



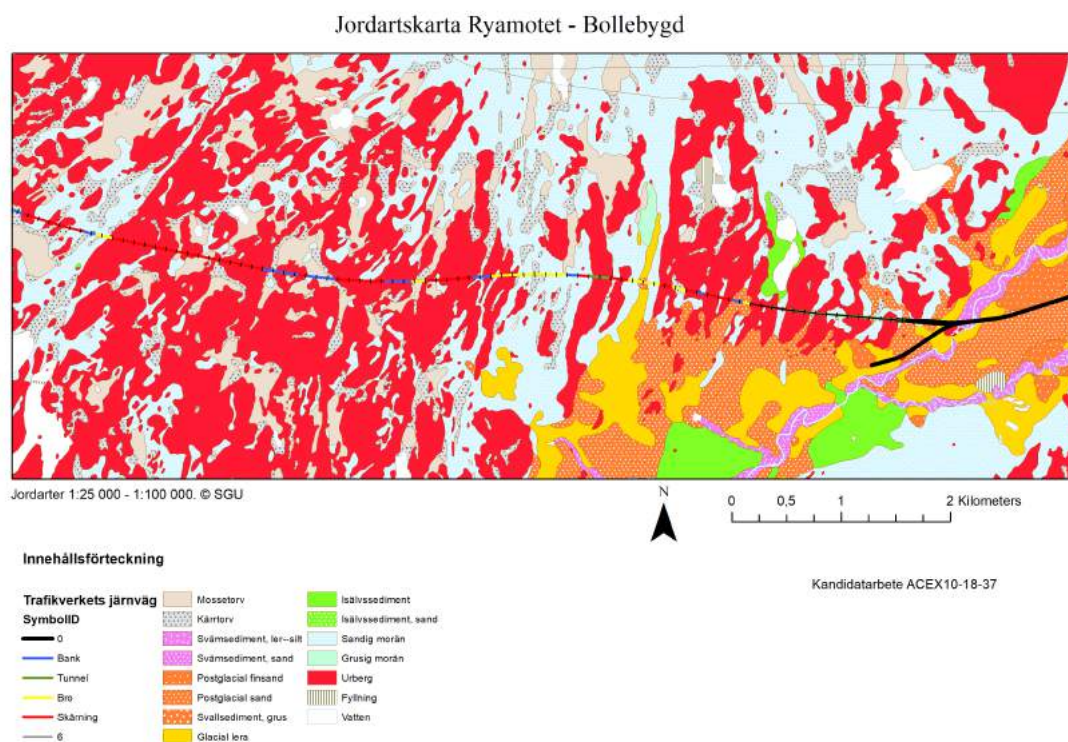
Figur 2.1: Högsta kustlinjen för Rävlanda.



Figur 2.2: Jordartskarta från Mölnlycke till Landvetter.



Figur 2.3: Jordartskarta från Landvetter till Ryamotet.



Figur 2.4: Jordartskarta från Ryamotet till Bollebygd.

2.1.3 Nederbörd samt avdunstning för området

Enligt SMHI har området Mölnlycke-Bollebygd en medelnederbörd på omkring 1000 mm per år [86]. Detta värde är framtaget under åren 1961-1990. Det förekommer dock extremfall där nederbörden som maximalt uppgått till 1600 mm under ett år [85].

Medelvärde för avdunstningen är i området 400-500 mm per år [82]. Noteras dock att potentiella avdunstningen uppgår till mellan 600-700 mm per år [84]. Potentiell avdunstningen innebär hur stor avdunstningen hade varit från en gräsbeklädd mark utan vattenbrist i området. Detta värde ger en fingervisning på hur stor den möjliga avdunstningen är [87].

Även dessa värden är för åren 1960-1991. Med vissa förenklingar i beaktning bidrar den nederbörd som inte avdunstar till det befintliga grundvattenmagasinet [108]. Bland de faktorer som även spelar roll är storleken på den genomträngliga respektive ogenomträngliga markytan. Detta då en ogenomtränglig yta förhindrar infiltration, och skapar en ytavrinning.

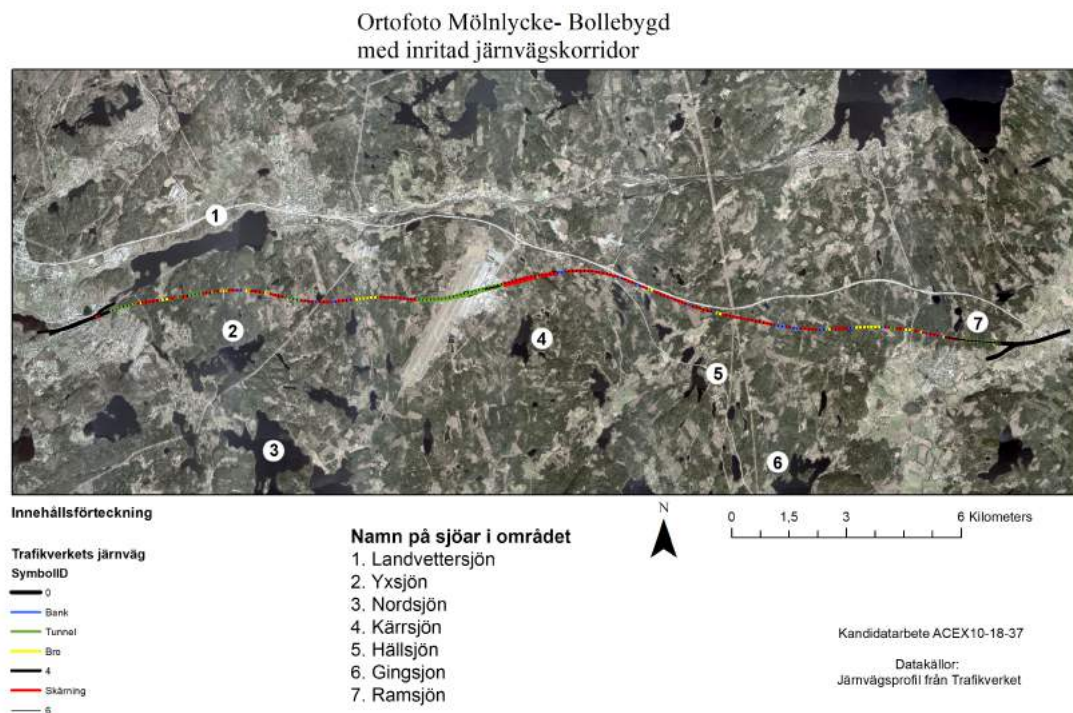
2.1.4 Sjöar och vattendrag i området

Järnvägsdragningen mellan Mölnlycke och Bollebygd passerar flertalet sjöar samt vattendrag. I figur 2.5 finns dessa visualiserade.

Landvettersjön är belägen i anslutning till järnvägsdragningens början i Mölnlycke. Mölndalsån rinner genom sjön. Längs den södra sidan av sjön går den nu existerande järnvägen mellan Borås och Göteborg, en del av Kust till kust-banan. Även höghastighetsjärnvägen mellan Mölnlycke och Bollebygd är planerad att gå längs sjöns södra sida. Landvettersjön är ett fint rekreationsområde med många badplatser för de boende i området.

På östra sida av Landvetter flygplats ligger Kärrsjön. Den är belägen cirka en kilometer söder om järnvägsdragningen.

I höjd med Rävlandatunnelns mynning ligger Ramsjön vilket är ett högt värderat rekreationsområde för invånarna i Rävlanda. Vid mitten av den planerade tunneln finns en mindre damm belägen och ett par hundra meter därifrån passerar Nolån genom området.



Figur 2.5: Visualisering av sjöar och vattendrag längs järnvägsdragningen mellan Mölnlycke och Bollebygd.

2.1.5 Tillrinningsområde

Ett tillrinningsområde är den markyta från vilken vatten rinner till sjöar, vattendrag eller andra vattenansamlingar [67]. Här menas endast området kring vattenansamlingen. Ett avrinningsområde omfattar däremot både markytan från vilken vattnet rinner från samt vattenansamlingarnas ytor [83].

För att bedöma vilka delar av tillrinningsområdet i sektionen som är primära tillrinningsområden, det vill säga områden som aktivt bidrar till grundvattenbildningen, kan två typfall användas [47]. Det första är öppna grundvattenmagasin som har grundvattenförekomster i isälvsavlagringar med omgivande berg- och moränsluttningar över högsta kustlinjen. Det andra typfallet är slutna eller delvis öppna grundvattenmagasin som har grundvattenförekomster i isälvsavlagringar som helt eller delvis täcks av finsediment under högsta kustlinjen. De östra delarna av den valda sektionen ligger under högsta kustlinjen, medan de västra ligger över högsta kustlinjen. Detta betyder att båda fallen kan tillämpas på den planerade järnvägssträckan mellan Mölnlycke-Bollebygd.

Hur stor och var grundvattenbildningen sker beror på omfattningen av nederbörden och avdunstningen, områdets dräneringsmönster och de hydrogeologiska

förutsättningarna som gradient, jordens mäktighet, jordart, grundvattenuttag samt djup till grundvattenytan [47]. Om en sjö eller vattendrag har hydraulisk kontakt med grundvattenmagasinet kan det betyda att tillrinningsområdet är betydligt större till dessa än till själva grundvattenmagasinet. Detta på grund av att vattendragets tillrinningsområde då även innefattar grundvattenmagasinets tillrinningsområde.

I området mellan Landvetter och Bollebygd återfinns mycket morän samt en mindre del isälvsediment, se figur 2.3 samt figur 2.4. Morän är en osorterad jordart vars egenskaper beror på sammansättningen av olika kornstorlekar [91]. Dess genomsläpplighet varierar från låg till måttlig, vilket betyder att det har relativt goda vattenförande egenskaper. Isälvsediment är en sorterad jordart med hög genomsläpplighet och har därigenom goda vattenförande egenskaper. Då en sjö eller ett vattendrag står i kontakt med dessa jordarter kan vatten med enkelhet transporteras.

För att bedöma storleken på tillrinningsområdet kan vattendelare tas fram genom topografiska kartor. Då man räknar ut påverkansområdet för en undermarkskonstruktion tar man även hänsyn till vilken nivå under markytan konstruktionen ligger på samt områdets hydrauliska konduktivitet. Då konstruktionen ligger i anslutning till morän kan avsänkingsområdet sträcka sig långt på grund av moränens goda vattenförande förmåga.

2.2 Hydrogeologisk påverkan vid tunnelbyggnad

2.2.1 Grundvatten

Grundvatteninflödet i tunnlar är ojämnt distribuerat över bergytan, vilket gör att det är väldigt komplicerat att ta fram detaljerade förutsägelser över inflödets storlek [29]. Inflödet behöver därför beräknas över en särskild delsträcka av tunneln. Detta inflöde avgör sedan vilka injekteringsåtgärder som krävs för att klara de krav som ställs på tunnelbyggnationen. Sprickornas hydrauliska förmåga samt dess transmissivitet är viktiga parametrar som behöver utredas för att sedan kunna räkna ut injekteringslängden samt den resulterande permeabiliteten. Injekteringslängd är den längd som injekteringsmedlet behöver föras in i sprickorna för att de ska bli tätare. Den grundvattenströmning som sker i anslutning till en tunnel har ett tredimensionellt flödesmönster. Detta gör att hänsyn till den nivåskillnad som bildas måste beaktas mellan grundvattnets trycknivå i en viss punkt och grundvattenytan [96]. Den maximala grundvattensänkningen kan antas vara till tunnelns sula.

Darcys lag säger att den totala potentialskillnaden mellan två punkter, den drivande kraften, är proportionell mot strömningen mellan två punkter i marken [74]. Darcys lag kan beskrivas med ekvation 2.1.

$$Q = K_s \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Q är volymflödet, K_s är jordens mättade hydrauliska konduktivitet, A är tvärsnittsarean, Δh är potentialförlusten $h_1 - h_2$ och Δx är höjdförändringen $x_1 - x_2$ i jordmaterialet. Då potentialförlusten är hög är även flödet högt, vilket betyder att det vid höga potentialskillnader blir problematiskt att injektera.

Hydrogeologiska parametrar har ofta stor spridning och uppvisar anisotropa egenskaper eftersom de geologiska miljöer där grundvatten förekommer många gånger är heterogena [96]. Ett exempel på en sådan parameter är hydraulisk konduktivitet, vilken under korta avstånd kan variera med flera tiopotenser. Även berggrunden kan ha stora variationer i de hydrauliska egenskaperna. På grund av detta är det därför inte möjligt att få exakta och detaljrika hydrauliska egenskaper för det område som undersöks. Detta leder i sin tur till att prognoserna för grundvattenströmning i berg blir oviss. Hydrogeologiska beräkningsmodeller är därför en förenkling av verkligheten.

I en hård och tät bergart fyller grundvatten de hålrum som finns i sprickorna i berget [17]. Grundvattnet bildas genom infiltration av ytvatten, antingen från ytvattentäkter eller direkt från nederbörd. Grundvattenförhållandena är beroende av geologiska, topografiska, hydrologiska samt klimatologiska omständigheter. I den valda sektionen mellan Mölnlycke och Bollebygd domineras området av kristallin berggrund, vilken består av främst granit och gnejs. Denna berggrund är relativt tät och svårgenomsläpplig för vatten, förutom i de sprickzoner som finns lokaliserade, se sektion 4.2.1. Enligt ekvation 2.2 är bergets hydrauliska konduktivitet proportionerlig mot sprickfrekvensen i berget.

$$K = T_f \cdot \gamma \quad (2.2)$$

K är bergets hydrauliska konduktivitet, T_f är transmissivitet och γ är sprickfrekvensen i berget i enheten $1/m$ [17]. Hur grundvattnet uppträder beror på var öppna vattenförande sprickor förekommer i berget. De primära porositets- samt permeabilitetsvärdena hos det kristallina urberget är så små att de i grundvattensammanhang kan försummas. Detta betyder att sprickor och sprickzoner till stor del avgör de injekteringsinsatser som behövs för att klara de ställda kraven på inläckage i undermarkskonstruktioner. Förutsättningarna för att stora mängder grundvatten ska bildas, strömma och magasineras beror på förekomsten av sprickiga bergarter.

Grundvattennivån indikerar även hur stort trycket i leran är, det vill säga hur portrycksfördelningen ser ut. Hydrostatiskt portryck kallas den enklaste portrycksfördelningen som kan påträffas i naturen [109]. När hydrostatiskt tryck råder orsakas trycket enbart av vattnets egentynghet på alla nivåer under markytan. En hydrostatisk portrycksfördelning inträffar endast då det ej förekommer någon

grundvattenströmning eller då den enbart är horisontell. Mänskliga ingrepp kan förändra portrycksfördelningen. Det innebär att en tunnelbyggnation kan ge upphov till nya flödesmönster om ett inläckage sker och därmed en förändrad portrycksfördelning.

2.3 Konsekvenser av en grundvattenavsänkning

En grundläggande aspekt till varför injektering görs i samband med tunnelbyggande är för att undvika en grundvattenavsänkning. Då en tunnel byggs kommer denna att agera som ett dränerade element i markprofilen.

Följderna av en eventuell grundvattenavsänkning kan vara att växtlighet tar skada då vattenresurser försvinner. I samband med detta kan djurlivet i området utrotas. En sådan ekologisk påverkan bör undvikas. En ytterligare effekt är att sättningar kan uppstå i samband med en grundvattennivåsänkning. Då det finns skyddsobjekt i området kan detta få omfattande konsekvenser. Att åtgärda en sättning som skett under närliggande skyddsobjekt är kostsamt ekonomiskt sett. Dessutom kan det bli negativa ekonomiska konsekvenser ur juridisk synpunkt. Sättningar i naturen kan även leda till en negativ ekologisk påverkan då man förändrar landskapet. Ett förändrat landskap kan innebära att vattnets flödesriktningar ändras vilket i sin tur kan leda till torrlagda naturområden samt jordbruksmarker.

En inventering av naturvärden görs för att bedöma vilka skyddsåtgärder som behöver inrättas kring undermarkskonstruktionen. Då en inventering gjorts utvärderas denna och tas med som parameter i projekteringen av injekteringsmetoder. En högre grad av skyddsobjekt i området för tunneldrivningen resulterar i mer omfattande skyddsåtgärder.

Om den injektering som utförts inte är tillräcklig kan efterinjektering användas för att uppfylla täthetskraven. Om däremot kraven för grundvattensänkning inte uppfylls kan infiltration användas som en ytterligare skyddsåtgärd. Infiltration innebär att vatten tillförs vattenmagasinet som ersättning för det utläckande vattnet ur magasinet. Genom infiltration kan grundvattennivån styras och därmed förhindra en grundvattenavsänkning.

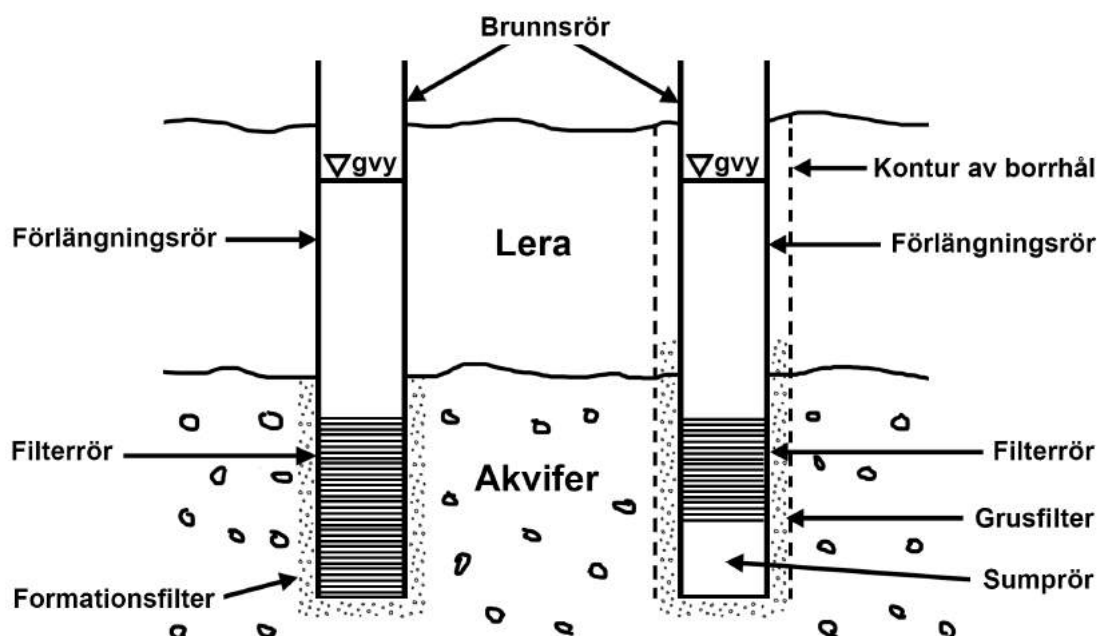
Ytterligare skyddsåtgärder är att tätspont installeras som avgränsning för påverkansområdet. Dämmen kan byggas för att hindra att vattenflödet i våtmarker strömmar mot tunneln om denna ligger grunt⁴.

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

2.4 Infiltration

Infiltrationsanläggningar använder en process där grundvattenmagasin på konstgjort vis fylls på med vatten. Detta görs främst för att undvika grundvattensänkning. Det är framförallt under byggnationen det är viktigt att vara beredd med infiltration då tunneln inte med säkerhet är tät [78].

En infiltrationsbrunn kan likställas med en uttagsbrunn. Infiltrationsbrunnen fylls på med vatten som sedan sprids vidare horisontellt ut i marken [4]. Ofta kan de brunnar som använts till grundvattenmätningar i förundersökningsstadiet även användas vid infiltration. Det är viktigt att de brunnar som förbereds för infiltration har god kontakt med den akvifer de avser fylla [7].



Figur 2.6: Principiell skiss över infiltrationsbrunn i tvärsnitt [3].

Brunnar konstrueras olika beroende på vilken geologi som förekommer. I 2.6 visas två principiella konstruktioner. Brunnen behöver oftast passera genom någon typ av lågpermeabelt material, exempelvis lera. Vattnet fyller sedan akviferen som antingen finns i de konduktiva materialen under leran eller i det sprickiga berget. En viktig funktion i konstruktionens design är filtren som dels ökar brunnens konduktivitet, men också avgränsar omgivande material från att vandra in och täppa till brunnen [70].

Ofta sker det en initial grundvattensänkning under tunneldrivningen innan tätningåtgärder har påbörjats. Därför skapas infiltrationsstationer innan eller strax efter att tunneldrivningen påbörjats. Dessa infiltrationsstationer står då redo när projektet påbörjas och kan då användas från start vid behov¹.

¹Lander, Sofia; Platschef vid Veidekke Entreprenad AB. 2018. Intervju 2 mars

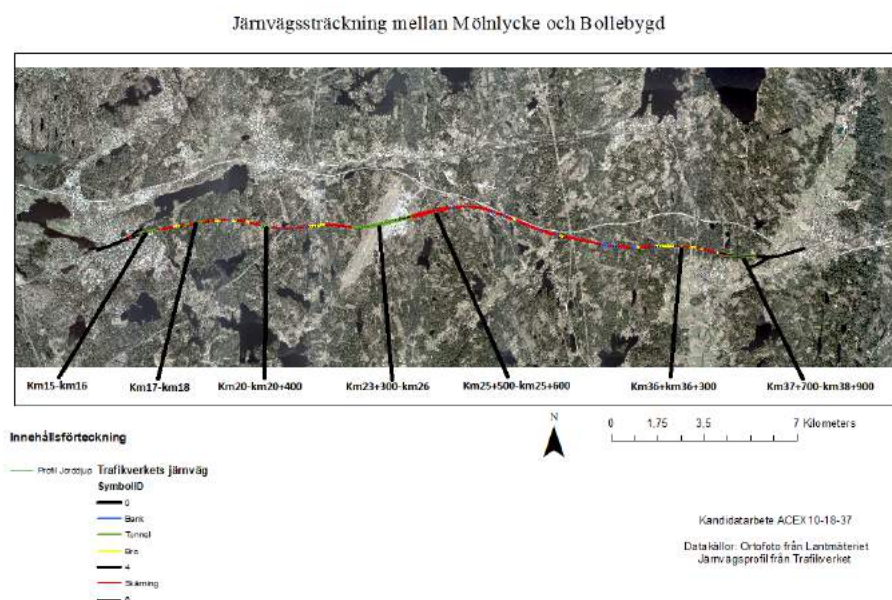
Stora variationer finns i infiltrationens tekniska genomförande. Den absolut enklaste formen av infiltration är att bevattna marken med en vattenkälla. En mer avancerad metod är att infiltrationsanläggningen måste trycksättas för att kunna fylla på akviferer med artesiskt tryck⁴.

2.5 Naturvärden

Sverige är unikt i sina natur- och miljölagar på så sätt att natur och miljö oftast har hög prioritet vid byggnation. Exempel på detta är när en gasklocka i Göteborg skulle rivas men försenades då en pilgrimsfalk hade sitt bo i denna gasklocka [33]. För alla projekt med järnvägsdragningar görs naturvärdesinventeringar för identifiera på vilka typer av naturvärden som finns samt vilken grad naturvärdena har. Detta för att projektera skyddsåtgärder efter dessa.

Naturvärden har stor inverkan då en tunnels öppningar formges. Utformningen bör vara på ett sätt som inte påverkar kringliggande naturmiljö negativt i den mån att djur och natur inte skadas. Det ska exempelvis vara möjligt för djur att passera på ett säkert och naturligt sätt.

Naturvärdena för tunnelsträckningarna är sammanfattade från Trafikverkets naturvärdesinventering för området mellan Mölnlycke-Bollebygd [103]. Var tunnelsträckorna är lokaliserade kan ses i figur 2.7.



Figur 2.7: Planerad järnvägsdragning mellan Mölnlycke och Bollebygd med tunnelsträckor markerade.

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

2.5.1 Km15-km16

De naturvärden som finns i området är skog, träd samt vattendrag. I detta område skall det undvikas att på något sätt sänka grundvattennivåerna för att inte påverka naturvärdena. En skyddsåtgärd här är att infiltrera eller lägga mycket resurser på att täta tunneln så dränering av området inte är möjlig. I området ligger även Landvettersjön. Beroende på nivåskillnaden mellan tunnel och sjö får antaganden göras. Ligger tunneln under sjöns nivå bör utredning göras om infiltration är nödvändig då tillflödet från sjön kan bidra till att vattennivån inte sänks till kritisk nivå. Ligger tunneln över sjöns höjdnivå måste utredning gällande vattentransport av skadliga ämnen ner till sjön göras.

2.5.2 Km17-km18

Denna sträcka präglas av skog och träd med relativt hög naturvärdesgrad. Här är det viktigt att undvika en grundvattensänkning. På samma sätt får en utvärdering göras om det finns ett tillflöde från sjön som bidrar till att eventuella skyddsåtgärder med avseende på grundvattenavsänkning blir överflödiga. Den östra öppningen av tunneln på sträckan ligger i nära anslutning till Yxsjöns naturreservat och bevarande av naturmiljön i detta område är av stor vikt.

2.5.3 Km20-km20+400

I området finns det två myrar. För att undvika uttorkning av dessa bör konstgjord infiltration, alternativt extra tätning av tunneln genomföras. Beaktning i området bör framförallt tas till att djurlivet i detta område inte får förändras. Kontinuerliga undersökningar och åtgärder bör därför göras under arbetets gång och en plan innan arbetet börjar tas fram.

2.5.4 Km23+300-km26

Denna tunneldragning planeras gå under Landvetter flygplats. I området finns endast ett naturvärde i form av betesmark att ta hänsyn till. I detta område är grundvattenavsänkning inte av stor vikt då växter i området snarare använder regnvatten som vattenkälla än grundvattnet.

2.5.5 Km25+500-km25+600

Inget av naturvärde dokumenterat.

2.5.6 Km36-km36+300

Inget av naturvärde dokumenterat.

2.5.7 Km37+700-km38+900

I området finns skog och träd att ta i beaktning. I tunnelslutet finns diverse grunda vattendrag och myrar. Området är därför känsligt mot en grundvattenavsänkning och eventuell konstgjord infiltration bör undersökas i detta område. I området ligger många gamla gårdar med ett högt kulturvärde. Det är viktigt att omkringliggande miljö inte påverkas.

2.6 Samhällets krav

När det kommer till tunnelbyggande ställer samhället en rad krav, där de flesta krav utgår från den hållbara utvecklingen. Begreppet innebär att nutidens utveckling inte får äventyra kommande generationers möjligheter till att tillfredsställa sina behov [20]. Det betyder att den utveckling och bebyggelse som sker idag inte får riskera att förstöra eller förändra de ekosystem och grundvattenförekomster som finns [45]. Kraven från samhället speglar sig i lagar, förordningar och regler [89].

2.6.1 Eurokod och konstruktionsmässigt regelverk

Eurokoder har kommit till som ett Europasamarbete för att tillgängliggöra hela den europeiska marknaden. En och samma aktör skall kunna bygga inom hela Europas gränser utan att anpassa sig till nationella konstruktionsregler. Eurokoderna medger att kompetensen i regelverket blir bredare och att säkerhetsnivån i Europa blir densamma. Reglerna tas fram av standardiseringsorganisationen Comité Européen de Normalisation, CEN. Regelverket kan ses som ett paraply som verkar över nationella särregler för konstruktioner och byggnationer. Det åligger varje nation att anpassa nationella regler så att dessa harmoniserar med Eurokoderna. Det finns totalt 10 Eurokoder som reglerar allt från betongkonstruktioner till i aktuell studies fall Eurokod 7; dimensionering av geokonstruktioner [23].

För att implementera det nya regelverket som Eurokoderna innebar bildades Implementeringskommissionen för Europastandarder inom geoteknik, IEG. IEG var en ideell förening som verkade under Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien. De hade fram till 2011 i uppgift att tolka Eurokoden och sammanställa tillämpningsdokument. Tillämpningsdokumenten beskriver hur arbetet kopplat till regelverket ska ske. Implementeringskommissionens arbete ligger till grund för hur metoden används på den svenska marknaden. [9].

Under kapitel 3 i Eurokod 7 regleras hur dimensioneringen skall förhålla sig till geoteknisk data. Bland annat ska preliminära undersökningar utföras som bör ligga till grund för ett fördjupat planeringsarbete, detta för att jämföra alternativa byggplatser. Ytterligare ett krav gällande preliminära undersökningar är att initialskedet bör bedömas för att fastställa byggplatsens lämplighet. [88]

Avseende design och projektering av undermarkskonstruktioner är det kapitel 3 som ger ramverket inom vilken dimensioneringen ska ske. Dimensionering av geokonstruktioner skiljer sig något från många andra ingenjörscienser genom att det generellt är stora variationer i projekten. Svårigheterna ligger i att göra generella antaganden, något som avhandlas vidare i kommande sektion 2.8. Eurokoden reglerar i kapitel 2.4 dimensioneringen till att utföras med fyra metoder, eller en kombination av dessa⁴, vilka är;

- Beräkningar med partialkoefficienter eller sannolikheter.
- Härdvunna erfarenheter.
- Modellförsök och provbelastning.
- Observationsmetoden och aktiv design.

Vidare menar regelverket att noggrannhet i beräkningsmodeller och partialkoefficienter vanligtvis är av mindre betydande karaktär. Viktigare är omfattning och kvalitet av marktekniska undersökningar samt hög kompetens hos de individer som dimensionerar [88]. Ytterligare bestämmelser av relevans för denna studie är det faktum att varje beräkning vare sig den är analytisk, empirisk eller numerisk ska vara tillförlitlig eller ge fel på den säkra sidan, det som kallas överdimensionerad.

Eurokoden reglerar även hur uppföljning och byggkontroll bör genomföras. Detta ger en bra bild av vilka faktorer som bör beaktas redan i dimensionering- och planeringsskedet.

Byggkontrollerna som kravställs i Eurokoden rör i många avseenden vattenrelaterade frågor. Kontroller som ska genomföras är bland annat:

- Grundvattenflöde och porttrycksfördelning.
- Inverkan av avvattning på grundvattenytan.
- Effektiviteten av åtgärder vidtagna för kontroll av inläckning.
- Inre erosion och piping (erosionsrör).
- Grundvattnets kemiska sammansättning.
- Korrosionsrisk.

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

- Effekter på närliggande byggnader och ledningar.
- Mätning av portrycksvariationer orsakade av schaktning eller belastning.
- Rörelser, flytning, stabilitet hos schaktväggar och schaktbotten.
- Säkerhet för arbetare med tillbörlig hänsyn till geotekniska gränstillstånd.
- Tillförlitligheten hos system använda för kontroll av porvattentryck i alla akviferer där porövertryck skulle kunna påverka stabiliteten hos slänter eller schaktbottnar, inklusive eventuella artesiska tryck.
- Användning av vatten från avvattningssystem
- Avledande och borttagande av regnvatten eller annat ytvatten.
- Effektivt och funktionsdugligt system för avvattning under hela byggnadsperioden, med beaktande av igensättning av brunnfilter, igenslamning av brunnar eller pumpgropar, slitage i pumpar, tilltäppning av pumpar.
- Sättning i angränsande konstruktioner eller områden.
- Effektiviteten hos nästan horisontella borrhålsdräner.

För uppföljning av beteenden gäller:

- Sättningsuppföljning med bestämda tidsintervall av byggnader och andra konstruktioner.
- Flödesmätningar från dräner.
- Portrycksnivåer under byggnader eller inom angränsande områden.
- Konstruktionens vattentäthet.

2.6.2 Miljöprovning

Beroende på vilken omgivande miljö tunneln befinner sig i kan ett antagande om hur inläckage påverkar omgivningen såväl som hur omgivningen påverkar tunneln, både under bygg- och driftskedet, göras. För att skydda miljön och reglera dessa verksamheter finns det bestämmelser och regelverk som reglerar vattenverksamheten. I Sverige skrivs de av Miljö- och energidepartementet [57]. Viktigast utav dessa regler är miljöbalkens 11:e kapitel som reglerar vattenverksamheter. Enligt Länsstyrelsen är vattenverksamhet en eller flera åtgärder som förändrar eller påverkar vattnets djup samt läge. Denna påverkan kan ske genom exempelvis, utfyllnad, pålning, gjutning, bortledande av grundvatten, infiltration eller uppförande av anläggningar [48].

En grundprincip är att all vattenverksamhet kräver tillstånd. Detta tillstånd söks hos Mark- och miljödomstolen, förutom tillstånd för markavvattning som söks hos Länsstyrelsen [48]. Det finns bestämmelser för att reglera mindre omfattande vattenverksamheter. Den mildaste graden av myndighetsutövning är den anmälningsskyldiga verksamheten. Generellt kan sägas att denna verksamhet är liten till skalan. Rör verksamheten istället en vattenverksamhet i större skala övergår det till tillståndsskyldighet. En anläggning blir tillståndsskyldig istället för anmälningsskyldig då den ligger inom ett vattenområde och konstruktionens bottenyta överstiger 3000 m² [48].

Även om tillstånd framförallt söks hos Mark- och miljödomstolen är Länsstyrelsen tillsynsmyndighet. Detta innebär att Länsstyrelsen har till uppgift att informera om gällande regelverk, kontrollera att tillstånd och anmälningar efterlevs samt ingripa mot olagliga ingrepp i vattenmiljön [48].

För tunnelbyggnation gäller nästan alltid förprövningsplikten enligt miljöbalkens 11:e kapitel. För att Mark- och miljödomstolen skall pröva ärendet krävs att den tillståndssökande presenterar ett omfattande material. En viktig aspekt är hänsynsreglerna som regleras i miljöbalken 2:a kapitlet. Dessa regler syftar till att säkerställa att den tillståndssökande har tillräckligt god planering och kunskap för att bedriva vattenverksamheten, med hänsyn till miljöreglerna [101]. Det åligger den tillståndssökande att presentera vilka skyddsåtgärder och försiktighetsmått som kan tänkas nödvändiga med avseende på acceptabel påverkan. Till grund för sin ansökan bör grundligt utförda hydrogeologiska- och miljökonsekvensutredningar ha gjorts. Oftast beviljar miljödomstolarna tillstånd med avseende på inläckage per tidsenhet. Därför krävs grundligt utförda utredningsmaterial för att ta reda på kritiska områden gällande vattenläckage. Dessutom avdelas detta inläckage på en sträcka, exempelvis liter/100 meter eller en viss etapp. Det är därför viktigt för den tillståndssökande att tydligt kunna redogöra för och motivera vilka villkor och mängder som bör uppfyllas. Den tillståndssökande åläggs också att presentera lösningar avseende miljöpåverkan, skyddsåtgärder samt försiktighetsmått, vilka skulle kunna röra sättningsrisker eller påverkan på grundvattennivåer [30].

2.7 Markundersökningar

Kartläggning av grundvattennivåer, deformationszoner samt bergets generella kvalité är en väsentlig del av projekteringsarbetet. Grundvattennivåer kan mätas genom utplacerade mätstationer med rör ner i jorden eller berget, med vilka grundvattennivåer kan mätas³. Under de senaste åren har ett antal nya metoder framkommit för att kunna bestämma jordlagerföljder, samt jordens egenskaper. En undersökningsmetod som anses vara genomarbetad och välfungerande för att utreda jordlagerföljden och dess egenskaper är CPT-sondering tillsammans med portrycksmätning [43]. CPT står för cone penetrometer test, och mäter idag i de flesta fall även portryck. Metoden utförs in-situ och fungerar för kornstorlekar upp till grus. Verktöget som används är en cylindrisk och konformad mätare med en spets längst fram. Denna släpps ner i jorden, utan slag eller rotation, och tar då fram jordegenskaperna. Metoden används i stor omfattning i flertalet länder.

Vid eventuellt behov av ytterligare undersökningar, eller ett mer noggrant resultat, kan triaxalförsök användas. Triaxalförsök är en betydligt mer kostsam metod, vilken går ut på att jordens hållfasthet mäts i laboratorium genom att applicera ett tryck på ett jordprov [40].

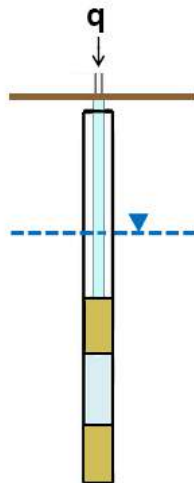
För att utvärdera bergets kvalité och sprickor kan ett kärnprov tas ur berget och studeras. Kärnprovet kan då användas för att utvärdera bergets egenskaper [41]. Enligt Trafikverkets krav ska jordens egenskaper undersökas och tas fram med hjälp av antingen undersökningar i laboratorium, fält eller med empiriska metoder [37].

Det är även av hög relevans att mäta den hydrauliska konduktiviteten, vilket kan fås fram med hjälp av ett antal olika tester. Den hydrauliska konduktiviteten ger en fingervisning om flödet som kan finnas i och omkring tunneln. För att mäta den hydrauliska konduktiviteten används vanligen vattenförlustmätningar med hjälp av borrhål [94]. Trafikverket vill att dessa typer av tester genomförs för att det redan i tidigt skede ska kunna uppskattas hur omfattande tätningsarbeten som kan förväntas⁴.

En undersökningsmetod som kan användas för att mäta den hydrauliska konduktiviteten är Lugeon testet. Testet går ut på att vatten pumpas in i ett borrhål i berget med ett övertryck på 1 MPa. Sedan mäts förlusten av vatten per minut och meter för detta övertryck. Denna enhet kallas för en Lugeon, Lu. [94]. Se figur 2.8 för en principiell skiss över Lugeon testet [28]. Med detta värde kan ett värde sedan avläsas genom att avläsa empiriskt framtagna resultat ur en tabell⁴.

³Ödlund Eriksson, Linn; Hydrogeolog vid Sweco Environment AB. 2018. Intervju 18 april

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april



Figur 2.8: Principiell skiss över Lugeon testet.

Lugeon test är en metod som förespråkas av bland annat Håkan Stille, professor vid Kungliga Tekniska Högskolan [94], men det finns fler metoder. Enligt Thörn och Lithén på Bergab AB⁴ används Lugeon testet i huvudsak av de som förespråkar den äldre skolan. Han menar vidare på att branschen idag i större utsträckning utför vattenförlustmätningar. Vattenförlustmätningar är en metod, vilken till skillnad från Lugeon test, går ut på att ett specifikt värde på övertrycket väljs för att direkt få SI-enhet i resultatet.

2.8 Observationsmetoden och aktiv design

2.8.1 Vad är observationsmetoden?

Problematiken kring byggnation i jord och berg grundar sig i att det finns lite eller ingen information om de geologiska och hydrogeologiska förhållandena i början av projekt. För att hantera denna okunskap krävs undersökningar. Beroende på vilken fas projektet befinner sig i kan undersökningarna bestå av exempelvis kartstudier eller sprickkarteringar. Senare i projekten, när en korridor utarbetats från karteringar, fortsätter arbetet med att undersöka borrhål genom exempelvis sondering och kärnborrningar samt konduktivitetsmätningar i brunnar [55]. Projekten begränsas ofta av att undersökningarna tar tid och kostar pengar, vilket gör att okunskapen kvarstår. För att hantera den ovan beskrivna problematiken är en lämplig arbetsmetod observationsmetoden. Observationsmetoden bygger på att under planerings- och projekteringsskedet förbereda en preliminär design. Samtidigt förbereds åtgärder som står redo att sättas in beroende på vad kontrollparametrar visar under tunneldriften, så kallade observationer. De osäkerheter och

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

brister som finns i förundersökningarna byggs med denna inställning till design bort under tunnelkonstruktionens framdrift. Resultatet blir att tunneln anpassas till de faktiska geologiska och hydrogeologiska förhållanden som råder i marken.

Den som först formulerade teorin bakom observationsmetoden var Dr. Ralph Brazelton Peck [73]. I en artikel i den franska journalen *Géotechnique* 1969 argumenterar Peck för att det fram tills då enbart funnits två vedertagna metoder för att angripa geotekniska problem vid undermarksbyggande. Metoden utvecklades eftersom undermarksbyggande kantas av problem där förhållanden och förutsättningar är svåra att säkert kartlägga innan byggnation. För att kompensera denna brist på kunskap görs istället en rad antaganden och idealiseringar i design- eller projekteringsstadiet. Eftersom dessa antaganden sällan stämmer helt överens med verkligheten var tidigare en lösning att överdimensionera markkonstruktionen. Detta medförde ofta ett slöseri av resurser samt att konstruktionen blev onödigt dyr. Det andra alternativet var att förlita sig på erfarenheter från tidigare projekt, det vill säga lita på kvalificerade antaganden. Problematiken när designen enbart utformades efter kvalificerade gissningar var att dessa antaganden kunde vara fel.

Vatten är problematiskt vid undermarksbyggnation då det på förhand är svårt att förutsäga var och hur vattnet kommer röra sig och uppträda. Peck belyser att väldigt små geologiska faktorer får avgörande betydelse för vattnets beteende. Därför är det även kopplat till vatten flest olyckor uppstår. Att förlita sig på antaganden är på grund av detta överlag farligt. Som en reaktion på dessa dåligt fungerande metoder konkretiserade Peck observationsmetoden.

2.8.2 Varför observationsmetoden?

Observationsmetoden har kommit till för att kompensera de ingenjörsområden där utarbetande av regler, empirier och metoder är svårt. För undermarksbyggandets del är det svårt att utarbeta återkommande metoder, just för att variationerna under marken kan vara stora. Dessutom är det relativt svårt att kontrollera dessa på förhand. Det är främst undersökningar i fält som är dyra vilket gör att de ekonomiska konsekvenserna snabbt blir stora. Dessutom är det svårt i den aspekten att alla byggprojekt i någon mån har en tidsram att verka inom och insamlande av stora mängder fältundersökningar är inte bara dyrt, det tar också tid. Ytterligare en svårighet består i att likna undermarksbyggandet vid en industrialiserad process där materialen kan idealiseras och homogeniseras för att därefter använda sig av repetitiv metod [104]. För att ett antagande skall kunna övergå till vetenskap krävs dock en stor mängd data vilket är något av en paradox i ett planeringssammanhang.

Design med hjälp av observationsmetoden är något som även regleras i Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner. Enligt Eurokoden är metoden lämplig att använda då de geotekniska förutsättningarna inför byggnationen är svåra att kartlägga [88]. Utöver svårigheter med att fastställa rådande förutsättningar är ofta geokonstruktioner och geotekniska frågeställningar projektspecifika vilket

komplikerar standardisering och metodarbete ytterligare [9]. Metoden ställer både krav och ger råd på vilka egenskaper geokonstruktioner ska ha med avseende på bärformåga, stadga, beständighet och täthet[9].

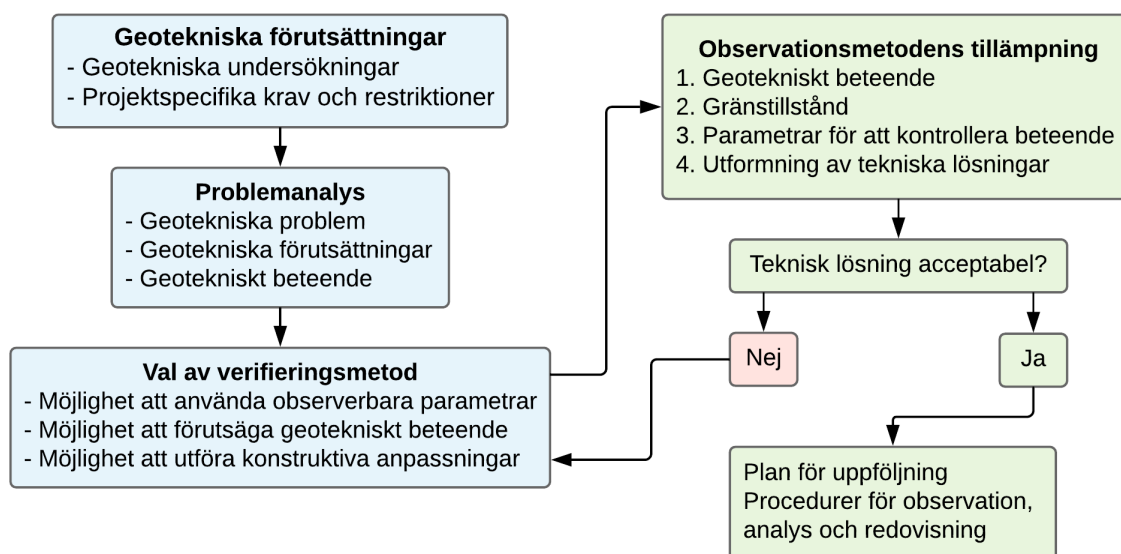
Det som gör observationsmetoden till en rekommenderad metod är det faktum att byggandet blir flexibelt. Efterhand som framdriften fortskrider insamlas mer och mer precis platsdata, vilket ökar kunskapen om vad som förväntas längre fram. Det behöver inte betyda att extra förstärknings- eller tätningsåtgärder blir resultatet utav observationerna, utan de kan istället medge en snabbare, sparsammare och mer ekonomisk design. [32].

2.8.3 Att arbeta med observationsmetoden

Konkret innebär observationsmetoden att förundersökningar i området görs för att få en allmän uppfattning om lagerföljden, sprickor och försvagningar, jordegenskaper samt vattenförhållanden. Med denna kunskap identifieras de troligaste förutsättningarna som råder på olika geografiska avsnitt. Det krävs också att en analys av de mest ofördelaktigaste förhållandena görs. Baserat på dessa kunskaper och antaganden utarbetas sedan en konstruktionsdesign för respektive geografiskt avsnitt.

För att hantera osäkerheten i vad som faktiskt kommer uppträda vid tunneldriften etableras en åtgärdsplan. Åtgärdsplanen beskriver vilka korrigeringar som görs i designen eller vilken annan design som ska användas beroende på vad som observeras och avviker från det initiala antagandet. När projekteringen är färdig har konstruktionen en rad designer som kompletteras med en portfölj av möjliga tekniska lösningar beroende på om förhållandena är bättre eller sämre än uppskattat [32]. För att ingenjörsmässigt kunna avgöra trovärdigheten i en viss design kopplat till observerade förutsättningarna är det viktigt att fastställa givna ramar eller parametrar. Arbetet med att kontrollera parametrarna eller gränsvärdena sker fortlöpande. Om någon avvikelse sker från det förutbestämda sätts planerade åtgärder in [9].

Figur 2.9 visar arbetsgången vid arbete med observationsmetoden och även utgångspunkten i aktuell studie.



Figur 2.9: Flödesschema för observationsmetoden enligt Implementeringskommis- sionen [9].

2.8.4 Begreppsförvirringen kring observationsmetoden

Beroende på vilken litteratur som bearbetas eller vem som intervjuas finns en osäkerhet och oklarhet i vad observationsmetoden och aktiv design exakt är och hur dessa förhåller sig till varandra. Något som bidragit till begreppsförvirringen i branschen är att observationsmetoden numera också finns med som en formell dimensioneringsmetod. Branschen har länge använt begreppet aktiv design för ungefär samma sak [76]. Det är viktigt att klarlägga rapportens definition samt beskriva förutsättningarna för metoden för att undvika förvirring och begreppsmissbruk. Den definition som används i studien konkretiserades under en intervju med Thörn och Lithén⁴, injekteringsexperter på Bergab AB. Innan Eurokoder applicerades på den svenska byggmarknaden användes metodiken aktiv design för att hantera osäkerheter. Aktiv design går ut på att utefter vad som händer anpassa designen. Metoden skiljer sig mot observationsmetoden eftersom det på förhand varken finns en tydlig hypotes om vad som förväntas eller arbetsgång med kontrollparametrar och förutbestämda åtgärder. Metoden bör ses som en "hands on" metod för enkla tillämpningar och kan i bästa fall vara ett bra komplement till observationsmetoden. Läsaren bör vara medveten om att begreppen aktiv design och observationsmetoden i någon mening är beroende av vilken generation som tillfrågas.

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

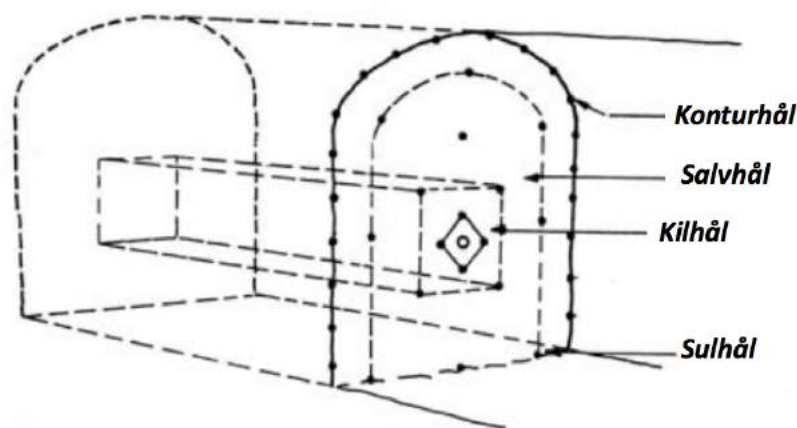
2.9 Tunnelbyggnation

Det finns två huvudsakliga metoder för att driva en tunnel i berg; borrhning och sprängning [68].

2.9.1 Sprängning

Den mest använda drivningsmetoden av tunnlar är pallsprängning [50]. Vid pallsprängning sprängs vertikala eller horisontella borrhål mot en fri yta i en eller flera rader. Med pallsprängning kan berg sprängas från 2-3 meter upp till 30 meter högt [79]. Borrhålsdiametererna är ofta relativt stora, cirka 51-89 mm, vilket betyder att borrhålsladdningarna kan uppgå till ca 100 kg. Om sprängning ska ske i flera borrhål detoneras de i tidsintervall, detta för att bergmassan ska ha en fri yta att spräckas upp emot. Vid sprängning laddas borrhålen med sprängämne och sprängkapsel som vid salvans tändning gör att sprängämnet detonerar [50].

I tunnelsprängningar kan uppemot 100 borrhål detoneras [79]. Vid tunneldrivning detoneras vanligtvis laddningarna i tunnelfronten först och sedan de placerade längre ut mot konturen av tunneln. Då en tunnel drivs under mark är borrhålen horisontella i tunnelfronten. Konturhålen, se figur 2.10, borrar närmast väggar och tak, där de laddas svagare än övriga hål [50]. Detta för att undvika att berg sprängs loss utanför konturen av tunneln samtidigt som en begränsad sprickbildning i berget runt omkring tunneln sker. Mindre förstärkningsåtgärder krävs därför samtidigt som säkerheten för de arbetande ökar. Sulhålen, vilka borrar längs tunnelns botten, laddas kraftigt för att lyfta upp bergmassan och därigenom underlätta arbetet med att lasta ut materialet [50]. Detta arbetssätt leder ofta till sprängskador samt ett ökat grundvattenflöde in i tunneln.



Figur 2.10: Borrhålstyper i tunnelsalva [2].

För en tunnel med area större än 80 m^2 delas tunneldrivningen upp, där takpartiet börjar drivas [50]. Därefter tas den resterande massan ut med pallsprängning. Detta är ett effektivt sätt att driva tunneln framåt då arbete på två oberoende arbetsplatser kan ske samtidigt och därmed undviks driftstopp. Vid tunnelbyggnation i berg av lägre kvalité görs en mindre öppning i taket till att börja med, vilken sedan förstärks. Därefter kan väggarna pallsprängas bort. Bergets hållfasthet avgör hur stor area tunneln kan uppgå till.

Sprängämnena ger upphov till stötvågor vilka spräcker upp bergmassan [79]. En del av energin som frigörs vid detonationen strålar ut till omgivningen som markvibrationer. Vid sprängningsarbeten måste därför vibrationspåverkan på omgivningen ofta tas i beaktning, särskilt då det sker i anslutning till tätorter. Den samverkande laddningsmängden avgör hur stora markvibrationer som uppstår, och definieras som den totala laddningsmängden som detonerar momentant. Den samverkande laddningsmängden sätts ofta till det kraftigast laddade borrhålet. Det finns idag prognosmetoder utvecklade för vibrationsspridning vid sprängning [79]. Dessa kan användas för vibrationsprognos vid tunnelsprängning.

En sprängplan sätts upp innan initierat sprängningsarbete görs, vilken innehåller planer över hur borr-, ladd- samt tändningsarbetet ska gå till [79]. Därefter dokumenteras varje sprängsalva i detalj i så kallade sprängjournaler för att undvika bland annat stenkast.

Vid sprängning gäller det att få en balans mellan optimalt uttag och acceptabla skador på kvarstående berg [71]. Skonsam sprängning är en metod för att minska dessa sprängskador. Det utförs genom att bland annat placera borrhålen närmare varandra än normalt samt att minska laddningsmängden i varje borrhål [65]. Förspräckning är en metod av skonsam sprängning där en konturspricka mellan borrhålen sprängs innan resten av salvan går [106]. Detta för att avskärma den slutliga konturen från inverkan av övriga hål i salvan.

Några fördelar som finns med sprängning är att det kan användas vid ett stort antal olika bergförhållanden, det är en mångsidig utrustning, det går snabbt att komma igång samt att det är relativt lågt kapital bundet till utrustningen [2]. Dock behövs en god organisation på arbetsplatsen för att få arbetet effektivt med det cykliska borr- och sprängningsarbetet samtidigt som det påverkar omgivningen med både buller och vibrationer.

2.9.2 Borrning

Borrning kan delas upp i två metoder; "partial face" och fullortsborrning [2]. Exempel på partial face-metoder är hammarborrning och grävmaskiner. Exempel på fullortsborrningsmetoder är tunnelborrningsmaskiner (TBM) och betong-lining.

Fullortsborrning är en borraringsmetod där hela tunnelarean borraras ut med hjälp av en tunnelborrningsmaskin [59]. I denna roterar ett borrhuvud där brytrullar

pressas mot tunnelgaveln och bryter sönder berget. På detta sätt avancerar maskinen framåt. Det sönderbrutna berget transporteras sedan via en bandtransportör till transportfordon bakom maskinen.

Fullortsborrning fungerar bäst när sprickbildningen i berget är känd samt när det går att förutse dess svaghetszoner [2]. TBM och "shield machines" används i mjuka jordar, inhomogen jord samt där det kan förväntas stort vattenintrång. En betong-lining reducerar sättningarna samt grundvatteninflödet. Liningen består av armerade betongelement vilka installeras i tunneln och följer dess form. Elementen kontaktnjekteras mot berget. Då metoden är mer skonsam mot berg och omgivning så används den vid drivande av tunnlar i närheten av tätorter.

"Shielded TBM" används då berget har mycket sprickor och är svagt eller om det inte går att göra kärnprov för att se vilka egenskaper berget har [2]. Metoden används även om en betong-lining behövs installeras i tunneln. Om berget är för svagt för att en tunnelborrmaskin ska kunna avancera kan en "shielded TBM" använda sig av liningen för att trycka emot och dra sig framåt. På så sätt kan en tunnelborrmaskin avancera även i berg med låg hållfasthet.

Fullortsborrning är den mest ekonomiska metoden då långa tunnlar ska drivas. Den har en hög investeringskostnad i utrustning, men det blir desto billigare under själva arbetsgången ty dess drivningshastighet [2]. Fullortsborrning är en snabb metod; ofta kan de drivas flera hundra meter i månaden [59].

2.10 Injektering vid tunnelbyggnation

2.10.1 Injekteringsmetoder

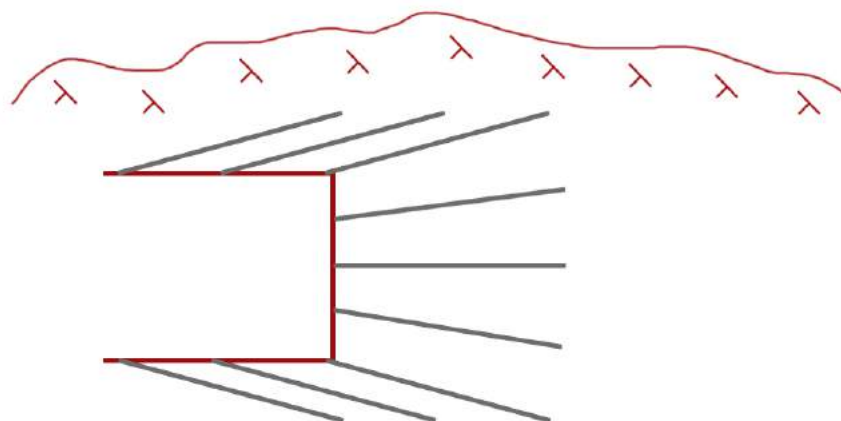
Injektering vid tunnelbyggnation genomförs huvudsakligen av två anledningar; att tätta och förstärka berg [50]. I stadsmiljö är det särskilt viktigt att tätta tunnlar då en grundvattensänkning kan orsaka ökad belastning på grundläggning samt sättningsskador. I tunnlar och undermarkskonstruktioner kan faktorer som arbetsmiljö, pumpkostnader samt möjligheten att förstärka berget med exempelvis bergbultar och sprutbetong påverkas negativt. Även underhållet är beroende av inläckage av vatten. I en personlig intervju hävdar Lander från Veidekke¹ att det kan behövas hacka is från tunnelns tak vintertid om injekteringen inte blir lyckad i en tunnel. Används betong-lining går detta att undvika isen genom att installera en duk innanför liningen, varpå vattnet flödar på utsidan av tunneln. På detta sätt undviks inläckage, men problematiken kring miljöpåverkan kvarstår. Lander hävdar att det ofta uppstår problem med mycket vatten i övergångar mellan jord och berg. En betongkonstruktion kan installeras, men det är svårt att göra den helt tät. Olika injekterings- samt förstärkningstekniker kan kombineras för att

¹Lander, Sofia; Platschef vid Veidekke Entreprenad AB. 2018. Intervju 2 mars

uppnå önskat tätningsresultat.

Injekteringsarbetet indelas normalt i två faser, förinjektering samt efterinjektering [50]. Ytterligare injekteringsstrategier som kan användas är ridåinjektering, botteninjektering samt kontaktinjektering. Vid tätning av berg injekteras material i bergets naturliga spricksystem [11].

Förinjektering innebär att berget under högt tryck injekteras innan tunneln sprängs ut [50]. Hål borrar i fronten riktade snett utåt och framåt, vilka sedan injekteras. En principiell skiss över detta kan ses i figur 2.11.



Figur 2.11: Principiell skiss över förinjektering.

När tunnelarbetet senare avancerar framåt drivs tunneln i tätat berg. Innan borrhålen injekteras spolas de rena från borrhax, vilket är det krossade berg som erhålls vid borrhning [50]. Detta görs eftersom borrhax kan försämra injekteringsresultatet. Manchetter som tätar borrhålen monteras. De ansluts sedan med en tryckslang till en injekteringspump. Därefter spolas sprickorna under tryck med vatten. På så vis tvättas även sprickfyllnadsmaterial bort, vilket kan täppa till sprickorna och förhindra injekteringsmedlet att tränga in. Den vanligaste metoden som används vid förinjektering är cementinjektering, se sektion 2.10.2.1.

Efterinjektering används för att tätta det inläckage som återstår efter tunneldrivingen [50]. Borrhål placeras så att de korsar de läckande sprickorna. Efterinjektering är en svår och kostsam process. En metod som används går ut på att borra injekteringshål över ett större område med ett bestämt avstånd och intervall. Om detta inte skulle ge önskad täthet kan ytterligare injekteringshål borrar samt injekteras.

Genom att injektera en skärm eller ridå kan omgivande grundvatten förhindras att tränga in i exempelvis en berganläggning nära markytan [50]. Även när ridåinjektering utförts kan grundvatten tränga upp i botten av berganläggningen. Bottenytan kan då injekteras så att en tjock tätad zon bildas. Injekteringshålen

borras vertikalt med ett bestämt avstånd och mönster. Om inte injekteringen ger den täthet som krävs borras nya hål vilka sedan injekteras.

Kontaktinjektering innebär att det utrymme som bildas mellan berg och betongkonstruktioner som exempelvis lining, valvbågar eller fundament fylls med cementbruk [50]. Genom detta säkerställs både en täthet mot vattenläckage samt en kraftsamverkan mellan berget och konstruktionen.

Vanligtvis inleds injekteringsinsatsen med ett cementbruk vars vattencementtal (vct) är relativt högt. Detta sänks sedan gradvis tills ett specificerat sluttryck erhålls [93]. Vattencementtalet beskriver proportionerna mellan cement och vatten i cementbruket [14]. Vattencementtalet avgör egenskaperna hos bruket; ju mer utspädd det är desto svagare blir bruket. Injekteringstrycken är även de inledningsvis relativt låga, och höjs sedan successivt [93].

Den injekteringsinsats som behövs bestäms efter vattenförlustmätningar i sonderingshål. En vattenförlustmätning, eller ett Lugeon test, kan utföras genom att vatten från en borrarad brunn leds ner till tunnelfront med hjälp av självtryck. Se sektion 2.7 för mer information om markundersökningar.

2.10.2 Injekteringsmedel

Injekteringsmedel kan delas in i två kategorier; kemiska injekteringsmedel som inte innehåller några partiklar samt suspensioner som består av partiklar blandade i vatten [50]. En suspension innebär att ett finfördelat fast material är uppslammat i en vätska, exempelvis lerpartiklar i vatten [66].

2.10.2.1 Suspensioner

Cementsuspension är det mest beprövade och vanligast förekommande injekteringsmedlet vid tätning av berg [11]. Finmalt Portlandcement används ofta då det har en hög inträngningsförmåga i smala sprickor [50]. I grundvattnet samt i vissa bergarter kan sulfater förekomma, vilka bryter ner cementen i injekteringsmedlet. Det kan därför krävas sulfatresistent cement för att anläggningar inte ska riskera att förstöras. En mängd olika tillsatsmedel kan användas i cementbruket för att styra dess egenskaper. Cementbrukets stabilitet förbättras genom att tillsätta silika [50]. För att öka inträngningsförmågan samt flytegenskaperna hos bruket tillsätts flytmedel [50]. Flytmedlet förhindrar cementkornen från att bilda klumpar vilket gör att bruket penetreras längre i smala sprickor.

Vid höga täthetskrav eller vid ogynnsamma geologiska och hydrogeologiska förhållanden ur tätningssynpunkt kan problem uppstå med att klara tätningskraven för cementbaserade injekteringsmedel [110]. Cementbruket kan även vid kraftig vattenföring, exempelvis i stora sprickzoner, spädas ut vilket resulterar

i att tätningsinsatsen inte blir som planerad. Detta kan i sin tur medföra stora inläckage. Vid kraftig vattenföring kan keminjektering användas som komplement till det cementbaserade injekteringsmedlet [110]. Även vid små spricksystem kan keminjektering användas som komplement då cementbrukets partiklar inte kan penetrera de minsta sprickorna och därmed ej klara områden med höga täthetskrav.

Silica sol är ett relativt nyutvecklat material för injektering. Det består av amorf kisel som är i suspension med vatten [50]. Amorf kisel är samma ämne som utgör bergarten kvarts [11]. Samlingsnamnet för de stabila lösningar av partiklar som utgörs av amorf kiseldioxid är kolloidalt silika [27]. Silica sol är en delmängd av kolloidalt silica där dess partikelstorlek samt koncentration har begränsats. Partiklarna i silica sol är väldigt små; diametern uppgår till cirka 20 nanometer. Då lösningen har ett pH mellan 7-10 och salter finns närvarande kommer partiklarna aggregera och bilda en gel [27]. Geltiden styrs av hur mycket saltlösning som tillsätts; ju mer salt desto kortare geltid. Partikelstorleken påverkar även gelens egenskaper. En högre specifik yta fås av en mindre partikelstorlek vilket skapar en mer reaktiv lösning. När lösningen är ogelad har den en låg viskositet och beter sig ungefär som vatten [50]. Detta gör att lösningen kan tränga in i mycket små sprickor. Så fort partiklarna i samband med gelningsprocessen börjar bilda större nätverk minskar den goda inträngningsförmågan, varför injekteringen bör påbörjas snarast efter inblandning av saltlösningen [27].

Förutom dess inträngningsförmåga är silica sol även praktisk då det går att styra injekteringsmedlets geltid [27]. Injekteringstiden per borrhål kan därmed styras efter önskvärd tid. Detta påverkar även inträngningslängden; en kort geltid ger en kort inträngningslängd. På så sätt kan bruksåtgång minimeras och spill vid exempelvis efterinjekteringssituationer. Jämfört med cement har silica sol generellt en låg mekanisk hållfasthet [27]. Dock är beständigheten hos silica sol något som hittills inte bestämts, utan forskning pågår fortfarande för att förstå de mekaniska nedbrytningsmekanismerna hos injekteringsmedlet.

2.10.2.2 Kemiska injekteringsmedel

Kemiska injekteringsmedel används ofta som ett komplement till injektering med cementsuspension, särskilt vid efterinjektering [6]. Kemiska injekteringsmedel kan indelas i vattenlösliga och icke vattenlösliga preparat [50]. De har mycket goda inträngningsförmågor, men kräver specialutrustning vid injekteringen. Det finns goda möjligheter att styra härdningsförloppet hos kemiska injekteringsmedel, vilket gör dem användbara för tätning av fina sprickor samt för att stoppa stora vattenflöden [110]. Icke vattenlösliga kemiska injekteringsmedel har en mindre risk för att spädas ut vid stora vattenflöden jämfört med cementbruk [6]. Idag används även kemiska injekteringsmedel för andra ändamål än bergtätning, som exempelvis vid tätning och stabilisering av lösa jordlager samt tätning av betongkonstruktioner. Kemiska injekteringsmedels viskositet samt gelningstid är

beroende av temperatur, tryck samt eventuella tillsattsmedel [110]. Gelningstiden är den tid det tar för partiklarna i injekteringsmedlet att aggregera och bilda en gel. Det betyder att ovan nämnda egenskaper, för samma produkt, kan variera beroende på tidigare nämnda omständigheter.

Silikat, acrylamid och ligning hör till de vattenlösliga kemiska injekteringsmedlen [50]. Silikater är relativt billiga och lätta att använda, men har en dålig beständighet. De bör inte användas vid permanent tätning då de vid kontakt med syre förlorar sina tätande egenskaper. I kraftiga vattenflöden kan injekteringsmedlet även blandas upp då det är vattenlösligt [110]. Silikatbaserade injekteringsmedel används därför endast vid temporära åtgärder som inte har några krav på långsiktig stabilitet.

Acrylamid- och ligninpreparat är giftiga och kan kontaminera grundvatten vilket gör dem olämpliga att använda vid injektering av mark och berg [50]. Akrylamid består av organiska monomerer, vilka med hjälp av katalysatorer polymeriseras [110]. Den slutgiltiga polymeren anses ha en god beständighet och är svårslöslig i vatten. Dock är materialet neurotoxiskt och kan fällas ut.

Epoxi är ett icke vattenlösligt injekteringsmedel som består av två komponenter; Bisfenol A samt Epiklorhydrin [110]. Bisfenol A misstänks vara hormonstörande och kan påverka fortplantningen hos levande varelser [38]. Även Epiklorhydrin är giftigt vid intag. Det största problemet hos Epoxi är att injekteringsmedlet orsakar allergi och irritation på hud [6]. På grund av detta behövs spridningen kontrolleras samtidigt som mängden inpumpat material bör begränsas [50]. Värme snabbar på reaktionen hos Epoxi medan kyla får den att sakta ner [110]. Materialet bör inte användas vid låga temperaturer, vilket gör att medlet inte är optimalt vid undermarksarbeten på grund av deras normalt relativt låga temperaturer.

Polyuretan är ett icke vattenlösligt injekteringsmedel. Det fås fram genom att isocyanater och polyol polymeriseras och kan produceras som en- eller tvåkomponentsmaterial [110]. Enkomponentspolyuretan produceras på fabrik där toxiciteten minskar medan viskositeten ökar. En mer fullständig reaktion uppnås när materialet reagerar med vatten samtidigt som mindre värme avges vid reaktionen. Tvåkomponentspolyuretan blandas vid själva injekteringstillfället med lika delar isocyanat och polyol. Då polyuretaner reagerar med vatten produceras koldioxid och plasten expanderar till ett skum. Koldioxiden som bildas vid reaktionen orsakar både volymexpansionen hos skummet samtidigt som det orsakar ett ökat tryck bakom fronten hos det reagerande polyuretanet. Ju större expansionen är hos polyuretanet desto längre blir beständigheten för injekteringsmedlet. Det är ett relativt beständigt material med en förväntad livslängd på 50 år eller mer i en extremt alkalisk miljö.

Enkomponentspolyuretan har en god inträngningsförmåga vilket gör det lämpligt för tätning av små sprickor [110]. Då det inte är vattenlösligt är injekteringsmedlet fördelaktigt att använda då kraftiga vattenflöden föreligger samtidigt som det vid kontakt med vatten polymeriseras. Dock anses tvåkomponentspolyuretan vara bättre vid extrema flöden eftersom det har en snabbare gelningstid samt

att det polymeriserar vid blandningstillfället. Det finns en hälsorisk för de arbetande gällande isocyanater. Dessutom kan de lösningsmedel som används i injekteringsmedlet ha dåliga effekter på den yttre miljön. Detta problem har inte tvåkomponentspolyuretan då det inte innehåller några lösningsmedel. Dock ökar riskerna för arbetsmiljön då isocyanater behöver hanteras fritt och blandas på plats.

3

Metod

Tillvägagångssättet för att nå resultat och slutsats i detta arbete utgick från ett arbete i tre steg. Med utgångspunkt från tidigare litteraturstudier samt granskningar av redan framtaget material skapades en uppfattning om de geologiska samt hydrogeologiska förutsättningarna. Parametrar utöver geologi och hydrogeologi granskades i de fall då det kändes relevant för att läsaren skulle kunna bilda sig en god överblick av ämnet och frågeställningen. Vidare fanns även undersökningar från närliggande projekt. Utredningar från Västlänken studerades särskilt och relaterades till projektet. Detta eftersom markförutsättningarna som råder längs Västlänkens dragning också anses vara representativa för området Mölnlycke-Bollebygd.

Efter det initiala skedet då en övergripande uppfattning om området bildats, fortsatte studien in i en bearbetningsfas där egna analyser genomfördes. Tunnelavsnitten på hela sträckan Mölnlycke-Bollebygd analyserades med avseendet att fastställa problemavsnitt längs sträckningen. Med koppling till observationsmetodiken valdes sedan den tunnel som exponerades för flest riskmiljöer, risker och problemfaktorer.

När den mest utmanande tunneln identifierats med avseende på bland annat hydrologiska förhållanden, naturvärden samt bergtäckning fortsatte studien i en fas där analys och faktabearbetning kretsade kring eventuella lösningar som kunde presenteras på problemen. Det vill säga en djupare kartering av förutsättningarna på sträckan. Detta gjordes genom att först fastställa viktiga parametrar att ta hänsyn till vid tätning av tunnlar.

Slutligen fortsatte studien in i sin sista fas, lösningen. Tre olika scenarion för tätning och injektering togs fram, eftersom det är så tunnlar typsikt tätas i Sverige [56]. Resultatet blev ett typfall då tunneln går genom kompakt berg med sprickbildning, ett typfall vid deformationszon samt hur tätning vid en jord-berg övergång skulle ske. När studien utifrån litteraturen fastställt detta resultat presenterades det för kunniga yrkespersoner i tunnelbranschen som fick möjlighet att lämna synpunkter samt bidra med värdefull kunskap till studien.

3.1 Vetenskaplig metod

Hur studier och forskning genomförs med avseende på datainsamling, analys och slutsats delas klassiskt in i två huvudkategorier. Dessa huvudkategorier är kvalitativ analys och kvantitativ analys [72].

Den kvalitativa metoden att analysera en frågeställning går främst ut på att utifrån en betraktad verklighet analysera och samla in data. Den kvalitativa metoden tenderar att omfatta en mindre mängd data, som sedan generaliseras [42]. Detta kan ses som insamling av mjuka data. Betoningen ligger här mer på enskilda människors arbetslivserfarenheter och åsikter [62]. Motsatsen till mjuk data är hårda data, den rollen fyller den kvantitativa metoden. Här ligger tonvikten istället på den systematiska insamlingen av ett stort urval empiriska och kvantifierbara data [63]. I båda metoderna finns intervjun med som ett viktigt verktyg. Skillnaden är att i den kvalitativa analysen är intervjun mer informell och det viktiga är den data som framkommer i själva mötet. I den kvantitativa intervjun är fokus på strukturerade frågor som syftar till att besvara tydligt ställda frågor. Vidare kan sägas att den kvalitativa metoden är mer tillåtande för författaren att blanda sig i, medan den kvantitativa bör vara strikt och sakligt neutral [99]. Vid vetenskapligt arbete är det viktigt att beskriva hur frågeställningen besvaras och skapas. Här talas det i regel om tre metoder. Den induktiva metoden, där generella iakttagelser får ligga till grund för mer generella omdömen hur det kan förhålla sig. Denna metod är starkt kopplat till den kvalitativa metoden. Den Hypotetiskt deduktiva metoden testar hypoteser, teorier och frågeställningar. För denna metod ligger ofta kvantitativ empiri och data till grund. Den abduktiva metoden är en kombination där teori, empiri och metod systematiskt används för att nå ett vetenskapligt slutmål [99]. I aktuell studie som i någon mening har breda frågeställningar och problem att besvara är det även naturligt att den vetenskapliga metoden innefattar det breda spektrumet av verktyg och teorier som finns. Ett exempel är hur studien undersöker förutsättningarna i den aktuella tunnelsträckningen vid Rävlanda med hjälp av detaljerade mätningar och data från Västlänksprojektet, det vill säga en komparativ metod [61]. Vidare baseras en hel del av lösningarna för tätningsproblematiken hos aktuellt infrastrukturbygge med intervjuer av kunnigt branschfolk som får chans att presentera lösningar och erfarenheter. Detta kan kallas mjuka kvalitativa data. Kombinationen av teori, empiri och metod som tillsammans väver samman vår kunskap till något som liknar en tidig systemhandling eller ett hydrogeologiskt PM, kan hävdas ta språng ur den abduktiva metoden.

3.2 Kritisk tunnelsträckning

Vid val av den mest kritiska tunneldragningen har samtliga, enligt Trafikverket, planerade tunnlar på sträckan Mölnlycke-Bollebygd studerats. Tunnelns placering ovan eller under högsta kustlinjen har betydelse för förväntad jordlagerföljd och har därför utvärderats. För att granska injektering samt dimensioneringsmässiga utmaningar har deformationszoner, naturvärden och bergtäckning studerats. Deformationszonerna kan kräva stora insatser gällande injektering och har därför ansetts vara en viktig faktor att studera [1]. Deformationszoner har studerats genom SGUs berggrundskarta. För att även få med okarterade deformationszoner har områdets topografi undersökts. Trafikverkets naturvärdesinventering, se sektion 2.5, har granskats för att redovisa områdets möjliga skyddsobjekt och naturvärden.

Bergtäckning är en viktig dimensioneringsfaktor och avgör vilken Geoteknisk kategori som används. Kategorierna innebär olika krav vid projektering, dimensionering och kontroll av tunneln [107].

Den kritiska tunneln har sedan delas upp i olika zoner. Dessa zoner har granskats närmare.

3.3 Zonindelning

För tillämpning av observationsmetoden behövs en indelning av de zoner som förväntas förekomma i berget där tunneln ska byggas. De olika zonerna är typmiljöer med likartade geologiska samt hydrogeologiska förhållanden. Indelningen görs för att skapa specifika metoder för varje enskild zon. I denna rapport kommer tre zoner beskrivas, kompakt berg med sprickbildning, berg med deformationszoner samt övergång mellan jord och berg.

3.3.1 Kompakt berg med sprickbildning

Då möjlighet till fältarbete och provborrningar saknas i denna studie har underlag från Västlänkens utredningar använts. Västlänken används eftersom den planläggs i en liknande miljö med huvudsakligen identisk berggrund. Till Västlänken har det även genomförts flera olika provborrningar och undersökningar av berget. Det innebär att det finns mycket material att tillgå. De prover som gjorts för Västlänken antas alltså vara representativa för tunnelarna på sträckan Mölnlycke-Bollebygd. Det underlag som har studerats kommer från de undersökningar och inverteringar som utförts mellan åren 2012-2015 och ingår i Västlänkens anläggningskrav och förutsättningar, så kallad AKF-uppdrag [75]. Underlaget har även kompletterats med information och material från äldre bergskonstruktioner i

Västlänkens influensområde. Insamlingsdata gällande sprickornas strykning och stupning sammanställdes med hjälp av programmet Stereonet.

3.3.2 Berg med deformationszoner

Överskådlig tolkning av topografin har använts för att urskilja vilken riktning deformationszonerna i området har. Detta jämfördes sedan med SGUs berggrunds-karta för att se om något samband kunde urskiljas. Västlänkens anläggningskrav och förutsättningar används för att få fram en vidd på deformationszonerna.

3.3.3 Övergång mellan jord och berg

Kartmaterial från bland annat SGU samt brunnsdataarkivet har använts för att uppskatta hur jordlagerföljden kan komma att se ut vid övergång mellan jord och berg. Västlänkens anläggningskrav och förutsättningar har använts för att jämföra framtagna mäktighet på jordlagerföljden.

3.4 Hydrogeologisk beskrivning

Sedan 1976 behöver alla som borrar en brunn för privat bruk anmäla detta till SGU:s brunnsarkiv [29]. Där återfinns data om brunnarnas kapacitet, jorrdjup, borrhjup samt dess geografiska koordinater. För beräkning av inläckage har denna databas använts, där de brunnar närmast belägna tunnelsträckningen har studerats.

3.4.1 Grundvatten

Områdets grundvattenförhållanden har studerats för att få en förståelse över vilka åtgärder som kan behövas för att undvika negativ miljöpåverkan vid ett eventuellt inläckage i tunneln.

För att ta reda på grundvattennivån i området kring Rävlandatunneln studerades ett antal brunnar från SGU:s brunnsarkiv. Brunnar belägna i berg samt lera har varit av intresse då det är genom dessa sektioner Rävlandatunnelns dragning är planerad. Den redovisade grundvattennivån för brunnar lokaliserade i lera representerar grundvattennivån i det undre magasin som underlagrar leran. Det undre magasinet kan bestå av exempelvis morän.

I SGU:s brunnsarkiv anges grundvattennivån i meter under markytan. Genom att ta ut absolut höjden för grundvattnets trycknivå erhöles en tydligare bild av hur vattnet i området strömmar. Absolut höjden togs ut genom att subtrahera grundvattennivån

från den topografiska höjdnivån hos brunnarna. En stor absolut höjd representerar en låg grundvattennivå.

3.4.2 Hydrauliska gränser

En positiv hydraulisk gräns återfinns då ett grundvattenmagasin har god kontakt till ett angränsande vattendrag, vars nivå inte sänks vid pumpning [16]. Detta betyder att det längs den hydrauliska gränsen inte sker någon avsänkning.

Det är viktigt att kartlägga hydrauliska gränser för att få förståelse över hur vattenföringen i området ser ut. En stor injekteringsåtgärd kan behövas om undermarkskonstruktionen står i kontakt med en positiv hydraulisk gräns då den kan bidra med kraftig vattenföring.

De positiva hydrauliska gränserna i närområdet kring Rävlandatunneln togs fram genom att studera Lantmäteriets ortofoto samt jordartskartor för att se vart vattenförekomster finns lokaliserade. Jordarter med höga vattenförande egenskaper kan leda vatten från en positiv hydraulisk rand till det område där tunneln ska anläggas. Exempel på sådana jordarter är morän samt isälvsavlagringar.

3.5 Beräkning av inläckage i tunnel

3.5.1 Beräkning för deformationszon samt kompakt berg

För att beskriva de hydrogeologiska förhållandena studerades brunnarna i området. Data om brunnarna hämtades från brunnsarkivet, vilka har sammanställts av SGU. De brunnar som ligger i topografiska sänkor i berg antas representera deformationszoner medan de brunnar som ligger på plintar antas representera kompakt berg med sprickbildning. Då området inte har någon större variation i sin geologi, antas alla brunnar ligga i granit eller gnejsiga bergarter. Brunnarna som användes i beräkningarna har ett stort brunnsdjup, vilket betyder att de är bergbrunnar och inte ligger i de övre jordlagren. Detta gör dem tillförlitliga vid beräkning av inläckage i bergtunnlar. Då varken SGU eller Trafikverket har brunnar som ligger i tunnelsträckningen antas de brunnar som ligger i närområdet representera de hydrogeologiska förhållandena. Vid beräkningarna antas det råda stationära hydrauliska förhållanden, och berget antas vara ett homogent, isotropt, poröst hydrauliskt medium [96].

I området valdes 12 brunnar i topografiska sänkor samt 12 brunnar på plintar ut. Var dessa finns lokaliserade geografiskt redovisas i figur A.5. Därefter beräknades transmissiviteten för de olika brunnarna med ekvation 3.1.

$$T \approx 1,2 \cdot \frac{Q}{s_w} \quad (3.1)$$

Q är kapaciteten för brunnen i liter per sekund. Då brunnen vid borrningen ofta töms helt så uppnås full avsänkning, och s_w kan därför anses motsvara brunnens djup i meter [51]. För att få bra värden som speglar området beräknades median-, max- samt medelvärde för de olika transmissiviteter. Det maximala värdet avlästes från de beräknade värdena, medan median- samt medelvärdet beräknades fram. Utifrån medianvärdet beräknades sedan konduktiviteten enligt ekvation 3.2.

$$K = \frac{T}{s_w} \quad (3.2)$$

Inläckaget i tunneln beräknades med ekvation 3.3 [29].

$$q \approx \frac{H}{2R_0} \cdot T \cdot \ln \frac{R_0}{r_w} \quad (3.3)$$

H är höjden från tunnelns sula till marknivå och r_w är observationsbrunnens radie vilken antas vara medelvärdet av de av SGU uppmätta brunnarnas radie och uppgår till 0,0614 m. Transmissiviteten är de beräknade värden som redovisas i tabell 4.4 samt tabell 4.5. Enligt Gustafson, [29], kan R_0 antas vara $3H$ i opåverkat berg. Därefter beräknades inläckaget i tunneln med värden angivna i figur A.4. Dessa värden görs sedan om till enheten liter/minut·100m för att jämföras med riktvärden för inläckage, vilka fastställs i miljödomar kopplade till närliggande projekt [22]. Erfarenheter av sättningar som orsakats av undermarksprojekt i kombination med en växande miljömedvetenhet har gjort att tätningskraven i samband med byggande under mark har blivit högre [110]. Miljömässiga täthetskrav för aktuella tunnelprojekt ligger i storleksordningen 1,0 - 10,0 liter/minut·100m tunnel. Dessa krav innebär i att det inte finns något rinnande läckage och endast få synliga droppar i tunneln.

3.5.2 Beräkning för övergång mellan jord och berg

För att beräkna inläckage i tunneln vid övergången mellan jord och berg behövs värden över jorddjupet i området. Dessa togs fram från SGU:s brunnnsdataarkiv där jordlagerföljder hos privata brunnar finns registrerade.

Ekvation 3.4 användes sedan för att uppskatta transmissiviteten för jordlagren.

$$T = \frac{Q}{d} \quad (3.4)$$

3.5.3 Beräkning efter injektering

Ekvation 3.5 användes för att beräkna inflödet i en tätad tunnel [25].

$$q_{gr} = \frac{2\pi T_{tot} H / L}{\ln(2H/r_t) + (T_{tot}/T_{gr} - 1) \cdot \ln(1 + t/r_t) + \xi} \quad (3.5)$$

T_{tot} är den totala transmissiviteten hos berget innan injektering, T_{gr} är en återstående transmissiviteten efter injektering, H är höjden från tunnelns sula till marknivå, L är längden av tunneln, r_t är tunnelns radie, t är tjockleken hos injekteringsskärmen medan skin faktorn ξ antas vara 0. Tjockleken t samt transmissiviteten T_{gr} är designparametrar och är relaterade till det krav på maximalt inflöde som fastställts. Värden för dessa två designparametrar togs fram genom en intervju med Thörn och Lithén på Bergab AB⁴.

3.6 Injekteringslösningar

För att ta fram injekteringslösningar för de tre redovisade typfallen sammanställdes teori, resultat samt intervjumaterial.

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

4

Resultat

4.1 Val av kritisk tunnelsträckning

Vid framtagning av den mest kritiska tunnelsträckningen har faktorer så som bergtäckning, topografi, deformationszoner och naturvärden studeras. Dessa faktorer har lett fram till att den östra tunneln, se figur 4.1, anses vara den tunneln som kommer ge upphov till störst problem vid dragningen ur injekteringssynpunkt. Se argumentation av detta nedan. I föreliggande dokument kallas denna tunnel för Rävlandatunneln.



Figur 4.1: Delsträcka Mölnlycke-Bollebygd, där grön färg avser tunnelbyggnation [18].

Rävlandatunneln ligger, till skillnad från de andra planerade tunnelarna, under högsta kustlinjen, se sektion 2.1.2. På grund av detta återfinns fler övergångar mellan jord och berg som kan komma att bli problematiska [109]. Dessa områden har blivit utsatta för svallning och omlagring vilket gör att leror blivit avsatta [8]. Tunneldragningen kommer därför passera genom jordlagerföljder med mer inslag av finsediment och lera, vilket tyder på att det kan vara en kritisk miljö på sträckningen.

Omkring 500 meter väster om Rävlandatunneln ligger den så kallade Mylonitzonen som går i en nord-sydlig riktning, se figur A.2. Enligt SGU:s rapport så består zonen av flera flackt liggande zoner med hårt deformerade bergarter [10]. Tunnelns närhet till Mylonitzonen kan antas tyda på att flera deformationszoner finns i området. Höjdprofilen visar att tunnelns sträckning passerar ett område med

väldigt varierande topografi. Den högsta höjden uppgår till omkring 140 m.ö.h, vilken sedan faller till omkring 70 m.ö.h, se figur 4.3. Dessa topografiska sänkor och mindre dalgångar följer nord-sydlig riktning likt Mylonitzonen, vilket stärker antagandet om möjliga deformationszoner även om berggrundskartan inte visar någon zon i direkt anslutning till tunneln.

Höjdprofilen visar att Rävlandatunneln är den tunnel som har störst variation gällande bergtäckning. Detta innebär dimensioneringsmässiga utmaningar, vilket även Collinder, projektledare Trafikverket², håller med om. Den planerade Rävlandatunneln kommer passera nära diverse skyddsobjekt som riskerar dräneras och påverkas negativt vid byggnation. Området används som strövområde för de boende och god tillgång ses som en viktig del i vardagen [31].

Rävlandatunneln samt bergtyper förekommande i den angränsande miljön studeras närmare i följande sektioner.

4.2 Zonindelning

För tillämpning av observationsmetoden behövs en indelning av miljön i zoner som förväntas förekomma i berget där tunneln ska byggas. De olika zonerna är typmiljöer med likartade geologiska samt hydrogeologiska förhållanden. Indelningen görs för att skapa specifika metoder för varje enskild zon.

Utifrån val av kritisk tunnel, se sektion 4.1, har tre olika zoner för Rävlandatunneln urskilts. En konceptuell skiss över de tre zonerna erhålls i figur 4.2.

Zon 1: Kompakt berg med sprickbildning

Även om berget anses vara kompakt kommer det finnas en sprickbildning. Sprickorna medför en möjlighet för vattentransport genom berget, vilket kan orsaka problem vid tätning av berget. Kompakt berg med sprickbildning kan förväntas förekomma i bergplintar. För djupare studier över zon 1 i Rävlandatunneln se sektion 4.2.1.

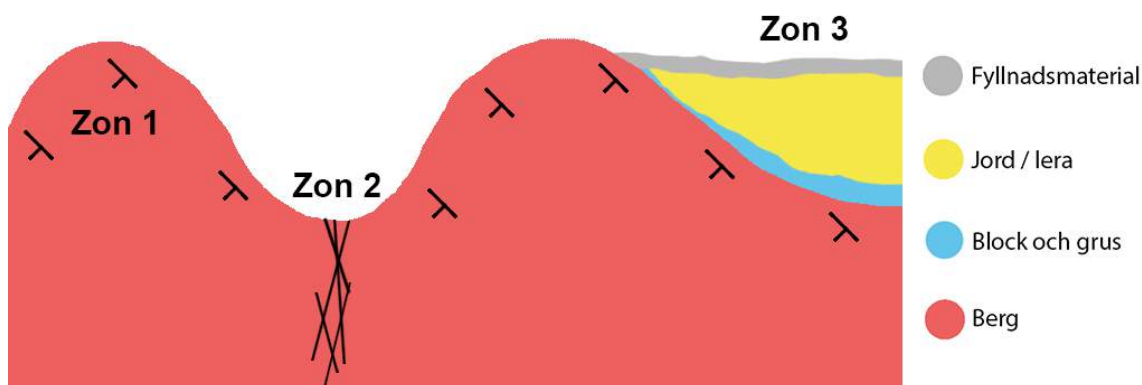
Zon 2: Berg med deformationszoner

Deformationszoner indikerar att berget har utstått rörelser under sin utveckling [95]. Zonen består av flera sprickor där huvudriktningen är riktad åt ett bestämt håll, vilket gör att vattentransporten kan vara hög. Vattenflödet i en deformationszon beror på utformningen av zonen samt dess permeabilitet [77]. Deformationszoner kan förväntas förekomma i områdets topografiska sänkor. För djupare studier över zon 2 i Rävlandatunneln se sektion 4.2.2.

²Collinder, Johan; Projektledare vid Trafikverket. 2018. Intervju 6 mars

Zon 3: Övergångar mellan jord och berg

Övergångar mellan jord och berg uppstår ofta vid tunnelmynningarna. Övergången blir problematisk på grund av det lager morän med hög permeabilitet som påträffas närmast berget. När tunneln passerar denna övergång kan därför kraftig vattenföring uppstå, vilket i sin tur kan resultera i tätningsproblem. För djupare studier över zon 3 i Rävlandatunneln se sektion 4.2.3.



Figur 4.2: Konceptuell figur över zonindelning. Lagerföljden är baserad på de brunnborrningar som gjorts vid övergången mellan jord och berg.

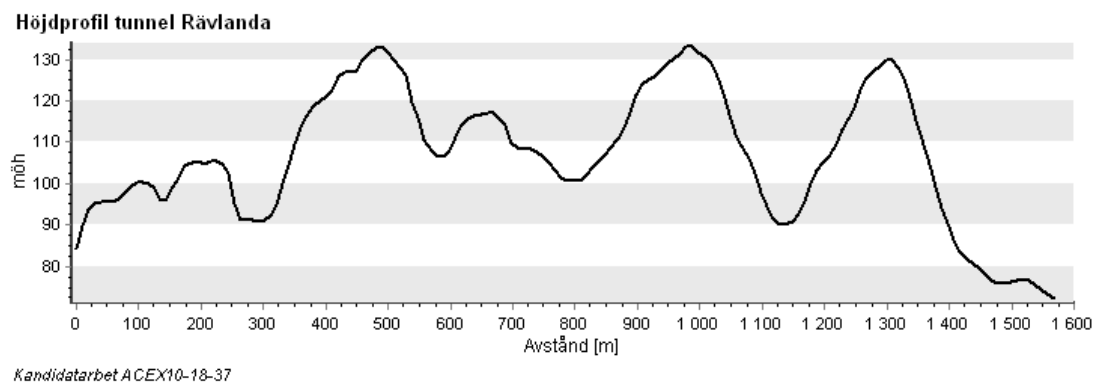
Dessa tre zoner beskriver berget vid Rävlanda. Antalet typmiljöer anses vara tillräckligt för att få en representativ bild av miljön, vilket även Thörn och Lithén på Bergab AB⁴ anser.

4.2.1 Kompakt berg med sprickbildning

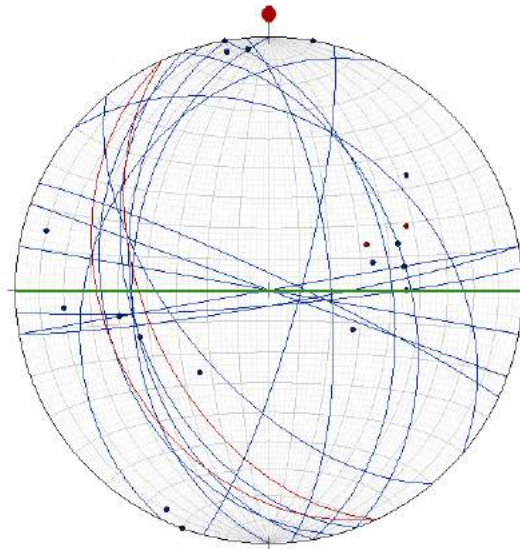
Sprickinventering har skett utifrån Västlänkens anläggningskrav och förutsättningar, så kallade AKF-uppdrag [75]. Denna koppling har gjorts eftersom det anses viktigt utreda sprickors riktning samt sprickfyllnadsmaterial. Sprickor som korsar tunneln med en rät vinkel utgör i normala fall inga större problem utan hanteras direkt vid passage av tunneln [92]. Parallella sprickor innebär däremot ett större problem då dessa måste hanteras utmed hela sträckningen. Även sprickfyllnaden har stor betydelse, då den ofta avgör flödet som kan passera genom sprickorna [1].

Topografin, se figur 4.3, visar att förekomsten av bergplintar är god och dessa antas bestå till stor del av kompakta berg. Även om berget anses vara kompakt kommer det finnas sprickbildning i berget. Insamlingsdata från Västlänken gällande sprickornas strykning och stupning har sammanställts med hjälp av programmet Stereonet, se figur 4.4. Majoriteten av sprickgrupperna har en strykning på omkring 150-200 grader vilket i de flesta fall sammanfaller med bergets foliation [51].

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april



Figur 4.3: Höjddprofil över Rävlandatunneln.



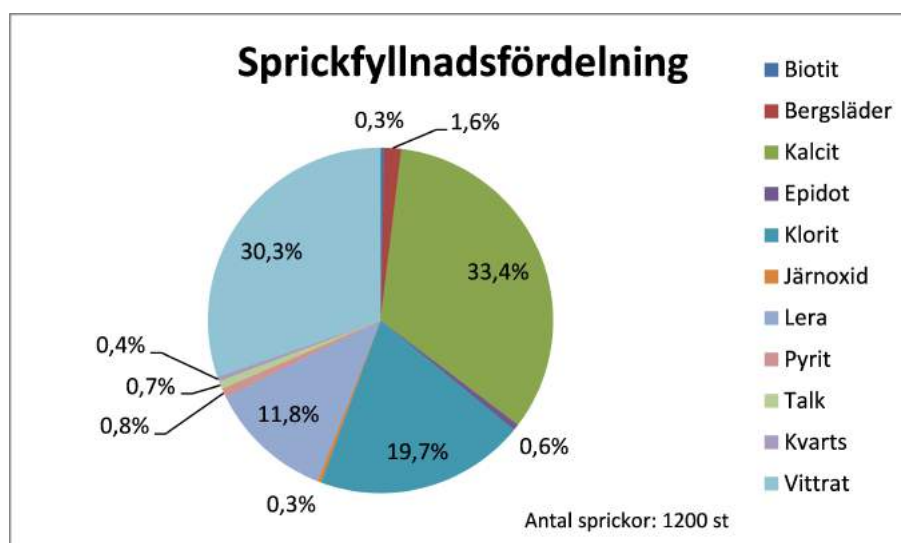
Figur 4.4: Sammanställda sprickriktningar från Västlänken, där grönt streck motsvarar tunneldragningen.

Tunneln sträcker sig i en öst-västlig riktning passerar majoriteten av sprickorna i en rät vinkel. Figur 4.4 visar att det även förekommer parallella sprickor vilka behöver hanteras utmed hela sträckningen. Därför kommer parallella sprickor innebära mer tätningsåtgärder utmed en längre sträcka. Den hydrogeologiska beskrivningen visar att transmissivitetens medianvärde för plintar är $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, se avsnitt 4.4.1. Detta värde indikerar en relativt hög förmåga för berget att leda vattnet i sprickorna.

Undersökningarna för Västlänken visar att det kan förekomma sprickor med en bredd på upp till en decimeter. Detta anses dock vara en stor bredd och vid denna vidd har de oftast en sprickfyllnad av kvarts [51]. Sprickbredder runt 0,1 meter brukar klassas som väldigt bred så troligtvis kommer majoriteten av sprickorna i Rävlanda istället röra sig mellan 0,1 mm till 10 mm [95]. Dock ska det tilläggas att denna sprickkartering är gjord med avseende på bergmekanik. För att få en

bättre inblick gällande injektering ska den hydrogeologiska sprickvidden tas fram. Materialet och testresultaten som visar denna vidd är konfidentiella, därför har bergmekaniken använts för att få en överblick.

Sprickornas sprickfyllnadsfördelning har sammanställts från Västlänken, se figur 4.5. Sprickprognosen är gjord med avseende på bergmekanik och anses vara representativ för Rävlanda. Diagrammet visar att sprickfyllnaden domineras av kalcit, klorit, lera och vittrat material. En spricka kan bestå av flera olika fyllnadsmaterial och kan därför förekomma flera gånger i statistiken [34].



Figur 4.5: Sammanställda sprickfyllnadsfördelningen från Västlänken.

4.2.1.1 Vittrat material

Den vittrade fyllningen anses vara problematisk på grund av att berget har sönderdelats och ofta saknas någon tydlig gräns mellan vittrad och fast berggrund. Det innebär att förekomsten av block är stor vilket kan vara problematiskt vid tätning då det blir svårt att förutse hållfastheten i berget [97]. Vittrat material antas ha hög konduktivitet och vattentransporten blir därför hög i dessa områden.

4.2.1.2 Klorit

Klorit kan vara problematisk på grund av att den tillhör gruppen lermineraler. Dessa kan vid en minskning av omkringliggande tryck, exempelvis vid tunnelsprängning, ta upp vatten som leder till att lermineralen sväller. Detta leder i sin tur att en fast bergart snabbt kan omvandlas till en lerliknande massa [24]. Omvandlingen av klorit kan medföra svårigheter både med avseende på hydrogeologi samt hållfasthet.

4.2.1.3 Kalcit

Kalcit är det vanligaste sprickfyllnadsmaterialet sett till fördelningen i figur 4.5. Kalcit är ett kristalliserat mineral som ofta finns vid så kallade läkta sprickor [95]. Sprickorna kan vara olika mycket läkta, i de fall då de fortfarande är delvis öppna bildas en kanalbildning. Denna kanal kan medföra risk för rinnande vatten. Kalcit anses även vara lösligt jämfört med andra bergmineraler och löses därför i koldioxidhaltigt vatten [39].

4.2.1.4 Lera

Då lera förekommer som sprickfyllnadsmaterial kan det leda till flertalet övergångar mellan lera och berg i en tunnel. Se problematiken kring detta i stycke 4.2.3. Lera är även problematisk med hänsyn till sättningar. Enligt Lander från Veidekke¹ kan lera sätta sig medan det omkringliggande berget är stumt. På så vis sätter sig jorden olika mycket. Även mycket små inläckage av vatten till tunneln kan ge stora sättningsskador [1]. Detta är främst ett problem i urbana miljöer, men på grund av den känsliga miljön som är belägen kring Rävlandatunneln måste detta tas i beaktning.

4.2.2 Berg med deformationszoner

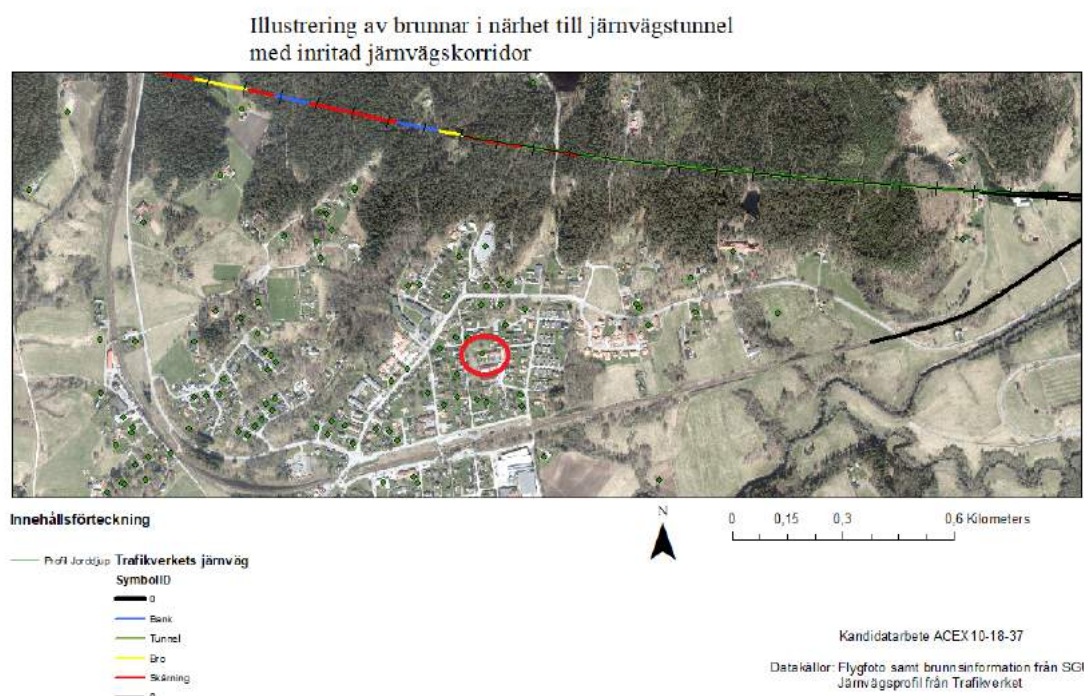
Det är svårt att bestämma enskilda sprickstrykningar i deformationszonerna. En överskådlig tolkning av topografin har därför gjorts, vilket indikerar att sänkor i området har en huvudriktning i norr-syd. Det överensstämmer med Mylonitzonen som enligt SGU:s berggrundskarta ligger 500 meter väster om den planlagda tunneln, se figur A.2. Berggrundskartan bygger på kartläggning som påbörjades i början av 1960-talet och består av olika observationstäthet respektive presentationsmetoder [100]. Kartans noggrannhet skiljer sig därför åt och det är svårt att säga var den verkliga gränsen för Mylonitzonen går. Det är på grund av detta en stor risk att Mylonitzonen även skär genom Rävlandatunneln. De fyra topografiska sänkor som syns i figur 4.3 indikerar deformationszoner och kommer skära tunneln i en rät vinkel.

- Deformationszon 1 efter ungefär 300 meter
- Deformationszon 2 efter ungefär 600 meter
- Deformationszon 3 efter ungefär 800 meter
- Deformationszon 4 efter ungefär 1100 meter

¹Lander, Sofia; Platschef vid Veidekke Entreprenad AB. 2018. Intervju 2 mars

Västlänkens karterade undersökningar visar en stor variation gällande vidden på svaghetszoner. I de flesta fallen är mäktigheten mellan 0,3 till 1 meter, det finns även förekomst av svaghetszoner mellan 1,45 till 8,83 meter [34] [35] [36].

Då fältundersökningar ej genomförts i området har deformationszonens vattenföring kopplats till SGUs brunnarsarkiv. Denna data indikerar i vissa fall på en hög kapacitet i brunnarna. En brunn i området har en kapacitet på 25000 liter/timme, se figur 4.6. Det anses troligt att dessa värden speglar kapaciteten i deformationszonerna. Därför anses den vattenförande förmågan i deformationszonerna vara hög vilket även närheten till den positiva randen Ramsjön indikerar. Antagandet har en viss osäkerhet eftersom inga undersökningar gjorts i området. Urvalet av brunnar i området är även dåligt, då de flesta ligger söder om tunneln nära Rävlanda. Antagandet har därför ej kunnat verifieras.



Figur 4.6: Brunn med kapacitet på 25000 liter/timme, vilket anses spegla kapaciteten i svaghetszonerna.

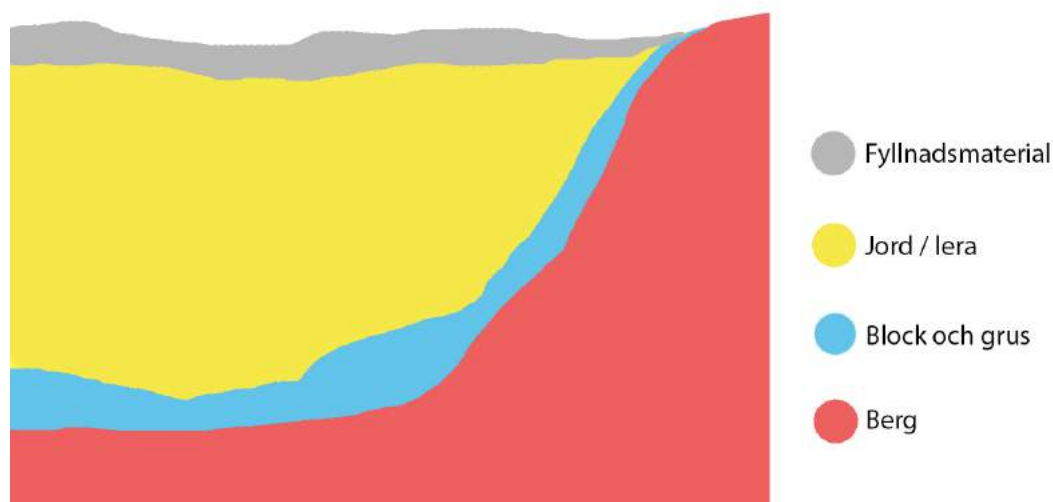
Bottenlagret i områdets sänkor antas, på grund av områdets geologiska historia, bestå av morän följt av lera. Grundvattnet kan medföra att moränen tränger sig in i deformationszonerna [15]. Fyllnaden kan därmed antas vara permeabla sediment vilket medför att vattengenomsläppligheten är hög [44].

4.2.3 Övergång mellan jord och berg

Tunnelsträckningen kommer innebära övergångar mellan jord och berg. Övergången kommer främst ske vid tunnelmynningarna och möjligen vid passage av deformationszoner med inträngd lera. Enligt tidigare sektion 2.1.2 antas jordlagerföljden för de områden som är under högsta kustlinjen se ut enligt figur 4.7. Även SGU:s brunnarsarkiv indikerar denna jordlagerföljd, se tabell 4.1. Det vill säga ett lager morän som ligger på berggrunden och överlagras av lera.

Tabell 4.1: Jordlagerföljd utmed Rävlandatunneln, baserad på SGU:s brunnarsarkiv

BrunnsID	Jordlager [m]	Jordlagerföljd
999091465	0-18	jord, grus
	18-63	berg
999059777	0-0,5	jord
	0,5-4	block, grus
	4-100	berg
914528276	0-6	lera
	6-9	block, grus
	9-160	berg

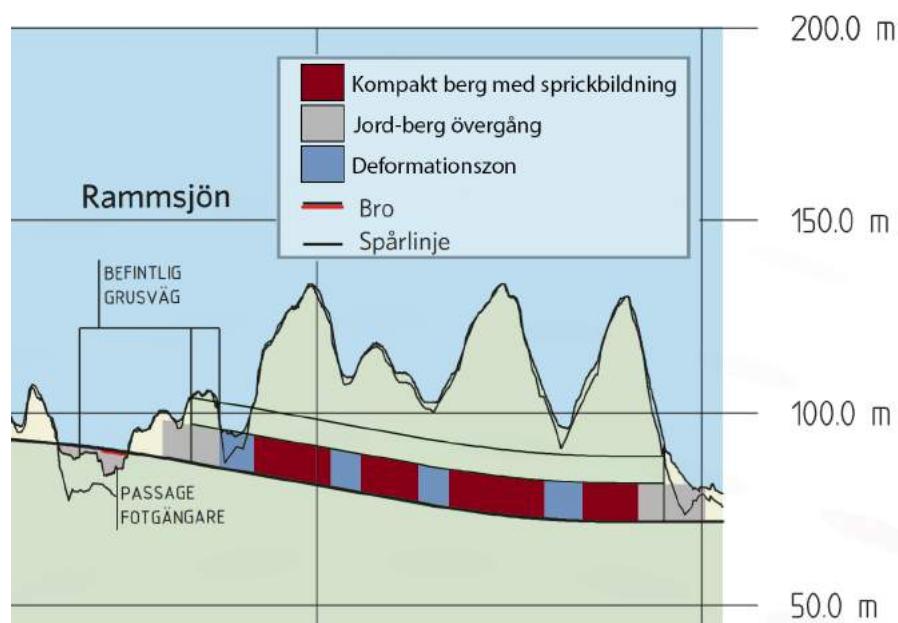


Figur 4.7: Visualiserad antagen jordlagerföljd utmed Rävlandatunneln.

Lagret med morän som befinner sig under leran kan ha hög hydraulisk konduktivitet. Under leran kommer en sluten akvifer bildas. Mäktigheten på moränen kan liksom Västlänken antas vara 1 till 3 meter mellan jord och berg [98]. Akviferen fylls på genom vattentransport i moränlagret som fungerar som en kanal för det inströmmande vattnet [109]. När tunneln passerar övergången skär den igenom vattenkanalen och därmed uppstår problem med vattentätning.

Grundvattenpåverkan i övergångar mellan jord och berg är som störst under

byggnationen av tunneln. Detta eftersom schakt riskerar att komma i kontakt med vattenförande moränlager eller ända ner till berget. Påverkan av grundvattnet kan komma att leda till sättningar, flödesriktningar som ändras och sänkning av vattennivån i omkringliggande brunnar [98]. I de fall då schakten inte kommer ner till moränen utan befinner sig i leran krävs det att leran stabiliseras för att inte riskera bottenuppträckning.



Figur 4.8: Förtydligande var varje typområde, kompakt berg med sprickbildning, deformationszoner samt övergång mellan jord och berg, finns i Rävlandatunneln.

4.3 Områdets hydrogeologi

4.3.1 Grundvatten

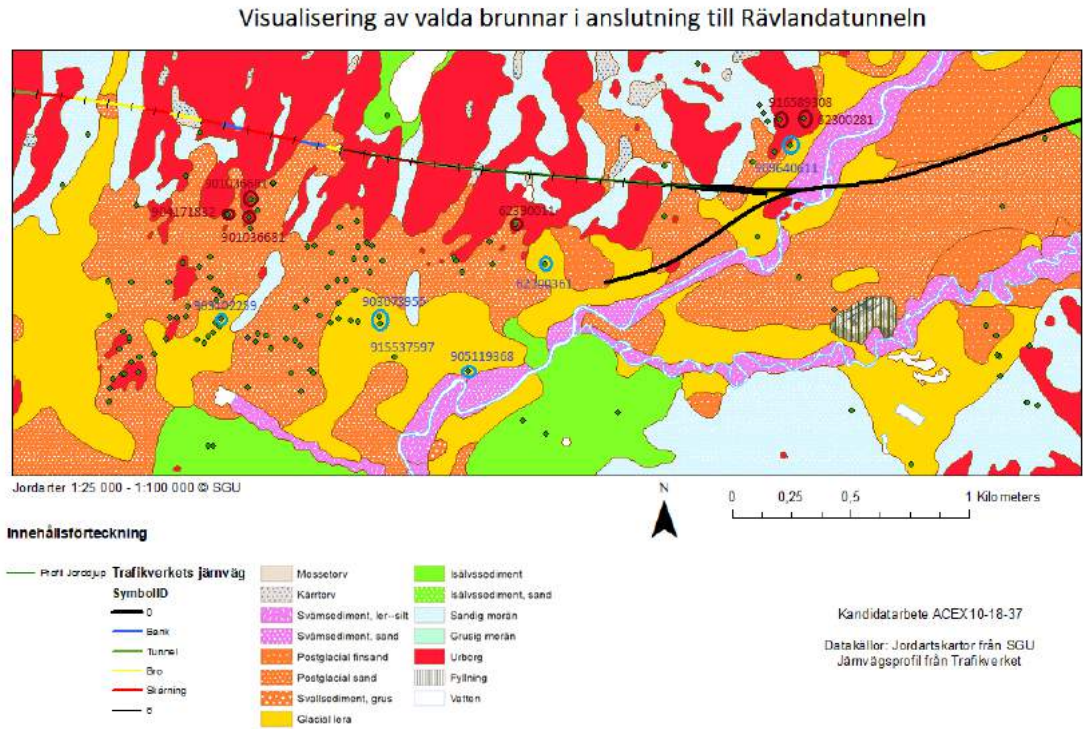
Sektionen ligger i ett område med stora höjdskillnader, vilket betyder en stor variation i potential och därmed stora tryckskillnader mot tunneltaken, se ekvation 2.1. Då potentialförlusten är hög är även flödet av vatten högt, vilket betyder att injekteringsinsatsen behöver dimensioneras efter dessa tryckskillnader. Följande tabeller redovisar absolut höjden för det undre magasinet samt för berg i anslutning till Rävlandatunneln, se tabell 4.2 samt tabell 4.3. Figur 4.9 visar de brunnar som studerats vid bestämning av absolut höjden.

Tabell 4.2: Grundvattennivå för det undre magasinet belägen under lera. Höjdsystemet RH2000 används.

Brunns-ID	Absolut höjd [m]	Grundvattennivå [m]	Höjdnivå [m]
909640611	63,2	15	78,2
903073955	49,9	19	68,4
915537597	57,0	10	67,0
903102259	54,3	5	59,3
905119368	39	12	51,0
62300361	38,7	25	63,7

Tabell 4.3: Grundvattennivå för brunnar i berg. Höjdsystemet RH2000 används.

Brunns-ID	Absolut höjd [m]	Grundvattennivå [m]	Höjdnivå [m]
916589308	100,1	0	100,1
62300281	95,6	2	97,6
904171832	79,9	8	87,9
914571541	75,4	13	88,4
62390011	61,6	28	89,6
901036681	76,6	16	92,6



Figur 4.9: Visualisering av valda brunnar i anslutning till Rävlandatunneln. Blå brunnar representerar grundvattennivå för det undre magasinet medan röda brunnar representerar grundvattennivå i berg.

Absoluthöjden för grundvattennivån är således lägre i det undre magasinet än vad det är i berg. De brunnar som används vid beräkning av absoluthöjden för det undre magasinet är belägna i lera, vilket kan ses i jordartskartan i figur 4.9. Det undre magasinet kan befinna sig i det moränlager som underlagrar leran, vilket har en relativt hög transmissivitet. En hög grundvattennivå i det undre magasinet kan betyda att leran på sikt börjar konsolidera om grundvattennivån sänks [40]. Detta kan ske då undermarkskonstruktioner byggs. En lera som har ett högt portryck samt vars undre magasin har en hög trycknivå bör betraktas som känslig för grundvattennivåförändringar tills det att mer information om leras egenskaper införskaffats. Om det återfinns en sättningskänslig lera med högt portryck kan den vid en grundvattennivåsänkning orsaka skador på omkringliggande miljö.

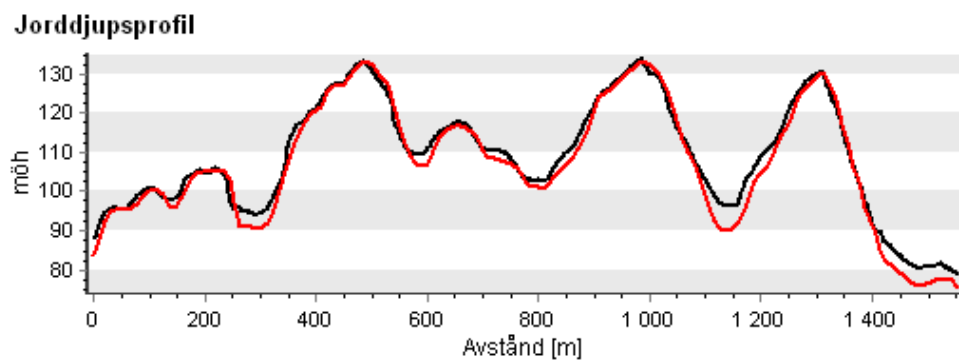
4.3.2 Hydrauliska gränser

Hydrauliska gränser beskriver hur vatten beter sig samt vilken flödesriktning det har. I figur A.6 illustreras de omkringliggande vattendragen för Rävlandatunneln, vilken anses vara den mest kritiska tunneln på järnvägssträckningen. För motivering till detta se sektion 4.1.

De närliggande vattendragen Ramsjön samt Nolån kan orsaka tillrinning till tunneln och därigenom orsaka problem med inläckage. Sådana vattenförekomster utgör en positiv hydraulisk rand, vilket innebär en oändlig tillgång till vatten [58]. Även de stora sprickor samt deformationszoner som finns i berget bildar en positiv rand. För en mer ingående beskrivning av dessa, se avsnitt 4.2.1.

Figur A.7 visar jordarterna i närområdet kring Rävlandatunneln. Till stor del består området av sandig morän samt urberg, men det återfinns även kärrtorv och postglacial sand. Ett moränstråk övergår i höjd med Ramsjön till isälvs sediment. Det betyder att vatten lätt kan ledas från Ramsjön till det område där Rävlandatunneln ska anläggas. Morän kan inte ses som en fullt positiv hydraulisk gräns då den till slut kommer att tömmas på vatten. Moränen kommer bidra med vattenföring från bland annat de omkringliggande vattendragen.

I slutet av Rävlandatunneln ökar jorddjupet och en flack terräng tar vid, vilket kan ses i figur 4.10. Detta område består av stora andelar glacial lera, postglacialt sediment samt postglacial sand. Vid övergång mellan jord till berg är det viktigt att lokalisera de negativa samt positiva hydrauliska gränserna, då det i randen mellan dessa områden kan ske stor vattenföring. Mer om detta i sektion 4.2.3.



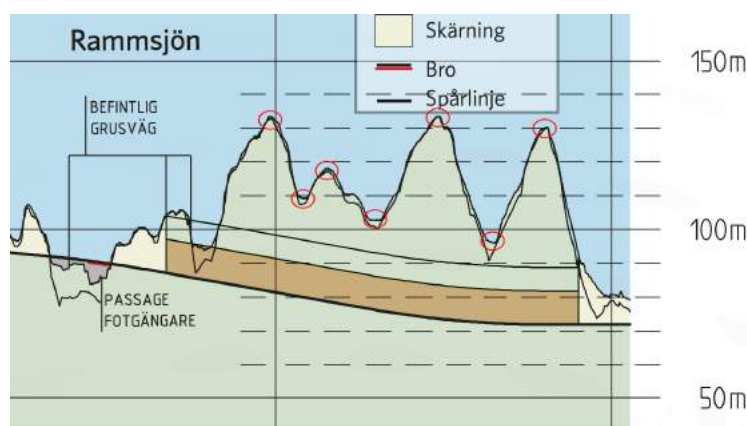
Kandidatarbete ACEx10-18-37

Figur 4.10: Höjddprofil samt jorddjup över Rävlandatunneln. Rött indikerar höjden på berggrundens överyta och svart indikerar höjden på markytans överyta. Skillnaden där emellan är alltså jorddjupet.

4.4 Beräkning av inläckage i tunnel

4.4.1 Beräkning av inläckage för deformationszon samt kompakt berg

Genom att beräkna inläckaget av grundvatten i tunnelsektionen kan både injektionsmedel samt injekteringsinsatsens storlek bestämmas. Mängden inläckande vatten i tunneln beräknas för olika sektioner av Rävlandatunneln. Punkterna representerar de sektioner som används vid beräkning och finns redovisade i figur 4.11. Tabell 4.4 samt tabell 4.5 redovisar resultatet för beräkningarna av transmissivitet samt konduktivitet för deformationszon samt kompakt berg. I figur A.3 redovisas vilka värden som använts.



Figur 4.11: Tunnelbitar som använts vid beräkning.

Tabell 4.4: Transmissivitet samt konduktivitet för deformationszon

Deformationszon	T [m^2/s]	K [m/s]
Medelvärde	$4,77 \cdot 10^{-6}$	
Median	$2,87 \cdot 10^{-6}$	$2,48 \cdot 10^{-8}$
Maxvärde	$1,59 \cdot 10^{-5}$	

Tabell 4.5: Transmissivitet samt konduktivitet för kompakt berg

Bergplint	T [m^2/s]	K [m/s]
Medelvärde	$3,01 \cdot 10^{-6}$	
Median	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$1,78 \cdot 10^{-8}$
Maxvärde	$1,23 \cdot 10^{-5}$	

Enligt Engdahl et al. [21] så är riktvärden för den hydrauliska konduktiviteten hos gnejs i göteborgsområdet $2,0 \cdot 10^{-8}$ m/s samt Bohus-granit $2,4 \cdot 10^{-8}$ m/s. De uträknade värdena ligger nära dessa riktvärden, vilket betyder att de antas rimliga.

Inläckaget i Rävlandatunneln för kompakt berg samt deformationszon finns redovisade i tabell 4.6 samt i tabell 4.7. Eftersom de beräknade värdena för inläckage i Rävlandatunneln överskrider riktvärdena beskrivna i sektion 3.5.1 krävs injekteringsåtgärder.

Då ekvation 3.3 inte tar hänsyn till den sprickbildning som finns i berget avgör bergtäckningen till stor del storleken på inläckaget. Deformationszonerna har en mindre bergtäckning än bergplintarna, se figur 4.11, vilket gör att inläckaget blir mindre. De transmissivitetsvärden som tagits fram för deformationszon samt bergplint i tabell 4.4 samt tabell 4.5 visar att ett större flöde bör inträffa i deformationszoner jämfört med kompakt berg.

Tabell 4.6: Inläckage i liter/min·100m för kompakt berg

Punkt	q medel [$\text{l/min} \cdot 100\text{m}$]	q median [$\text{l/min} \cdot 100\text{m}$]	q max [$\text{l/min} \cdot 100\text{m}$]
1	37,0	22,2	123
3	35,8	21,5	119
5	37,7	22,6	125
7	37,5	22,5	125

Tabell 4.7: Inläckage i liter/min·100m för deformationszon

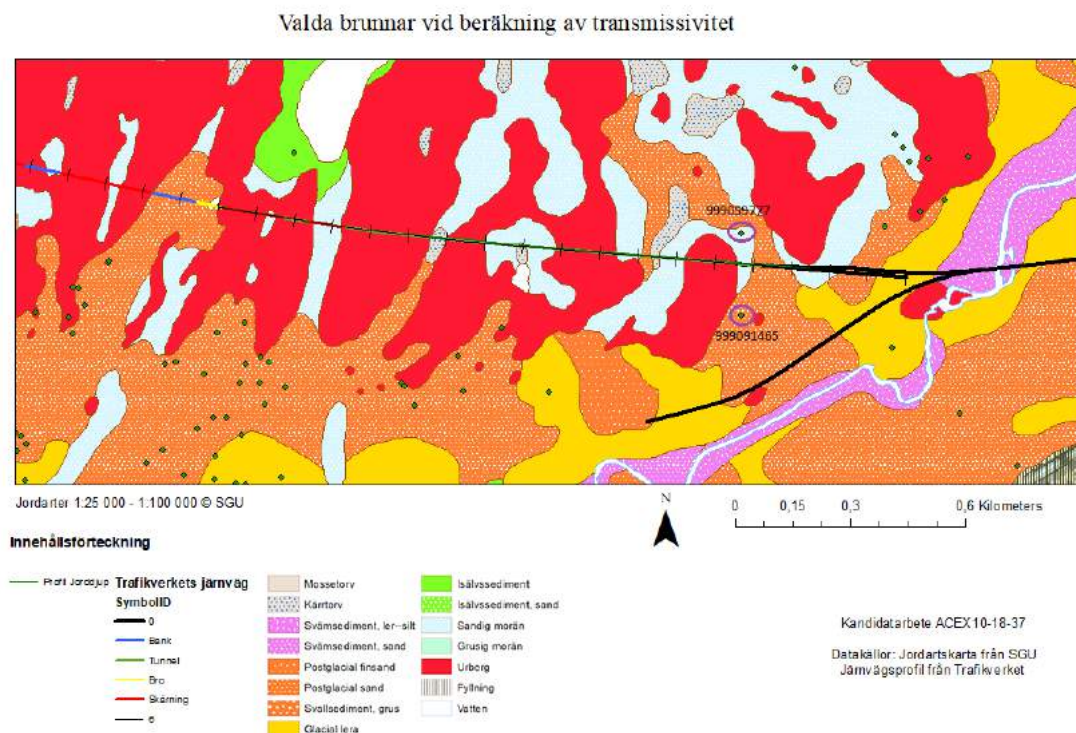
Punkt	q medel [$\text{l/min} \cdot 100\text{m}$]	q median [$\text{l/min} \cdot 100\text{m}$]	q max [$\text{l/min} \cdot 100\text{m}$]
2	21,5	12,1	88,2
4	21,2	11,9	86,7
6	20,7	11,7	85,0

4.4.2 Beräkning av inläckage för övergång mellan jord och berg

I topografiska sänkan närmast den östra tunnelmynningen finns mätvärden ur SGU:s brunnarsarkiv, vilka ger ett jorddjup på 18 meter samt 4 meter med underlagrande berg, se tabell 4.8. Brunnarnas kapacitet finns även angiven. Med dessa värden beräknades ett uppskattat värde på transmissiviteten för området mellan jord och berg.

Tabell 4.8: Jordlagerföljd för valda brunnar i anslutning till övergång mellan jord och berg

BrunnsID	Jordlager [m]	Jordlagerföljd
999091465	0-18	jord, grus
	18-63	berg
999059777	0-0,5	jord
	0,5-4	block, grus
	4-100	berg



Figur 4.12: Visualisering av valda brunnar vid beräkning.

Den uppskattade transmissiviteten för jord i övergången mellan jord och berg redovisas i tabell 4.9.

Tabell 4.9: Uppskattad transmissivitet för jord i övergång mellan jord och berg

Jorddjup [m]	Kapacitet [l/h]	Transmissivitet [m^2/s]	Konduktivitet [m/s]
4	1100	$7,64 \cdot 10^{-5}$	$1,91 \cdot 10^{-5}$
18	2000	$3,09 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-6}$

Utifrån jordartskartan över området kring Rävlandatunneln, se figur A.7, antas det SGU:s brunnarkiv anger som jord och grus vara sandig morän samt postglacial sand. Isälvsmaterial antas vidare underlagra moränen och den postglaciala sanden. Dessa material har en god vattenförande förmåga, vilket speglas i de relativt höga uppskattade transmissiviteter. Då det endast finns två brunnar i anslutning till Rävlandatunneln i brunnarkivet blir de uppskattade värdena på transmissivitet inte representativa för området. Dessa värden kan ses som stickprov, och det krävs fler mätvärden för att med säkerhet kunna fastställa transmissiviteten.

I en utredning av de hydrogeologiska förhållandena för Västlänken har Trafikverket utfört undersökningar samt sammanställt information om de hydrologiska förhållandena i jordlagren i Göteborg från tidigare utredningar. I detta PM, se [52], har värden tagits fram för transmissiviteten i området kring Station Haga. Jordartsprofilen vid det planerade bergtunnelpåslaget vid denna station förväntas vara lera underlagrand av sandig siltig lera eller siltig sand samt underst morän. Den hydrauliska transmissiviteten beräknas vid en propumpning uppgå till 10^{-5} - $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ i detta område.

Station Haga-Station Korsvägen innefattas även av detta hydrauliska PM [52]. Delområdet omfattar ett flackt område med relativt mäktiga jordlager samt lokala uppstickande bergpartier. Jordlagren karaktäriseras av ett övre lager friktionsjord och fyllning på lera samt underst friktionsjord närmast berget [90]. Friktionsjord är en grovkornig jord, och består huvudsakligen av sand och grus. Dess hållfasthet byggs upp av friktionskrafter mellan kornen, och har en god vattenförande förmåga. En utförd propumpning gav en transmissivitet på ca $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, vilket representerar friktionsjord samt ytligt berg [52].

Då de båda delområdenas transmissivitet överensstämmer i storleksordning med de uppskattade transmissiviteter för övergången mellan jord och berg vid Rävlandatunneln antas de uppskattade värdena rimliga.

Det är svårt att uppskatta transmissiviteten endast för jord i en övergång mellan jord och berg. Om den utvärderade transmissiviteten är relativt hög kan den representera den ytliga, uppspruckna delen av berggrunden och grundvattenmagasinet i jordlager på berggrundsytan [52]. Om berget är väldigt uppsprucket vid övergången mellan jord och berg kan det vara svårt att urskilja vart gränsen går mellan de två materialen. Detta skapar en osäkerhet i beräkningarna, vilket i sin tur skapar en osäkerhet i beräkningen av inläckage i tunneln, injekteringsinsatser kan då feldimensioneras.

4.4.3 Beräkning efter injektering

I en personlig intervju hävdar Thörn och Lithén vid Bergab AB⁴ att injekterings-skärmens tjocklek varierar mellan fyra och sex meter beroende på vilken vinkel injekteringshålen riktas. Därför antas tjockleken, t i ekvation 3.5, vara fem meter. Thörn och Lithén⁴ påstår vidare att den återstående transmissiviteten efter injektering brukar variera mellan $1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ och $3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ beroende på de krav på inläckage som ställts. Då en tunnel är belägen i obebott område är det ofta funktionskraven som avgör vilken tätningsklass som krävs. Funktionskraven för tunnlar ställs av Trafikverket. Vid ett inläckningsställe i ett trafikutrymme får flödet inte vara större än eller lika med 0,05 ml/minut per meter tunnel, i väggar eller tak [107]. Detta gäller även över kontaktledningssystem, räler, plattformar, elutrustning samt installationer för nödsituationer. I övriga utrymmen i tunnelanläggningen får flödet från ett inläckningsställe inte vara större än 7,5 ml/min per meter tunnel. Byggherren kan även ställa krav på maximalt tillåtet inläckage med hänsyn till skadlig omgivningspåverkan. Då Rävlandatunneln är belägen nära Rävlanda, Ramsjön samt ett område känsligt mot grundvattensänkning, se sektion 2.5, så antas det att ett högre krav mot inläckage än funktionskraven behövs. Den återstående transmissiviteten efter injektering antas därför vara $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

För att beräkna inläckage i tunneln efter injektering används ekvation 3.5. De totala transmissiviteter som används vid beräkning är det medianvärde som beräknats i tabell 4.4 samt i tabell 4.5. Rävlandatunneln är 1250 meter lång och har en radie på 5 meter. De punkter som används på tunnelsträckningen finns redovisade i figur 4.11.

Tabell 4.10: Beräknat inläckage efter injektering. Den återstående transmissiviteten efter injektering antas vara $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

Punkt	Höjd [m]	Transmissivitet, total [m^2/s]	Inläckage [l/min]	Inläckage [ml/min]
1	48	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$2,09 \cdot 10^{-5}$	0,021
2	26	$2,87 \cdot 10^{-6}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	0,011
3	37	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$	0,016
4	23	$2,87 \cdot 10^{-6}$	$9,99 \cdot 10^{-6}$	0,010
5	55	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$2,39 \cdot 10^{-5}$	0,024
6	20	$2,87 \cdot 10^{-6}$	$8,69 \cdot 10^{-6}$	0,009
7	53	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$	0,023

Då beräkningen baseras på uppskattade värden är den inte helt representativ för hela tunnelsträckningen. Mätningar behövs för att veta exakt hur transmissiviteten varierar över tunneldragningen samt hur den varierar efter injekteringen är gjord. Även injekteringsskärmens tjocklek är något som hade krävt vidare undersökningar. Det kan konstateras att injekteringinsatsen reducerar mängden inläckande

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

vatten, vilket är det som ville uppnås. Alla delsträckor som studerats klarar funktionskravet för trafikutrymmen på 0,05 milliliter/minut. Då de uträknade värdena är betydligt lägre än funktionskravet kan ett högre designvärde på den återstående transmissiviteten efter injektering användas.

Efter de litterära studier som gjorts är det svårt att avgöra vilka ytterligare skyddsåtgärder som eventuellt kommer behövas utöver injektering. Infiltration är en möjlig lösning om kraven på grundvattensänkning inte uppnås. Infiltrationsanläggningen förbereds i starten av projektet, för att sedan användas efter behov både i byggskedet samt då konstruktionen är färdigställd.

4.5 Injekteringslösningar

4.5.1 Injekteringslösning för kompakt berg med sprickbildning

Det som styr vilken injektering som krävs bestäms av tre faktorer; täthetskrav, bergets genomsläpplighet samt de skyddsobjekt som finns i närheten. Då bergets genomsläpplighet är låg kan bergmassan utan injektering vara tillräckligt tät för att klara täthetskraven som ställts [1]. Den fakta som togs fram gällande sprickvidder i sektion 4.2.1 bygger på sprickarteringar gjorda efter bergmekanik. Den framtagna sprickvidden är därför ej representativ när det kommer till injektering. En bedömning av de hydrauliska sprickvidderna i berget hade krävts för att med säkerhet bestämma de injekteringsinsatser som behövs. Enligt Thörn och Lithén⁴ ligger de hydrauliska sprickvidderna i storleksordningen μm . Det är därför svårt att täta berg som är tätt då den vattenförande sprickan måste träffas exakt rätt för att täta berget ytterligare. Den minsta hydrauliska sprickvidden är dimensionerande och bestämmer längden på inträngningen hos injekteringsmedlet för att inläckagekravet ska klaras [27]. Denna sprickvidd är därför central i valet av injekteringmedel.

Thörn och Lithén från Bergab AB⁴ hävdar att sprickfyllnad, se sektion 4.2.1, inte är en parameter som det läggs vikt på vid injektering. Prognosen baseras istället på de vattenförlustmätningar som görs i borrhål för det aktuella området. Designen baseras då på konduktivitetsvärden, vilket gör att materialet i sprickorna inte spelar någon roll. Borrhålen som använts vid bestämning av dessa konduktivitetsvärden är sekretessbelagda vilket gjort att dess mätningar ej har kunnat tas del av. Den bedömning som gjorts av injekteringsinsats har därför baserats på de redovisade geologiska undersökningar som finns tillgängliga.

Då kompakt berg med viss sprickbildning inte kräver stora injekteringsinsatser är cementbruk att föredra då det har tillräckligt hög täthet för att klara täthetskraven.

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

4.5.2 Injekteringslösning för berg med deformationszoner

I deformationszoner med dålig kvalitet krävs ofta omfattande injekteringsinsatser, dels för att öka stabiliteten i bergmassan men även för att förhindra inläckage. Det finns en risk i stora sprickzoner med stark vattenföring att cementbaserade injekteringsmedel späds ut och därmed inte erhåller de egenskaper som eftersträvas. Vid dessa förhållanden kan kemiska injekteringsmedel användas för att tätade stora vattenflödena. Polyuretan är ett lämpligt kemiskt injekteringsmedel för dessa ändamål då det inte är vattenlösligt samtidigt som det i kontakt med vatten polymeriserar och bildar en gel, se sektion 2.10.2.2. Det har en mycket god inträngningsförmåga i smala sprickor. Tidigare redogörelser, se sektion 4.2.2, visar att det kan förväntas vara ett högt flöde i områdets deformationszoner. Antagandet har dock ej kunnat verifieras men bör tas i beaktning i injekteringslösningen. Polyuretan kan användas vid fintätning eller efterinjektering när det tidigare injekteringsarbetets täthet inte är tillräcklig. Enligt Thörn och Lithén från Bergab AB⁴ räcker det ofta att tätas med cementbruk. I projekteringsunderlaget skrivs dock ofta ett kemiskt tätningsmedel med som kan användas vid extremfall. Exempel på sådana fall är om det har ställts väldigt höga täthetskrav eller om det är problem med stora mängder vatten från början.

Silica sol är ytterligare ett injekteringsmedel med goda inträngningsegenskaper i smala sprickor då dess partikelstorlek är väldigt liten. Det är även lätt att styra dess geltid, vilket gör att både injekteringstiden samt injekteringslängden kan optimeras. Enligt Thörn och Lithén på Bergab AB⁴ är Silica sol ett medel som visat goda egenskaper men som inte är accepterat i branschen då dess beständighet är relativt obeprovad.

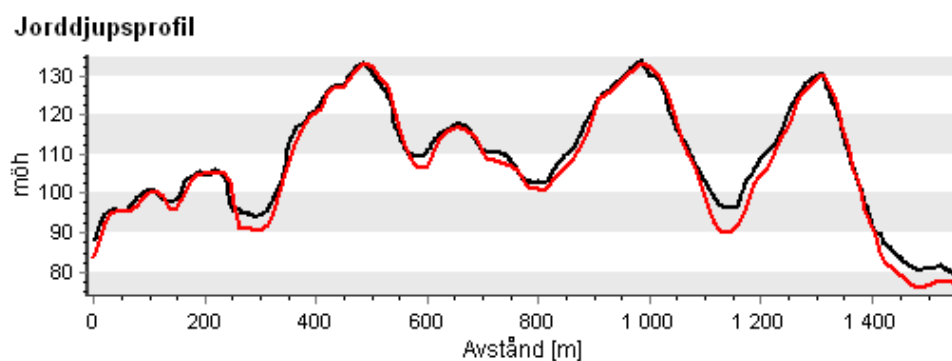
Thörn och Lithén från Bergab AB⁴ hävdar vidare att det är lättare att tätade deformationszoner jämfört med enstaka sprickor. Detta eftersom det vid relativt mycket sprickor är enklare att disponera cementbruket då sprickorna har god kontakt med varandra, och därigenom erhålla en tätningseffekt.

Injekteringsarbetet i en deformationszon bör därför initieras med cementinjektering. Det kemiska injekteringsmedlet polyuretan kan därefter användas för att tätade zoner med kraftig vattenföring eller zoner där tätningen inte blivit fullständig.

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

4.5.3 Injekteringslösning för övergång mellan jord och berg

Som tidigare nämnts i sektion 4.2.3 finns övergångar mellan jord och berg främst vid tunnelmynningarna. Vid dessa övergångar överlagrar leran ett lager med vattenförande morän, se jordlagerprofil i figur 4.7. Figur 4.13 visar att det främst är vid den östra tunnelmynningen som störst jorddjup erhålls.



Kandidatarbete ACEx10-18-37

Figur 4.13: Höjddprofil samt jorddjup över Rävlandatunneln. Rött indikerar höjden på berggrundens överyta och svart indikerar höjden på markytans överyta. Skillnaden där emellan är alltså jorddjupet.

För att konstruera en bra övergång kommer leran schaktas bort. I schakten byggs sedan en betongtunnel, en så kallad betong-lining. När gjutningen är klar placeras den bortschaktade leran över tunneln. Betongtunneln kommer gå in en bit i bergtunneln, detta dels ur tätningssynpunkt men även ur stabilitetssynpunkt. Längden på betong-liningen som går in i berget bestäms med avseende på bergtäckning samt kvaliteten på omkringliggande berg [98]. Injektering kommer sedan behövas för att täta skarvarna mellan lining och berg.

Hydrogeologiska beräkningar samt bergindelning visar att övergångar mellan jord och berg innebär svårigheter gällande kraftig vattenföring på grund av det permeabla moränlagret.

Hydrogeologiska beräkningar, se sektion 4.4.2 samt bergindelning, se sektion 4.2.3, visar att övergångar mellan jord och berg innebär svårigheter gällande kraftig vattenföring på grund av det permeabla moränlagret. Vattentrycket i moränen måste sänkas innan schaktarbete kan påbörjas. Detta för att förhindra hydraulisk bottenuppträckning, vilket innebär att vattentrycket i moränen vill trycka upp schaktbotten som består av ett tunt lager lera [53].

Denna lösning med bortschaktning av lera kan enligt Ödlund Eriksson, Sweco Environment AB³, innebära att betongtunneln skär av dalgången och i värsta

³Ödlund Eriksson, Linn; Hydrogeolog vid Sweco Environment AB. 2018. Intervju 18 april

fall kan dämma upp grundvattenflödet. Uppdämning av grundvattnet innebär att flödet till de fastighetsbrunnar och de naturvärden som ligger längre ner i dalgången minskar. För att lösa detta problem kommer grundvattnet samlas upp uppströms konstruktionen och sedan ledas i ledningar till andra sidan tunneln. För att få vattnet tillbaka till det vattenförande moränlagret rinner det sedan ner i brunnar.

Den västra tunnelmynningen anläggs troligtvis på ett mindre djup och kommer inte dämna upp lika mycket som den östra tunnelmynningen. Därför finns inte samma behov av att samla upp vatten och leda det under tunneln. Enligt Ödlund Eriksson³ kommer det troligtvis räcka med att byta ut jordmassor och anlägga ett permeabelt material under tunneln. Mängden permeabelt material beror på jordmäktigheten hos det vattenförande materialet samt hur mycket vatten som flödar genom materialet jämfört med vilket flöde som finns naturligt i området. Fler undersökningar behövs för att säkerhetsställa det rådande förhållandet och om utbyte av material är en tillräcklig åtgärd.

Dessa två lösningar gällande övergångar mellan jord och berg bygger på att det finns en tydlig gräns mellan jorden och berget. I verkligheten är övergångarna mer komplexa. Om ytberget i övergången mellan jord och berg är väldigt uppsprucket och har ungefär samma konduktivitet som den överlagrande moränen kan det vara svårt att räkna ut var övergången mellan materialen ligger. Enligt Thörn och Lithén på Bergab AB⁴ kan då en berginjektering göras genom borrhål. Cement hålls ner genom borrhålen och sprids sedan i den uppspruckna bergmassan. På så sätt stabiliseras övergången mellan de två materialen.

³Ödlund Eriksson, Linn; Hydrogeolog vid Sweco Environment AB. 2018. Intervju 18 april

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

5

Diskussion

5.1 Problemformulering och syftesformulering

För att kunna utreda vilken eller vilka injekteringsmetoder som är bäst lämpade för just den typen av berg som utreds är det bra att ha en god uppfattning om de egenskaper som projekteringsområdet har. En viss omfattning geologiska och hydrogeologiska undersökningar är avgörande för val av injekteringsmedel samt injekteringsmetod i berg. Viktigt är dock att mängden undersökningar som behövs för att fatta initiala designbeslut inte är i närheten av så omfattande som litteraturen från början antydde. Därför har vi under arbetets gång fått omvärdera den initiala hypotesen om att undersökningar är det mest vitala i projektet.

Det vi märkt under studiens gång är att företagen i stor utsträckning ser sina undersökningar som företagshemligheter, och inte något, de gärna delar med sig av. Detta är inte särskilt anmärkningsvärt då geotekniska och hydrologiska undersökningar både är kostsamma och tidskrävande. Undersökningsmaterialet kan användas som en konkurrensfördel gentemot andra företag. Något vi diskuterade under en intervju med Ödlund Eriksson, Hydrogeolog på Sweco³ var att branschen, och framförallt samhällsutvecklingen, kanske hade mått bra av att regleras i lag likt brunnarsarkivet [80]. Det vill säga en anmälningsplikt av resultatet vid geotekniska undersökningar, i någon form.

Viktigt att komma ihåg, är att vi som gjort studien påbörjade detta arbete ganska förutsättningslöst och dessutom utan några nämnvärda förkunskaper inom ämnet. Våra funderingar och frågeställningar kretsade därför i ett tidigt skede mycket kring vilka injekteringsmedel som användes vid olika typmiljöer. Självfallet är ett gediget förundersökningsarbete viktigt för valet av injekteringsdesign. Vad som däremot förvånade oss var den totala dominansen av cementbaserade injekteringsmedel. Designens varians är snarare hur tätt injekteringshålen ska placeras eller om borrhvinkeln för injekteringshålen ska ändras för att bättre träffa ett spricksystem snarare än som vi trodde på förhand; vilka injekteringsmedel som behövs vid olika avsnitt. Eventuellt använder man polyuretan, som är ett kemiskt injekteringsmedel, vid efterinjekteringar. Det studien nämnt är hur Silica

³Ödlund Eriksson, Linn; Hydrogeolog vid Sweco Environment AB. 2018. Intervju 18 april

sol antas ha en bra användbarhet i framtiden, som komplement till cementbaserade injekteringsmedel. Dock krävs fortsatt forskning kring detta ämnes beständighet och livslängd.

Det är viktigt att fråga sig varför tunneln ska dras just där trafikverket planerat, och kopplat till detta varför det behöver tätas. Det är även viktigt att beröra vilka objekt som riskerar att påverkas, och därför är värda att skyddas. Som en följd av detta blir även naturvärden, avrinningsområden och tillrinningsområden, frekvensen av energi- och vattenbrunnar i området samt sättningskänsliga jordar avgörande för hur tunneln måste byggas. Detta var något vi redan i förstudien förstod när vi läste hydrogeologiska PM för diverse stora infrastrukturprojekt, inget av dessa PM var mindre omfattande än 100 sidor.

För studien var behovet av att sammanställa kunskap om geologi, hydrologi och hydrogeologi stort. Det finns i någon mening ett omätligt behov av mer kunskap och information inom bergbyggnad, detta även om vi tidigare hävdade att studiens slutsats är något av det motsatta. Det som är gränssättande är oftast tiden eller ekonomin, detta i samt att berget relativt enkelt idealiseras i Sverige gör att tunnelprojekten kan genomföras med relativt lite information på förhand. En betydande faktor för att kunna bygga på detta sättet är också att observationsmetoden som är bra vid lite förkunskaper, blivit allt vanligare i Sverige på senare tid. När hela denna breda beskrivning av tunnelkorridoren och det område som på ett eller annat sätt påverkas är klarlagt, är det också viktigt att inse att tunneln själv inte kan stå emot alla risker. De som designar tunneln måste även förbereda och utforma erforderliga skyddsåtgärder. Även här var vi på förhand naiva och fantiserade om otaliga metoder att välja mellan. Verkligheten visade emellertid att skyddsåtgärderna nästintill alltid tillgodoses med infiltrering.

5.2 Miljö

Under studien har vi diskuterat och studerat en rad miljödomar för andra stora infrastrukturprojekt. Vidare har vi diskuterat med kunniga inom området. Mycket talar för att infrastrukturbyggnaden i framtiden kommer få mycket fokus eftersom många satsningar behövs göras för att klimatanpassa och effektivisera sättet vi reser på. Det finns dock en risk att dessa infrastrukturensatsningar missar att beakta viktiga miljöaspekter. Exempelvis försöks det i aktuellt projekt att skona påverkan på våtmarker och torvmarker. Detta är dock inget man förr har tagit hänsyn till och därför finns väldigt lite tidigare forskning och erfarenheter för att säkert lyckas med detta. För att ta hänsyn till dessa men också många andra miljömässiga faktorer är domsluten från mark- och miljödomstolen enligt miljöbalken viktiga. Mycket talar för att dessa domslut, hos andra projekt, har varit väl avvägda för att skona miljön. Vi hade dock önskat ett ökat holistiskt perspektiv där även sättet att bygga eller täta resurseffektivt och miljömässigt bedöms. Det är bra om tunneln inte påverkar sin lokala miljö. Dock har vi vid ett flertal tillfällen

insett att detta kommer till ett pris, nämligen omfattande injekteringar. Dessa injekteringar leder till omfattande koldioxidutsläpp och en förstörd global miljö. Här hade miljöbalken behövts balanseras så att den väger in alla miljöaspekter. Mark och miljödomstolarna tenderar att lyssna på synpunkter från branschen. Ett exempel är hur praxis har förändrats från att reglera det maximala inläckaget per hundra meter. Istället fokuserar domarna på maximalt inläckage för ett visst område eller avsnitt. Detta nya synsätt har gjort att injekteringsinsatserna kan fokuseras till där de gör mest nytta.

Infrastrukturprojektet som studerats i detta arbete kommer antagligen inte ha samma förutsättningar som projektet Västlänken eller något utav de andra projekt som genomförts i Göteborg de senaste åren. Dock har en jämförelse med dessa visat hur processen kan komma att se ut och ungefär vilka krav en handläggare för tillståndsansökan måste förberedas för.

5.3 Historisk utveckling

Det har under arbetets gång visat sig att behovet av precisa och behovsanpassade tättningsåtgärder är något som trendmässigt önskas i byggbranschen. Dock finns det mycket kritik mot denna utveckling. Något som även är tydligt är att entreprenörerna många gånger väljer en överdimensionerad injekteringslösning som anses gällande för en hel tunnel eller ett tunnelavsnitt¹.

I branschen har det sedan de ökade miljökraven i den nya miljöbalken 1998 förekommit ett stort fokus på att bygga väldigt tätt. Ytterligare en effekt av dessa hårda miljökrav är att det blir långa handläggningstider och en kompetensbrist. Detta orsakas av att arbetsbördan hos de hydrogeologer som arbetar med utredning och handläggning blir för stor³.

Något som idag genomsyrar vår utbildning men även i någon mening samhällsbyggnadsdiskursen, är det holistiska tänket där miljöanalyser tas i beaktning från ax till limpa. När miljön betraktas ur ett holistiskt perspektiv blir det tydligt att även cement är en stor negativ faktor för miljöpåverkan. Därför är även en begränsning av exempelvis injekteringsåtgärder något som behöver vägas in i miljöekvationen.

¹Lander, Sofia; Platschef vid Veidekke Entreprenad AB. 2018. Intervju 2 mars

³Ödlund Eriksson, Linn; Hydrogeolog vid Sweco Environment AB. 2018. Intervju 18 april

5.4 Ekonomiska aspekter

Felaktiga antaganden om bergets egenskaper kan, om inte rätt metod används, ge stora ekonomiska konsekvenser och prisstegringar. Kostnadsförändringar i byggprojekt ger som känt ofta upphov till konflikter. Vad vi ser i husbyggnadssektorn är att partneringsamarbete och andra typer av samarbetsinriktade arbetsmetoder blir vanligare. Det mer flexibla sättet som aktiv design medger är även för tunnelbyggnad något som främjar innovativt samarbete. Ett utav de största hindren för att få till en bättre flexibilitet i byggandet är dock traditionella kontrakts- och organisationsformer som inte alls är flexibla, dynamiska och anpassade efter tunnelbyggandets förutsättningar [13]. Cederholm⁶, Affärsområdeschef för injektering på BESAB, menar att mycket forskning har gjorts för att klargöra olika tekniska metoder när det kommer till injekterings- och tunnelbyggnadsteori. Behovet menar Gustav är mer forskning kring hur branschen skall regleras ekonomiskt, det vill säga hur avtal skrivs där utgångsmetoden är observationsmetoden. Detta menar han är det stora hindret som måste överkommas för att effektivisera tunnelbyggnad. Det kommer även göra att underentreprenörerna får goda incitament att arbeta efter observations-filosofin. Vidare menar Cederholm⁶ att cementinjekteringen i svenska förhållanden är så pass god att de flesta situationer som uppkommer med enkelhet kan lösas. Små millimeterfina sprickor till centimetervida sprickor går att tätas utan några större problem, det är som sagt enbart ekonomin som är gränssättande.

Även Thörn och Lithén⁴ hydrogeologer på Bergab AB, menar att kontraktsfrågorna är problematiska. Tunnelbyggandets kontraktsformer skulle kunna förfinas, så att entreprenören får ytterligare incitament att följa det utförande som designande konsulter föreskrivit. Finns det ekonomisk vinning i att ta genvägar, kommer det antagligen också ske. Just injektering är en utav de områden som är svårast att reglera ekonomiskt och kontrollera resultatmässigt menar Thörn och Lithén⁴. Detta har gjort att tätningsresultaten många gånger inte motsvarar designen. En av orsakerna är att det i en tunnel som exempelvis har ett inläckagekrav på 5 liter/min·100m ska till knappt mätbar fukt för att överskrida kravet. Dessutom går detta inte att mäta i anslutning till injekteringen utan måste ske en tid senare. Thörn och Lithén⁴ menar att det är viktigt att arbeta fram byggbara handlingar i ett tidigt skede för att förebygga dessa problem.

Kontraktsformerna är som tidigare nämnt dåligt anpassade för denna typen av byggande, ett bra resultat måste medge en ökad vinst även för utföraren. Denna bild är något som också bekräftas av Kaderfors och Bröchner i en rapport för stiftelsen BeFo där dom studerar observationsmetodens förutsättningar för kontrakt och samverkansarbete [13]. Deras slutsats är att observationsmetoden är en bra metod att arbeta efter. Farhågorna är dock att metoden medger att parterna blir mer som parter än partners och att kontraktsoenigheter kan uppkomma.

⁶Cederholm, Gustav; Affärsområdeschef vid BESAB AB. 2018. Flertalet telefonintervjuer

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

Metoden har både blivit mer användbar och effektiv på senare tid eftersom samarbetsformerna oftare än tidigare är konsortium eller partneringsamarbeten, vilket är en trend i branschen.

5.5 Observationsmetoden ur ett ekonomiskt perspektiv

Då kontrakt tas fram för entreprenören görs antaganden kring mängder av de olika bergklasserna för att uppskatta hur stora injekteringsmängder som krävs med varje metod. Detta är något som på förhand är väldigt svårt att precist veta eftersom specifika data inte går att ta fram i projekteringsskedet. Priset från beställaren sätts efter detta. När entreprenören sedan producerar tunneln och injekterar blir ofta mängden injekteringsmedel annorlunda än den uppskattade mängden⁴. Har ett bra arbete enligt observationsmetoden genomförts är det även rimligt att en resursbesparing gjorts.

Observationsmetoden är ofta en vinst för entreprenören. Genom att få en utförlig beskrivning av berget i sektioner kan arbetet utföras på så kort tid som möjligt. Visar det sig att injekteringsmängden är mindre än projekterat resulterar det troligen i en vinst. För beställaren innebär observationsmetoden att mycket tid läggs i projekteringen vilket är kostsamt. Det är möjligt att dessa timmar tjänas in senare i produktionen och i så fall är observationsmetoden en vinst även för beställaren.

Den optimala vinsten på beställarsidan hade gjorts om arbetet med framtagning av typfall för bergklasser i projekteringen hade stämt överens med verkligheten. För entreprenören är det ofta gynnsamt att det är en differens mellan projektering och verklighet, menar Taatila från BBEAB⁵.

5.6 Observationsmetoden och aktiv design

Praktiskt har observationsmetoden använts i ett flertal projekt. Bergkonsult använde exempelvis metodiken vid projekteringen av Norrströmstunneln som är en del av citybanan. Här valdes att kvantifiera ett antal parametrar som kunde observeras och inom ett visst intervall förbestämdes det vilka designlösningar som var giltiga. Dessa var:

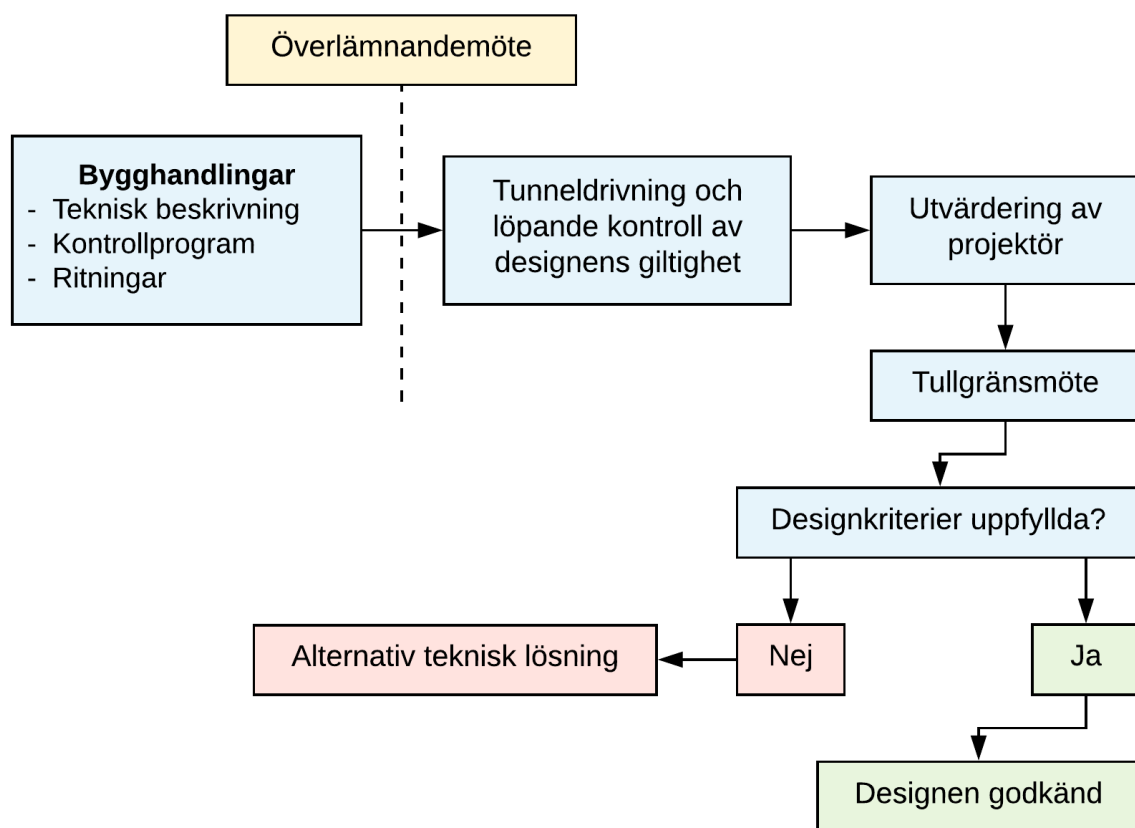
- Bergkvaliteten
- Bergtäckningen

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

⁵Taatila, Veli; VD och Tunnelldrivningsledare vid BBEAB. 2018. Mailintervju 29 april

- Sprickegenskaper
- Sprickorienteringar
- Deformationer
- Skador på installerad bergförstärkning

På dessa parametrar definierades sedan så kallade tullgränser, en geografisk indelning av sträckningen där ett antal krav till varje parameter var tvungna att uppfyllas innan drivningen kunde fortgå [76].



Figur 5.1: Flödesschema för aktiv design vid byggnation av Citybanan [76].

För att kontrollera designens giltighet gäller det sedan att kontrollera de kontrollparametrar som är definierade under design- och projekteringsfasen. Detta gjordes fortlöpande under berguttag och drivning av tunneln. För detta arbete användes i Norralänkens fall ingenjörsgéologin till att kartera gränserna med avseende på bergkvalitet, sprickegenskaper samt sprickorienteringar. Entreprenören genomförde fortlöpande mätningar av deformationerna och meddelade dessa till beställaren. I vissa etapper av sträckningen fanns inte tillräckligt goda kunskaper om bergtäckningen på förhand. Därför sonderingsborrades bergskiktet under

drivningen. Skador på den installerade bergförstärkningen inspekterades och besiktigades sedan [76].

När det gäller systembeskrivningen av delsträckan Mölnlycke-Bollebygd är det därför viktigt att i ett tidigt skede klargöra vilka designmässiga förutsättningar som kan antas råda. Ett exempel på sådan data som behövs är vilka grundvattenflöden som kan förväntas i dragningen. Att olika parametrar är klargjorda för området innebär att en design på förhand kan väljas. Under byggnationen görs sedan mätningar och observationer, vilka avgör den rådande designen.

Eftersom planeringen för sträckan Mölnlycke-Bollebygd befinner sig i ett skede innan projektering, något vi kan kalla för en planeringsfas [18], finns väldigt lite fältundersökningar direkt riktade mot aktuell byggnation. Detta arbete har syftat till att så långt det går sammanställa den data som idag finns tillgänglig inom ramen för projektet men även liknande projekt i närområdet. Rapporten kan ses som det teorin kallar för fåtalsprovning, där det utifrån den data som finns idag utarbetats kvalificerade gissningar. Rapporten har satt upp ett ramverk där antaganden, baserade på sannolikheter, beskriver vilka problem som kan tänkas rimliga att stöta på och vilka åtgärder som bör planeras för att hantera dessa. Ränderna på dessa antaganden är de dimensioneringsmässiga förutsättningar som blir gränssättande. Den övre randen är det värsta fallet där exempelvis vatten hejdlöst sprutar in i tunnelschaktet. Den andra randen skulle kunna vara rakt motsatt ytterlighet, det vill säga att schaktet går i helt impermeabelt och torrt berg.

För att göra rapporten helt regelrätt inom ramverket för observationsmetoden skulle det behövas tas fram fler olika fall för varje delområde. Vi har nöjt oss med att endast studera de tre vanligaste typfallen i berget och därmed inte tagit fram tre olika designlösningar för varje delområde, vilket hade vart en lämplig nivå av fördesign. Detta gör att observationsmetoden inte tillämpas fullt ut utan att enbart det allra grövsta ramverket fastställs. Observationsmetoden är som tidigare nämnt något som lever med ett projekt hela vägen in i slutskedet av byggnationen.

Ödlund Eriksson³, Hydrogeolog på Sweco Environment AB som deltagit under utredningen och systemskedet av Mölnlycke-Bollebygd, menar att observationsmetoden är ett bra verktyg vid själva tunnelbyggnaden. Gällande omgivningspåverkan menar Ödlund Eriksson³ att det är svårt att applicera mätbara parametrar som sedan går att kontrollera. Ett exempel Ödlund Eriksson³ lyfter är att våtmarkerna fastställts vara väldigt känsliga för avsänkning; så lite som 0,1 meter kan påverka våtmarkerna drastiskt och riskerar att skada känsliga biotoper. Detta skulle kunna tänkas vara en bra mätbar parameter där en alternativ lösning eller skyddsåtgärder sätts in. Dock är det svårt att fastställa vad normalnivån i våtmarken är, det vill säga varifrån mätningen börjar. Därför är det metodiken, kontroll samt uppföljning som gäller för många hydrologiska problem och utifrån vad som händer appliceras åtgärder. Det är därmed något som mer har karaktären av en aktiv design.

³Ödlund Eriksson, Linn; Hydrogeolog vid Sweco Environment AB. 2018. Intervju 18 april

Även om observationsmetoden reglerats som en godtagbar designmetod i Eurokoden råder det inom branschen stor begreppsförvirring. Något som är beskrivet tidigare i studien är oklarheten om sambandet mellan observationsmetoden och aktiv design. En del av den oklarheten menar Kaderfors och Bröchner härstammar ur att det även innan Eurokoden förekommit metoder som är svåra att särskilja från observationsmetoden [13]. Vidare menar de att observationsmetodens anpassning till de svenska geologiska förhållandena gör att observationsmetoden bäst lämpar sig för att effektivisera och optimera injekteringen.

5.7 Val av kritisk tunnelsträckning

För att ta fram den mest kritiska tunnelsträckningen för delsträckan Mölnlycke-Bollebygd har vi studerat ett antal olika faktorer. Med informationen som togs i beaktning landande vi tillslut i att den mest kritiska tunnelsträckningen var Rävlandatunneln. Detta på grund av att Rävlandatunneln innehåller många övergångar mellan jord och berg, samt Rävlandabornas och kommunens önskan om att invånarna ska kunna ta sig till rekreatiomsområdet Ramsjön.

Ett antagande vi gjort är att deformationszonerna i huvudsak ligger i området kring Rävlandatunneln. Detta syns till höger i figur A.2. Här finns svårigheter i SGU:s material om deformationszoner då det är svårt att veta hur mycket av området som har blivit undersökt. Om exempelvis deformationszoner inte finns med på kartan betyder det antingen att de inte finns eller att området inte är undersökt.

Det finns många utmaningar på sträckan samtidigt som det är ett komplext projekt med många parametrar som behövs ta hänsyn till, utvärdera samt jämföras. Detta leder till att det är svårt att ge en definitiv värsta sträcka. Trots detta styrks vår hypotes, att Rävlandatunneln är den mest kritiska av de planerade tunneldragningarna, av både Thörn och Lithén på Bergab AB⁴ samt av Ödlund Eriksson vid Sweco Environment AB³.

Vi har i denna rapport fokuserat på tekniska aspekter. Verksamma i branschen anser däremot att det egentligen är designaspekter och skärningar i träsk och våtmarker som är mest kritiska vid tunnelbyggnation. Detta skiljer sig från deformationszoner och andra tekniskt avancerade områden som vi i denna rapport huvudsakligen ansett vara de mest problematiska. Exempelvis resonerar Thörn och Lithén vid Bergab AB⁴ att Landvetter flygplats kommer bli problematiskt, främst på grund av designaspekter, där vibrationskraven kommer leda till svårigheter i byggskedet.

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

³Ödlund Eriksson, Linn; Hydrogeolog vid Sweco Environment AB. 2018. Intervju 18 april

5.8 Injekteringslösningar

I början av detta arbete låg fokus på vilka injekteringslösningar som behövdes i de tre valda typfallen på den kritiska tunneldragningen. Under arbetets gång förstod vi att branschen domineras av cementbaserade injekteringsmedel. De kemiska injekteringsmedlen används endast vid extremfall, då det exempelvis råder kraftig vattenföring. Thörn och Lithén från Bergab AB⁴ hävdar att detta beror på den goda bergkvalitet vi har i Sverige. Injektering används i många fall inte som en stabiliserande åtgärd, utan används ofta endast som skyddsåtgärd mot inläckage. Cementbaserade injekteringsmedel klarar i de flesta fall att täta för inläckage i svensk berggrund, varför de kemiska injekteringsmedlen blir överflödiga.

Det finns även en viss rädsla i branschen att använda nya injekteringsmedel som exempelvis Silica sol då de mekaniska nedbrytningsmekanismerna hos injekteringsmedlet i dagsläget fortfarande inte är helt kända. Enligt Ödlund Eriksson³ beror denna rädsla delvis på grund av den kemikaliespridning som skedde i grundvattnet vid projektet Hallandsåstunneln. På Chalmers tekniska högskola sker det forskning kring beständigheten hos Silica sol, vilket gör att injekteringsmedlet förhoppningsvis börjar användas mer av branschen i framtiden. Det är dock svårt att nå ut till branschen med nya injekteringsmedel på grund av den goda bergkvalitet vi har i Sverige. Det finns inget stort behov av nya injekteringsmedel då cementbruk ofta räcker till.

Kraven som ställs på tätheten i tunnlar har en tendens att bli hårdare längre ner i beställarledet. Då beställaren beställer en projektering för injektering begärs ofta hårdare krav än de som ställts i miljödomen. Detta för att ha marginalerna på rätt sida. De som utför projekteringen höjer därefter kraven ytterligare för entreprenören av samma anledning. Detta leder i slutändan till att de projekterade injekteringsåtgärderna är mer omfattande än vad som krävs i miljödomen⁴. Tunnlar blir dessutom tätare med tiden. Detta då nya tätande material ofta lägger sig i sprickorna. Fenomenet uppkommer då det skapas ett flöde av vatten i berget mot tunneln. Då detta sker tar vattnet med sig material som lägger sig i sprickorna och tätar de ytterligare. I slutändan har man en tunnel med inläckagekrav som är på en avsevärt högre nivå än vad som krävts i miljödomen. Detta blir en ekonomisk fråga för företagen. Som tidigare nämnts fuskas det mycket i injekterinsskedet från entreprenörer. Kunskapen om ovanstående kan vara en anledning till att man väljer att göra det.

Vi ser tendenser till att bergbyggandet kommer att öka i framtiden. Nya krav på infrastruktur har lett till att lutningen på järnvägsdragningar minskat samtidigt som kurvradier ökat. Detta leder i sin tur till att järnvägen ofta behöver dras genom berg då man inte kan dra järnvägen runt det på grund av de stora kurvradierna. Det råder även en ökad urbanisering i städerna, vilket gör att undermarkskonstruktioner blir mer ekonomiskt tilltalande då det föreligger konkurrens

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

³Ödlund Eriksson, Linn; Hydrogeolog vid Sweco Environment AB. 2018. Intervju 18 april

om markytan. Vid ett ökat undermarksbyggande anser vi att både behovet av nya metoder inom injektering samt injekteringsmedel ökar. Detta kan även styrkas i behovet av kärnavfallslagring, där slutförvarsanläggningen med sin långa drifttid kräver material med hög beständighet [12]. Forskning inom injekteringsmetoder samt injekteringsmedel är därför viktig för att klara samhällets framtida behov av undermarkskonstruktioner.

Vid beräkning av inläckage i övergången mellan jord och berg erhöles en hydraulisk konduktivitet i storleksordningen 10^{-5} - 10^{-6} i jordmaterialet. Detta tyder på grusig morän, vilket kan bekräftas i tabell 4.8 [44]. Beräkningen visar att transmissiviteten i jordmaterialet är hög. Om inte detta jordmaterial tätas kan därför höga flöden uppstå, vilket kan orsaka skador på både omkringliggande miljö och tunnel. Då övergångarna mellan jord och berg ligger i de båda tunnelpåslagen kan jorden med lätthet schaktas bort. Därefter byggs en betong-lining, vilken skapar både stabilitet samtidigt som den förhindrar inläckage. Flera alternativa metoder finns för att uppnå samma resultat tätningsmässigt. En betong-lining anses dock vara mest praktisk tillämpbar i detta fall samtidigt som det är mest ekonomiskt försvarbart.

Taatila från BBEAB⁵ anser att övergångar mellan jord och berg inte är problematiska ur en tunneldrivningsledares synpunkt. Taatila⁵ hävdar att alla tekniska problem i övergångar mellan jord och berg går att lösa genom att:

- Spränga förskärningar samt tunnelns 10 första meter med måtta och förnuft
- Göra inslagsvalvet vattentätt samt minst 10 meter långt in i berget. Därefter injekterar man slutet av inslagsvalvet.

Vid påslagets början är berget ofta så uppsprucket att injekteringen inte kan utföras mot injekteringstryck. Volymskriteriet är därför ofta det som avgör hur stor injekteringsinsatsen blir. Taatila⁵ hävdar att injekteringsinsatsen på grund av detta bör fokuseras till slutet av inslagsvalvet, då tätningseffekten är störst där.

Taatila⁵ hävdar vidare att entreprenören gärna försöker kringgå injekteringsinsatser genom att föreslå ändringar i injekteringsförfarandet eller genom att ta risker med mängden inläckage. Detta på grund av att injekteringsinsatsen inte kan generera så mycket pengar att den täcker stilleståndskostnaderna för tunneldrivningen. För att kunna producera billigare tunnlar med samma tekniska resultat anser Taatila⁵ att:

- Sonderingshål bör borraras var tredje sprängsalva där klara kriterier ställts upp för när man tar till injektering.
- En realistisk problembeskrivning gällande inläckage bör ställas upp. Det förekommer alltid inläckage, det behövs därför specificeras om inläckaget ska tälas eller döljas.
- Där det verkligen behövs bör en betong-lining uppföras.

⁵Taatila, Veli; VD och Tunneldrivningsledare vid BBEAB. 2018. Mailintervju 29 april

Injekteringsinsatsen kan med dessa åtgärder bli mer tidseffektiv, och därmed mer tilltalande för entreprenörerna.

Övergångar mellan jord och berg är något som litteraturen sett som problematiska då de ofta medför en kraftig vattenföring. Taatila⁵ hävdar däremot att branschen inte ser dessa övergångar som ett problem. Med ovan nämnda metoder går inläckaget i övergångar mellan jord och berg att förhindra med relativt enkla medel. Detta visar på att det som litteraturen anser vara problematiskt inte behöver vara det i de verkliga projekten.

5.9 Lagar och tidigare miljödomar

För ett av de andra stora och uppmärksammade infrastrukturprojekten i regionen, Västlänken, meddelade Mark- och miljödomstolen sin deldom i januari 2018. En deldom innebär att ett beslut meddelas i stora drag men den slutliga domen kommer innehålla mer detaljer. Denna dom är intressant i ett antal avseenden, bland annat för det faktum att det här ska väljas ett nytt angreppssätt på det som tidigare varit en praxis.

För Västlänkens del åläggs Trafikverket i sitt tillstånd enligt 9:e och 11:e kapitlet i miljöbalken att bland annat inom influensområdet kontinuerligt kontrollera grundvattentryck i förekommande magasin, samt mäta porttrycksnivåer i leran. Vidare skall även kontroll av alla andra identifierade riskobjekt göras med lämpliga metoder. Vidare ska det under anläggningsskedet finnas åtgärder förberedda i olika nivåer grundade på riskbedömningarna. Anläggningsskedet ska ta hand om och rena det processvatten som tillverkas. Detta vatten ska renas minst med avseende på partiklar och olja [111].

Ytterligare en viktig del från domslutet är att utföraren, i detta fallet Trafikverket, senast tre månader innan tillståndspliktig verksamhet eller vattenverksamhet påbörjas, åläggs inkomma med kontrollprogram för verksamheten. I kontrollprogram för verksamhet ska det till exempel anges hur grundvattentryck, sättningar och annan påverkan på omkringliggande byggnader och anläggningar ska kontrolleras. Som en del av detta måste det kunna presenteras injekteringsresultat, uppmätta inläckage per delsträcka samt eventuella uppmätta sättningar [111]. Även vid andra tunnelprojekt, exempelvis det tunnelprojekt som förbinder Johanneberg med Korsvägen, ålägger miljödomstolen i sitt tillstånd att fastställa ett antal riskfaktorer och kopplade till dessa ”larmnivåer” i olika givna observationspunkter. I dessa observationspunkter ska sedan mätningar genomföras med olika intervall under bygg- och bruksskede. Överskrids dessa toleranser ska länsstyrelsen genast underrättas. Anmärkningsvärt är att avsteg från den praxis om inläckage per 100 meter görs för även denna dom. Här tillåts istället ett inläckage av grundvatten på 120 liter/minut i genomsnitt per vecka under byggnationen, samt 42 liter/minut och vecka under driftskedet [112].

En risk vid själva utförandet av undermarkskonstruktioner är alltid att kraven temporärt överskrids. Därför har Mark- och miljödomstolens tillståndsgivande för Västlänken även bestämt att de träd som riskerar att skadas till följd av grundvattensänkning ska bevattnas konstgjort [111].

Eftersom en tunnel i berg nästintill uteslutande tätas genom injektering, och då till en övervägande del förinjektering, är det viktigt att inse att resultatet av den slutgiltiga tätningen i stor utsträckning är på plats redan innan tunneln drivs. Därför är det även viktigt att dimensioneringen av injekteringsinsatserna tas i beaktning för att säkert klara de täthetskrav som ställs både under utförande och i driftskede. I Mark- och miljödomstolens dom menar de att även om målen är högt uppsatta tätningsmässigt, så är den faktiska tätheten som uppnås med en viss metod väldigt osäker. Det finns i undermarkskonstruktioner alltid osäkerheter kring vilken bergkvalitet som finns över sträckningen. En väldigt stor osäkerhet är övergångar mellan jord och berg, särskilt om dessa är frekvent förekommande [111].

I domen för Spårtunneln vid Johanneberg regleras även injekteringsmedel som är tillåtna att använda. Framförallt förordas cementbaserade varianter och för andra medel krävs godkännande av Miljöförvaltningen i Göteborgs kommun [112].

Efter att vi analyserat miljödomar står det klart att aktuellt projekt har goda förutsättningar att få ett tillstånd med lägre krav än till exempel Västlänken. Under själva byggnationsskedet samt det senare driftskedet ställs det ofta krav i domarna på att olika typer av kontroller ska genomföras. Dessa kontroller är kopplade till de riskfaktorer som identifierats i riskansökan. För aktuellt projekt har både denna studie, men även de branschpersoner vi intervjuat, en god kännedom om vilka områden och faktorer som skulle kunna bli problematiska. Utöver en god kartlagd kännedom upplever vi även en tonvikt på hållbarhet och miljömedvetenhet i projektet. Vi är övertygade om att detta tänk kommer leva med projektet in i driftskedet. Som vi tidigare beskrivit och diskuterat har praxis i miljödomarna mer skiftat mot att föreskriva inläckage för en viss etapp, exempelvis skulle miljödomen kunna föreskriva maximalt inläckage för Rävlandatunneln. Detta sättet att reglera har visat sig vara uppskattat i branschen och många anser att detta medger en effektivare och mer flexibel injektering⁵.

Under intervjun med på Bergab AB⁴ diskuterade vi den eventuella miljödomen för Rävlandatunneln. Diskussionen bekräftade det vi konstaterat i studien; skyddsobjekten i anslutning till tunnelsträckningen i aktuellt projekt har en relativt låg skyddsklass jämfört med tunneldrivande genom stad. Dessutom diskuterade vi att ett kontroversiellt projekt likt Västlänken antagligen kommer överklagas i alla juridiska instanser. Detta gör att dimensioneringen antagligen görs något ordentligare från början. Dessutom är antagligen det beslutsunderlag som trafikverket lämnar till mark och miljödomstolen mer genomarbetat då projektet Mölnlycke-Bollebygd inte är kontroversiellt i det avseendet. För projekt liknande

⁵Taatila, Veli; VD och Tunneldrivningsledare vid BBEAB. 2018. Mailintervju 29 april

⁴Thörn, Johan och Lithén, Johanna; hydrogeologer vid Bergab AB. 2018. Intervju 23 april

detta är det även osannolikt att Trafikverkets utredning som ligger till grund för Mark och miljödomens bedömning skulle ställa högre krav på täthet än 10 liter/min·100m. På de avsnitt där det inte finns några skyddsobjekt är det osannolikt att miljödomen kommer vara skarpare än rekommendationerna. En kvarvarande osäkerhet efter studien är om tunneln kommer ha god kontakt med Ramsjön eller ej. Föreligger god kontakt med någon form av ytvatten kommer sannolikt täthetskraven öka.

6

Slutsats

Genom intervjuer samt undersökningar av sträckan Mölnlycke-Bollebygd konstaterades att tunneln i området kring Rävlanda är den mest problematiska tunnelsträckningen ur injekteringssynpunkt. I denna tunnel samt i dess omgivning kan det förväntas att följande hydrogeologiska problem uppstår:

- Inläckage
- Grundvattenavsänkning
- Stora vattenflöden i jord- och bergmaterial

Injekteringsmetoder har tagits fram för de tre zonerna i Rävlanda.

- För kompakt berg med sprickbildning har en metod som bygger på att tätas med en cementblandning tagits fram.
- För berg med deformationszoner har en metod som bygger på att tätas med cementblandning i kombination med tätningsmedlet Polyuretan tagits fram. Polyuretan bör användas vid behov då det exempelvis råder höga vattenflöden där cementbruk riskerar att spolats bort.
- I övergången mellan jord och berg bör en urschaktning av jordlager göras. Därefter bör ett tunnelement i betong installeras i kombination med att material med hög konduktivitet läggs i botten. Detta för att leda vattnet under elementet. Tätningen ser olika ut beroende på bergets genomsläpplighet i övergången. Då bergets genomsläpplighet är låg tätas skarven med en cementblandning. Är berget uppsprucket med en hög konduktivitet bör en metod som innefattar att borrhål fylls med en cementblandning användas. Cementen i borrhålen trycks sedan ut i det uppspruckna materialet och förstärker samt tätar det uppspruckna berget.

De injekteringsmetoder som valts skiljer sig inte nämnvärt från varandra. Detta beror troligtvis på att kvaliteten i Sveriges berggrund är god. Cementbruk är ofta tillräckligt för att tätas de sprickor och inläckage som råder. Injekteringsproblematiken är därför relativt liten i Sverige.

Med de valda designparametrarna beräknas tunneln klara inläckagekraven ställda av Trafikverket. Det konstateras även att tillämpningen av observationsmetoden är en lämplig metod att använda vid projektering av tunnlar i berg. Installation av infiltration bör göras i området kring Rävlandatunneln som ytterligare skyddsåtgärd för förhindrande av en eventuell grundvattenavsänkning. Om denna installation kommer att användas utvärderas både under byggskedet och i efterhand.

Litteratur

- [1] P. Wilén, S. Kvartsberg och M. Zetterlund, "Behovsprövad injektering -Hydrogeologiskt baserad metodik för implementering. BeFo Rapport 137", Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, tekn. rapport, 2014.
- [2] U. Ahtola, K. Gehring, P. Kesseli, P. Kogler, P. Latva-Pukkila, A. Lislerud, M. Mänttari, J. Naapuri och T. Niskanen, *Rock excavation handbook*. Sandvik: Sandvik Tamrock Corp, 1999.
- [3] A.-C. Andersson och J. Berntson, "Djupinfiltration - En metod att upprätthålla grundvattentrycket i slutna akviferer. Utförande, drift och kontroll. Rapport R166:1980", tekn. rapport, 1980.
- [4] —, "Kontrollerad grundvattenbalans genom djupinfiltration - en inventering av djupinfiltrationsprojekt.", Chalmers tekniska högskola, Göteborg, tekn. rapport, 1977.
- [5] C. Andersson, *Levande skogar*, 2016. URL: <https://www.miljomal.se/Miljomalen/12-Levande-skogar/>.
- [6] H. Andersson, "Polyuretan som injekteringsmedel. BeFo Rapport 41", Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, tekn. rapport, 1999.
- [7] J. Axelsson, "Bilaga 3 PM Skyddsinfiltation - Miljöprovning för tunnelbana från Kungsträdgården till Nacka och söderort", Stockholms läns landsting, Stockholm, tekn. rapport, 2018.
- [8] Banverket, "Kust till kustbanan. BRVT 2003:02:1", tekn. rapport, 2003.
- [9] B. Bergren, M. Holmberg och H. Stille, "Tillämpningsdokument - Observationsmetoden i Geotekniken", Implementeringskommissionen för Europastandarder inom Geoteknik, Stockholm, tekn. rapport, 2010.
- [10] U. Bergström, T. Eliasson, M. Engdahl, C. Jelinek, Å. Lindh, L. Lundqvist, L.-o. Lång, L. Persson, T. Persson och O. Pile, "Götalandsbanan - ställning av SGUs geologiska data för sträckan Göteborg – Jönköping. Rapport 2017:03", tekn. rapport, 2017.
- [11] BESAB, *Tätning av berg med injektering*, 2018. URL: <http://www.besab.se/produkter-tjanster/berg/injektering/>.
- [12] I. Bogdanoff, "Degradering av berg, förstärkningar och injektering i tunnlar. Rapport 2013:26", Strålsäkerhetsmyndigheten, tekn. rapport, 2013.
- [13] J. Bröchner och A. Kadefors, "Observationsmetoden i bergbyggande - Kontrakt och samverkan. BeFo Rapport K28", Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, tekn. rapport, 2008.

- [14] P. G. Burström, *Byggnadsmaterial - Uppbyggad, tillverkning och egenskaper*, Upplaga 2: Lund: Studentlitteratur AB, 2007.
- [15] A. Carlsson och R. Christiansson, "Construction experiences from underground works at Forsmark. SKB Rapport R-07-10", Svensk Kärnbränslehantering AB, tekn. rapport, 2007.
- [16] L. Carlsson och G. Gustafson, *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik*, Version 2. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola, 1997.
- [17] Chalmers Tekniska Högskola, "Kompendium i hydrogeologi", årg. Publ. C41, 1991.
- [18] J. Collinder, *Göteborg-Borås - Presentation för chalmerister*, Göteborg, 2018.
- [19] A. Ek, *Ett rikt odlingslandskap*, 2017. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Sveriges-miljomal/Miljokvalitetsmalen/Ett-rikt-odlingslandskap/>.
- [20] P. Elvingson, *Hållbar utveckling*, 2018-03-20. Ne.se, 2018.
- [21] M. Engdahl, B. Fogdestam och P. Engqvist, "Beskrivning till kartan över grundvattnet i Västra Götalands län, västra delen, f.d. Göteborgs och Bohus län - SGU Serie Ah nr 12", Sveriges Geologiska Undersökning, tekn. rapport, 1999.
- [22] A. Engström, K. Persson och G. Gustafsson, "Nyttan av vattenförlustmätningar vid tätning av tunnlar. BeFo Rapport 91", Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, tekn. rapport, 2009.
- [23] European Union, *European Commission - JRC Eurocodes*, 2018. URL: <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/home.php>.
- [24] H. Fagerström, VBBAB, A. Carlsson, G.-o. Morfeldt och Hagconsult AB, "Undermarksbyggande i svagt berg Byggnadsgeologi", tekn. rapport, 1983.
- [25] Å. Fransson och L. Hernqvist, "Geology, Water Inflow Prognosis and Grout Selection for Tunnel Sealing: Case Studies from Two Tunnels in Hard Rock, Sweden", i *World Tunnel Congress*, Vancouver, Kanada: Tunneling association of Canada, 2010.
- [26] B. M. Franzén och L. Kristina, "Agrarhistorisk landskapsanalys över f.d. Göteborgs och Bohus län. Rapport 2000:8", Riksantikvarieämbetet, Stockholm, tekn. rapport, 2000.
- [27] J. Funehag, "Handledning för injektering med silica sol - för tätning i hårt berg. BeFo Rapport 106", Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, tekn. rapport, 2011.
- [28] Geotechdata, *Lugeon test*, 2015. URL: http://www.geotechdata.info/geotest/Lugeon_test.html.
- [29] G. Gustafson, Formas. och Fälth & Hässler, *Hydrogeologi för bergbyggare*. Formas, 2009.
- [30] K. Hansson, T. Svensson, A. Möller, P. Larch och B. Åhlen, "Mätning av inläckande vatten till bergtunnlar", Stockholm, tekn. rapport, 2010.
- [31] K. Hasselborn Wenner, "Järnvägsplan. Mölnlycke-Bollebygd, en del av Götalandsbanan PM Spårlinjens höjdläge vid Rävlanda-Rammsjön. TRV 2014/43394", Trafikverket, Göteborg, tekn. rapport, 2016.

-
- [32] M. Holmberg och H. Stille, "Observationsmetodens grunder och dess tillämpning på design av konstruktioner i berg. BeFo Rapport 80", Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, tekn. rapport, 2007.
- [33] S. Jungmar, *Pilgrimsfalkar försenar rivningen av gasklockan*, Göteborg, jan. 2017. URL: <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/vast/pilgrimsfalkar-forsenar-rivningen-av-gasklockan>.
- [34] J. Karlsson och O. Olofsson, "PM F 06 – 009 Ingenjörsgelogisk prognos – Servicetunnel Skår", tekn. rapport, 2014.
- [35] —, "PM F 06 – 010 Ingenjörsgelogisk prognos – Servicetunnel Liseberget", tekn. rapport, 2014.
- [36] —, "PM F 06 – 012 Ingenjörsgelogisk prognos – Servicetunnel Haga", tekn. rapport, 2014.
- [37] M. Karlsson och L. Moritz, "Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13", Trafikverket, tekn. rapport, 2014.
- [38] Kemikalieinspektionen, *Kort om Bisfenol A*. URL: <https://www.kemi.se/vagledning-for/konsumenter/kemiska-amnen/bisfenol-a>.
- [39] Kärnavfallsrådet, "Slutförvaring av kärnavfall Kärnavfallsrådets yttrande över SKB:s Fud-program 2007. SOU 2008:7", 2008.
- [40] J. Knappet och R. Craig, *Craigs soil mechanics*, 8. utg. Harlow: CRC Press, 2012.
- [41] S. Knutsson, R. Larsson, T. Marius och A.-L. Öberg-Högsta, "Siltjordars egenskaper", Statens geotekniska institut, Linköping, tekn. rapport, 1998.
- [42] A. Lantz, *Intervjumetodik*, 2. utg. Lund: Studentlitteratur AB, 2007.
- [43] R. Larsson, "CPT-sondering utrustning, utförande, utvärdering. En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord", Statens geotekniska institut, Linköping, tekn. rapport, 2015.
- [44] —, "Jords egenskaper", Statens Geotekniska Institut, Linköping, tekn. rapport, 2008.
- [45] L.-o. Lång, "Målmanual för uppföljning och bedömning av miljökvalitetsmålet grundvatten av god kvalitet", Sveriges geologiska undersökning, tekn. rapport, 2014.
- [46] —, *Preciseringar av Grundvatten av god kvalitet*, 2012. URL: <https://www.miljomal.se/Miljomalen/9-Grundvatten-av-god-kvalitet/Preciseringar-av-Grundvatten-av-god-kvalitet/>.
- [47] L.-O. Lång, H. Stejmar Eklund och O. Graffner, "Utgångspunkter för avgränsning av tillrinningsområden till grundvattenmagasin - SGU-rapport 2003:22", Sveriges Geologiska Institut, Göteborg, tekn. rapport, 2003.
- [48] Länsstyrelsen västra götlands län, *Vattenverksamhet*, 2018. URL: <http://www.lansstyrelsen.se/VastraGotaland/Sv/miljo-och-klimat/verksamheter-med-miljopaverkan/vattenverksamhet/Sidor/default.aspx>.
- [49] C. Löfving, *Höghastighetsjärnväg i Sverige - våra tekniska val*, Stockholm, 2015. URL: <https://www.trafikverket.se/om-oss/nyheter/Evenemang/Genomforda-evenemang-2015/kunskapsseminarium-hoghastighetsjarnvag-4-juni/>.
- [50] U. Lindblom, *Bergbyggnad*. Liber, 2010.

- [51] J. Lithén och M. Wadsten, *PM Hydrogeologi berg - Underlagsdokument till PM Hydrogeologi, ansökan om tillstånd till vattenverksamhet*, 2016.
- [52] J. Lithén, M. Wadsten och S. H. Östergaard, "PM Hyrogeologi jord - Underlagsdokument till PM Hydrogeologi, ansökan om tillstånd enligt miljöbalken för anläggandet av Västlänken och Olskroken planskildhet", Trafikverket, tekn. rapport, 2016.
- [53] K. Lundström, K. Odén och W. Rankka, "Schakta säkert - Säkerhet vid schaktning i jord", AB Svensk Byggtjänst, Stockholm, tekn. rapport, 2015.
- [54] F. Magnusson, *Hallandsåstunneln på 90 sekunder*, Internet, dec. 2015. URL: <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/halland/hallandsastunneln-pa-90-sekunder>.
- [55] J. Malmtrop och P. Lundman, "Förundersökningar vid undermarksprojekt- Osäkerheter och deras hantering", Trafikverket, tekn. rapport, 2010.
- [56] A. Möller, "Jömförelse av tätningskoncept för ytnära bergtunnlar", KTH Architecture och the build environment, Stockholm, tekn. rapport, 2010.
- [57] Miljö- och energidepartementet, *Miljö- och energidepartementets organisation*, 2018. URL: <http://www.regeringen.se/sveriges-regering/miljo--och-energidepartementet/organisation/>.
- [58] E. Myrhede, F. Mossmark och J. Sundberg, "Beskrivning av hydrogeologisk konceptuell modell - PM Bengtsfors kommun. Rapport EKA 2005:6", Bengtsfors, tekn. rapport, 2006.
- [59] Nationalencyklopedin, *Fullortsborrning*, 2018-02-20. Ne.se, 2018.
- [60] —, *Högsta kustlinjen*, 2018-02-18. Ne.se, 2018.
- [61] —, *Komparativ metod*, 2018-04-09. Ne.se, 2018.
- [62] —, *Kvalitativ metod*, 2018-04-09. Ne.se, 2018.
- [63] —, *Kvantitativ metod*, 2018-04-09. Ne.se, 2018.
- [64] —, *Metamorfos*, 2018-02-15. Ne.se, 2018.
- [65] —, *Skonsam sprängning*, 2018-02-20. Ne.se, 2018.
- [66] —, *Suspension*, 2018-04-11. Ne.se, 2018.
- [67] —, *Tillrinningsområde*, 2018-02-27. Ne.se, 2018.
- [68] —, *Tunnel*, 2018-02-20. Ne.se, 2018.
- [69] Naturvårdsverket, *Miljömål*, 2018. URL: <https://www.miljomal.se/>.
- [70] B. Olofsson och S. Palmgren, "Djupinfiltration för grundvattennivåkontroll. BeFo Rapport 13", Stiftelsen bergteknisk forskning, Stockholm, tekn. rapport, 1994.
- [71] M. Olsson, N. Rydén och U. Åkeson, "Skadezonsutbredning vid skonsam sprängning. Rapport 2015:067", Trafikverket, tekn. rapport, 2015.
- [72] R. Patel och B. Davidson, *Forskningsmetodikens grunder : att planera, genomföra och rapportera en undersökning*. Studentlitteratur, 2011.
- [73] R. Peck, "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics", *Géotechnique*, årg. 19, nr 2, 1969.
- [74] J. Persson, K. Fridell, E.-L. Gustafsson och J.-E. Englund, "Att räkna på vatten – en formelsamling för landskapsingenjörer. Rapport 2014:17", Sveriges Lantbruksuniversitet, Alnarp, tekn. rapport, 2014.
- [75] K. Persson, "PM Hydrogeologi berg", tekn. rapport 58, 2016.

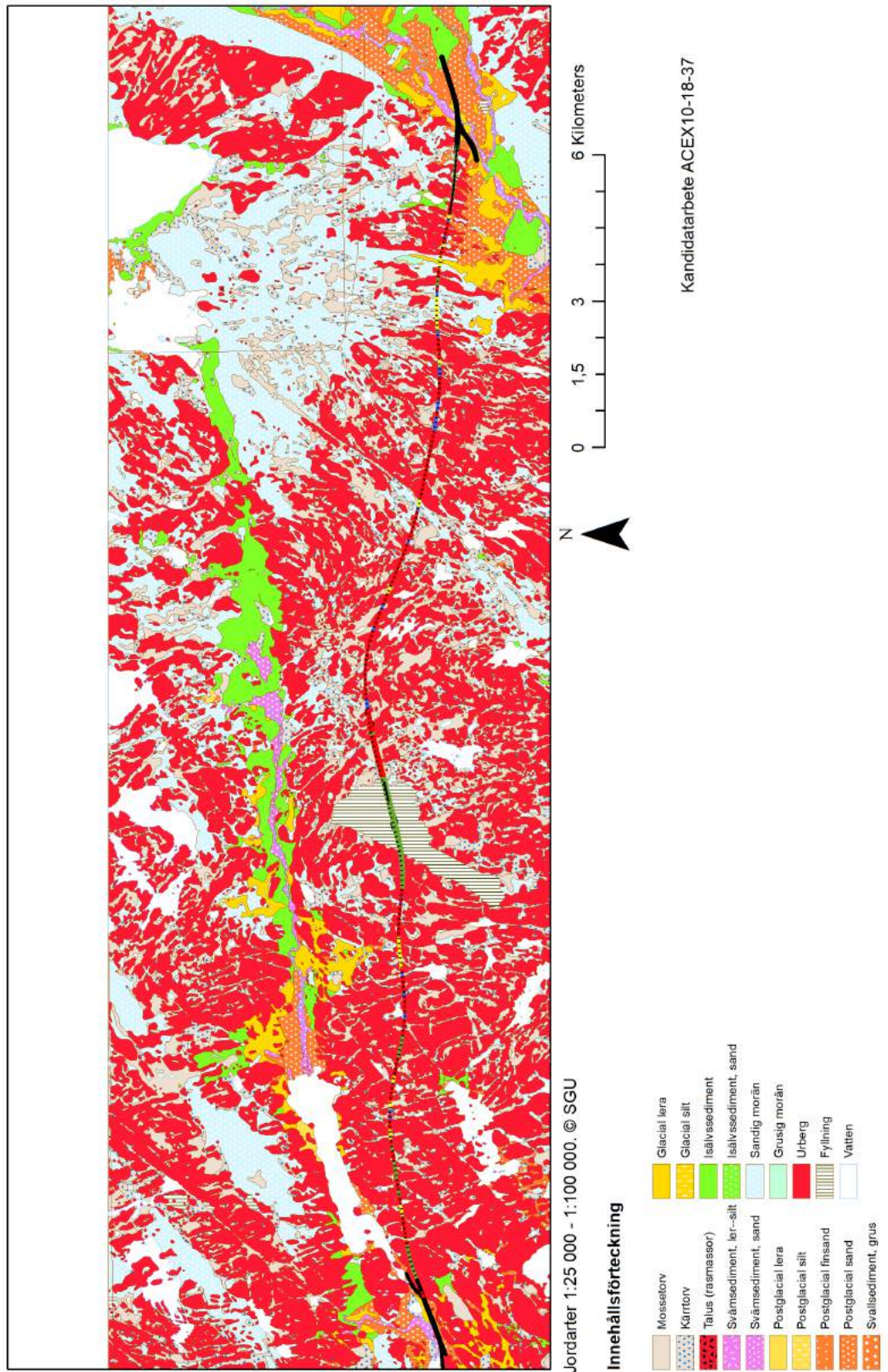
-
- [76] R. Swindell och M. von Matérn, "Citybanan - Tillämning av aktiv design i entreprenad Norrströmstunneln", Stockholm, tekn. rapport, 2013.
- [77] J. Saul Caine, J. P. Evans och C. B. Forster, "Fault zone architecture and permeability structure", The Geological Society of America, tekn. rapport, 1996.
- [78] Scandiaconsult Sverige AB, "Kust till kustbanan, Delen Mölnlycke - Rävlanda/Bollebygd. BRVT 2003:02:13", Banverket, Göteborg, tekn. rapport, 2003.
- [79] SGF, "SGF Informationsskrift 1:2012 Markvibrationer", 2013.
- [80] SGI, *Vägledning för att borra brunn*, 2018. URL: <https://www.sgu.se/grundvatten/brunnar-och-dricksvatten/anlaggning-av-brunn/vagledning-for-att-borra-brunn/>.
- [81] SGU, *Landhöjning - från havsbotten till lerslätt*, 2018. URL: <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/landhojning-fran-havsbotten-till-lerslatt/>.
- [82] SMHI, *Avdunstning*, 2017. URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/avdunstning-1.30720>.
- [83] —, *Avrinningsområde*, 2015. URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/avrinningsomrade-1.6704>.
- [84] —, *Årlig potentiell avdunstning*, 2017. URL: <https://www.smhi.se/klimatdata/hydrologi/vattenstand-2-2-338/arlig-potentiell-avdunstning-medelvarde-1961-1990-1.4098>.
- [85] —, *Månads-, årstids- och årskartor*, 2018. URL: <https://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/kartor/monYrTable.php?myn=1&par=nbdYr#>.
- [86] —, *Normal uppmätt årsnederbörd, medelvärde 1961-1990*, 2018. URL: <https://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/nederbord/normal-uppmatt-arsnederbord-medelvarde-1961-1990-1.4160>.
- [87] —, *Potentiell avdunstning*, 2017. URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/potentiell-avdunstning-1.80578>.
- [88] E. C. f. S. Standardization, *Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner*, 2010.
- [89] Statens Geotekniska Institut, "Hållbart markbyggande - en handlingsplan i ett föränderligt klimat", Statens geotekniska institut, Linköping, tekn. rapport, 2017.
- [90] —, *Jords hållfasthet*, 2018. URL: <http://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/skjuvhallfasthet/>.
- [91] Statens geotekniska institut, *Jordarter*, 2018. URL: <http://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/lera-och-kvicklera/>.
- [92] J. H. Steingrímsson, E. Grov och B. Nilsen, "The significance of mixed-face conditions for TBM performance", *World Tunnelling*, nr October, 2002.
- [93] B. Stille och F. Andersson, "Injektering - Tillämpning av injekteringsforskning i fält. BeFo rapport 79", Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, tekn. rapport, 2008.
- [94] H. Stille, *Rock grouting : theories and applications*. 2015.

- [95] A. Stråhle, "Definition och beskrivning av parametrar för geologisk, geofysisk och bergmekanisk kartering av berg. SKB Rapport R-01-19", Geosigma AB, Stockholm, tekn. rapport, 2001.
- [96] U. Sundkvist, *PM Hydrogeologiska beräkningar*, 2016.
- [97] C. Svensson, *Vittringsjord - vittringen i Sverige*, 1996. URL: <http://connywww.tg.lth.se/BildningsprocesserDokument/JordarterDokument/vittringdokument/vittringsjord.html>.
- [98] L. Svensson, "Västlänken en tågtunnel under Göteborg. BRVT 2006:03:20", Banverket, tekn. rapport, 2006.
- [99] P. Svensson, *Kvalitativ och kvantitativ undersökningsmetodik*, Göteborg, 2015. URL: <https://student.portal.chalmers.se/sv/chalmersstudier/programinformation/maskinteknik/kandidatarbete/Documents/20150225%20Vetenskapsmetodik%20f%C3%B6rel%20%20PS.pdf>.
- [100] Svergies Geologiska Undersökning, "PRODUKT : BERGGRUND 1 : 50 000-1 : 250 000", tekn. rapport 60, 2017.
- [101] Sveriges riksdag, *Miljöbalk (1998:808)*, 2017. URL: http://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/miljobalk-1998808_sfs-1998-808.
- [102] L. Svärd, *Ett rikt växt och djurliv*, 2018. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Sveriges-miljomal/Miljokvalitetsmalen/Ett-rikt-vaxt--och-djurliv/>.
- [103] H. Thevenot, J. Svedholm, J. Johansson, P. Bohman, L. Karlsson, A. Engdahl, J. Ahlén, M. Mattsson, Medins Havs- och vattenkonsulter AB och Naturcentrum AB, "Järnvägsplan, Mölnlycke-Bollebyggd, en del av Göta-landsbanan. PM Naturvärdesinventering: översikt och detalj", Trafikverket, tekn. rapport, 2017.
- [104] J. Thörn, *Rock models - BMT041*, Göteborg, 2017.
- [105] Trafikverket, *Ny dubbelspårig höghastighetsjärnväg Södertälje- Linköping*. 2018. URL: <https://www.trafikverket.se/nara-dig/projekt-i-flera-lan/Ostlanken/>.
- [106] —, "Trafikverkets handbok för ovanjordssprängning. Rapport 2014:044", tekn. rapport, 2014.
- [107] —, *Tunnel 11- Trafikverkets tekniska krav tunnel. TRV publ nr 2011:087*. 2011.
- [108] Trafikverket, U. Sundkvist och K. Persson, "PMHydrogeologiska beräkningar - Underlagsdokument till PM Hydrogeologi, ansökan om tillstånd enligt miljöbalken för anläggandet av Västlänken och Olskroken planskildhet", Trafikverket, tekn. rapport, 2016.
- [109] M. Tremblay, "Mätning av grundvattennivå och portryck", Vägverket- VBg Statens geotekniska institut, Linköping, tekn. rapport, 1990.
- [110] Vägverket, "Tätning av bergtunnlar - förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser", Borlänge, tekn. rapport, 2000.
- [111] Vänersborgs Tingsrätt, *Deldom- Västlänken*, 2018.
- [112] —, *Dom - Spårvagnstunnel Johanneberg*, Vänersborg, 2000.

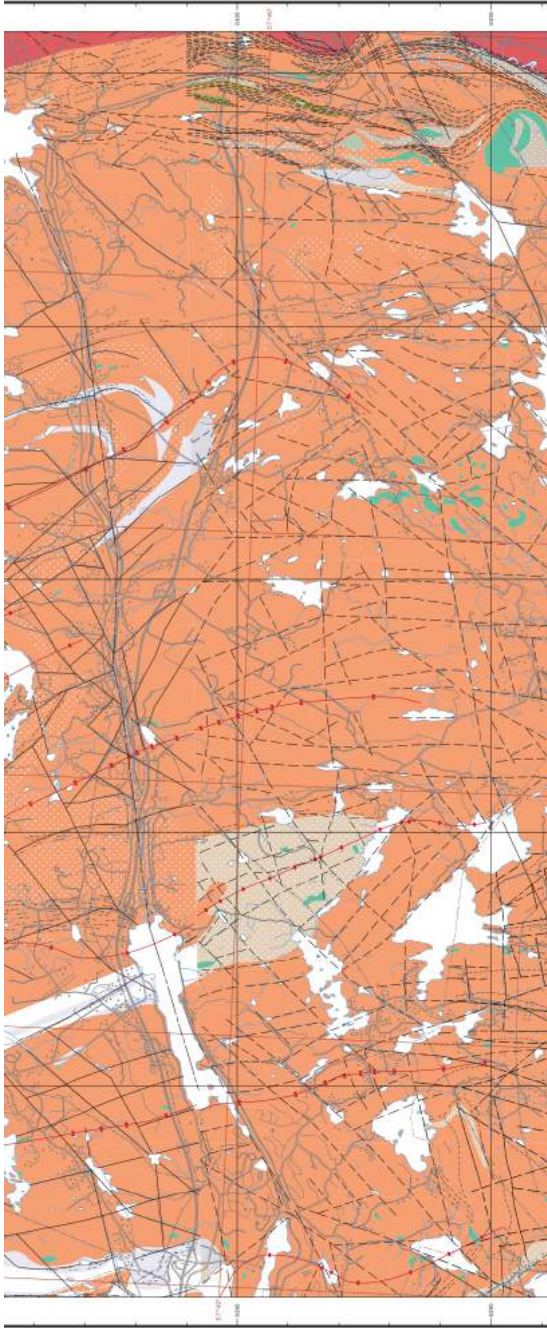
A

Appendix

Jordartskarta över området mellan Mölnlycke och Bollebygd



Figur A.1: Jordartskarta över området mellan Mölnlycke och Bollebygd



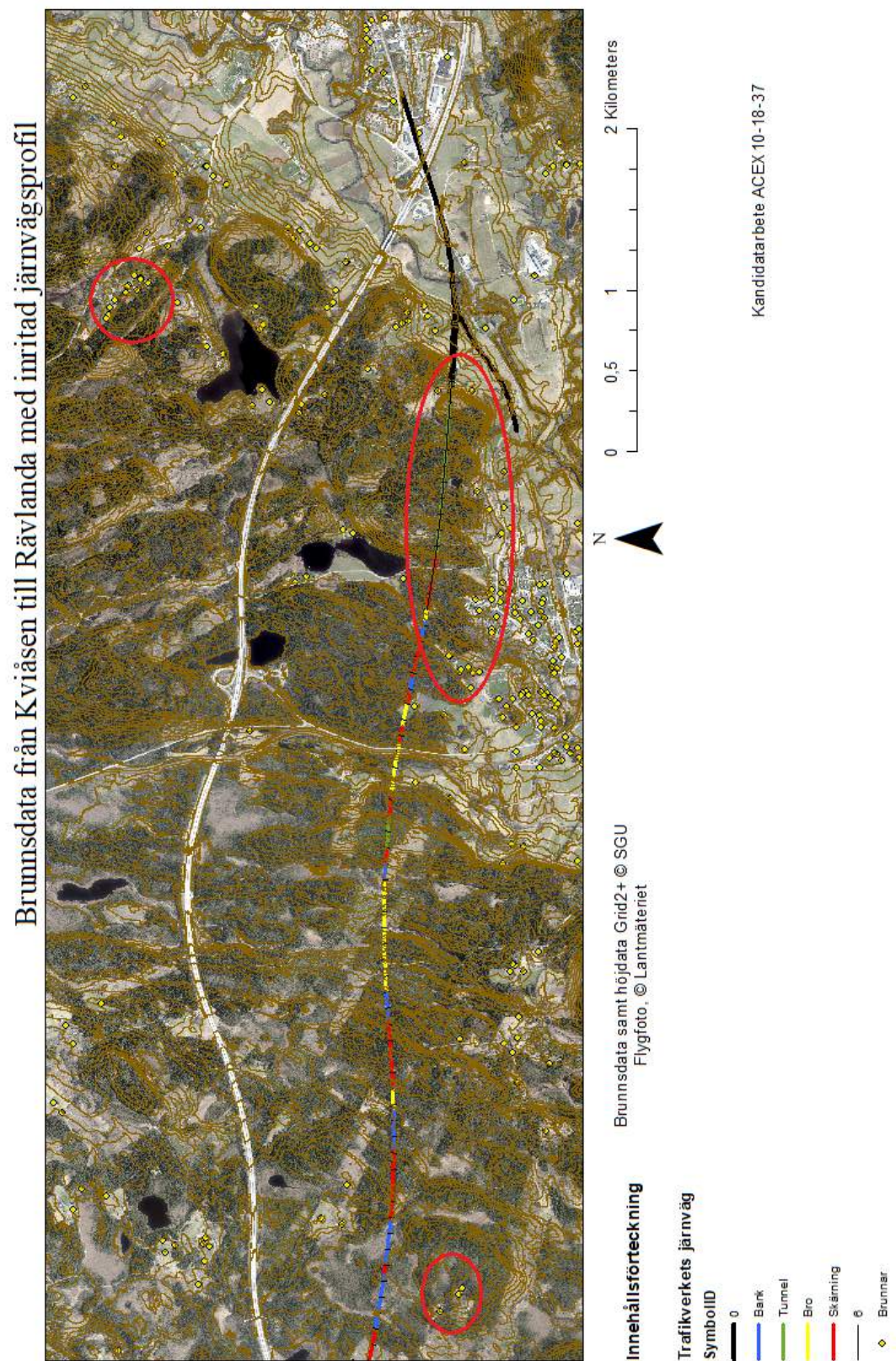
Figur A.2: Berggrundskarta över området mellan Mölnlycke och Bollebygd

	BRUNNS_ID	KAPACITET (l/h)	GRVNIVA	BOTTENDIAM	TOTALDIUP	JORDDIUP	ROR_TILL	Kapacitet (m3/s)	Transmissivitet	Konduktivitet	medel	T	K
Sänka	62300361	5000	25	132	151	3	9	0,00139	1,10E-05	7,31E-08	medel		
Sänka	62390011	2500	28	110	79,1	0,8	0	0,00069	1,05E-05	1,33E-07	median	4,77E-06	
Sänka	62300320	500	16	0	108	1	10	0,00014	1,54E-06	1,43E-08	max	2,87E-06	2,48E-08
Sänka	915534486	1500	10	110	140	8,5	12	0,00042	3,57E-06	2,55E-08		1,59E-05	
Sänka	916547934	10000	23	115	210	11,5	15	0,00278	1,59E-05	7,56E-08			
Sänka	917509633	100	0	115	170	0,5	6	0,00003	1,96E-07	1,15E-09			
Sänka	914584042	3000	12,5	115	170	9	12	0,00083	5,88E-06	3,46E-08			
Sänka	62300698	300	8	114	84	10	12	0,00008	1,19E-06	1,42E-08			
Sänka	914528276	50	0	113	160	9	0	0,00001	1,04E-07	6,51E-10			
Sänka	901104984	1000	5	0	100	0,8	3	0,00028	3,33E-06	3,33E-08			
Sänka	908117518	720	8	0	100	4	6	0,00020	2,40E-06	2,40E-08			
Sänka	62300368	480	0	160	102	2,3	4,5	0,00013	1,57E-06	1,54E-08			
PLINT	909115842	300	20	0	160	1,5	6	0,00008	6,25E-07	3,91E-09	medel	3,01E-06	
PLINT	62300080	520	10	108	115	4	6	0,00014	1,51E-06	1,31E-08	median	1,70E-06	1,78E-08
PLINT	995042629	500	0	161	107	1	3	0,00014	1,56E-06	1,46E-08	max	1,23E-05	
PLINT	998062731	360	1	135	100	2,3	9	0,00010	1,20E-06	1,20E-08			
PLINT	61400691	540	0	112	51	2	3	0,00015	3,53E-06	6,92E-08			
PLINT	913118006	3000	10	112	81	3	6	0,00083	1,23E-05	1,52E-07			
PLINT	908006273	300	8	0	150	1	6	0,00008	6,67E-07	4,44E-09			
PLINT	62300615	1000	9,5	135	100	0,5	3	0,00028	3,33E-06	3,33E-08			
PLINT	913623464	270	6	139	120	3,5	9	0,00008	7,50E-07	6,25E-09			
PLINT	61400532	480	0	0	87	1	6	0,00013	1,84E-06	2,11E-08			
PLINT	61400584	900	0	113	72	1,5	6	0,00025	4,17E-06	5,79E-08			
PLINT	61400549	960	0	113	69	1	6	0,00027	4,64E-06	6,72E-08			

Figur A.3: Beräkning av transmissivitet samt konduktivitet

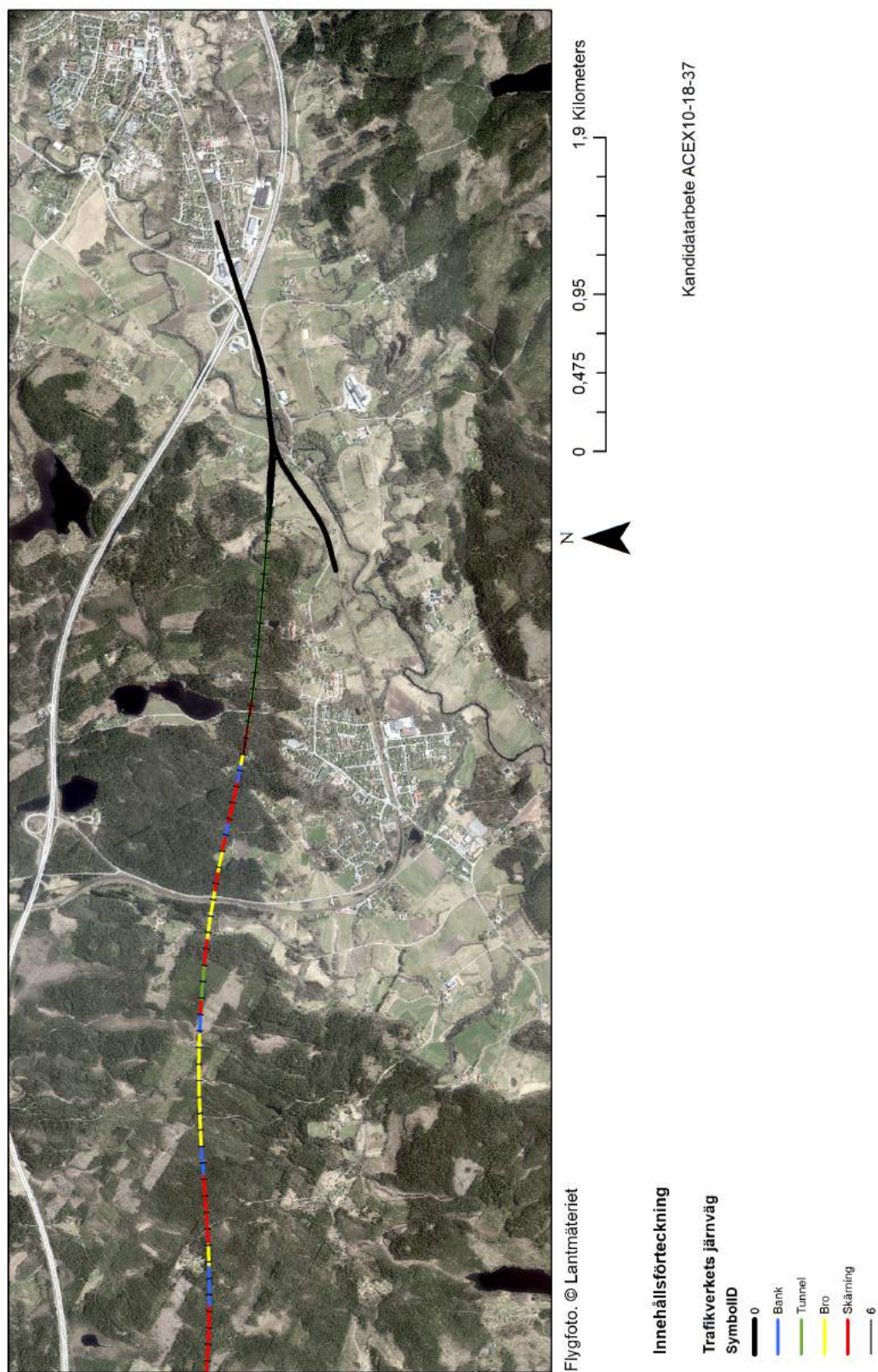
Punkt	H [m]	RO [m]	radie brunn [m]	T plint	
1	48	144	medelvärde	medel	4,77E-06
2	26	78	0,0614	median	2,87E-06
3	37	111		max	1,59E-05
4	23	69			
5	55	165			
6	20	60			
7	53	159			
				T sänka	
				medel	3,01E-06
				median	1,70E-06
				max	1,23E-05

Figur A.4: Värden för beräkning av inläckage i tunnel



Figur A.5: Valda brunnar vid beräkning av inläckage

Illustrering av hydrogeologiska randvillkor för järnvägstunnel med inritad järnvägskorridor



Figur A.6: Illustrering av de omkringliggande vattendragen för Rävlandatunneln

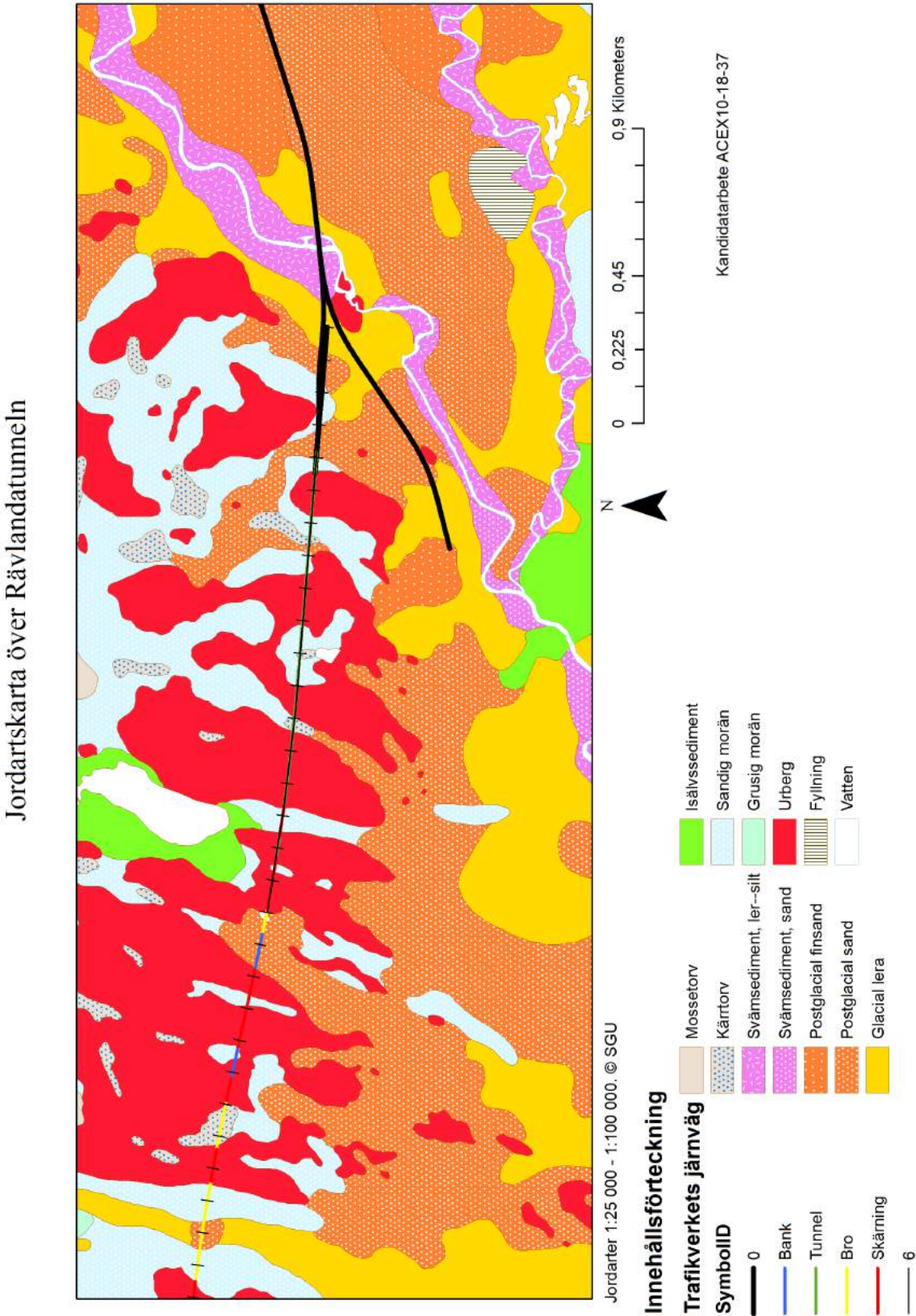
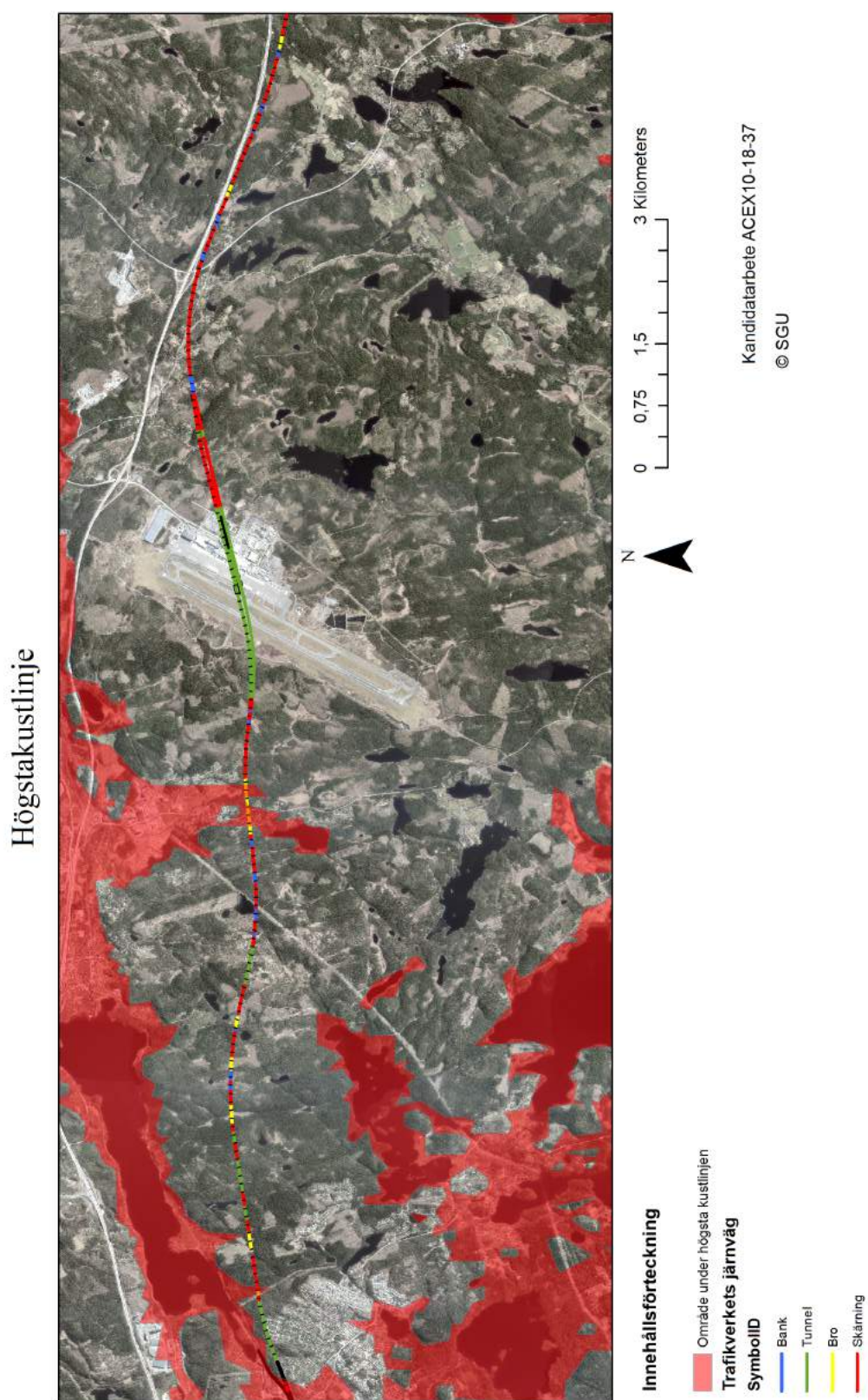
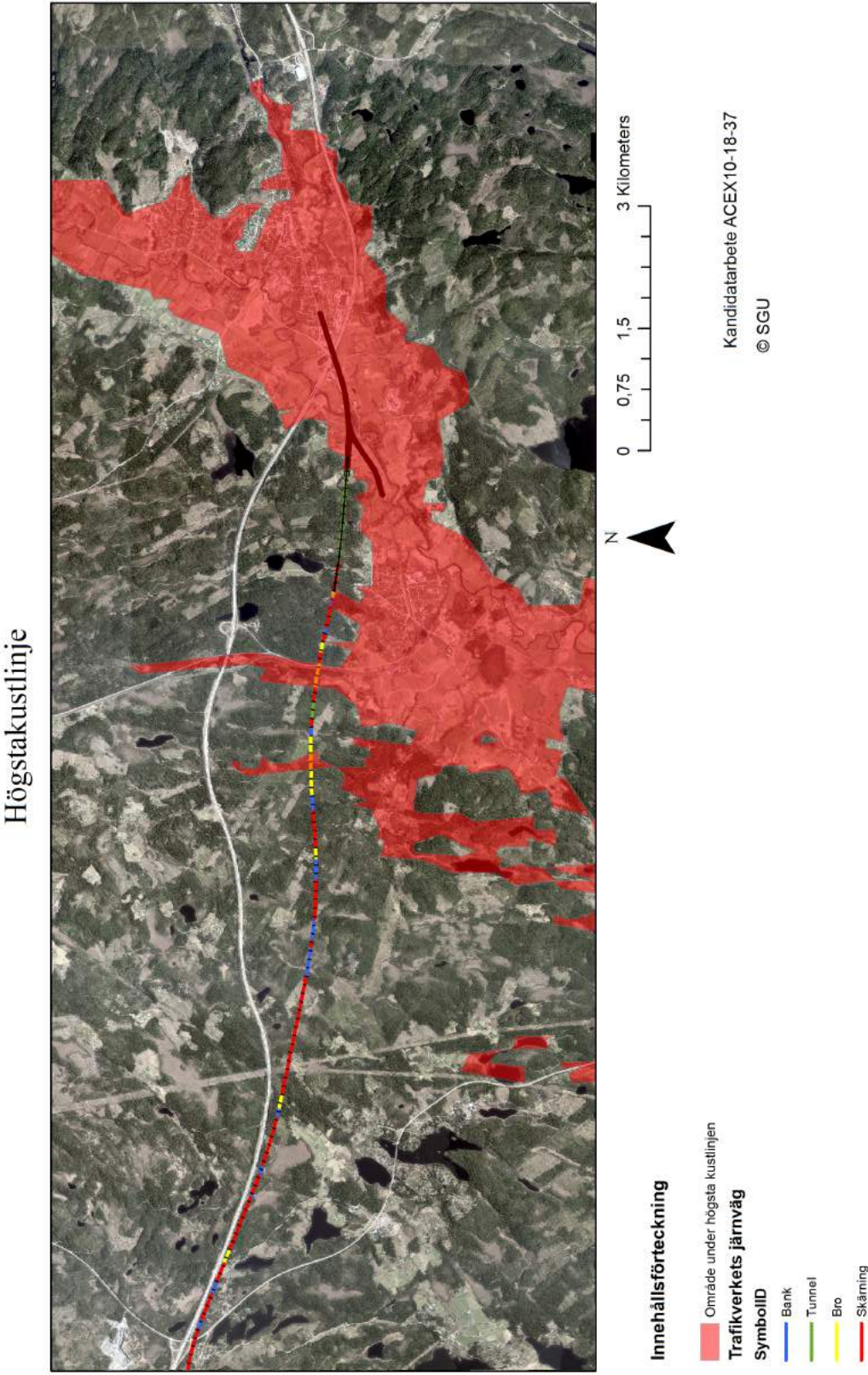


Figure A.7: Soil types around Rävlandatunneln



Figur A.8: Högsta kustlinjen i området Mölnlycke-Landvetter



Figur A.9: Högsta kustlinjen i området Landvetter-Rävlanda

A.1 Intervju med Linn Ödlund Eriksson, Hydrogeolog vid Sweco Environment AB

Hur har miljökraven på samhällsbyggnadsbranschen ändrats med åren?

Med åren har miljökraven blivit hårdare, bland annat i och med att miljöbalken sätter större krav på samhällsbyggnadsbranschen. Detta gör att det är ont om hydrogeologer i Sverige.

Vilka typer av hydrogeologiska undersökningar utförs vanligen i tunnelprojekt?

I ett stort tunnelprojekt är det mycket undersökning som krävs. Dock inte för mycket då det lätt blir dyrt. Är fortfarande mycket manuella mätningar. Borrningar, ofta samkör man då hydrologiska och geotekniska undersökningar. En undersökning som idag är för dyr är spårningsundersökningar, där man skickar ut ett ämne, i ett vattendrag eller annan typ av hydrologisk bildning, och sedan mäter koncentrationen av detta spårämnet längre bort.

Vilken tunnel anser ni är värst ut ett hydrogeologiskt perspektiv?

Vi anser att det värsta stället är Stora Ristjärn, vilket är en sjö mellan Landvetter flygplats och Mölnlycke. Hon är dock osäker på om det är en tunnel eller en skärning. Ramsjön är även en stark kandidat.

Vilken är den första klassificeringen ni gör, och vart är det svårast hydrogeologiskt?

Först får man göra en klassificering om vilket område som är svåras hydrogeologiskt. Det beror på tryckskillnaden mellan tunnel- eller skärningsbotten, och grundvattennivån. Detta kombinerat med hydraulisk konduktivitet i materialet eller mediet som finns däremellan. Nästa steg är att ta reda på hur stor tryckgradienten är, vad k-värdet är. Detta är rent hydrogeologiskt, men det som spelar roll när man applicerar detta på ett verkligt fall är vad som finns i området som är grundvattenberoende, och vad som är känsligt med en grundvattensänkning.

Vilket område anser ni vara mest känsligt ur ett hydrogeologiskt perspektiv?

I fallet Mölnlycke-Bollebygd är det torvmarker som är det mest känsliga. Man gör en naturvärdesinventering av vårmarker, och klassar dem sedan enligt en nationell skala mellan 1-4. Detta är ett sätt att få ett skyddsvärde på torvmarkerna. Sen kan torvmarken även vara olika känsliga för grundvattenstörning, vilket beror på hur geologin ser ut i området, samt hur stor arean på torvmarken är, som styr dess känslighet för en förändring i grundvatten. I princip kan man säga att ju mindre area, desto mindre rubbad vattenbalans krävs för att få torvmarken förstörd. Det

största utmaningen ut ett hydrogeologiskt perspektiv för Mölnlycke-Bollebygd blir då torvmarkerna i kombination med risk för grundvattenavsänkning.

Hur mycket studier finns på torvmarkers påverkan av en grundvattensänkning?

Att titta på torvmarker, vad de tål har inte studerats under en längre tid. Det finns inte alls mycket forskning på hur torvmarker påverkas av grundvattensänkning. Forskningen som finns fokuserar snarare på hur man exempelvis kan bygga en väg över en torvmark.

Finns det något som är extra intressant när det gäller övergång mellan jord och berg?

Det som är intressant när det skär av en jordfylld dalgång är om betongtunneln kommer dämma grundvattenflödet. Detta är stor fråga man arbetar med.

Där Rävlandatunneln tar slut i öster går tunneln ut i berg till en lerslänthä, och det blir då en dalgång med övergång mellan jord och berg. Här får man problematik kring mycket stora grundvattenflöden då ett stort område avvattnas genom denna lerslänthä. Här behöver man ha extrainsatta åtgärder för att undvika att det dämmer.

Dessa åtgärder går att göra på olika sätt men principen är att man får samla upp grundvattnet uppströms konstruktionen, där det dämmer, och sedan leda bort vattnet i ledningar till andra sidan konstruktionen. Sedan låter man grundvattnet rinna ner i brunnar eftersom det där finns ett opermeabelt lerlager ovanpå den friktionsjorden som är vattenförande. Det blir alltså i princip konstgjord infiltrering. Detta är inte projekterat i detalj än, men man vill gärna ha lösningar som kräver att man inte behöver pumpa.

Vad är det första man bör skanna av när det gäller att ta fram den värsta tunneln?

Det första man skannar av är zoner, tittar på berggrundskartan, samt kolla på topografin och flygfoton. Topografin kan säga en hel del om olika zoner, där man kan se genom mönster i topografin zoner som inte är identifierade zoner på SGUs kartor. Det är även av hög relevans att kolla på om det finns bebyggelse, energibrunnar eller andra typer av brunnar som kan påverkas.

Vid lerslänthä efter Rävlandatunneln, har vi tänkt schakta bort jorden för att bli av med leran, grundläggningsmässigt, fungerar det? Hur brukar ni göra vid sådana här tillfällen?

Schakta bort är ju en smidig åtgärd. Dock vill man göra ett så litet intrång som möjligt, vilket man inte alltid gör när man schaktar bort ett stort område jord. I dessa typer av tillfällen brukar man eftertrakta massbalans så gott det går. I just denna delen är pådäck en möjlig åtgärd. Det finns mycket naturvärden i området

runt Rävlandatunneln. Därför är det dumt att dra järnväg och då förstöra mycket där, genom att exempelvis schakta bort stora jordmassor.

När det gäller de stora vattenflödena vid övergång mellan jord och berg undersöks detta egentligen väldigt sällan i ett sådant tidigt skede, då det sällan har allt för hög prioritet. Detta område är inte rubricerat som en övergång mellan jord och berg, utan det har fallit sig naturligt att detta området är ett av de potentiella problemområdena hydrogeologiskt.

Det har visat sig att andra saker har undersökt betydligt noggrannare. Exempelvis på något som studerats noggrannare är skärningar, som går rakt igenom torvmarkerna. Det är skärningarna som går rakt igenom våtmarkerna som går rakt.

Kan man se att bygga tätt, injektera och sedan infiltrera som en universallösning?

Generellt sett är det första åtgärden man gör att täta, sen kan det finnas många aspekter som gör att man inte vill täta jättemycket, och framför allt är det dyrt och tidskrävande. Tunnelfrontens framdrift är oftast jätteviktig ur en ekonomisk aspekt. Här vill man minimera tidskrävande åtgärder. Men man ska naturligtvis täta.

Tillbaka till frågan, första åtgärden är att täta eller injektera. Andra åtgärden, om det är nödvändigt, är att man infiltrerar. Infiltration, vill man i princip alltid undvika. Det är en betydligt sämre lösning att infiltrera, än att injektera. Injektering generellt sett medför en högre investeringskostnad, och medför att lösningen blir mer robust då man har kontroll över resultatet. Om det skulle visa sig att det behövs, går även att täta igen och efterinjektera. Infiltration är istället i längden en betydligt dyrare och mer komplicerad lösning. Dels dyra underhållningskostnader, samt att det sällan finns befintliga vatten- och avloppsanläggningar ute i skogen, vilket gör att infiltration oftast är något man vill undvika i största möjliga mån.

När det gäller Aktiv design och Observationsmetoden: För ett hydrogeologiskt sett känsligt område som, vilka kontrollparametrar undersöker ni då?

Det beror på vad man avser att kontrollera. Ofta tillämpar man just Aktiv design och Observationsmetoden vid tunneltätning. Enligt dessa metoder finns förslag på vilka parametrar man ska undersöka. Här har "Chalmers" och "KTH" olika metoder när det gäller vilka parametrar som undersöks.

Vilka typer av markundersökningar är extra viktiga för torvmarker?

För torvmarker vill man ha mätpunkter i berg, hammarborrhål. Här är det viktigt att tänka ut på vilket djup, och lutning de vattenförande sprickorna har så att man träffar dem. Om man inte korsar de vattenförande sprickorna ser man ju ingen förändring alls. Problematiken är att man behöver många mätpunkter, samt mätdata under flera års tid för att kunna få ett svar man kan förlita sig på.

Hur mycket grundvatten- eller trycksänkning klarar en torvmark?

Vi har relativt nyligen bestämt oss att skydda torvmarkerna. Detta har vi bestämt på upphandlingsnivå, baserat på tidigare erfarenheter, samt forskning. Forskare brukar hävda att en torvmark kan klara 0,1 m avsänkning temporärt. Däremot är det inte alla vårmarker som klarar inte alla en grundvattensänkning på 1 dm permanent. Detta gör att torvmarker är komplexa att arbeta med.

Är anledningen till att det bildats en torvmark alltid att det finns impermeabla eller täta avlagringar under, mellan torvmarken och berget?

Det är inte nödvändigtvis sant. Det finns flera typer av våtmark. Detta är även lurigt då det finns flera namn på i princip samma sak. Våtmarker är ett samlingsnamn och kallas exempelvis för både mossmark, myrmark, torvmark eller mossar, sumpskog. Det som skiljer namnen åt är olika biotoper eller jordmaterial. I detta projektet har vi valt att kalla våtmarken för torvmark då vi valt att definiera våtmarken efter jordarten, vilken är torv. Egentligen skulle man kallat det våtmark då det finns mark som inte innehåller torv som också är skyddsobjekt. Däremot är det stor skillnad på kärr och mossar, och det har stor betydelse vid hydrogeologisk känslig byggnation.

A.2 Intervju med Johan Thörn och Johanna Lihén vid Bergab AB

Finns det någon standardprocedur vid projektering av injekteringsdesign?

Att dela in berget i olika klasser är en så kallad standardprocedur när det kommer till att designa för injektering, antalet indelningar kan dock variera. Vanligast med tre.

Vår uppfattning är att man ofta bara använder cementblandningar för att täta bergtunnlar. Projekterar ni för tätningsmedel vid injektering?

Tätningsmedel är ofta en ytterligare säkerhetsåtgärd. Man inkluderar ofta ett tätningsmedel man kan använda vid extremfall. Oftast räcker det med att täta med hjälp av cementblandning dock.

Vad anser ni är skillnaden mellan Aktiv design och Observationsmetoden?

Aktiv design är den gamla skolan och används i stort sett bara när man försöker göra kopplingar mellan gamla skolans metod och observationsmetoden som är den nya. Idag använder man i stort sett bara observationsmetoden.

Hur ingående är den gjorda projekteringen för injektering i projektet Mölnlycke-Bollebygd?

Mölnlycke bollebygd är inte detaljprojekterad och har alltså bara designats i grova drag för injektering. Man har tagit fram en plan som är "byggbar". I skedet man är i för projekteringen för tunneldragningarna på sträckan finns i dagsläget tre injekteringsklasser som är förhållandevis optimerade. Även beskrivningar på hur bergklassen kopplas till injekteringsklassen finns. Att bestämma bergklasser är mer omfattande än att bestämma injekteringsklasser. Detta eftersom det krävs mer undersökningar för att avgöra en bergklass. T.ex. borrhärdar och vattenförlustmätningar. Har man gjort en injekteringsklass innan är det inte extremt stora förändringar som gör fall till fall då det inte är en detaljprojektering. Man ska bara föreslå en byggbar lösning.

Då vi studerat projekteringsmetoder för injektering stöter man i stort sett bara på observationsmetoden som designmetod, finns det en anledning till detta?

En tidigare masterskurs på Chalmers tar upp Eurocodedesign osv. Beräkningsdesign tas ofta som första alternativet av design men är väldigt svårt då man ofta har för dålig koll på berget för att göra beräkningar. Denna design faller därför ofta bort. Belastningsfall faller också bort, även om man gör fullskaliga försök blir dessa sällan representativa. Därför blir det i stort sett bara observationsmetoden som är kvar.

Man kan dock kombinera metoder, man kan använda observationsmetoden och för normalberg som man tror är lätt så har man metoder sen har man räknat på lite mer detaljerade fall för det som blir svårare.

Hur väljs injekteringsklass i stora drag?

Pratar man enbart injektering kontrollerar man berget med hjälp av sonderingshål innan. När man har sin stuff i tunneln borrar man ett par hål och mäter inflöde/vattenförlust i dem och därifrån väljer man injekteringsklass. Sen kan man göra kontroll efter antingen i stuff eller mellan skärhålen för att verifiera att flödet har gått ner. Detta är något man kan göra om det finns ett driv hos byggorganisationen att driva tunnelmeter.

Är Lugeon test generellt sett metoden man använder för att bestämma den hydrauliska konduktiviteten?

Lugeon test är ett generaliserat sätt att mäta vattenförlust. I vattenförlustmätningar väljer man vilket tryck man har och kan därför få en si enhet ut. Lugeon testet är en äldre metod som läses av genom en tabell medans nya metoder ger en enhet som visar den hydrauliska konduktiviteten direkt. Detta är ett viktigt test för att ta reda på bergets egenskaper. Är berget tätt behövs kanske ingen injektering. Trafikverket vill att man gör dessa tester för att avgöra om det är den enkla injekteringsskärmen eller om man ska göra något mer avancerat.

Hur styrda är man av kontrakten som tas fram i projekteringen när man är i byggskedet?

När man gör underlaget för kontrakt tar man fram mängder som man tror stämmer för berget, dvs så här många meter tror vi att vi kommer ha av den här bergklassen och kommer ha behov av den här injekteringsklassen osv. Sedan får entreprenaden räkna på denna mängd. Detta är en uppskattning och det stämmer sällan i verkligheten. Priserna sätts efter de projekterade injekteringsklasserna och regleras efter utfallet oftast.

Vi har tagit fram tunneln i Rävlanda som mest problematisk, vilken anser ni är mest problematisk?

För att avgöra vilken tunnelsträckning som har mest problematiska egenskaper bör man först kolla bergmassans egenskaper. Nästa faktor är vad det finns för skyddsobjekt i området, finns det något som kan skadas? Finns det inget i området som kan ta skada finns inget egensyfte i att injektera så mycket som möjligt. I de fallen handlar det snarare om funktionskrav, t.ex. att det inte ska droppa på spåren. Man vill dock aldrig ha en helt oinjekterad tunnel på grund av funktionskraven. Johanna och Johan resonerar kring att sträckningen som kommer vara mest komplex är sträckningen vid Landvetter men det handlar snarare om designaspekter än injekteringsaspekter. Det är framförallt vibrationskraven som blir problematiska här.

Vilka parametrar är mest relevanta att ta upp när man delar in berg-

klasser för injektering?

Då man beskriver en bergklass i avseende av injektering är det mer relevant att redovisa ett konduktivitet eller transmissivitetsvärde snarare än en geologisk sprickbeskrivning. Oftast bortser man från sprickfyllnadsmaterial, kan hända att man kollar på det när man är nere på detaljnivå men det säger sällan särskilt mycket. Sprickfyllnadsmaterial spelar roll men man kollar inte på det när man gör en injekteringsdesign. Då man baserar sin design på vattenförlustmätningar spelar inte materialet någon roll eftersom man har ett konduktivitetsvärde. Materialet påverkar konduktiviteten men man designar efter konduktivitetsvärdet snarare än materialet. Det finns ett parti i projektet Västlänken bestående av Breccia som påvisar ett väldigt tätt berg men erfarenhetsmässigt vet man att det kommer läcka då man öppnar upp här.

Vilka värden bör man använda vid beräkningar av inflöde efter injektering för parametrarna T och T_{gr} ?

T : 4-6m brukar vara standardvärde. Detta beror på hur tätt man lägger hålen och vilken vinkel (stick) man ger hålen.

T_{gr} : Olika i olika klasser. Här kan man göra en baklängesanalys. T.ex. vi har 22l/min och 100m tunnel oinjekterat samt ex antal skyddsobjekt. Hur mycket får det läcka in? Vad behöver vi uppnå för täthet? Både T och T_{gr} är parametrar vi försöker styra utförandet mot. Ca: $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$, vill ner till ca $1 \cdot 10^{-8}$ - $3 \cdot 10^{-9}$ m³/s Dessa är olika i olika bergklasser och injekteringsklasser.

Vilket k-värde man får på zonen vill man gärna testa med kontrollhål efter injektering för att kontrollera om det blev tätt eller inte. Detta beror på hur höga krav man har. Har man låga krav spelar det mindre roll om man uppnått en viss täthet eller inte. I stora drag kan man säga att det är tre viktiga faktorer som styr injektering. Det är kraven, dvs hur mycket det får läcka in. Om det finns några skadliga grejer och till sist berget.

Vill man ha så lågt T_{gr} som möjligt i deformationszoner?

Det är väldigt svårt att täta tätt berg ytterligare eftersom man då måste träffa precis en spricka t.ex. Om man däremot har en deformationszon med mycket sprickor kommer man att få ut sin cement i sprickorna och därmed få en tätningseffekt. Detta betyder inte att deformationszoner är lättare att täta i, utan optimala förutsättningar är ett tätt berg med lagom mycket sprickor. Är man i en deformationszon med ett högt flöde av vatten kan flödet spola ut injekteringen. Dessutom kan stabiliteten bli ett problem vid en deformationszon.

Är valet av tätningsmedel man kan använda i produktionen en projekteringsfråga eller en upphandlingsfråga för ingenjören?

Det är något man tar fram i detaljprojekteringen.

Finns det någon typ av tätningsmedel som är mer vanligt att man använder vid injektering Sverige?

Cement. Man kan använda Polyuretan för fintätning eller efterinjektering. Silica sol är ett medel som visat goda egenskaper men som inte är accepterat i branschen då beständigheten är relativt obeprövad.

Vad skulle göra att man väljer att använda ett tätningsmedel utöver cement?

Om man vet att man måste få det väldigt tätt eller om man har andra problem t.ex. att man har extremt mycket vatten från början. För projektet Mölnlycke-Bollebygd kommer tätningsmedel utöver Cement vara ointressant men för sakens skull bör ett tätningsmedel bestämmas ifall att.

Bestäms vinkeln för injekteringsborrhålen på plats eller i projekteringen?

Det är en designparameter, oftast sätts alla hål i samma vinkel runt 15-20 grader. Detta motsvarar hål som är ca 20m långa och ger ett stick på ca 6m. Gör man noggranna undersökningar av sprickriktningar kan man optimera och lägga sticken i olika vinklar beroende på vilken sida man jobbar på för att bättre kunna träffa sprickorna.

Hur går man tillväga vid en Jord-berg övergång om berget är väldigt uppsprucket och i stort sett har samma konduktivitet som jorden?

Man kan göra berginjektering genom borrhål. Eller helt enkelt borra hål och sedan hålla ner cement och låta det spridas. Detta är generellt sätt ett väldigt svårt fall. Då man börjar en tunnel vill man gärna ha ca fem meter bergtäckning därför gör man i regel en bergskärning tills man har denna bergtäckning. Är man under marknivå gör man i ofta en betongkonstruktion som placeras med detta djup under marken.

Hur går man tillväga för att täta mellan en betongkonstruktion och bergtunneln?

Ett exempel är ett projekt i Stockholm nyligen då man jet-injekterade en dalgång innan man drev igenom tunneln. Förslaget i vårt fall är antingen att schakta bort bergtäckningen och sedan bygga en betongkonstruktion. Alternativt att man förstärker jorden och sedan driver tunneln genom detta.

Har ni någon hypotes kring miljödomen kring projektet Mölnlycke-Bollebygd?

Skyddsobjekten i detta projekt håller relativt låg klass i avseende att ta skada till skillnad från ett tunneldrivande genom en stad. Det är inte heller ett speciellt kontroversiellt projekt. Av att döma efter detta lär kraven inte bli särskilt höga. Antagligen kommer Trafikverket inte kräva mer än kanske 10 l/min. Samtidigt på sträckor där vi inte har några skyddsobjekt känns det orimligt att täta mer än att

man klarar funktionskraven.

Vad är det största bekymret enligt er då man talar om injektering?

Det största problemet handlar om tid. För den som bygger kostar det mycket pengar att vänta. I slutändan mynnar detta ut i att det är en pengafråga. Efterinjektering är antagligen den största tekniska utmaningen. Då det finns ett starkt ekonomiskt driv hos företag kan det hända att man vid injekteringsfasen väljer att ta genvägar för att spara pengar och därmed äventyrar kvalitén. I tidigare projekt där fokus inte legat på slutprodukt har man varit tvungen att vakta för att se till att inget fusk sker då man injekterar. Därför behövs ordentliga handlingar och kontrakt som inte straffar ut entreprenören. Det ska finnas möjlighet till vinst för både beställare och entreprenör.

Fuskas det ofta inom injektering i samband med tunnelbyggande?

Ja, iom att det ibland inte finns någon vinst för entreprenören att det ska bli så tätt som möjligt. Dessutom är injektering en väldigt dyr byggprocess både som byggprocess och som ett moment som stoppar upp vidare tunnelbyggande. Ibland tätar man väldigt bra en sträcka och sämre mot slutet eftersom det bara finns krav på ett inläckage för den totala sträckan. Skulle man inte klara kraven med avseende på grundvattenavsänkningar måste infiltration installeras.

Installeras alltid infiltration innan byggstart av en bergtunnel?

För att kunna säkerställa där det finns riskobjekt installerar man alltid en skyddsåtgärd oftast i form av infiltration i närhet till dessa. Andra typer av skyddsåtgärder kan vara för t.ex. våtmarker att bygga dämmare för att hindra vattnet från att försvinna från våtmarken. Detta t.ex. genom en jordvall. En annan åtgärd kan vara att bygga rännor som leder vattnet en annan väg än in i tunneln.

Hur är beständigheten i en cementinjektering?

Man pratar sällan om det. Tunnlar blir dessutom mer täta med tiden. Anledningen är att sprickorna "kleggar" igen och vattentrycket sjunker en aning. Detta kan dock inte ses som en självklarhet.

Vilka parametrar är det egentligen man kollar på i stora drag vid en injekteringsprojektering?

Det viktiga i en sådan här projektering är att det finns tydligt beskrivet för vilken bergklass vilken injekteringsdesign som ska användas. En viktig parameter är att specia vilken typ av bruk entreprenören ska blanda sen är det upp till entreprenören att blanda och visa att blandningen uppfyller egenskapskraven. Konrollparametrar ska också vara specade, t.ex. Om det står att det ska vara 3 l/min under vissa förutsättningar ska ni göra på ett visst sätt osv. Den som borrar injekteringshålen ska även ha en karta över hur hålen ska sättas. Med vinkel och avstånd.

Det finns ett stoppkriterium när man injekterar för att undvika att medlet man använder hamnar någon annanstans än där det är ämnat att hamna. Ett rimligt värde på stoppkriteriet är ca 300 l för ett hål och efter det sprutar man inte in mer. Blir det inte tätt efter detta kollar men eventuellt på en ny typ av cementblandning. Man kan även kolla på injekteringsskärmen om man behöver designa om denna. Injekteringstrycket är alltid avsett för vilken bergtäckning man har. Trycket är lika stort som egentycngden från bergmassan generellt sett.

A.3 Intervju med Veli Taatila, VD och ägare på BBEAB AB

Intervju med Veli BBEAB, Bror Bergentrepenad AB

Veli beskriver kort bbeabs verksamhet. Jag med mina medarbetare är inga forskare, vi är helt vanliga ingenjörer och civilingenjörer från Finland, Sverige, Estland och Polen. Vi har erfarenhet av tunneldrift i Finland, Sverige och i Norge. Man skulle kunna säga att det finns få organisationer med samma praktiska erfarenhet och lika många kvadratmeter berg i ryggsäcken som vi, trots att vi är så små som vi är.

Hur anser ni att problematiken med Jord-bergövergångar hanteras bäst?

Vi anser inte att övergång berg/jord är problematisk alls. Alla tekniska problem går att lösa genom att:

- Spränga förskärning, med måtta och förnuft.
- Spränga de första 10 metrarna av tunnel med måtta och förnuft.
- Göra inslagsvalvet minst 10 meter lång, och vattentätt, in i berget.
- Injektera slutet av inslagsvalvet, när man är lite grann inne i tunnel och inte längre behöver tampas med ytberg eller två gånger sprängt (förskärning och tunnel) berg. Sätt i injektering där och strunta i de första metrarna av tunnel. (Påslaget är så uppsprucken att det inte bli någon injekterings mottryck, allra oftast injekterar man tills volymkriteriet och sedan är det slut).

Hur anser ni att olika bergklasser injekteras bäst?

Injektering så som det görs i Sverige är rena kapitalförstöringen och vad som än görs så kommer ingenting att bli bättre. Alla Svenska tunnlar har alltid systematisk förinjektering vilket gör att 50% av tunneldriften används till att borra långhål varav 70-80 % sedan konstateras till torra/ täta och fylls med cement. Den enda som bli glad av detta är borrstålsleverantören och cementleverantören. Beställaren betalar för mycket. Entreprenören förlorar tid.

I Norge och i Finland driver man tunnel med sonderingsborrning vilket betyder att efter 15-20 meter tunnel borrar ett antal (2-10) injekteringshål som man sedan vattenförlustmäter (Finland) eller mäter hur mycket vatten som rinner ut (Norge), och beroende på resultat bestämmer geologen om det bli injektering eller ej. Injektering = fortsatt borra Ingen injektering, fyll sonderingshålen och ta en salva.

Totala volymen cement som man pumpar i berget är i grova drag detsamma i Norge, i Finland och i Sverige. Tunnlar läcker ungefär lika mycket i Finland, i Norge och i Sverige. (jag menar efter utförd förinjektering). Det är bara i Sverige man tror att injektering ensam gör att tunnlar bli torra och att ingenting annat behövs för att

uppnå interna täthetskraven i form av läckor och dropp på installationer/trafik/vad än som finns i tunnlar. Det är bara i Sverige man i slutet av tunnelentreprenaden får en panikreaktion som slutar med att:

- Det beställs mera efterinjektering med cement
- När det inte hjälper så beställs mera efterinjektering med kemikalier eller annat (Polyuretan, Silica, vattenglas etc)
- När de inte hjälper installeras dränmattor, tunnelduk, nya dränmattor, mer tunnelduk, droppplåtar, rännor, hinkar, nappflaskor och allt annat möjligt för att inte få droppande eller rinnande vatten på installationer och resenärer.

Så, vad borde man göra för att få billigare tunnlar med samma tekniska resultat:

- Sonderingsborrning var tredje salva med klara kriterier för när man tar till injektering
- Realistisk problembeskrivning gällande läckage – den finns alltid kvar, ska det döljas eller tålas?
- Där det verkligen behövs – innerlining.

Vidare resonerar Veli:

Det är helt omöjligt att injektering någonsin genererar så mycket pengar att den täcker stilleståndskostnader för bergschakt. Injektering är ingenting en entreprenör (framförallt utländska men i större omfattning även svenska) vill göra, eller där han vill ta risker eller föreslå ändringar. Injektering är någonting man gör så som Beställaren och Konsulten anvisar och med tiden försöker man bli av med hela arbetet, eller i alla fall får injekteringsförfarandet mycket enklare. I dom flesta tunnlar jag byggt har entreprenörens största insats riktats på att förenkla eller förminska injekteringsinsatsen. I de tunnlar där beställaren har gått med på det har entreprenaden avslutats utan stora ekonomiska oenigheter. I de tunnlar där Beställaren inte har gått med på det har injektering orsakat en omfattande claim och i vissa fall även rättegång.

De nya rön som ni tar fram på universitet kommer dessutom sällan till någon användning. Entreprenören jobbar aktivt för att bli av med injekteringen. Byggledaren som oftast numera är en gammal (60+) svensk injekterare förstår inte teoretiska bakgrunden till det som ni förespråkar varpå man ofta i nattens tysta timmar går till ”gamla goda” lösningar. Byggledaren struntar i vad Konsulten har skrivit och ändrar injekteringsordningen, trycket, vct. . . ja, hela rasket. Så det som Ni skriver är inte alltid det som vi gör.

Hur anser du att kontraktsformerna och ersättningen stimulerar tunnelarbetet?

Entreprenören har pressats av LOU för att hitta det absolut billigaste sättet att prissätta arbetet. Han är inte ett dugg intresserad av om det blir tätt eller inte. I vart fall inte på bygget (i snacket på huvudkontoret möjligtvis) Man har antingen alldeles för stora mängder i sin MF, eller tok för små. Entreprenören gör det han kan för att i första hand bli av med injektering eller i vart fall förenkla det så gott han kan, i andra hand försöker han få hela arbetsmomentet till löpande räkning.

Hur anser du att sprickfyllnadsmaterialen påverkar injekteringsarbetet?

Kisel, kalcit eller klorit. Spelar ingen roll, sprickor få vara fyllda med maräng om det passar till Konsultens tankesätt. Entreprenören ger fan i det. Jag vet faktiskt inte själv vad jag hade önskat för sprickfyllnad, efter någon miljon kvadratmeter schaktad i nordiska berg.

Transmissivitet, ingen aning. Har aldrig använd ordet i en byggbarack.

Hur ska injektering utvecklas?

Veli föreslår flera saker.

- Det blir inte tätt, ge upp med att försöka.
- Ta fram en ekonomisk vettigt inner lining för alla tunnlar.
- Försök påverka miljödomstolar med mera så att en lokal sänkning av grundvatten accepteras under byggtiden.
- När injektering görs, försök få ut mycket massa med låg vct. Det ger resultat.
- Ge pengar för injekteringsarbete och för tunneldriftens stillestånd så slipper vi alla claims och rättegångar
- Förinjektering fungerar skitbra. Använd det i de 20-30% av tunnelmeter där det finns vatten.
- Låt förenkling i injektering bekosta hela inner lining så sparar man massor i DoU.