



# GRUNDVATTENBILDNING OCH INLÄCKAGE TILL TUNNLAR

Samband i data från Förbifart Stockholm

**Katja Eftring**

**EXAMENSARBETE 30HP**

ISRN LUTVDG(TVTG-5174)/1-68/(2022)

**TEKNISK GEOLOGI**

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet



# Grundvattenbildning och inläckage till tunnlrar

Samband i data från Förbifart Stockholm

Katja Efrting



**LUND**  
UNIVERSITY

EXAMENSARBETE

utfört vid avdelningen för Teknisk geologi för fullföljande av kraven för Civilingenjörsexamen  
i Ekosystemteknik vid Lunds tekniska högskola, Lunds universitet.

Lund 2022

Omslagsbild: Casey Horner på Unsplash

Lunds universitet, Lunds tekniska högskola  
Avdelningen för Teknisk geologi

Grundvattenbildning och inläckage till tunnlar - Samband i data från Förbifart Stockholm

Groundwater recharge and leakage to tunnels - Patterns in data from the Stockholm Bypass

Författare: Efring, Katja

Handledare: Barmen, Gerhard (Teknisk geologi); Jenryd, Rebecka (COWI AB)

Examinator: Rosberg, Jan-Erik (Teknisk geologi)

ISRN LUTVDG(TVTG-5174)/1-68/(2022)

Sökord: Bergtunnel, inläckage, Förbifart Stockholm, grundvattenbildning

Språk: Svenska

Arbetet är utfört i samarbete med COWI AB

Samtliga illustrationer publiceras med tillstånd från upphovsrättsinnehavaren. Där inget annat anges är illustrationerna författarens egna.

Digital utgåva Lund 2022

# Sammanfattning

För att förbättra framkomligheten och minska sårbarheten hos transportsystemet i Stockholmsregionen bygger Trafikverket genomfartsleden E4 Förbifart Stockholm. Vägen är till stor del förlagd i tunnel. Inläckage av grundvatten genom tunnelkonturen är mer eller mindre oundvikligt, och om inläckaget är för stort kan det orsaka förändringar i grundvattennivån i stora områden kring tunnelsträckan. Under drivningen av Förbifart Stockholm har inläckaget varit högre än väntat på vissa sträckor, och på vissa platser uppvisar inläckaget även ett samband med nederbördstillfällena och grundvattennivå utöver det förväntade. Detta examensarbete syftar till att söka potentiella förklaringsmodeller i litteraturen, samt att påvisa och försöka förklara variationer i inläckage och dess samband med grundvattennivå och grundvattenbildning. Arbetet utgörs dels av en litteraturstudie, dels av en analys av data från tre specifika tunnelavsnitt inom projektet Förbifart Stockholm. Dataanalysen innefattar främst en regressionsanalys av aktuella parametrar.

Litteraturstudien visar att det finns en mängd studier om tunnelprojekt och inläckage, men få handlar om hur grundvattenbildning och associerade parametrar påverkar inläckaget. En slutsats är alltså att det inte verkar finnas några förslag på förklaringsmodeller i litteraturen, utöver de som föreslogs i den ursprungliga problemställningen från Trafikverket. Dataanalysen visar att det går att observera ett samband mellan variationer i inläckage och grundvattennivåer, utöver det som kan förklaras med endast en trycknivåökning. Detta skulle kunna bero på att grundvattenmagasin ökar i utbredning vid en ökad grundvattennivå, och då kommer i kontakt med svaghetszoner som legat utanför magasinets ursprungliga utbredning. Det verkar inte finnas några starka samband mellan inläckage och direkt grundvattenbildning, uppskattad genom nettonederbörd eller nivåförändringar i grundvattenmagasin. Ett något starkare samband fanns för en av de undersökta tunnelsträckorna, även om det inte var lika starkt som sambandet med grundvattennivån. I detta område består också en större del av markytan av grundvattenbildningsområden, och det är tänkbart att det i detta fall är torrlagda sprickor eller svaghetszoner i ytligt berg som ger kortvarigare inläckageökningar. Det finns dock stora problem med mätfrekvensen hos datan som omöjliggör en fullständig analys av den direkta grundvattenbildningen. Andra stora osäkerheter är påverkan från valet av tunnelsträckor, osäkerheter i antagandena för linjär regression samt förenklingar i beräkningarna för grundvattenbildning. För framtida studier föreslås en applicering av samma metoder på färdigställda tunnlar med längre mätserier. Ett annat förslag är att göra närmare studier av de geologiska förutsättningarna på de undersökta platserna för att bekräfta de föreslagna strukturerna.



# Abstract

In order to improve the accessibility and reduce the vulnerability of the transport system in Stockholm, the Swedish Transport Administration is building the bypass E4 Förbifart Stockholm (Stockholm Bypass). Most of the road will be located in tunnels. Groundwater leakage through the tunnel walls, bottom and roof is more or less inevitable, and if the leakage becomes too great it can cause disturbances in the groundwater levels in the vicinity of the tunnel. During the construction of the Stockholm Bypass, the observed groundwater leakage has been greater than expected in some sections of the tunnel, and in some areas the leakage exhibits a correlation with precipitation and groundwater level fluctuations that goes beyond what was to be expected. This master's thesis aims to find potential explanatory models in literature for the observed patterns, and also to demonstrate and attempt to explain variations in the groundwater leakage and its correlation with groundwater levels and groundwater recharge. The thesis consists of a literature review and an analysis of data from three specific tunnel sections within the Stockholm Bypass. The data analysis mainly consists of a regression analysis of relevant parameters.

The literature review shows that there are many studies concerning tunnel projects and groundwater leakage, but also that few of these investigate how groundwater recharge and associated parameters affect the leakage. One conclusion is therefore that there do not seem to be any explanatory models in the literature, other than those that were suggested in the original problem description provided by the Swedish Transport Administration. The data analysis indicated a correlation between fluctuations in the leakage and groundwater levels in the vicinity of the tunnel, which goes beyond what a simple increase in the hydraulic gradient can cause. An explanation for this could be that the spatial distribution of groundwater reservoirs increases as the groundwater level is increased, causing the reservoir to come in contact with a fracture zones that were previously above the groundwater table. There does not seem to be any clear correlation between leakage and the groundwater recharge, which was estimated as the net precipitation or as changes in the groundwater level of two reference reservoirs. A slightly stronger correlation was found for one of the investigated tunnel sections, but the correlation was not as strong as the correlation with the groundwater level. In this tunnel section, a larger part of the ground surface consisted of groundwater recharge areas, and it is possible that these areas contain dry fractures and fracture zones in the superficial rock that causes short term increases in the groundwater leakage. However, there are significant issues with the measuring frequency of the data that was used, which prevents a complete analysis of the impact of the groundwater recharge. Other major uncertainties are the influence of the tunnel section selection, uncertainties in the assumptions for linear regression and simplifications in the calculations of groundwater recharge. Future studies should analyse longer data series from completed tunnels using the methods in this master's thesis. Another suggestion for future studies is to make a detailed study of the geological conditions in the areas investigated in this report in order to confirm the suggested structures.



# Förord

I och med detta arbete avslutas mina studier vid Civilingenjörsutbildningen i Ekosystemteknik på Lunds tekniska högskola. Examensarbetet motsvarar 30 högskolepoäng och har utförts under våren 2022. Arbetet har utförts vid Avdelningen för Teknisk geologi, Lunds tekniska högskola.

Jag vill börja med att tacka mina handledare Gerhard Barmen och Rebecka Jenryd för all hjälp och det stöd jag fått under arbetets gång. Bitvis har vägen framåt känts oklar och svår, men tack vare er hjälp med prioriteringar, kontakter och förslag på vägar framåt kom jag alltid vidare. Jag vill också rikta ett stort tack till Anders Strandanger på Trafikverket för hjälp med urval av data, diskussioner om resultattolkningar och information om Förbifart Stockholm som varit ovärderliga för mitt arbete.

Jag vill tacka Sara Roth för medverkan under hela projektet samt korrekturläsning nu mot slutet, och så vill jag tacka Henrik Paldán för korrekturläsning och ändlös support under hela mitt arbete.

Slutligen vill jag rikta ett tack till alla vänner, studiekamrater och engagerade jag mött i studentlivet som gjort mina sex år i Lund till en så fantastisk tid!

Lund, augusti 2022

Katja Eftring





# Innehållsförteckning

<b>Innehållsförteckning</b>	<b>IX</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrund	1
1.1.1 Föreslagna förklaringsmodeller	2
1.2 Syfte och frågeställningar	2
1.3 Avgränsningar och begränsningar	3
1.4 Arbetets upplägg	3
<b>2 Teori</b>	<b>4</b>
2.1 Geologi och hydrogeologi	4
2.1.1 Stockholmsområdets geologi	6
2.2 Inläckage och tunneldrivning	7
2.2.1 Tunneldrivning och injektering	8
2.2.2 Inläckagemätning	9
2.2.3 Omgivningspåverkan	9
2.2.4 Uppskattning av inläckage	10
2.3 Faktorer som påverkar inläckage	11
2.3.1 Geologiska förutsättningar	11
2.3.2 Grundvattenmagasin	13
2.3.3 Grundvattenbildning	15
2.3.4 Tunnelbyggnadsteknik och injektering	18
<b>3 Fallstudie Förbifart Stockholm</b>	<b>20</b>
3.1 Om Förbifart Stockholm	20
3.1.1 Modeller av inläckage	21
3.2 Utvalda tunnelsträckor	22
3.2.1 Arbetstunnel norra Lovön (AT 393)	22
3.2.2 Ramptunnel Johannelund (RT 412)	24
3.2.3 Huvudtunnlar Lunda (HT 504 & HT 505)	25
<b>4 Metodik</b>	<b>28</b>
4.1 Litteraturstudie	28
4.2 Dataanalys	28
4.2.1 Urval av data	28
4.2.2 Visuella bedömningar av samband mellan data	29
4.2.3 Regressionsanalys	30
4.2.4 Korskorrelation	31
4.2.5 Analytisk formel	31
<b>5 Resultat och analys</b>	<b>33</b>
5.1 Litteraturstudie	33
5.1.1 Förklaringsmodeller	33

5.1.2	Tidigare studier	33
5.2	Översikt data	35
5.2.1	Grundvattenbildningsdata	35
5.2.2	Jämförelser med inläckage	37
5.3	Regressionsanalys	44
5.3.1	Beskrivningar av försök och indelningar av data	44
5.3.2	Grundvattennivåer	46
5.3.3	Uppskattningar av grundvattenbildning	47
5.3.4	Multipel regression	48
5.3.5	Residualer	48
5.4	Korskorrelation	49
5.5	Geologiska kartor och karteringar	49
5.5.1	Arbetstunnel Lovö	50
5.5.2	Ramptunnel Johannelund	51
5.5.3	Huvudtunnlar Lunda	53
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>54</b>
6.1	Metodval	55
6.1.1	Grundvattennivåmätningar	56
6.1.2	Grundvattenbildning	56
6.2	Osäkerheter	57
6.2.1	Data och mätosäkerheter	57
6.2.2	Grundvattenbildning	58
6.2.3	Val av statistiska metoder	59
6.2.4	Val av tunnelsträckor och inverkan av geologiska aspekter	60
6.3	Förklaringsmodellernas lämplighet	61
6.3.1	Förklaringsmodell 1	61
6.3.2	Förklaringsmodell 2	62
6.3.3	Förklaringsmodell 3	62
6.4	Omgivningspåverkan och applicerbarhet	63
<b>7</b>	<b>Slutsatser och rekommendationer</b>	<b>64</b>
7.1	Rekommendationer för framtida studier	65
<b>8</b>	<b>Referenser</b>	<b>66</b>

## Bilagor

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Betydelsen av fungerande infrastruktur och transportsystem ökar i ett alltmer urbaniserat och rörligt samhälle. För att förbättra framkomligheten och minska sårbarheten hos transportsystemet i Stockholmregionen har man beslutat att bygga en ny ringled runt innerstaden – E4 Förbifart Stockholm (FS). Genom att förlägga 18 km av totalt 21 km planerad väg i bergtunnlar skonas natur- och kulturvärden i området (Trafikverket, 2021). Men även om en tunnel är mer eller mindre osynlig i landskapet kan den innebära stor påverkan under marknivån, framför allt på grundvattnet.

Inläckage av grundvatten genom tunnelkonturen är mer eller mindre oundvikligt, och om inläckaget är för stort kan det orsaka förändringar i grundvattennivån i stora områden kring tunnelsträckan. En avsänkt grundvattennivå kan innebära problem med sinande brunnar, påverka vegetation i grundvattenberoende ekosystem samt orsaka sättningar i husgrunder och skadade underjordiska ledningar (Spross, 2011). Av denna anledning måste den som avser bygga en tunnel eller annan berganläggning ansöka om tillstånd för vattenverksamhet enligt Miljöbalken (SFS 1998:808) 11 kap., och förhålla sig till de villkor för inläckage som beslutas av Mark- och miljödomstolen.

För att kunna följa de krav som ställs utan att kostnaden för tätningsåtgärder och dylikt blir orimligt hög, görs uppskattningar av förväntat inläckage i ett inledande projekteringskede. Uppskattningar kan göras genom beräkningar med analytiska formler eller numeriska metoder och modellering. För att kunna göra den här typen av uppskattningar för stora områden krävs god kunskap om de hydrogeologiska förhållandena i de aktuella områdena, såsom nederbörd, markegenskaper och geologi.

De hydrauliska egenskaperna hos det svenska urberget skiljer sig från de i jord och andra porösa material såtillvida att bergmassan är mer eller mindre impermeabel, och att grundvattenrörelser därmed endast kan ske i sprickor och frakturer. Även om flödet i en enskild spricka kan vara stort blir den effektiva porositeten och genomsläppligheten hos berg mycket låg. I tätade tunnlar styrs inläckaget främst av den tätade zonens och bergets egenskaper, samt grundvattentrycket över tunneln. Genomsläppligheten hos berg minskar också med djupet (Trafikverket, 2014). I tunnlar på större djup är inläckaget därför sällan begränsat av vattentillgången, utan av istället av bergets vattenförande förmåga (Andersson, 2019).

Under drivningen av Förbifart Stockholm har inläckaget varit högre än väntat på vissa sträckor. På vissa platser uppvisar inläckaget även ett beroende av nederbördstillfällena och grundvattennivå, och det ökar under perioder med hög grundvattennivå. Det är känt att vattentillgången kan begränsa inläckaget till en tunnel i ytliga områden där grundvattentillgången inte är särskilt god (Andersson, 2019; Gustafson, 2009). Det finns också studier, t.ex. Samuelsson (2007), som har konstaterat att inläckaget ökar i samband med nederbörd och högt tillflöde av grundvatten. Mekanismerna som styr dessa samband har dock inte utretts, och det är alltså inte i detalj klarlagt vilka hydrogeologiska strukturer och fenomen som ligger bakom det observerade beteendet. De samband som observerats vid

bygget av Förbifart Stockholm går utöver det som kan förklaras med endast ett ökat grundvattentryck, och sambanden mellan grundvattenbildning, grundvattennivå och inläckage verkar varken vara enkla eller linjära. Att hitta och kunna beskriva samband mellan nederbörd, grundvattennivåer och inläckage i tunnlar skulle underlätta uppföljningen av grundvattensituationen i andra tunnelprojekt liknande Förbifart Stockholm.

### 1.1.1 Föreslagna förklaringsmodeller

I ett underlag från Trafikverket (Forssberg & Strandanger, 2021) ges följande tre förslag på förklaringsmodeller för det observerade inläckagemönstret i Förbifart Stockholms tunnlar:

- 1) I ett enkelt konceptuellt system kan grundvattenbildning antas leda till en höjd grundvattennivå, vilket i sin tur ökar den hydrauliska gradienten i berget och i tunnelns tätning. Sambandet passar troligtvis bäst för ytliga system och områden med sprucket berg, eftersom konnektiviteten mellan bergtunneln och det överliggande grundvattenmagasinet då är bättre. Vid flera fall av inläckage som observerats under projektet Förbifart Stockholm är inläckaget också större än vad som kan förklaras med endast tryckökningen.
- 2) Grundvattenbildning leder till att sprickor som annars är torra fylls med vatten och ger nya läckvägar. Detta kan till exempel vara aktuellt i områden med ytliga berghällar, där effekten kan komma snabbt men också vara relativt kortvarig, eftersom det inte är frågan om något permanent grundvattenmagasin. Det här fenomenet kan tänkas komplettera tryckökningen i 1) ovan och ge en större ökning av inläckaget.
- 3) När grundvattennivån i ett magasin höjs till följd av grundvattenbildning växer magasinet på bredden och kommer i kontakt med nya bergsprickor som är kopplade till tunneln. Effekten samverkar med den ökade trycknivån i grundvattnet, och resultatet är en långsammare men mer långvarig ökning av inläckaget. Detta liknar det mönster som kan observeras vid en lyckad artificiell infiltration i ett område där grundvattennivån har varit avsänkt.

## 1.2 Syfte och frågeställningar

Examensarbetet har föreslagits av hydrogeologer på Trafikverket (Forssberg & Strandanger, 2021) med utgångspunkt i de inläckagemönster som observerats under bygget av E4 Förbifart Stockholm. Ett långsiktigt mål är att ta fram kvantitativa samband för inläckage, eller åtminstone enkla omvandlingstal för specifika tunneltyper som kan vara till hjälp vid planering och uppföljning av nya tunnelprojekt. Detta examensarbete syftar till att vara ett första steg på vägen mot det ovanstående målet, genom att söka potentiella förklaringsmodeller i litteraturen och koppla dessa till befintliga fall av inläckage som observerats. Huvudsyftet är att försöka påvisa och försöka förklara variationer i inläckage och huruvida de hänger samman med grundvattennivå och grundvattenbildning.

Arbetet söker svar på följande frågeställningar:

1. Vilka fall av inläckage har observerats för Förbifart Stockholm och vilka förslag på samband finns i dagsläget?
2. Vilka teoretiska förklaringsmodeller för inläckage finns i litteraturen?
3. Kan förklaringsmodellerna verifieras med data från Förbifart Stockholm?

### 1.3 Avgränsningar och begränsningar

I detta arbete undersöks ett urval av avgränsade områden längs Förbifartens sträckning i syfte att bekräfta och beskriva några fall av inläckage, skaffa en bättre bild av sambandet och de geologiska förhållandena i de aktuella områdena, samt att utvärdera föreslagna förklaringsmodellens lämplighet. Detta innebär att alla tolkningar blir beroende av de sträckor som valts ut, och att de inte nödvändigtvis går att applicera direkt på andra tunnlar.

Arbetet syftar inte till att inventera alla fall av inläckage som uppvisar samband med grundvattenbildning. Inom arbetets ramar genomförs ingen modellering, utan tolkningar och analys görs utifrån befintliga data från projektet.

### 1.4 Arbetets upplägg

Detta arbete bygger dels på en litteraturstudie, dels på en analys av data från specifika tunnelavsnitt inom projektet Förbifart Stockholm. Dataanalysen innefattar främst en regressionsanalys av aktuella parametrar.

Rapporten inleds med ett teorikapitel som innefattar bakgrund och grundläggande koncept inom geologi, hydrogeologi, tunnelbyggnation och inläckage. Syftet med detta kapitel är att ge en översikt över de koncept som utgör grunden för den analys som genomförts. Teorikapitlet avslutas med ett mer ingående avsnitt om olika faktorer som påverkar inläckage. Därefter följer ett kapitel som ger mer ingående information om Förbifart Stockholm och de områden som valts ut för fallstudien. Därefter följer en redovisning av metodiken som använts i detta arbete. Avslutningsvis redovisas resultaten från litteraturstudie och dataanalysen, samt tolkningar av dessa.

## 2 Teori

I detta avsnitt presenteras bakgrund och teori som utgör grunden för tolkningen av geologisk information och data i arbetet. Avsnittet inleds med en grundläggande bakgrund om geologiska och hydrogeologiska begrepp, och följs av ett avsnitt om tunneldrivning och inläckage. Sist finns ett avsnitt med mer ingående information om faktorer som har stor påverkan på inläckaget.

### 2.1 Geologi och hydrogeologi

Hydrogeologi avser relationen och interaktionen mellan geologiska material och processer i vatten. Förståelse för hydrogeologi är grundläggande för att förstå mekanismerna som orsakar inläckage till tunnlar, och därför behandlar det här avsnittet en del basala geologiska och hydrogeologiska begrepp och hur de definieras i det här arbetet.

Geologiska material kan i princip delas upp i två kategorier: berg och jord. Jordarter är okonsoliderade, det vill säga att kornen som utgör jorden inte sitter ihop. I bergarter är istället beståndsdelarna mer eller mindre sammanfogade. Det finns tre huvudsakliga typer av bergarter: sedimentära, metamorfa och magmatiska. Metamorfa och magmatiska bergarter kallas ibland gemensamt för kristallina bergarter. Kristallint berg är generellt sett hårt och sprött med låg porositet, eftersom det bildats direkt av stelning av lava eller genom ombildning under höga tryck och temperaturer. Den svenska berggrunden består till stor del av mycket gamla kristallina bergarter, så kallat urberg (Wahlgren et al., 2018).

Ett geologiskt materials förmåga att innehålla vatten styrs framför allt av dess porositet. Den totala porositeten hos ett geologiskt material är ett mått på andelen hålrum i jorden eller i en bergmassa. Den effektiva porositeten beskriver istället andelen hålrum som är sammankopplade och som vatten kan flöda genom. Lera har exempelvis en mycket hög total porositet och kan hålla stora mängder vatten, men har en låg förmåga att leda vatten eftersom den effektiva porositeten är liten. Porositet kan också delas in i primär och sekundär porositet. Den primära porositeten är materialets ”inneboende” porositet, som uppstår då materialet bildas. Med den sekundära porositeten avses sprickor eller hålrum som formas av erosion över tid (Fetter, 2014). Kristallint berg har ofta en försumbar primär porositet, och majoriteten av materialets vattenförande egenskaper kan härledas till den sekundära porositeten. Dock är även den totala porositeten hos kristallint berg låg och uppgår endast till några få procentenheter i de flesta fall. Om berget är mycket uppsprucket och eroderat förekommer det, i undantagsfall, att porositeten uppgår till 30-60 %. Hos jordarter är majoriteten av porositeten primär, och hos välsorterade, grövre material kan den effektiva porositeten uppgå till 40 %. I jordarter med blandade kornstorlekar, såsom morän, blir porositeten lägre, och moräner med en stor andel finkornigt material kan ha mycket låg porositet (10-20 %) (Fetter, 2014).

I grundvattenzonen är alla hålrum helt fyllda med vatten. Portrycket överskrider atmosfärstrycket och ökar med ett ökat avstånd från grundvattenytan. Förekomsterna av vatten i grundvattenzonen kan indelas i geologiskt avgränsade grundvattenmagasin. Ett eller

flera grundvattenmagasin som tillsammans har en tillräcklig lagringskapacitet och genomsläpplighet för att vatten ska kunna utvinnas i användbara mängder kallas för akvifer. I detta arbete kommer grundvattenförekomster för det mesta att benämnas som grundvattenmagasin, eftersom ingen information om uttagskapacitet har samlats in eller analyserats.

Akviferer och grundvattenmagasin kan vara öppna eller slutna. I öppna magasin kan vatten infiltrera direkt från ytan, medan slutna magasin avgränsas från ovanliggande magasin och atmosfären av t.ex. lerlager eller avlagringar av något annat material med låg genomsläpplighet. I ett öppet magasin råder atmosfärstryck vid grundvattenytan, och ett uttag av grundvatten eller en minskad grundvattenbildning har en direkt påverkan på grundvattenytans läge. I ett slutet magasin överlagras däremot grundvattenmagasinets material av ett tätande lager och den faktiska grundvattenytan begränsas då av det tätande lagret. Trycket kan därför överstiga atmosfärstrycket vid grundvattenytan. Den potentiella grundvattenytan ligger över den faktiska, och en ändring i mängd lagrat grundvatten påverkar den potentiella grundvattenytan (Fetter, 2014).

Grundvattnets rörelse i marken styrs av hydrauliska gradienter, dvs tryckskillnader orsakade av exempelvis höjdskillnader. Det är också tryckskillnaden mellan in- och utsidan av en tunnel som driver inläckaget genom tunnelkonturen. Då grundvattnet i regel ligger nära markytan under svenska förhållanden betyder det att grundvatten vanligtvis flödar från högre till lägre belägna områden (Fetter, 2014). Ett vanligt förekommande sätt att beräkna grundvattenflödet ( $Q$ ) är Darcys lag, som också ger en konceptuell förståelse av hur grundvattennivåskillnader driver grundvattenflödet (se Ekvation 1):

$$Q = -K * A * \frac{dh}{dL} \quad (\text{Ekvation 1})$$

Där  $K$  [m/s] är den hydrauliska konduktiviteten hos det geologiska materialet,  $A$  [m<sup>2</sup>] är tvärsnittsarean och  $dh/dL$  [m/m] är den hydrauliska gradienten.

Hydraulisk konduktivitet ( $K$ ) beskriver det geologiska materialets förmåga att transportera vatten. Den hydrauliska konduktiviten anges vanligen i meter per sekund, och är en materialegenskap. Ett annat sätt att beskriva genomsläpplighet är att ange transmissiviteten hos materialet. Transmissiviteten är en integrerad egenskap, vilket innebär att den är en sammanvägning av den hydrauliska konduktiviteten hos de geologiska materialen på en viss, bestämd sträcka (Gustafson, 2009). Transmissiviteten är mer lämplig att använda i lokal skala, t.ex. för att beskriva brunnar i heterogena material.

Darcys lag och användningen av hydraulisk konduktivitet förutsätter ett poröst och homogent medium, vilket kan stämma för okonsoliderade material som sand och grus, men som inte är ett rimligt antagande för kristallint berg. Endast i större skala, t.ex. för en lång tunnel som korsar flera olika spricksystem, kan ett berg antas bete sig som ett poröst material. I denna skala kan det vara möjligt att använda den hydrauliska konduktiviteten för att beskriva bergets egenskaper utan orimligt stora fel. Det förutsätter dock att inget av spricksystemen är särskilt dominant eller har särskilt stor påverkan på grundvattenflödet i området (Engström et al., 2009).

För massiv kristallin berggrund kan den hydrauliska konduktiviteten vara mellan  $3 \cdot 10^{-14}$  och  $2 \cdot 10^{-10}$  m/s, dvs mycket liten, medan konduktiviteten hos uppsprucket kristallint berg kan variera mellan  $8 \cdot 10^{-9}$  och  $3 \cdot 10^{-4}$  m/s (Domenico & Schwartz, 1998). Flödet i berg sker alltså i sprickor och större svaghetszoner med sprickigt och deformerat berg. Generellt sett finns ett ytligt berglager som är mer uppsprucket och konduktivt. Detta lager har bildats genom avlastning, erosion osv. Bergets konduktivitet avtar generellt sett med djupet, dels pga minskad påverkan från eroderande processer, men också på grund av det ökande trycket från



den ovanliggande bergmassan, som gör att de sprickor som finns trycks ihop och sluts. En stor del av flödet i berg sker alltså i det ytligaste lagret av berget, som också ofta står i kontakt med ovanliggande jordlager (Engström et al., 2009; Gustafson, 2009). Utöver detta sker grundvattenflödet i huvudsak i större svaghetszoner och längs andra heterogeniteter i bergmassan, såsom band av andra bergarter (gångbergarter) osv (Olofsson, 1994). Ett mer korrekt sätt att beskriva grundvattenflödet i berg, jämfört med Ekvation 1, är därför att genomföra en numerisk modellering. Man har kunnat visa att sprickfrekvensen och spricktransmissiviteten hos enskilda sprickor i kristallint berg i stort följer olika statistiska fördelningar (negativ binomialfördelning respektive paretofördelning) (Gustafson, 2009). Ett sätt att representera heterogeniteten är därför att ansätta en stokastiskt fördelad hydraulisk konduktivitet för de olika cellerna. Denna typ av modellering förutsätter dock att man har tillräckligt med information om modellområdet för att kunna ansätta korrekta fördelningsparametrar.

Ökad infiltration och efterföljande inläckage är vanligare där bergsprickor står i kontakt med en överliggande reservoar eller annan vattenkälla (Cesano et al., 2000; Olofsson, 1994). Vidare ökar den hydrauliska konduktiviteten när porerna fylls med vatten och mättade förhållanden uppstår (Sweetenham et al., 2017). Detta innebär att inläckaget kan komma att öka successivt i samband med nederbörd, i och med att torra sprickor måste bli mättade med vatten innan den maximala hydrauliska konduktiviteten uppnås.

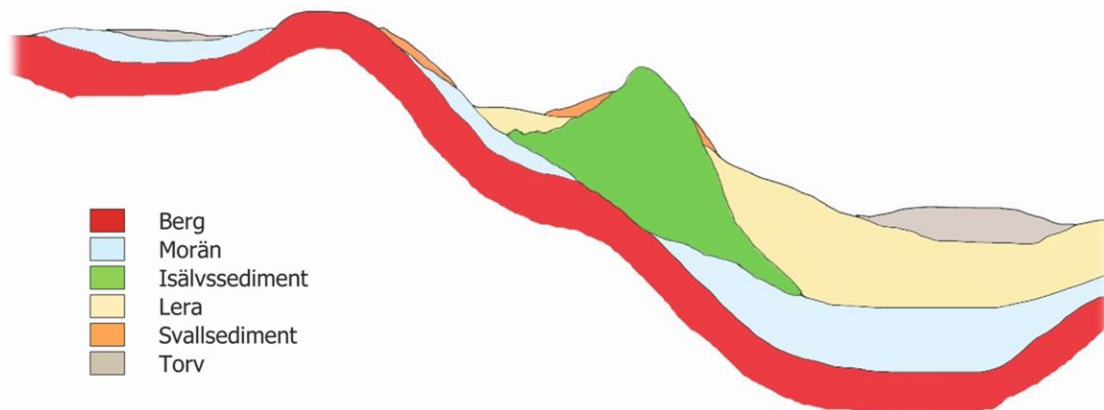
### **2.1.1 Stockholmsområdets geologi**

Sveriges geologi är starkt präglad av den senaste istiden. I stora delar av landet kan den ytliga geologin beskrivas som ytnära urberg utan jordlager eller med tunna jordlager av främst morän och svallprodukter i höjdområden. I dalgångar överlagras morän och friktionsjord av lerlager med varierande mäktighet. Denna generella beskrivning stämmer väl för Stockholmsområdet, som kommer att vara i fokus i nedanstående avsnitt.

Stora delar av Sveriges berggrund består av så kallat urberg, som består av kristallina bergarter som är mer än 545 miljoner år gamla. Kristallina bergarter kan vara magmatiska, eller metamorfa. Magmatiska bergarter bildas av magma som svalnat, stelnat och kristalliserats. Ett typiskt exempel är granit. Metamorfa bergarter kan ha magmatiskt eller sedimentärt ursprung, och bildas genom att den ursprungliga bergarten omvandlas under högt tryck och/eller hög temperatur. Metamorfa bergarter har ofta en veckad och skiktad textur som kallas foliation. Gnejs är ett exempel på en metamorf bergart. Utöver dessa bergarter förekommer band av gångbergarter, såsom diabas och amfibolit (Wahlgren et al., 2018).

#### *2.1.1.1 Jordarter*

Jordlagren som överlagras berg har stor påverkan både på kvaliteten och kvantiteten hos grundvattenbildningen till berg. Det är viktigt att ha kunskap om de jordarter och lagerföljder som finns i ett område för att förstå sig på hydrogeologin och grundvattnets rörelse, och i förlängningen hur detta påverkar inläckage av grundvatten i undermarksanläggningar. I detta avsnitt beskrivs förekomsten av jordarter i Stockholmsområdet samt egenskaper hos de olika jordarterna.



Figur 1. Typsektion som visar fördelningen av jordarter i Stockholmsområdet. Modifierad från Wahlgren et al. (2018).

Figur 1 visar en generaliserad bild av hur olika jordarter är fördelade i Stockholmsområdet. I höjdområden, som förekommer relativt frekvent, ligger bergytan mycket nära markytan och det är vanligt med berg i dagen (berghällar). I dessa områden består jordtäcket ofta av tunna lager av morän som bildats av krossat bergmaterial under den senaste istiden. Morän är en osorterad jordart som består av alla olika kornstorlekar. Om moränen har påverkats av hav vid någon tidpunkt under historien kan man finna grövre svallsediment (grus och sand) på sluttningar nedanför höjdområdena.

I dalgångar och låglänta områden finns ofta ett moränlager underst, ovanpå berggrunden, och där ovanför finns andra strukturer. Bl.a. kan man finna isälvsavlagringar (rullstensåsar) som består av sorterade jordarter som sand och grus. Dessa kan överlagras av lera med varierande mäktighet. I lokala svackor kan det översta lagret bestå av organiskt material (torv) (Wahlgren et al., 2018).

Lera har som tidigare nämnt mycket hög porositet och kan innehålla stora mängder vatten, men den effektiva porositeten är mycket lägre. Detta gör att genomsläppligheten är så låg att lera i många sammanhang betraktas som ett tätt lager genom vilket inget vatten kan passera. I ett större tidsperspektiv kan dock vatten dräneras från lera, och om detta sker under tryck ökar lerans hållfasthet och den konsolideras, dvs trycks ihop (Fetter, 2014).

## 2.2 Inläckage och tunneldrivning

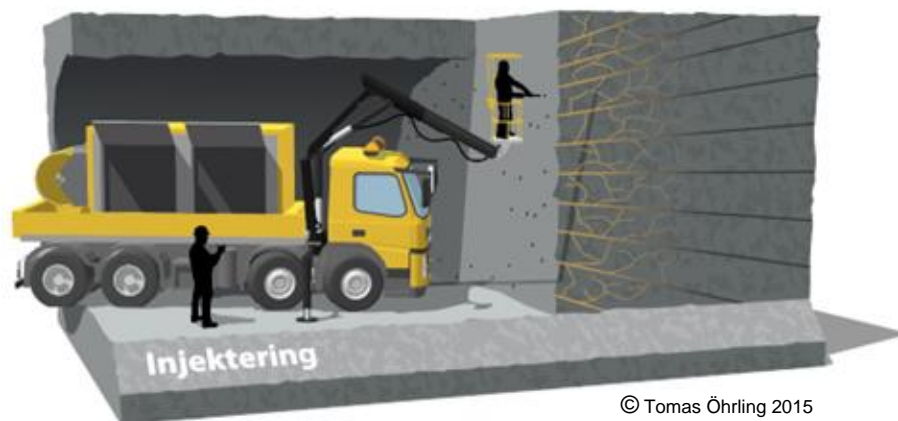
Det finns flera olika faktorer som påverkar inläckaget till bergtunnlar, såsom hur ytlig tunneln är, hur nyligen den sprängdes ut, om den står i kontakt med ett magasin med god grundvattentillgång eller inte osv (Andersson, 2019). I avsnittet ovan redogjordes det för att bergmassan innehåller sprickor och svaghetszoner med högre genomsläpplighet som vattnet kan läcka in igenom (Axelsson & Follin, 2000; Spross, 2011). Bergmassans kvalitet, dvs hur uppsprucken den är, har stor påverkan på grundvattenflödet och därmed även inläckaget till tunnlar i berg.

Tunnlar syns inte i landskapet, men de kan ha stor påverkan under ytan som indirekt påverkar strukturer och miljöer ovan mark. Påverkan sker framför allt på grundvattnet, eftersom det alltid sker ett visst inläckage av grundvatten till berganläggningar under grundvattenytan. Därför är det viktigt att åtgärder planeras och implementeras under byggtiden för att motverka

inläckaget. I detta avsnitt behandlas grundläggande information om tunneldrivning, inläckage och dess omgivningspåverkan.

### 2.2.1 Tunneldrivning och injektering

Ett tunnelbygge i berg består av flera steg: tunneldrivning, förstärknings- och tättningsarbeten, installationsarbeten osv. Det finns flera metoder för att driva tunnlar, och olika metoder lämpar sig för specifika förutsättningar. Den vanligaste metoden för att bygga tunnlar i Sverige är borring och sprängning. Arbetsförloppet är cykliskt, och tunneln drivs fram ett segment åt gången. En produktionscykel kan ta ungefär en vecka. Om inte berget är av exceptionellt bra kvalitet med mycket få sprickor inleds en produktionscykel med förinjektering. Vid förinjektering drivs långa borrhål in i berget i formen av en skärm eller trätt runt det blivande tunnelröret, varefter ett injekteringsmedel (vanligen cementbaserat) trycks in i hålen. Målet är att betong ska tränga in i sprickor som korsar borrhålen och därmed förhindra grundvattnet där från att nå tunneln, se Figur 2 nedan (Hamnö, 2017; Stockholm Vatten och Avfall, 2022). Om förinjektering utförs kontinuerligt bildas en så kallad injekteringsskärm med lägre hydraulisk konduktivitet än det omgivande berget (Andersson & Sellner, 2000).



Figur 2. Förinjektering av berg. Injekteringsmedlet tränger in i sprickor via borrhål och bildar en injekteringsskärm (Stockholm Vatten och Avfall, 2022).

När förinjekteringen är klar påbörjas salvboring, vilket innebär att borrhål för sprängning borrar in i tunnelfronten. Borrhålen laddas med sprängämnen, varefter själva sprängningen genomförs. En sprängning innefattar ca 100-250 borrhål, vardera 2-5 m långa, och lika många detonationer. De bortsprängda bergmassorna transporteras ut ur tunneln, och hela cykeln avslutas med att berget skrotas och förstärks vid behov. Skrotning innebär att man knackar på berget för att löst sittande bergdelar ska lossna och kunna föras bort (Hamnö, 2017; Stockholm Vatten och Avfall, 2022).

Om tunnelns täthet inte uppfyller kraven efter att den förinjekterats och sprängts ut kan efterinjektering tillämpas. Det innebär att nya hål borrar på en redan injekterad sträcka och nytt injekteringsmedel pumpas in. Det kan vara antingen cementinjektering eller så kallad kemisk injektering. Injekteringsmedlet ska väljas så att det kompletterar den injektering som redan är gjord. Om de stora sprickorna tätats vid förinjekteringen kommer en ytterligare runda med cement som injekteringsmedel inte kunna komma in och täta de små sprickor som kvarstår. Efterinjektering är på många sätt mer komplicerat än förinjektering av denna anledning. Komplexiteten beror också på att den hydrauliska gradienten över den befintliga injekteringsskärmen är hög, vilket gör att flödestrycket i nya borrhål kan vara så högt att

injekteringsmedlet får svårt att tränga in eller att det trycks tillbaka in i tunneln (Fransson & Gustafson, 2008).

### **2.2.2 Inläckagemätning**

I det tillstånd för vattenverksamhet som utfärdas för ett tunnelprojekt (enligt Miljöbalken (SFS 1998:808) 11 kap.) anges ett riktvärde för maximalt tillåtet inläckage i driftskedet. Värdet är satt med hänsyn till omgivningspåverkan. För byggskedet finns inga konkreta begränsningsvärden för inläckagets omfattning, men byggherren är ansvarig för att kontinuerligt övervaka inläckaget för att säkerställa att den färdiga tunneln kommer att kunna uppfylla villkoren i tillståndet (Spross, 2011).

Mättdammar och pumpgropar är två exempel på anordningar för inläckagemätning. Båda bygger på att vatten från ett avgränsat område rinner ner till en anordning som stoppar och samlar upp vattnet så att det kan mätas när det passerar eller leds förbi begränsningen. Pumpgropar placeras i lågpunkter där vatten från ett visst tunnelavsnitt samlas. Vattnet pumpas ofta till en container där sediment avges innan det pumpas vidare ut ur tunneln. Flödet mäts vid en pumpslangs mynning. Nackdelen med pumpgropar är att mätningen begränsas av pumpens kapacitet och oregelbundenhet, samt att pumpningen i sig kan störas av sediment eller inträngande luft vid låga vattennivåer. En mättdamm är en betongmur som byggs tvärs över tunnelinjen. Det måste ske en tätning av både kontaktytan mellan mur och berg samt eventuella sprickor i tunnelbotten för att förhindra att vatten läcker från en sektion till en annan. Själva mätningen görs med hink och klocka vid ett rör där vattnet kan passera genom muren (Spross, 2011).

Mätanordningarna ska placeras med jämna intervaller i tunneln, t.ex. var 200:e meter. Hänsyn måste dock tas till lokala förhållanden, som t.ex. att en mättdamm måste placeras i en sluttning för att kunna samla upp vatten. Den regelbundna placeringen av mätanordningar underlättar en lokalisering av inläckage, så att kompletterande åtgärder såsom efterinjektering kan vidtas på ett träffsäkert sätt. En svårighet med dessa mätmetoder är att skilja på mängden inläckande grundvatten och processvatten från injektering, borrning osv. För att göra detta krävs antingen att mätningarna görs när det är ett uppehåll i drivningsarbetet, eller att mängden tillfört processvatten mäts och subtraheras från det uppmätta flödet vid på mätsträckan (Spross, 2011).

### **2.2.3 Omgivningspåverkan**

Vatten som läcker in i berganläggningar utgör problem för byggarbete och drift av tunneln, men inläckaget innebär också en bortledning av grundvatten från omgivande grundvattenmagasin i jord och berg. Bortledningen kan orsaka förändring av strömningsmönstret, en ökad fluktuation i grundvattennivån eller en avsänkning av grundvattenytan. (Kvaerner & Snilsberg, 2013; Tilly, 2001)

Påverkansavståndet för dräneringen, det vill säga hur långt från tunneln som grundvattnet sänks av, kan uppskattas med analytiska brunnsekvationer eller med numerisk modellering. I ett homogent och isotropt geologiskt material orsakar tunneldräneringen en jämn avsänkning som är lika stor längs hela tunneln. Dessa kriterier stämmer dock inte för sprickigt kristallint berg, eftersom flödet framför allt sker i sprickor och svaghetszoner. Avsänkningen längs med större svaghetszoner kan uppgå till tiotals meter och påverkansområdet kan sträcka sig flera hundra meter från tunneln längs zonens sträckning, samtidigt som avsänkningen utanför svaghetszonen blir mycket begränsad (Floren, 2015; Kvaerner & Snilsberg, 2013).

Avsänkningen blir generellt sett störst i bergmagasin eftersom dessa har en lägre porositet och magasineringsförmåga, samt står i direkt kontakt med bergtunneln. Ett mycket litet inläckage kan orsaka stor avsänkning i bergsprickor och mindre jordmagasin, framförallt om tillrinningen till magasinet är liten. Magasinets mäktighet och grundvattenbildningen spelar alltså stor roll för hur stor påverkan på omgivningen blir. En stor grundvattenbildning dämpar avsänkningen, och det gör även kontakt med ett stort grundvattenmagasin eller en ytvattenreserv (Axelsson & Follin, 2000).

En avsänkning av grundvattenytan i berg leder i sin tur till en ökad grundvattenbildning från jord till berg, eftersom den hydrauliska gradienten däremellan blir större. Tillrinningens storlek och omgivningspåverkan vid ytan är dock starkt beroende av kontakten mellan berggrund och jordlager. Om det förekommer svaghetszoner eller konduktiva sprickor i det aktuella området kan dräneringen av jordlagret bli större (Olofsson, 1994). Förutsättningen för detta är dock att jordlagret har hög permeabilitet. Om berget däremot överlagras av lera eller morän med låg hydraulisk konduktivitet begränsas påverkan på ovanliggande jordlager. I dessa fall kan ett system med dubbla grundvattenytor utvecklas – en i berggrunden och en i jordlagret – och påverkan på jordmagasinet blir mindre (Axelsson & Follin, 2000). Om situationen kvarstår under en längre period kan dock eventuella ovanliggande lerlager dräneras med kompaktering och sättningar som följd.

En ökad grundvattenbildning till underliggande bergmagasin minskar mängden vatten i de ytnära systemen, vilket riskerar att påverka både byggnation och naturmiljöer negativt. Påverkan på växtlighet i naturmiljöer och jordbruksmark skiljer sig åt beroende på det topografiska läget och de lokala geologiska förutsättningarna. Naturlig växtlighet på höjder och sluttningar är generellt sett mindre känslig för grundvattenavsänkningar eftersom denna framför allt är beroende av infiltrerande vatten i den omättade markvattenzonen. Växtligheten är mer känslig i områden där grundvattenytan ligger nära eller över markytan, till exempel i låglänta våtmarker, eftersom denna växtlighet anpassats till vattenmättade förhållanden (Axelsson & Follin, 2000).

#### *2.2.3.1 Skyddsinfiltation*

Omgivningspåverkan minskas främst genom att minimera inläckaget till tunneln. Ett annat sätt att dämpa den negativa påverkan på grundvattnet är att utföra konstgjord infiltation till de påverkade grundvattenmagasinen, så kallad skyddsinfiltation. Vid skyddsinfiltation kan man använda sig av infiltrationsbassänger, eller så kan vatten pumpas ner i brunnar som står i kontakt med det aktuella grundvattenmagasinet. Alternativt kan vatten släppas ut direkt på jordytan för att sedan infiltrera (Floren, 2015). Observera att skyddsinfiltation inte minskar inläckaget till tunneln, snarare tvärt om. Infiltrationen syftar endast till att bibehålla de naturliga grundvattennivåerna i ett område.

Det vatten som används för skyddsinfiltationen måste vara av god kvalitet för att grundvattenkvaliteten i magasinet inte ska försämrats av åtgärden. Att använda utpumpat vatten direkt från tunneln är inte att rekommendera, eftersom det kan innehålla mycket sediment eller rester av sprängämnen och andra kemikalier från produktionen. Det krävs rening av detta vatten innan det kan användas för infiltation (Tilly, 2001).

### **2.2.4 Uppskattning av inläckage**

För att kunna göra en uppskattning av förväntat inläckage innan tunnelbygget påbörjas krävs diverse förundersökningar och beräkningar. Relevanta förundersökningar kan bland annat innefatta kartläggningar av berg- och jordartsförekomster, genomgång av äldre hydrogeologiska undersökningar och databaser, sprickkarteringar på berghällar och i

befintliga berganläggningar, geofysiska undersökningsmetoder (t.ex. seismik), provpumpningar och kartläggning av grundvattennivåer i området. Information från kärnborrhål kan användas för att få en detaljerad bild av sprickförekomst och bergartsföljder på en specifik plats. I kärnborrhålen kan även så kallade vattenförlustmätningar genomföras. Detta innebär att vatten pumpas in i borrhålet under ett visst tryck och det totala flödet per minut (vattenförlusten) används för att bestämma den hydrauliska konduktiviteten hos berget (Berzell, 2011).

Utifrån den data som erhålls från förundersökningarna kan det förväntade inläckaget beräknas med olika metoder. Analytiska ekvationer är en etablerad metod. Fördelen med dessa är att de är relativt enkla och snabba att använda, och de kräver inga stora datamängder. De kräver däremot mycket stora generaliseringar och antaganden (Thelander, 2021). Till exempel antas berget vara homogent, något som endast är lämpligt i större skala, och inte för lokala förhållanden. Ett exempel på en analytisk formel för att beräkna inläckage till en injekterad tunnel är Ekvation 2 (Gustafson, 2009).

$$Q_{inj} = \frac{2\pi KHL}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \left(\frac{K}{K_{inj}} - 1\right)\ln\left(1 + \frac{t}{r_t}\right) + \xi} \quad (\text{Ekvation 2})$$

$K$  [m/s] är medelkonduktiviteten för bergmassan,  $K_{inj}$  [m/s] är konduktiviteten hos den injekterade zonen och  $H$  [m] är tryckhöjden (egentligen tunneldjupet, då grundvattenytan oftast kan antas ligga nära markytan).  $L$  [m] är längden på det aktuella tunnelavsnittet,  $r_t$  [m] är tunnelradien,  $t$  [m] är tjockleken på den injekterade zonen och  $\xi$  är skinfaktorn. Skinfaktorn beskrivs närmare i slutet av avsnitt 2.3.1.

Att uppskatta inläckaget genom modellering kan ofta ge mer detaljerade och korrekta uppskattningar, men de kräver både mycket tid och data för att ge en rättvisande bild av verkligheten. Flera studier har konstaterat att den ansatta hydrauliska konduktiviteten hos berget har mycket stor betydelse för det uppskattade inläckaget och den omgivningspåverkan som det orsakar, och det är därför av stor vikt att den bestäms så noga som möjligt inför modellering (Ragvald, 2012; Thelander, 2021). Dessvärre är det också en parameter som är svår att bestämma med hög noggrannhet för berg (Farhadian & Nikvar-Hassani, 2019; Ormann, 2006).

## 2.3 Faktorer som påverkar inläckage

I detta avsnitt behandlas fyra olika aspekter som påverkar grundvattenflöde och inläckage i större detalj.

### 2.3.1 Geologiska förutsättningar

Typiskt för de kristallina bergarterna som dominerar i Stockholm är att de är hårda och spröda, vilket innebär att deformation genom bergspänning och tryckförändringar leder till sprickbildning. Liksom tidigare nämnts är sprickbildningen avgörande för bergets hydrogeologiska egenskaper, eftersom den täta mineralstrukturen hos kristallina bergarter gör att genomsläppligheten är nära noll (Cesano et al., 2000; Gustafson, 2009).

Enligt ovan är den primära porositeten, det vill säga andelen hålrum i bergets mineralstruktur, nära noll, och bergets genomsläpplighet är i praktiken helt beroende av den sekundära porositeten. Sprickor kan bildas genom olika geologiska processer eller processer vid ytan. Några exempel på sådana processer är, enligt Gustafson (2009), bergartsbildning,

bergskedjeveckning, avlastning genom t.ex. erosion av överliggande berg, glaciation samt erosion och vittring. På grund av de lokala spricksystemens dominanta roll för porositeten och de vattenförande egenskaperna hos kristallint berg, styrs genomsläppligheten hos bergmassan i större utsträckning av spricksystemet än av bergarten, och variationen i genomsläpplighet inom en bergart är också större än variationen mellan olika bergarter. Olika bergarter kan dock ha olika benägenhet till sprickbildning och spricka upp på olika sätt, och det kan därför ändå vara värt att ta hänsyn till bergart vid bedömning av inläckage. Magmatiska bergarter som granit är generellt sett något hårdare och sprödare, vilket innebär att de är mer benägna att spricka jämfört med metamorfa bergarter som gnejs. Gnejs har något högre draghållfasthet och lägre sprödhet, men anisotropin och foliationen kan innebära svaghetsplan där sprickor kan bildas parallellt med skikten (Gustafson, 2009).

Sprickor i berg är heterogent distribuerade i bergmassan. Sprickfrekvensen i relativt opåverkad granit kan ligga på ca 4 sprickor per m, men frekvensen kan variera stort på litet avstånd. Genomsläppligheten hos ett spricksystem styrs också av konnektiviteten mellan enskilda sprickor (Banks et al., 2002), då olika konduktiva sprickor måste stå i kontakt med varandra för att vatten ska kunna föras över mellan bergets olika delar. Spricktransmissiviteten, det vill säga genomsläppligheten, hos enskilda sprickor kan variera på grund av ett flertal olika anledningar. Framför allt är genomsläppligheten hos sprickor och sprickgrupper starkt beroende av sprickaperturen (sprickvidden). Transmissiviteten hos en spricka är proportionell mot kuben av sprickvidden, enligt kubiska lagen (se Ekvation 3 nedan). En liten skillnad i apertur mellan två sprickor kan alltså innebära en signifikant skillnad i genomsläpplighet (Banks et al., 2002; Gustafson, 2009).

$$T = \frac{\rho g b^3}{\mu 12} \quad (\text{Ekvation 3})$$

$T$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] är sprickans transmissivitet,  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] är vattnets densitet,  $g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] är jordaccelerationen,  $\mu$  [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ] är vattnets viskositet och  $b$  [ $\text{m}$ ] är aperturen.

Aperturen är inte konstant genom en spricka. Sprickor kan innehålla bergfragment, löst bergmjöl, eller konsoliderat bergmjöl i form av mylonit samt utfällningar av olika mineral från grundvattnet i sprickan. Dessa komponenter kan fylla upp en del av tomrummet mellan bergytorna, och ibland till och med sluta sprickan helt. Aperturen påverkas också av bergspänningen<sup>1</sup>. Bergspänningen är större på ett större djup, vilket gör sprickaperturen mindre och därmed minskar också genomsläppligheten med djupet (Banks et al., 2002; Gustafson, 2009). Andra faktorer som bidrar till att genomsläppligheten ökar mot ytan är t.ex. att det ytligaste lagret är mer utsatt för eroderande processer såsom frostsprängning och upplösning av sprickmineraler på grund av nybildat grundvatten (Gustafson, 2009).

Man har visat att transmissiviteten hos sprickor i hårt, svenskt urberg varierar enligt en så kallad pareto-fördelning (Gustafson, 2009). Denna fördelning passar för datamängder med många små värden och ett fåtal mycket större värden. Detta innebär alltså att majoriteten av alla sprickor har en låg genomsläpplighet, samtidigt som det finns ett fåtal mycket konduktiva sprickor som står för majoriteten av grundvattenflödet.

Det finns områden som utsatts för större påverkan från t.ex. tektoniska händelser. Dessa benämns som svaghetszoner eller sprickzoner. De kan även kallas krosszoner om berget är mycket kraftigt deformerat. Svaghetszoner kan ha varierande bredd och längd, men de karakteriseras av en högre sprickfrekvens och därmed berg med sämre hållfasthet och högre genomsläpplighet. Ofta definieras svaghetszoner som ett område med sprickfrekvens på t.ex.

---

<sup>1</sup> Tektoniska händelser och belastning från ovanliggande bergmassa skapar mekaniska spänningar i berget.

5–10 ggr frekvensen i omgivande berg. Svaghetszoner är ofta betydelsefulla grundvattenledare i berg, och associeras därför också med större inläckage i tunnlar. Detta beror inte på att sprickorna i en svaghetszon generellt sett har större apertur och är mer genomsläppliga än i omgivande berg, utan att sannolikheten att träffa på en konduktiv spricka är större när sprickfrekvensen är hög. Det är ett fåtal sprickor i en svaghetszon som ger stora vattenflöden (Gustafson, 2009). Enskilda konduktiva sprickor som står i kontakt med svaghetszoner kan också orsaka betydande inläckage (Cesano et al., 2000).

I kraftiga svaghetszoner med mycket krossat berg kan det förekomma kärnor av leromvandlat material som bildar en hydraulisk barriär i landskapet. I dessa fall finns ofta konduktiva övergångszoner med icke-omvandlat berg kring kärnan, vilket gör att den här typen av zoner ändå orsakar stora problem vid tunnelbyggen. Olofsson (1994) och Cesano et al. (2000) har dock visat att ler- och mineralfyllning resulterar i ett minskat inläckage från kraftigt deformationerat berg, jämfört med svaghetszoner utan fyllning. Band eller zoner bestående av andra bergarter, såsom diabas och amfibolit, kan uppvisa ett liknande beteende. Dessa bergarter har i sig en mycket liten genomsläpplighet, men i kontakten med den omgivande bergmassan förekommer deformationer och sprickor som kan leda vatten (Cesano et al., 2000; Wahlgren et al., 2018).

De hydrogeologiska förutsättningar som gäller vid tunneldrivningen ändras ofta över tid, på ett sätt som leder till ett ökat flödesmotstånd. Bergspänningen kring tunneln orsakar en minskning av sprickaperturen över tid, vilket därmed också minskar genomsläppligheten. Andra faktorer som bidrar till denna utveckling är förekomsten av gasbubblor i sprickorna, utfällning av sprickmineral osv. Det ökade inläckagemotståndet brukar benämnas skin, och representeras av en så kallad skin-faktor vid beräkningar (Gustafson, 2009), se t.ex. Ekvation 2 ovan.

Sammanfattningsvis är grundvattenflödet i sprickor och spricksystem komplext. För att beskriva grundvattenflöde och inläckage till tunnlar i berg med analytiska formler krävs därför stora förenklingar och generaliseringar. Numeriska modeller kan beskriva komplexiteten i större utsträckning, men de kräver stora mängder information och data om spricksystemet för att kunna beskriva flödet på ett korrekt sätt. I större skala blir antaganden och förenklingar mer giltiga, eftersom det genomsnittliga flödesbeteendet då beror på den sammantagna effekten av alla sprickor.

### **2.3.2 Grundvattenmagasin**

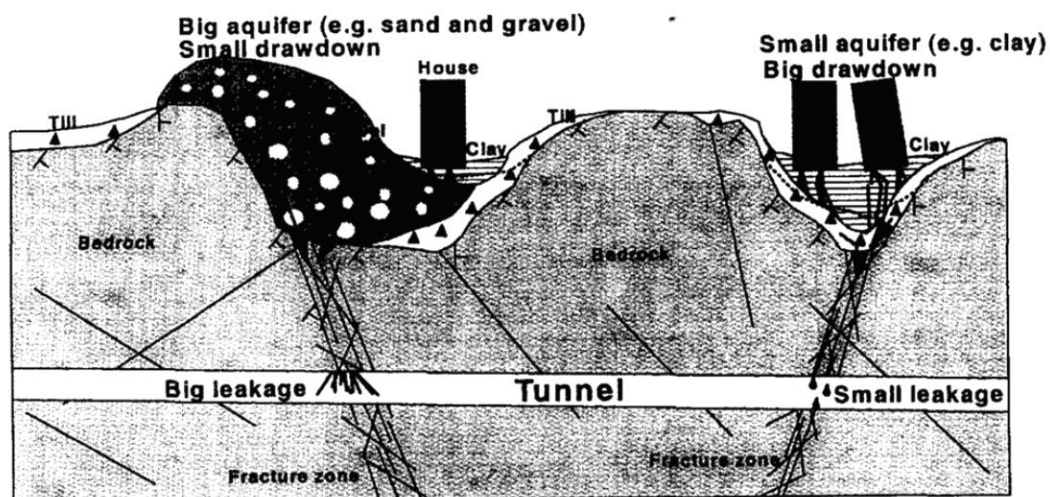
Utöver själva bergmassans genomsläpplighet spelar förekomsten av grundvattenmagasin i berg och ovanliggande jordlager en betydande roll för inläckagets karaktär. Magasinens egenskaper bestäms av det geologiska material som de består av, tillflödet av nytt vatten (grundvattenbildningen), samt de omkringliggande geologiska formationerna. Till exempel behövs någon form av begränsande lager under och vid sidorna för att grundvattnet ska hållas kvar. Ett magasin som består av väl sorterade, grova jordarter kan hålla och transportera stora mängder vatten, medan ett magasin av mer finkornigt material kan begränsa flödet. Grundvattenmagasin i berg utgörs av sprickorna i bergmassan. Sprickornas frekvens, konnektivitet och apertur är därför avgörande för bergets magasineringkapacitet. Generellt sett kan berg leda mycket vatten, men magasinering förmågan är mycket liten (Fetter, 2014; Gustafson, 2009).

Bergmagasinens karaktär innebär alltså att de inte kan lagra några större mängder vatten, utan att magasinegenskaperna till stor del styrs av det ovanliggande jordmagasinets egenskaper, samt kontakten mellan de två enheterna. I områden där berg överlagras av jord finns



grundvatten både i berget och i jordlagret. Om kontakten mellan materialen är god kan dessa magasin fungera som ett. En god kontakt förutsätter bl.a. att det finns en svaghetszon eller åtminstone någon betydande spricka, samt att bergytan inte är leromvandlad. Om kontakten med jordmagasinet begränsas av ett lager lera eller gyttja kan grundvattnet inte flöda fritt mellan magasinerna. Det kan då bildas dubbla grundvattenytor där berggrundsmagasinet grundvattennivå sänks av medan jordmagasinet är opåverkat (Berzell, 2011; Olofsson, 1994).

De ovanliggande jordmagasinens egenskaper påverkar alltså inläckagets karaktär (se Figur 3 nedan). Om en sprickzon står i kontakt med ett stort grundvattenmagasin med god genomsläpplighet, innebär det en god tillgång på vatten och ett stort, kontinuerligt inläckage. Om det ovanliggande magasinet istället består av ett tunnare moränlager under ett tjockt lertäcke är tillgången på vatten sämre, och inläckaget blir också mindre omfattande. Även om inläckageproblemet blir mindre i detta scenario, blir den potentiella omgivningspåverkan stor i och med att tillflödet av grundvatten är mindre, vilket resulterar i en större avsänkning. Om grundvattennivån i moränen sänks av kan detta även leda till att lerlagret börjar dräneras och portrycket i leran sjunker, vilket kan orsaka sättningar (Cesano et al., 2000).



Figur 3. Storleken hos ovanliggande grundvattenmagasin i jord påverkar inläckagets storlek samt grundvattenytans avsänkning. Stora magasin av sand eller grus ger stora inläckage och liten avsänkning, medan mindre magasin i t.ex. morän ger ett mindre inläckage och större avsänkning (Cesano et al., 2000).

Uppehållstiden i ett undre grundvattenmagasin med liten tillströmning kan vara mer än 100 år (Fetter, 2014). Grundvattenmagasin är dock inte ett isolerat system, även om tidsperspektivet för grundvattenavrinning är mycket längre än det för ytvatten eller nederbördsbildning. Grundvatten påverkas av klimat, nederbördsmonster och årstider, och grundvattennivån varierar därför naturligt över tid. Framför allt för små magasin kan tydliga årstidsvariationer skönjas. Grundvattennivån ökar då grundvattenbildningen är stor, dvs under perioder med kraftig eller ihållande nederbörd och låga temperaturer (liten avdunstning). Detta kan exempelvis vara under höst- och vinterregn eller snösmältning. Nivåsänkning sker i stället då grundvattenbildningen är liten eller försumbar, dvs under sommar/växstsäsongen eller då det finns tjäle i marken som hindrar infiltration. Det mönster i variationen som är karakteristiskt för ett visst område kallas grundvattenregim. Grundvattenregimen skiljer sig åt i olika delar av landet på grund av skillnader i klimat och växstsäsong. I Stockholmsområdet liknar grundvattenregimen den i södra Sverige, vilket innebär att grundvattennivån ökar under höst och vinter när nederbörds mängderna är stora och temperaturen är låg, för att sedan minska under sommaren (Eveborn et al., 2017).

I avsnitt 2.2.4 ovan beskrevs en analytisk metod för att uppskatta inläckage till en tunnel. Den drivande parametern i denna ekvation är trycknivån över tunneln, vilket innebär att en tunnel på större djup löper risk för kraftigt inläckage vid förekomst av svaghetszoner och konduktiva sprickor (Cesano et al., 2000; Gustafson, 2009). Det innebär också att grundvattenmagasinets egenskaper inte endast påverkar inläckaget genom tillgången på vatten, utan även genom att magnituden på inläckaget påverkas av att grundvattennivån och det resulterande vattentrycket ovanför tunneln varierar. Magasinens egenskaper och grundvattenregimer kan alltså tänkas påverka variationen i inläckaget på olika sätt.

### 2.3.3 Grundvattenbildning

Grundvattenbildning kan definieras som den process som leder till påfyllnad av ett grundvattenmagasin. Grundvattenbildningen kan variera stort både i tid och rum, och bildningen är beroende av flera olika faktorer i det lokala och regionala klimatet, samt de geologiska förutsättningarna (Eveborn et al., 2017).

Den hydrologiska cykeln beskriver hur vattnet på jorden rör sig och fördelas mellan atmosfären, ytvatten, grundvatten och havet. När vatten i form av nederbörd ( $P$ ) faller över markytan kommer en del att återgå direkt till atmosfären genom avdunstning och växternas transpiration. Sammantaget benämns avdunstning och transpiration som evapotranspiration ( $E$ ). En andel av den kvarvarande nederbörden infiltrerar marken och bildar mark- och grundvatten. Grundvattnet kan flöda genom landskapet, och det vatten som lämnar ett geografiskt avgränsat område benämns avrinning ( $R$ ). Avrinning kan delas upp i grundvattenavrinning ( $R_G$ ) och ytavrinning ( $R_s$ ), vilket är vatten som rinner av direkt på markytan samt i älvar och andra vattendrag. I slutändan når i princip all avrinning de stora vattendragen och havet (Eveborn et al., 2017; Gustafson, 2009).

Den hydrologiska cykeln sluts genom att det vatten som återförts till atmosfären genom evapotranspiration åter blir till regn. Då inget vatten kan försvinna eller skapas kan den hydrologiska cykeln sammanfattas med följande enkla ekvation:

$$\frac{dV}{dt} = P - E - R \quad (\text{Ekvation 4})$$

$dV/dt$  är förändringen i den totala mängden vatten som finns i olika magasin, såsom grundvatten, sjöar, snötäckan osv. Denna typ av ekvation kallas vattenbalans, och kan till exempel användas för att verifiera tillförlitligheten i hydrogeologiska modeller eller till att bedöma omgivningspåverkan från inläckaget till tunnlar (Andersson, 2019; Gustafson, 2009).

Som en del av den hydrologiska cykeln är grundvattenbildningen beroende av bland annat nederbörd och evapotranspiration. Nederbörd minus evapotranspiration brukar benämnas nettonederbörd eller effektiv nederbörd. Under sommaren är grundvattenbildningen begränsad på grund av att högre temperaturer och växtlighetens aktivitet leder till en hög evapotranspiration. SGU brukar räkna med att inga betydande mängder av grundvatten bildas under vegetationsperioden, som varierar i längd beroende på var i landet man befinner sig. I Stockholmsområdet är vegetationsperioden 190-200 dygn i snitt. Därmed sker grundvattenbildningen i Sverige framförallt under vinterhalvåret, och allra främst under höst och vår då stora nederbördsmängder och snösmältningen i kombination med låg evapotranspiration ger en stor nettonederbörd (Eveborn et al., 2017). Infiltrationen kan dock begränsas av snö och tjäle under vintern (Samuelsson, 2007). Hur mycket av nettonederbörden som utgör den faktiska grundvattenbildningen beror också på de geologiska förhållandena och markens egenskaper (Eveborn et al., 2017; Gustafson, 2009).

I regel är infiltrationsförmågan hos svenska jordar så pass god att grundvattenbildningen i marken motsvaras av den effektiva nederbörden, åtminstone över en längre tidsperiod. Det kan också finnas lokala undantag. Lera, som har en mycket låg hydraulisk konduktivitet, kan fungera som ett tätande lager över eller under mer genomsläppliga jordlager (Eveborn et al., 2017; Gustafson, 2009). I de områden där det finns ett tätande lager med lera kommer nederbörden i området att rinna av på lerytan eller ge grundvattenbildning i ytliga, öppna akviferer. Grundvattenbildningen till undre, slutna akviferer sker därför i ytterkanten av dessa och från öppna akvifersdelar, främst i höjdområden utan lertäckning.

Under typiska svenska förhållanden består ytan i höjdområden ofta av morän och berg i dagen, som också har en relativt låg hydraulisk konduktivitet och infiltrationsförmåga. Det kristallina och metamorfa berg som dominerar i detta område är mer eller mindre impermeabelt, med undantag för sprickor och svaghetszoner (Wahlgren et al., 2018). Grundvattenbildning till berg kan ske vid öppna berghällar om det finns öppna sprickor där, men grundvattenbildning till berg sker i första hand från jordmagasin i lägre belägna områden, eftersom de ofta sammanfaller med sprickor och svaghetszoner i landskapet (Cesano et al., 2000; Floren, 2015).

### *2.3.3.1 Påverkan från jordlager*

Markzonen, det vill säga den översta delen av jordlagret som inte är mättad med vatten, kan i många fall spela en avgörande roll för grundvattenbildningens storlek. Infiltrerande vatten kan uppehållas i den omättade markzonen innan det når grundvattenytan. Kapillärkrafter och växtupptag bromsar upp det sjunkande vattnet till en viss punkt, på samma sätt som en tvättsvamp kan hålla en viss mängd vatten. Den högsta halten av vatten som marken kan hålla mot gravitationen kallas fältkapacitet, och denna styrs framför allt av jordarten. Först när jordens vattenhalt överstiger fältkapaciteten kan vattnet perkolera, dvs rinna nedåt genom markzonen och bilda grundvatten. Därmed sker grundvattenbildning endast när vattenhalten i markzonen överstiger fältkapaciteten (Gustafson, 2009). För att komplicera det hela ytterligare så styrs vattnets perkolation av den vertikala hydrauliska konduktiviteten i den omättade zonen, och den varierar i sin tur med markvattenhalten, som givetvis inte är konstant i hela det omättade jordlagret. Egenskaperna och det aktuella tillståndet hos den omättade zonen kan alltså ha stor påverkan på grundvattenbildningen, och ju tjockare den omättade zonen är desto större är påverkan på grundvattenbildningen och tiden mellan ett nederbördstillfälle och perkolation (Fetter, 2014). Sweetenham et al. (2017), som studerat inläckage i en bergtunnel med hjälp av en hydrologisk modell, visade att fördröjningen mellan ett nederbördsevent och en inläckageökning ökade allra mest när ett tjockare jordlager lades in i modellen. En något mindre ökning i fördröjningen åstadkoms om permeabiliteten hos jordlagret sänktes utan att ändra dess tjocklek. Båda dessa förändringar orsakade en större fördröjningsökning än vad som åstadkoms vid ett ökat tunneldjup (25 m). Detta visar på de ovanliggande jordlagrens stora betydelse för grundvattenbildningen.

Konduktiviteten i de flesta typer av jordarter överstiger den hydrauliska konduktiviteten hos berg med en faktor 10 (Gustafson, 2009), något som gör att berget verkar som en flödesbarriär som hindrar grundvattnet från att lämna de ytliga jordlagren. Vidare är porositeten och magasineringsförmågan hos jord större än bergets, vilket tillsammans med ovan nämnda faktorer gör att grundvattenbildningen till berg i mångt och mycket styrs av de ovanliggande jordlagren. En annan viktig faktor som styr grundvattenbildningen till berg är hur kontakten mellan jord och berg ser ut, något som även påpekats i ovanstående avsnitt (Eveborn et al., 2017; Werner, 2006). Ofta är det översta lagret mer uppsprucket och genomsläppligt, vilket gynnar flödet av grundvatten från jordmagasin till berg. Förekomst av

sprickzoner i samband med (konduktiva) magasin i jord är ofta en förutsättning för ett signifikant flöde till berggrundsmagasin (Floren, 2015; Olofsson, 1994).

### *2.3.3.2 Påverkan från inläckage till tunnlar*

Tunnlar och andra berganläggningar orsakar en ökad grundvattenbildning. Tunneln fungerar som ett dräneringscentrum som, på samma sätt som ett dike eller ett dräneringsrör, har hög transmissivitet och effektivt leder bort vatten från omgivningen. Resultatet blir att grundvatten strömmar mot tunneln från alla riktningar, och därmed ändras grundvattenströmningen i både jord och berg. Utströmningsområden kan omvandlas till grundvattenbildningsområden. I och med att berget är heterogent kan man inte anta en radiell strömning mot tunneln, men det översiktliga mönstret är ändå att vatten från sprickor i anslutning till tunneln dräneras. De dränerade sprickorna kommer att ha en större förmåga att infiltrera vatten, både direkt från nederbörd som når ytliga sprickor och från överliggande jordlagermagasin. På grund av sprickors och svaghetszoners utbredning kan grundvattenbildningen öka på betydande avstånd från tunnelns sträckning (Floren, 2015).

När en större del av nederbörden infiltrerar och perkolerar till grundvattnet innebär det en ökad grundvattenbildning på bekostnad av ytavrinning och markvattenhalt. Det innebär att grundvattennivåerna inte nödvändigtvis sjunker särskilt mycket i ett längre perspektiv. Däremot kan grundvattennivån sjunka mer dramatiskt under perioder med liten nettonederbörd och grundvattenbildning, vilket innebär att grundvattennivån fluktuerar mer under ett år och att medelnivån för magasinet blir lägre (Berzell, 2011; Floren, 2015).

### *2.3.3.3 Uppskattning av grundvattenbildning*

Det är svårt att mäta eller uppskatta grundvattenbildningen av flera skäl. Dels eftersom det inte finns ett enda tydligt utlopp för grundvattnet, och att bildningen beror av ett flertal olika faktorer som nämnts ovan. Ett enkelt och grovt sätt att göra det på är att approximera grundvattenbildningen med nettonederbörden. Detta bygger på det faktum att svenska jordar överlag är så pass genomsläppliga att all nederbörd har möjlighet att infiltrera i marken, och att de viktigaste faktorerna för grundvattenbildning därmed är nederbörd och avdunstning (Eveborn et al., 2017). Det är dock en förenkling att likställa infiltrerat vatten med nettonederbörden, dels på grund av den omättade markzonens förmåga att hålla vatten mot gravitationen, men kanske framför allt för att marktäckningen kan variera stort, och att vissa marktyper såsom lera och berg har mycket låg genomsläpplighet. Det senare blir en viktigare faktor i mindre skala än regionalt och nationellt (Gustafson, 2009). Nettonederbörden motsvarar snarare den potentiella grundvattenbildningen, det vill säga den teoretiskt högsta möjliga grundvattenbildningen (Blomberg, 2015).

Förekomsten av genomsläppliga jordarter i de lager som överlagrar berg har mycket stor betydelse för grundvattenbildningen i området (Barkels & Silva Parra, 2010). I Stockholmsområdet bör detta innebära att grundvattenbildningen är mindre än den effektiva nederbörden, eftersom stora områden är täckta av lera med låg genomsläpplighet, och att nederbörden som faller på dessa områden därför bör bilda ytvattenavrinning eller åtminstone inte når de undre grundvattenmagasinen i särskilt stor utsträckning. Att uppskatta grundvattenbildningen som nettonederbörd blir därför en relativt grov och inexakt metod i detta fall.

Det finns andra sätt att uppskatta grundvattenbildningen. Eveborn et al. (2017) delar in de olika sätten att uppskatta grundvattenbildningen i tre olika kategorier baserat på vilken del av det hydrologiska kretsloppet som sätts i fokus:

1. Användning av spårämnen för att uppskatta inflödet till grundvattnet.
2. Mätning av förändringar i grundvattennivå, dvs grundvattnets respons på grundvattenbildningen.
3. Mätning av utflödet från avrinningsområdet. I detta fall används ofta ytvattendata för att uppskatta grundvattenavrinningen, eftersom det går att visa att i princip allt ytvatten härstammar från grundvatten (Gustafson, 2009).

### 2.3.4 Tunnelbyggnadsteknik och injektering

Det finns flera olika sätt att bygga tunnlar och motverka inläckage av grundvatten. Om berget är mycket dåligt och deformerat kan tunnelbormaskin och betonglining vara nödvändigt. Betonglining innebär att ett tjockt lager av betong gjuts utmed tunnelns väggar och tak för att skapa en tätning som inte kan uppnås genom enbart injektering i sprickor. Ofta används färdiggjutna betongelement i stället för platsgjuten betong för detta ändamål. Konventionell teknik med omväxlande borrar och sprängning passar för tunneldrivning i bättre berg. Vid denna typ av tunneldrivning används injektering som tätningsmetod.

Ofta bestäms injekteringens omfattning utifrån prognoser om bergkvaliteten i ett område, som i sin tur kan baseras på geologiska och geofysiska förundersökningar. Ett annat sätt att bedöma behovet av injektering är att använda sig av vattenförlustmätningar. Detta kan ge en uppskattning av bergets konduktivitet i områden och därmed behovet av tätning (Andersson, 2019). Utöver den geologiska prognosen spelar även kostnader, produktionsplanering och tidigare erfarenhet roll i bedömningen av injekteringsbehovet. Behovet för olika delar av en tunnel kategoriseras ofta enligt injekteringsklasser eller täthetsklasser, som är kopplade till injekteringstekniken och till den målkonduktivitet som eftersträvas (Berzell, 2011).

Vid förinjektering är målet att skapa en skärm av berg med tätade sprickor kring det blivande tunnelröret innan sprängning faktiskt sker. En lyckad injektering är dock beroende av ett flertal faktorer, såsom egenskaperna hos injekteringsbruket, sprickvidden hos de berörda sprickorna samt injekteringstid och det applicerade injekteringsstrycket. Sprickornas egenskaper är särskilt viktiga. Ett vanligt injekteringsmedel är cement, som ofta anges ha en inträngningsgräns på 0,1 mm (Gustafson, 2009). Det innebär att sprickor med en mindre sprickvidd än 0,1 mm kommer att förbli öppna även efter injektering. Vidare utgörs sprickor sällan av ett perfekt plan mellan två släta ytor, och variationen i form och apertur inom samma spricka orsakar svårigheter vid injekteringen, även i de fall då kemiskt fintättningsmedel används. Sammanfattningsvis innebär detta att det i princip aldrig går att tätta berget helt, framför allt i svaghetszoner där det finns både dominanta sprickor som står för en stor del av vattenflödet och sprickor med lägre genomsläpplighet i nära samband med varandra. Resultatet av injektering kan bli att flödet länkas över från de stora vattenförande sprickorna till de mindre sprickorna så att ett visst läckage kvarstår. Man har dock kunnat visa att ett fåtal konduktiva sprickor ofta står för majoriteten av genomsläppligheten, och att endast ett fåtal procent av transmissiviteten kvarstår efter att injektering har genomförts (Gustafson, 2009).

Även om för- och efterinjektering sällan tätar alla sprickor i en tunnel är det sannolikt att injekteringen åtminstone ger en betydande förändring i inläckaget jämfört med "naturliga", otätade förhållanden. Det påverkar alltså analysen av vilka faktorer som orsakar eller påverkar inläckaget. I en studie av Cesano et al. (2000) såg man ett starkt samband mellan mängden förinjektering och inläckage i en statistisk analys av olika faktors påverkan på inläckage i olika tunnelsektioner. Det sambandet skulle kunna tolkas som att zoner med sämre berg och

inläckageförhållanden har tätats i större utsträckning. Det gör det dock svårt att utvärdera skillnaden mellan olika typer av svaghetszoner och sprickor.

Efter att en tunnel sprängts ut kan de faktiska geologiska strukturerna och inläckagepunkterna identifieras genom en geologisk kartering. Detta ger en bättre möjlighet att bedöma samband mellan inläckage och diverse geologiska strukturer, förinjekteringen till trots. Ett problem är dock att karteringen ofta utförs utifrån ett hållfasthetsperspektiv och inte specifikt för att kartera inläckage. Vidare är det endast de mest betydande sprickorna och svaghetszonerna karteras (Cesano et al., 2000), vilket ger en ofullständig bild av situationen.

## 3 Fallstudie Förbifart Stockholm

I detta kapitel ges en översikt över de inläckageuppskattningar som gjorts inom projektet Förbifart Stockholm, samt en introduktion till de tunnelavsnitt som valts ut för närmare analys i detta arbete.

### 3.1 Om Förbifart Stockholm



Figur 4. Översikt av Förbifart Stockholms sträckning (Tilly, 2001). De svarta rektanglarna markerar de områden som studerats i detta arbete,

Förbifart Stockholm är ett stort infrastrukturprojekt där en ny sträckning av E4 byggs runt Stockholm. Syftet med projektet är att minska trycket på nuvarande sträckning (Essingeleden) samt minska sårbarheten hos Stockholms transportsystem. Projektet har delats in i fyra

delområden, varav två är aktuella i denna studie (Mälaröarna samt Lambarfjärden-Hästa klack). Drivningen av Förbifart Stockholms tunnlar har pågått sedan 2016, och i dagsläget har nästan 90 % av tunneln sprängts ut (Forsberg et al., 2022). Hela tunnelsträckningen syns i Figur 4 ovan.

Stockholmsområdet består geologiskt av ett lapptäcke av lertäckta svackor och höjdområden med tunna moräntäckten och berg i dagen. De större grundvattenmagasinen finns i dalgångarna under lerlagret, som fungerar som en flödesbarriär. Grundvattenbildningen till dessa slutna grundvattenmagasin sker främst i höjdområdena, där nederbörden kan infiltrera i moränen (eller i bergsprickor) och därifrån flöda horisontellt eller subhorisontellt mot det undre magasinet (Eveborn et al., 2017; Wahlgren et al., 2018).

Tunnlarna går till största del i berg under grundvattenytan, vilket innebär att det är en vattenverksamhet som kräver tillstånd enligt Miljöbalkens (1998:808) 11 kap. Till underlaget för tillståndsansökan hör bl.a. en Teknisk beskrivning, en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) samt PM Hydrogeologi. Det är den sistnämnda som är mest relevant för detta arbete, då den redogör för förväntade effekter av den planerade vattenverksamheten och hur dessa uppskattningar har tagits fram (Berzell, 2011). Uppskattningar av det förväntade inläckaget ligger till grund för de beslutade begränsningarna i miljötillståndet. Hur stort inläckage som bedöms acceptabelt beror på hur grundvattennivåer i berg- och jordmagasin påverkas och vad detta får för konsekvenser för grundvattenberoende ekosystem och risken för sättningar hos bebyggelse i lerområden (Berzell, 2011).

### **3.1.1 Modellering av inläckage**

Till PM Hydrogeologi finns en bilaga som beskriver beräkningarna som gjorts för att uppskatta inläckage och grundvattenpåverkan för Förbifart Stockholm. Vattenbalanser har använts för att bedöma påverkan på grundvattnet från tunnarnas dränering. Inläckage och påverkansområdets utbredning har uppskattats med hjälp av modellering. I modelleringen har man valt att se hela bergmassan som ett vattenförande medium, och ansatt konduktiviteten för berget som en sammanvägning av de konduktiviteter som uppskattats för olika delområden. En central del i förarbetet för modelleringen har varit att uppskatta den hydrauliska konduktiviteten för de olika delområdena, eftersom det är en av de viktigaste faktorerna som styr inläckaget. Underlaget består av vattenförlustmätningar från kärnborrhål, uppgifter från SGUs Brunnsregister samt den regionala konduktiviteten för olika bergarter enligt den hydrogeologiska kartan för Stockholm (Berzell, 2011; Onkenhout, 2011). Enligt beräkningsbilagan har man använt medianvärden för konduktiviteten i modelleringen (Onkenhout, 2011).

Modelleringen har genomförts med tvärsnittsmodeller för 100-meters sektioner längs hela sträckan, med särskilda 3D modeller som komplement vid trafikplatser, luftbytesstationer osv. Det finns tre varianter av tvärsnittsmodellen som använts för olika sektioner, beroende på de övergripande egenskaperna. Basmodellen består av ett friktionsjordlager över ett lager som ska motsvara ytsprickigt, mer konduktivt berg. Därunder består modellen av urberg med låg konduktivitet. Tunnelrören modelleras med en tätad zon runt omkring. Utöver basmodellen, som ska motsvara t.ex. grundvattenbildningsområden med morän, har man använt en lerlagermodell som motsvarar en bred, lerfylld dalgång. Där har ett lager med lägre konduktivitet inkluderats i jordlagret. För att ta hänsyn till områden med större svaghetszoner finns en sprickmodell där ett vertikalt plan med högre konduktivitet har lagts in vinkelrätt mot tunneln, från jordlagren till botten av modellen (Onkenhout, 2011). Grundvattenbildningen i modellen styrs av infiltrationsparametrar, inte nettonederbörden. Infiltrationsparametrarna har satts till 210 mm/år för berg och morän, och 175 mm/år för lerjordar (Berzell, 2011).



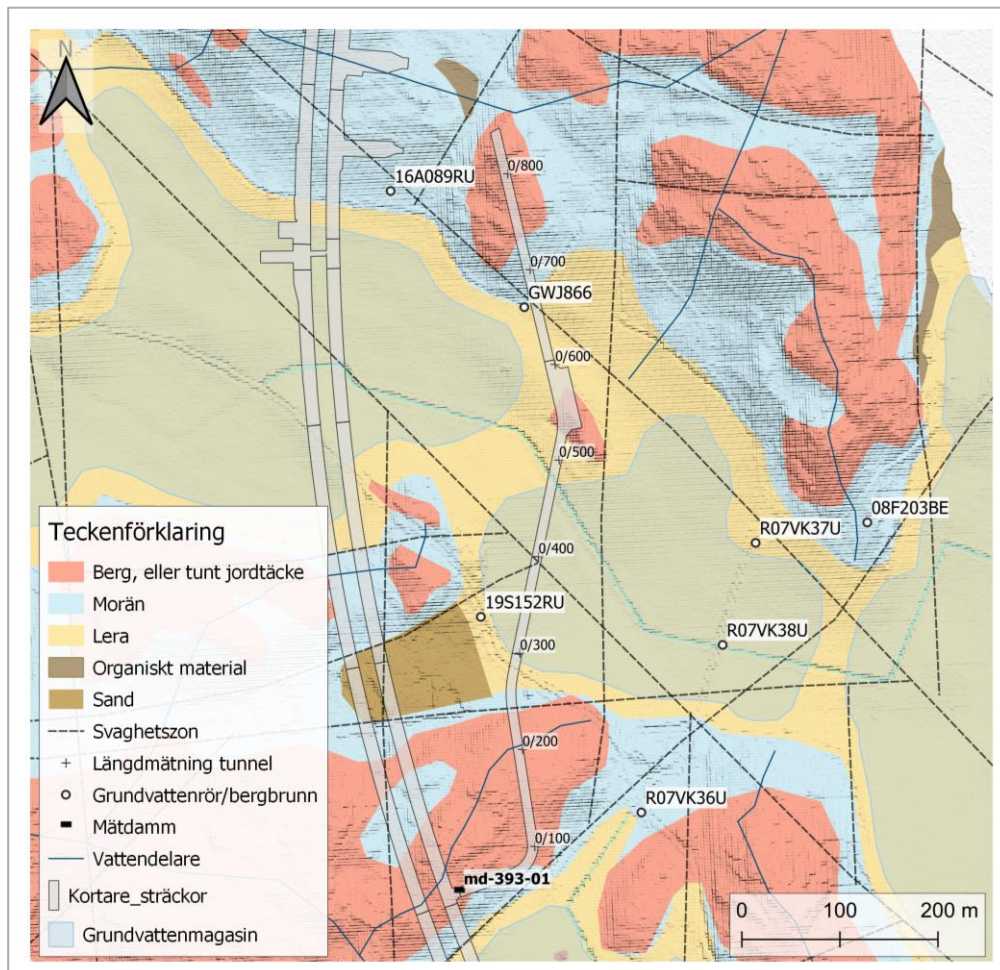
Modellresultaten har jämförts med resultat från analytiska ekvationer för beräkning av inläckage. Resultatens överensstämmelse med ekvationer likt Ekvation 2 från Gustafson (2009) är god (Onkenhout, 2011).

## 3.2 Utvalda tunnelsträckor

I detta arbete har tre kortare tunnelavsnitt valts ut för analys, och i detta avsnitt presenteras bakgrundsinformation om dessa tunnelsträckor. Tunnelavsnittens geografiska placering går att se i Figur 4 ovan. Mer information om valet av tunnelsträckor återfinns i avsnitt 4.2.1, och en fullständig lista över valda mätpunkter finns i Bilaga A.

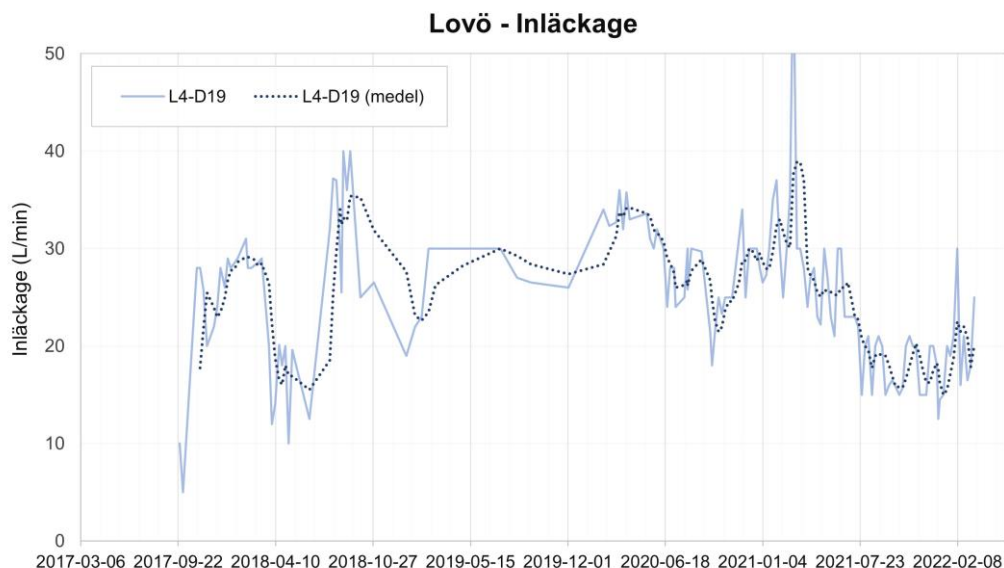
### 3.2.1 Arbetstunnel norra Lovön (AT 393)

Det första tunnelavsnittet är en arbetstunnel på norra Lovön med benämning AT 393. Tunnelsträckan går från ett höjdområde i norr med berg och morän, under en dalgång med flera svaghetszoner och slutligen in under höjdområdet på andra sidan dalgången (se kartan i Figur 5).



Figur 5. Kartan visar arbetstunneln på Lovö samt aktuella grundvattenrör och bergbrunnar som använts för analys. Längst ner i figuren, vid kopplingen till huvudtunnlarna, finns mätdamm md-393-01. Grundvattenmagasinen är de gröna markeringarna ovanpå leran, som är gul i kartan.

Tunneln har drivits från ytan och ner till nivån för huvudtunnlarna ca 90 m under markytan. Drivningen är genomförd under 2016, 2017 och första delen av 2018, varefter huvudtunneln började drivas både norrut och söderut från tunnelpåslaget. Det har inte genomförts någon efterinjektering på sträckan. Mätning av inläckage i arbetstunneln har dels skett vid stoffen (dvs tunnelfronten) under byggtiden, samt i två mätdammar (md-393-01 och md-393-02). Av dessa är endast den nedre (md-393-01) fortfarande i bruk. Bearbetad inläckagedata från alla tre mätpunkter har slagits samman och anges för hela delsträckan som arbetstunneln utgör (L4-D19), se Figur 6 nedan. Mätningarna är gjorda med ungefär en veckas intervall, med undantag för tillfällena då exempelvis arbeten i tunnarna har förhindrat mätning. Mätningar genomförs alltså endast då produktionen inte är igång. Inläckaget verkar öka under det första året för att sedan nå någon form av dynamisk jämvikt från och med 2019. Enligt en kvartalsrapport för december 2021 till februari 2022 överstiger inläckaget på sträckan inte budgeterat värde enligt miljötillståndet (Forsberg et al., 2022), men det pendlar upp och ner mer eller mindre säsongvis under hela mättiden. Under 2019 minskar mätfrekvensen, vilket gör att det är svårt att utläsa mönster i tidsserien under denna tid. Svängningen verkar dock kvarstå även efter denna period. Eventuellt är inläckaget på väg att plana ut, men det kan också bara handla om en torr vårvinter 2022.

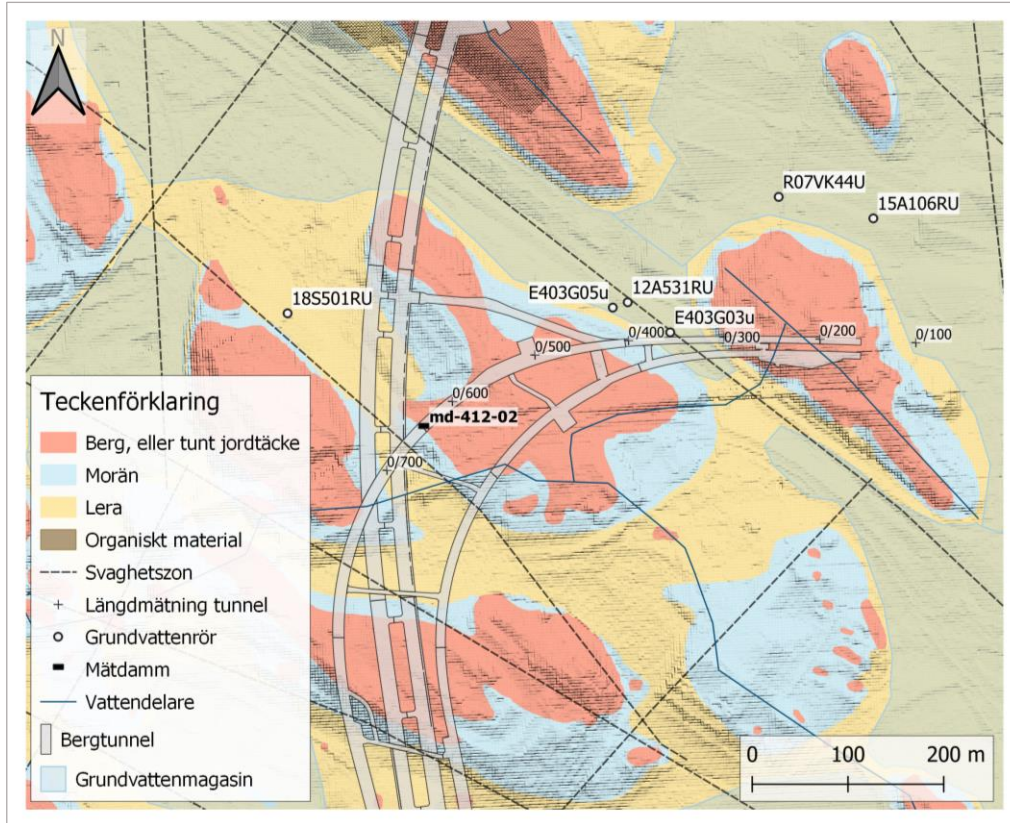


Figur 6. Uppmätt inläckage för delsträcka L4-D19 på Lovö. Den prickade linjen är ett glidande medelvärde och syftar till att belysa trender hos data.

Sex grundvattenrör och en bergbrunn (08F203BE) i området har valts ut för att ge information om grundvattennivån. Mätpunkternas placering presenteras i Figur 5. Grundvattenrören mäter grundvattennivån i det undre jordmagasinet, medan bergbrunnen mäter grundvattennivån i själva berget. Grundvattenregimen i ett av rören, R07VK36U, är mer eller mindre oförändrad innan och efter tunnelbygget, och uppvisar en årstidsvariation med toppar under tidig vår. I övriga grundvattenrör har lägstanivån och därmed den genomsnittliga grundvattennivån sänkts efter tunnelbygget. Vissa rör blir till och med helt torrlagda på sommaren (16A089RU, GWJ866, 19S152RU). Skillnaden i grundvattenregimen verkar dock vara störst från och med 2018, då även huvudtunneln börjat byggas ut.

### 3.2.2 Ramptunnel Johannelund (RT 412)

Den andra tunnelsträckan är en ramptunnel, med benämning RT 412. Det är de första 650 m öster om mätdamm md-412-02 som har undersökts, och inte de djupare delarna över och bortom huvudtunnlarna (se Figur 7 nedan). Denna tunnel går till största del under höjdområden, men passerar även en smal dalgång med lera där det finns en svaghetszon.

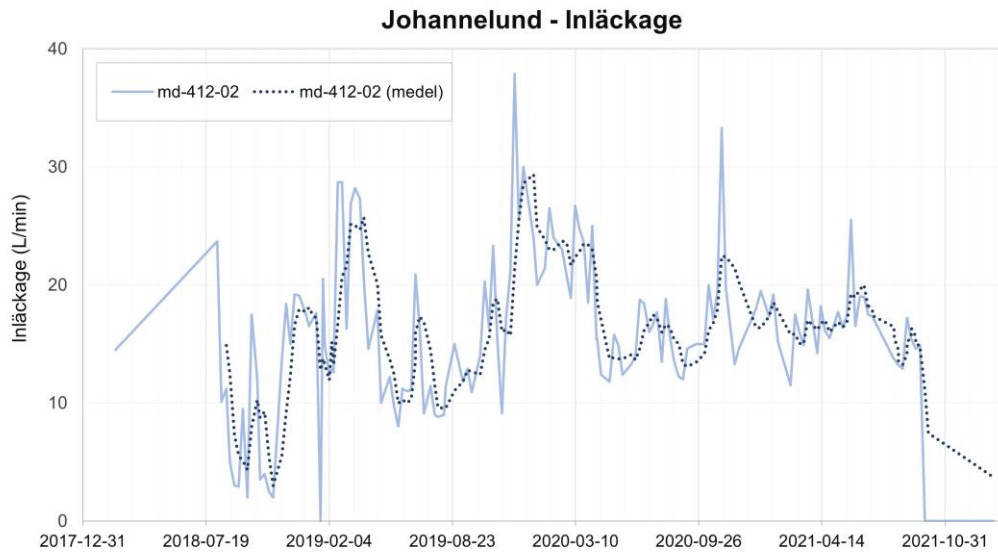


Figur 7. Kartan visar ramptunneln i Johannelund samt aktuella grundvattenrör som använts för analys. Strax innan ramptunneln passerar huvudtunnlarna finns mätdamm md-412-02.

Tunneln har drivits från ytan mot huvudtunneln under 2016 och 2017. Den allra sista delen av sträckan fram till mätdammen drevs ut i början av 2018, samtidigt som de närliggande huvudtunnlarna drevs ut från en arbetstunnel som ansluter till ramptunneln drygt 400 m från ramptunnelns början (längdmätning 0/400). Ramptunnelns djup går från ca 5 till 25 meter under markytan, vilket innebär att detta är en relativt ytlig tunnel.

Regelbunden inläckagemätning i den aktuella mätdammen (md-412-02) påbörjades först i augusti 2018, ca ett halvår efter att den byggts. Det har funnits ytterligare två mätdammar på sträckan i början av 2018, men dessa har sedan rivits och datan från dem anses inte tillräckligt ostörd för att kunna användas. Mätningarna i md-412-02, som fortfarande är aktiv, har gjorts ungefär en gång per vecka men ibland mer sällan än så. Inläckaget för hela delområdet Johannelund, där båda ramptunnlarna och huvudtunnlarna i området ingår, överstiger för närvarande det budgeterade inläckaget. Inläckaget på den sträcka som undersöks i denna studie utgör dock ca en tiondel av det totala inläckaget som uppmätts inom delområdet i samband med den senaste kvartalsrapporten (Forssberg et al., 2022). Inläckaget för den aktuella sträckan presenteras i Figur 8 nedan. Inläckaget ser ut att uppvisa en ökande trend under 2018 och 2019, och under denna period syns en viss säsongsmässig variation i inläckageflödet. Från och med 2021 verkar inläckaget plana ut till en relativt stabil nivå. Det finns fortfarande enskilda toppar (t.ex. vid 2020-11-02), men i övrigt ligger inläckaget stabilt mellan 13 och 20 l/min. Det är svårt att säga varför inläckaget planar ut, men eftersom det inte

verkar ha gjorts någon efterinjektering på sträckan vid denna tidpunkt kan det t.ex. handla om påverkan från andra närliggande tunnlar, en ändrad skin-effekt eller liknande.



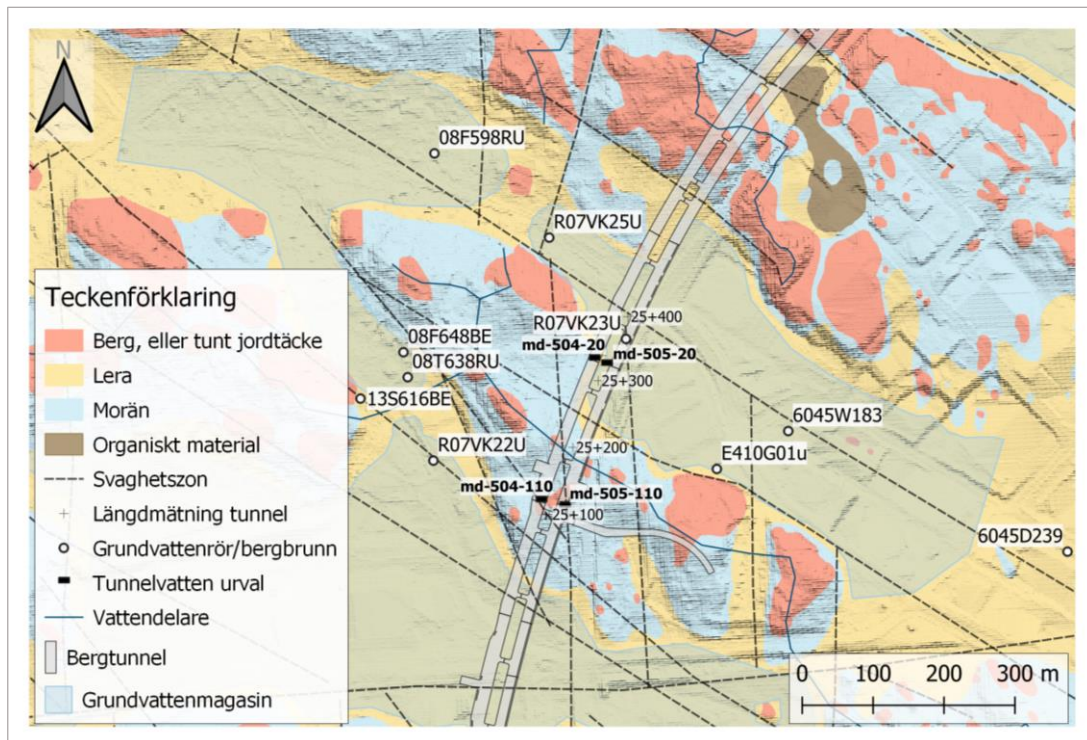
Figur 8. Uppmätt inläckage för mätdamm md-412-02 i Johannelund. Den prickade linjen är ett glidande medelvärde och syftar till att belysa trender hos data.

Sex grundvattenrör har valts ut för analys i detta område (se placering i Figur 7 ovan). För de rör vars mätningar påbörjades innan tunnlar började byggas syns en tydlig avsänkning av grundvattennivån över hela året efter att tunneldrivningen påbörjades. Ett rör (E403G05u) står i princip helt torrt från och med 2018 och fram till 2021. Även 12A531RU torkar ut ibland under sommarmånaderna. Alla rör förutom 18S501RU verkar få en mer uttalad årstidsvariation efter tunnelbygget.

Strax norr om tunnelsträckan finns två anläggningar för skyddsinfiltation (ej markerade i kartan ovan). Aktiv infiltation påbörjas i början av 2021, och från denna tidpunkt ökar grundvattennivån till en mer eller mindre naturlig nivå för de flesta grundvattenrör, och fluktuationerna i grundvattennivån är mindre uttalade. Detta sammanfaller ungefär med tidpunkten då inläckaget planar ut, och skulle därmed kunna vara en anledning till att även inläckaget inte uppvisar tydliga fluktuationer efter denna tidpunkt.

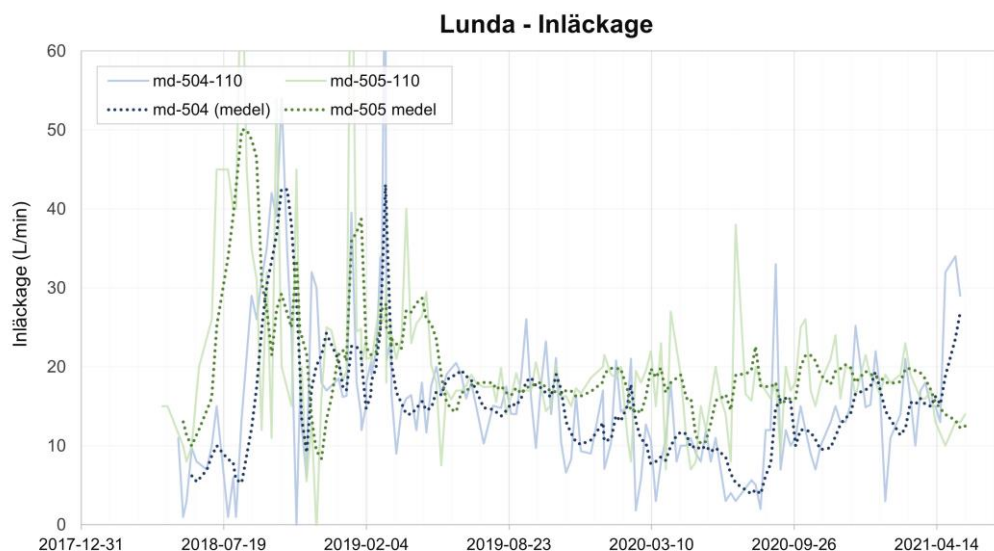
### 3.2.3 Huvudtunnlar Lunda (HT 504 & HT 505)

Den tredje och sista sträckan består av två parallella huvudtunnelrör i Lunda med benämningen HT 504 och HT 505. Det finns flera mätdammar på sträckan, och det är endast den sträcka på ca 300 m som ligger mellan de nedersta två mätdammarna som undersökts i denna studie (se Figur 9 nedan). Tunnelavsnittet börjar under ett höjdområde som till största del är täckt av morän, och de sista 100 m finns under en lertäckt dalgång.



Figur 9. Kartan visar huvudtunnlarna vid Lunda samt aktuella grundvattenrör och bergbrunnar som använts för analys. Den undersökta sträckan finns mellan mätdammarna md-504-110 och md-505-110 (vid 25+100) och md-504-20 och md-505-20 (mellan 25+300 och 25+400 i kartan).

Dessa tunnlar är drivna i uppförsbacke mot ett tunnelpåslag vid ytan ca 1 km norrut. Tunneldrivningen genomfördes under 2018. Den utvalda tunnelsträckan ligger på drygt 20-30 m djup, och avgränsas av mätdammarna md-504-110/md-505-110 och md-504-20/md-505-20. Inläckagemätningar finns från april 2018 för -110 dammarna, medan mätningen i -20 dammarna påbörjas i slutet av samma år. Dammarna revs i mitten av 2021 och det finns alltså inga mätningar efter denna tidpunkt. Vid den sista mätningen låg inläckaget strax under begränsningsvärdet och det budgeterade inläckaget (för hela kontrollområdet som sträcker sig till tunnelpåslaget vid ytan) (Forssberg et al., 2022). För båda tunnelrören är det mycket kraftiga fluktuationer och störningar i inläckagemätningarna det första året, fram till första delen av 2019 (se Figur 10 nedan). Detta är troligtvis tidpunkten då efterinjekteringar har börjat genomföras i tunneln. Ingen information om tidpunkten för efterinjektering har erhållits för detta arbete, men det är bekräftat att hela sträckan är efterinjekterad när denna studie genomförs. Efter 2018 försvinner mycket av störningarna, och för HT 505 kan i princip ingen säsongsbunden variation skönjas, förutom en liten dipp under sommaren 2020. För HT 504 verkar det eventuellt finnas ett säsongsmönster även efter 2019.



Figur 10. Uppmätt inläckage för Lunda. De presenterade värdena motsvarar inläckaget i mätdammarna md-504-110 och md-505-110 efter att inläckaget från md-504-20 och md-505-20 subtraherats. De prickade linjerna är glidande medelvärden och syftar till att belysa trender hos data.

I Lunda valdes åtta grundvattenrör och två bergbrunnar (08F648BE och 13S616BE) ut för analys (se Figur 9 ovan). Att ett större antal rör valdes ut beror bland annat på geologin i området, samt att flera av rören har mycket korta dataserier. För i princip alla dessa rör kan en säsongsbunden variation observeras, och denna variation fanns redan innan tunnlarna drevs ut. Amplituden på svängningarna verkar ha ökat sedan tunnlarna drevs, och lägstanivån som inträffar på somrarna har sjunkit.

Enligt dokumentationen för Förbifart Stockholm (Berzell, 2011) finns det två olika grundvattenmagasin i dalgången som tunnelsträckan korsar. Tunneln går framför allt under det ena magasinet (Järva 3), men det är främst i det andra magasinet (Järva 9) som vissa grundvattenrör periodvis står torra. Grundvattenrör R07VK23U har dock också markerats som torr vid enstaka tillfällen under kortare perioder sedan tunneln drevs ut.

# 4 Metodik

Arbetet med denna rapport har bestått av två huvudsakliga delar: litteraturstudie och analys av data. De två delmomenten beskrivs närmare i avsnitten nedan.

## 4.1 Litteraturstudie

Syftet med litteraturstudien var i första hand att söka förklaringsmodeller för det inläckagemönster som observerats under drivningen av Förbifart Stockholm. Litteraturstudiens syfte var också att samla information om relevanta koncept och processer, såsom grundvatten i berg, grundvattenbildning, tunneldrivning och inläckage.

Litteraturstudien utgick i första hand från dokumentation från projektet Förbifart Stockholm samt grundläggande litteratur om hydrogeologi. Detta material kompletterades med allmänna och iterativa sökningar på inläckage, tunnelbyggen, Förbifart Stockholm och grundvattenbildning.

En mer systematisk kompletterande litteraturgenomgång genomfördes också, med huvudsyftet att leta ytterligare förklaringsmodeller. Databasen LUBSearch samt Google Scholar användes för att hitta litteratur med sökorden grundvatten, inläckage och grundvattenbildning, samt de engelska översättningarna av dessa ord (rock tunnel, leakage, recharge).

## 4.2 Dataanalys

Målet med dataanalysen är att påvisa ett samband mellan variationer i inläckage och variationer i grundvattennivå och grundvattenbildning, för att utifrån det kunna diskutera de olika förklaringsmodellernas relevans. Som ett mått på direkt grundvattenbildning, som skulle kunna kopplas till förklaringsmodell 2 (se avsnitt 1.1.1), användes två olika uppskattningar: nettonederbörd samt ändring av grundvattennivån i två referensrör. För att kunna utvärdera förklaringsmodell 3 jämfördes inläckaget med den uppmätta grundvattennivån i ett antal grundvattenrör på olika avstånd från utvalda tunnelsträckor.

Analysmetoderna utvecklades iterativt under arbetets gång, vilket är anledningen till att de finns vissa skillnader i hur olika data behandlades, t.ex. med avseende på glidande medelvärden etc.

### 4.2.1 Urval av data

Data för inläckage och grundvattennivåer har hämtats ur Trafikverkets databas TMO. Nederbördsdata och medeltemperatur har hämtats från SMHI (mätare vid Observatoriekullen respektive Bromma i Stockholm). Referensrör för grundvattennivå för uppskattning av grundvattenbildning valdes ut av Anders Strandanger (personlig kommunikation, 2022, 2

maj). Det ena referensröret finns på södra Lovön (*Lovön\_1*) och det andra på Vaxholm i Stockholms skärgård (*Vaxholm\_12*).

Inläckagedata har plockats ut för utvalda, avgränsade sträckor längs förbifarten. Sträckorna är valda i samråd med Anders Strandanger. De utvalda avsnitten (se avsnitt 3.2 ovan) valdes dels baserat på observerade fluktuationer i inläckage, men också utifrån mätseriernas kvalitet och längd. Mätserierna kan påverkas av allt från mänskliga fel vid mätningen till borrhingsarbeten, sprängningar, injekteringsaktiviteter etc i den aktuella tunneln och i andra närliggande tunnlar, och målet var att välja tunnelavsnitt och mätningar med så lite störningar som möjligt.

Data om grundvattennivåer hämtades från grundvattenrör i jordmagasin samt grundvattennivåer i bergvärmebrunnar. Mätpunkterna har valts ut utifrån närhet till de aktuella tunnelavsnitten och kvaliteten på dataserien. Med hjälp av geologiska kartor och material från förundersökningar har brunnar också sällats ut med hänsyn till geologiska strukturer och uppskattningar om grundvattenmagasinens utsträckning. Till exempel har brunnar på motsatt sida av en antagen grundvattendelare valts bort, eftersom det är mindre sannolikt att dessa påverkas direkt av dränering till tunneln.

För att kunna skatta nettonederbörden från regn- och temperaturdata behövs en uppskattning av avdunstningen. En enkel empirisk ekvation för att beräkna avdunstningen är Ekvation 5 nedan (Rodhe et al., 2006). Nettonederbörden beräknades utifrån uppmätt dygnsnederbörd samt den beräknade avdunstningen per dygn.

$$E = B * T_{medel} \quad (\text{Ekvation 5})$$

$$B = 0,19 * (1 + 0,5 * \sin \left( 2 * \pi * \frac{D + 45}{365} - \frac{\pi}{2} \right))$$

E är avdunstningen under ett dygn i mm,  $T_{medel}$  [ $^{\circ}$  C] är luftens medeltemperatur för det aktuella dygnet, B är en proportionalitetsfaktor och D är dagen på året (dvs en siffra mellan 1 och 366). Är temperaturen  $<0$  blir avdunstningen 0 mm (Rodhe et al., 2006).

#### 4.2.2 Visuella bedömningar av samband mellan data

Analysen av data inleddes med en visuell jämförelse av tidsserierna. Inläckaget för varje område jämfördes med grundvattennivåer i de utvalda grundvattenrören, med den effektiva nederbörden, samt med nivåändringar hos referensrören. Syftet var att skaffa en översikt av hur fluktuationerna i inläckaget matchade fluktuationer hos grundvattennivå eller grundvattenbildning i tid. Inläckageförändringarnas timing jämfört med de andra faktorerna kan antas ge någon form av indikation om sambandets natur.

Majoriteten av tidsserierna för grundvattennivåer lämnades obehandlade i figurerna. För vissa grundvattenrör fanns dock ett antal mätpunkter utan värde där det antingen inte gått att mäta pga hinder eller att röret stod torrt. Dessa visas som avbrott i figurerna som presenteras i avsnitt 5.2.2.

För att illustrera tydligare trender beräknades 10- samt 30-dagars glidande medelvärden för nettonederbörden. Utifrån grundvattennivån i de två referensrören (*Lovön\_1* och *Vaxholm\_12*) beräknades nivåändringen per dygn, vilket gav en ny tidsserie. För att illustrera tydligare trender i datan beräknades ett 7-dagars medelvärde för nivåförändringen.



### 4.2.3 Regressionsanalys

Vid linjär regression utvärderas styrkan av sambandet mellan två variabler genom att en linjär ekvation ansätts till datan. Ekvationen ansätts med minsta kvadratmetoden. Regression kan också genomföras med icke-linjära ekvationer. Detta förutsätter dock kunskap om sambandet mellan beroende och oberoende variabler för att en korrekt ekvation ska kunna ansättas (Cesano et al., 2000). Eftersom någon sådan kunskap inte finns för de samband som ska undersökas har linjär regression använts. Den linjära regressionen kan åtminstone påvisa huruvida inläckaget ökar med t.ex. en ökande grundvattennivå eller inte.

De regressionsparametrar som bedömts relevanta för detta arbete är R<sup>2</sup> värdet och korrelationskoefficienten som är associerad med denna, samt p-värdet för lutningskoefficienten i den linjära ekvationen. p-värdet är ett mått på sambandets statistiska signifikans, eller egentligen på sannolikheten att det inte finns något samband mellan de två parametrarna som undersöks. Om p-värdet är under 0.05 tolkas det som att det finns ett samband mellan variablerna med 95 % konfidensgrad (Vännman & Dunkels, 2002). I vissa studier används p-värdet som ett mått på sambandets styrka, där en högre konfidensgrad ses som ett starkare samband (Cesano et al., 2000). I detta arbete används p-värdet för att avgöra huruvida det finns ett statistiskt signifikant samband mellan de utvärderade parametrarna.

Det finns ett flertal korrelationskoefficienter med olika användningsområden. Excels inbyggda analysverktyg, som används för denna studie, använder sig av Pearsons linjära korrelationskoefficient. Korrelationskoefficienten är ett mått på styrkan i sambandet mellan två variabler och anges med ett värde mellan 0 och 1, där 1 motsvarar en perfekt korrelation (Vännman & Dunkels, 2002). Heterogeniteten hos grundvattensystem i berg gör dock att det kan finnas en stor spridning i data och att den här typen av generaliserade variabler sällan ger särskilt höga korrelationskoefficienter. I tolkningen måste man därför ta hänsyn till detta. Hänsyn måste även tas till att inläckage till bergtunnlar är beroende av ett flertal faktorer. Av dessa anledningar kan korrelationskoefficienter kring 0,5 betraktas som höga (Cesano et al., 2000; Holmøy & Nilsen, 2014).

R<sup>2</sup>-värdet för ett samband är kvadraten av korrelationskoefficienten, och är ett vanligt mått för ”goodness-of-fit”. Ett R<sup>2</sup>-värde på 0.8, dvs 80 %, tolkas som att 80 % av variationen hos den beroende variabeln kan förklaras av variationen hos den aktuella oberoende variabeln (Cameron, 2009).

#### 4.2.3.1 Databehandling

För att kunna jämföra dataserierna behövde grundvattennivåer och grundvattenbildningsuppskattningar matchas med inläckagevärden som uppmätts vid samma tidpunkt. Detta gjordes genom att söka efter matchande datum med Excels VLOOKUP funktion. För nettonederbörden och nivåändringen i referensrör matchades värdena dygnsvis. På grund av den glesare mätfrekvensen fick grundvattennivåerna i stället matchas med inläckage som uppmätts samma vecka. I enstaka fall, när inläckage och grundvattennivåer inte mätts samma vecka, matchades inläckagevärdena med grundvattennivån som uppmätts veckan innan. Detta bygger på ett antagande om att det finns en viss fördröjning mellan nederbörd och att vattnet når ett grundvattenmagasin eller en tunnel, där det orsakar inläckage.

De datapunkter där inläckagedata, grundvattennivå eller grundvattenbildning saknades togs bort från analysen.

#### 4.2.3.2 Analys

De olika variablerna (grundvattennivå, nettonederbörd, ändring i grundvattennivå) plottades mot de matchade inläckagevärdena i spridningsdiagram, och en linjär trendlinje ansattes med Excels inbyggda verktyg för grafer.

Detaljerade regressionsparametrar (R<sup>2</sup>-värde, korrelationskoefficient samt p-värdet för lutningskoefficienten) beräknades med Excels Data Analysis-verktyg. För en av de utvalda tunnelsträckorna (Johannelund) genomfördes även en multipel regressionsanalys med både grundvattennivå och de två uppskattningarna av grundvattenbildning (nettonederbörd respektive nivåändring i referensrör) som oberoende variabler. Värden på regressionsparametrarna beräknades då för alla utvalda grundvattenrör kombinerat med en grundvattenbildningsuppskattning i taget (10-dagars medelvärde för nettonederbörden och *Vaxholm\_12* som referensrör).

Med hjälp av Data Analysis-verktyget framställdes även residualdiagram. Residualerna är skillnaden mellan det uppmätta värdet och det värde som beräknats med den ansatta ekvationen, och kan studeras för att upptäcka eventuella kvarvarande samband när man har tagit hänsyn till en oberoende variabel. Residualerna representerar alltså den delen av variationen i data som inte förklaras av det antagna sambandet.

#### 4.2.4 Korskorrelation

Korskorrelation är ett annat mått på hur två oberoende tidserier är korrelerade med varandra. I detta arbete genomfördes beräkningarna med Matlabs funktion *xcorr*. *Xcorr* ger icke-normaliserade värden på korrelationskoefficienten, om inte normalisering aktivt väljs till. De icke-normaliserade värdena blir beroende av storleken på mätvärdena i tidsserierna (MathWorks, u.å.). Värdena normaliserades med kommandot 'coeff', vilket innebär att autokorrelationen i en tidsserie utan förskjutning är 1.

Syftet med att undersöka korskorrelationen var dels för att få ett ytterligare mått på sambandet mellan inläckagedatan och övriga tidsserier, samt att undersöka sambandets eventuella förskjutning i tiden. I beräkningarna användes den matchade data som tagits fram för regressionsanalysen (se avsnitt 4.2.3.1 ovan). Sambandet utan förskjutning kunde beräknas för alla tidsserier genom att sätta maxförskjutningen till noll. För att kunna förskjuta datan behöver den ha en jämn mätfrekvens. Detta stämde dessvärre inte för majoriteten av tidsserierna, vilket gjorde att en komplett korskorrelationsanalys inte var möjlig.

#### 4.2.5 Analytisk formel

Syftet med detta examensarbete är att påvisa och försöka förklara ett samband mellan grundvattennivå, grundvattenbildning och variationer i inläckaget till tunnarna. En motivering för denna studie är att befintliga metoder för att uppskatta inläckage inte kan förklara de inläckagemängder och variationer som observerats i vissa tunnlar inom projekt Förbifart Stockholm. En sådan befintlig metod är att använda Ekvation 2 från Gustafson (2009) (se avsnitt 2.2.4 ovan). En motsvarande ekvation har använts för att verifiera resultaten från de numeriska modellerna som använts i PM Hydrogeologi för Förbifart Stockholm (Onkenhout, 2011).

Det finns även en förenklad, linjär version av Gustafsons ekvation, se Ekvation 6.

$$Q_{inj} = 2\pi K_{inj}HL \quad (\text{Ekvation 6})$$

I den ursprungliga problemformuleringen för detta examensarbete konstaterades det att den linjära ekvationen ovan inte kan förklara den variation som observerats. Den icke-linjära ekvationens (Ekvation 2) giltighet hade dock inte verifierats med beräkningar. För att göra detta ansattes värden på de olika parametrarna utifrån planeringsdokument såsom PM Hydrogeologi och dess beräkningsbilaga (Berzell, 2011; Onkenhout, 2011), samt Ingenjörsgelogiska prognoser som tillhandahölls av Trafikverket. I Bilaga D presenteras de värden som ansattes vid beräkningarna, samt resultatet av dessa beräkningar. Beräkningarna bekräftar att inläckageökningen vid en höjd grundvattennivå enligt Ekvation 2 inte motsvarar den ökning i inläckage som faktiskt har uppmätts för de utvalda tunnelavsnitten.

# 5 Resultat och analys

I detta avsnitt redovisas först resultat från litteraturstudien. Därefter presenteras resultat, samt analys och bearbetningar av dessa, från de utvalda sträckorna av Förbifart Stockholm. Analysen inleds med en översikt och jämförelse av de olika tidsserierna. Därefter presenteras regressionsanalys och residualer, samt resultatet av korskorrelationsanalysen. Kapitlet avslutas med en genomgång av geologisk information från de olika områdena, samt geologins kopplingar till den data som analyserats i de tidigare avsnitten. I detta avsnitt kommenteras och tolkas resultaten löpande inom varje avsnitt. En mer ingående diskussion följer sedan i Kapitel 6.

## 5.1 Litteraturstudie

I detta avsnitt presenteras resultat av litteraturstudien, både gällande teoretiska förklaringsmodeller och mer generella resultat.

### 5.1.1 Förklaringsmodeller

Ett av de främsta syftena med litteraturstudien i detta arbete var att hitta möjliga förklaringsmodeller till de samband som observerats under drivningen av Förbifart Stockholm. Överlag verkar det inte ha gjorts några studier som direkt behandlade de mekanismer som ligger bakom sambandet mellan grundvattenbildning och inläckage. Framför allt finns få studier om förklaringsmodeller och geologiska orsaker till samband mellan olika parametrar och inläckage. Det har alltså inte gått att hitta några ytterligare förslag på förklaringsmodeller i litteraturen, och därmed har inläckaget på de utvalda tunnelavsnitten längs Förbifart Stockholm framför allt utvärderats utifrån de förklaringsmodeller som föreslagits av Trafikverket (se avsnitt 1.1.1).

### 5.1.2 Tidigare studier

Det har alltså inte gått att hitta några ytterligare förslag på förklaringsmodeller i litteraturen. Det har däremot gjorts en mängd studier om inläckage i bergtunnlar, hur inläckaget kan uppskattas och modelleras, samt vilken omgivningspåverkan som kan väntas från tunnlar och andra bergstrukturer, dvs hur inläckage påverkar grundvattenbildning och grundvattennivåer. I detta avsnitt sammanfattas resultat från några sådana studier.

En studie som faktiskt undersökt olika parametrars effekt på inläckage är gjord av Cesano et al. (2000). I studien undersöks olika parametrars statistiska relevans som en påverkansfaktor för inläckage. Man använder sig inte av direkta mätningar av inläckageflöden, utan av kvalitativa uppskattningar som gjorts under den geologiska karteringen av tunneln. Under karteringen har man noterat antal fall av inläckage på en sträcka samt klassat inläckaget som stort eller litet. Med hjälp av korrelationskoefficienter och multipel regressionsanalys har man försökt karakterisera sambanden mellan inläckaget och en mängd parametrar som jorddjup, sprickfrekvens och mängd förinjektering. Författarna behandlar dock inte specifikt

grundvattenbildning som parameter. De konstaterar att topografiska lågområden och dalgångar korrelerar med totalt antal fall av inläckage samt stort inläckage, men inte lika starkt med fall av mindre inläckage. Man fann också att en mäktigare bergtäckning samt branta sprickor gav en större sannolikhet för stora inläckage. Det fanns även en stark korrelation mellan båda magnituderna av inläckage och tekniska parametrar som bergkvalitet, tidsåtgången för att driva tunneln på en viss sträcka och mängd förinjektering. Förinjektering ändrar de naturliga förhållandena i berget och sågs som en korrigerande parameter i analysen. I regressionsanalysen såg man att förinjektering ensam kunde förklara 45 % av de små inläckagen, medan antalet sprickor förklarade 27 % av de små inläckagen om förinjekterings effekten togs bort. Kombinationen förinjektering, tunneldjup, antal sprickor och mängd torv i överliggande jordlager förklarade nästan 60 % av det mindre inläckaget när lite längre tunnelsträckor undersöktes. Stora inläckage kunde förklaras till 33 % av antal sprickor i gnejs, mängd torv samt förinjektering. Det noteras också att områden som till stor del täcks av morän associeras med en mindre mängd stora inläckage. Det konstateras också att den geologiska och hydrogeologiska miljön och dess spricksystem präglas av en stor heterogenitet, vilken kan ge en stor spridning i data (Cesano et al., 2000).

En annan studie som undersöker sambandet mellan olika parametrar och inläckage är gjord av Holmøy and Nilsen (2014). I studien har de formulerat och utvärderat åtta frågeställningar eller hypoteser, som exempelvis att brant stupande sprickor i närheten av större svaghetszoner orsakar mer inläckage, eller att ökande bergtäckning är kopplat till minskande inläckage. Studien använder sig av data från fem bergtunnlar i Norge, varav tre av tunnarna till största del går i kristallint berg. Datan har analyserats med låddiagram samt med linjär regression och korrelationskoefficienter (Pearson). Ett stöd för hypoteserna har definierats som att korrelationskoefficienten mellan dataserierna är större än 0,3, och man finner ett stöd för tre av hypoteserna samt ett svagare stöd för ytterligare två hypoteser. En av hypoteserna med starkast stöd är att vattenbärande sprickor oftast är orienterade subparallellt med huvudspänningsriktningen i berget. Man kunde också visa att stora vatteninflöden ofta sker i samband med bergartsövergångar. En hypotes med svagare samband är att vattenbärande sprickor är orienterade med en 45 graders stupning i förhållande till närliggande större svaghetszoner. Författarna poängterar ett stort behov av ytterligare studier på andra tunnlar och med bättre data för att med säkerhet kunna bedöma hypoteserna som bekräftade (Holmøy & Nilsen, 2014).

Andersson (2019) har i sitt examensarbete utvärderat initiala prediktioner av inläckaget till Förbifart Stockholm utifrån en ny konceptuell modell för två ramptunnlar. Modellen i studien ger genomgående högre värden på inläckage jämfört med underlaget från systemhandlingsskedet i det verkliga projektet, även om de nya prediktionerna ändå inte helt motsvarar det uppmätta inläckaget. Som främsta skäl till skillnaderna pekar författaren ut en för lågt ansatt hydraulisk konduktivitet, och framför allt att en svaghetszon som observerats i området inte inkluderades i den ursprungliga konceptuella modellen. Liknande resultat har också funnits i ett arbete av Thelander (2021), som modellerat avsänkning kring en bergtunnel och konstaterar att svaghetszonerna hade en mycket stor betydelse för avsänkningen. Andersson (2019) har dock funnit att prediktionerna inte var känsliga för förändringar i grundvattenbildningen. En utvecklad datainsamling och en annan tolkning av möjliga svaghetszoner förespråkas för bättre prediktioner.

En likartad studie har genomförts av Samuelsson (2007). I studien utvärderas det uppmätta inläckaget till tunnelprojektet Södra Länken i Stockholm samt faktorer som påverkar inläckaget. I studien konstateras det att större flöden i tunneln hänger samman med nederbörd, eftersom detta medför ett större grundvattenflöde och grundvattentillgång i systemet. De aktuella grundvattenmagasinens storlek konstateras påverka dränvattenflödets (dvs

inläckagets) stabilitet, och instabila, varierande flöden kopplas till mindre magasin som reagerar snabbt vid ett ökat tillflöde av grundvatten. God vattentillgång, till exempel i samband med större magasin, ger ett ökat inläckage. Det påpekas också att inläckagemätningarna kan påverkas av inflöden från tunnelmynningarna vid kraftiga nederbördsevent. Arbetet innehåller inga konkreta förslag på förklaringsmodeller, utan det antas vara tryckökningen som orsakar det ökade inläckaget vid ett ökat grundvattenflöde (Samuelsson, 2007).

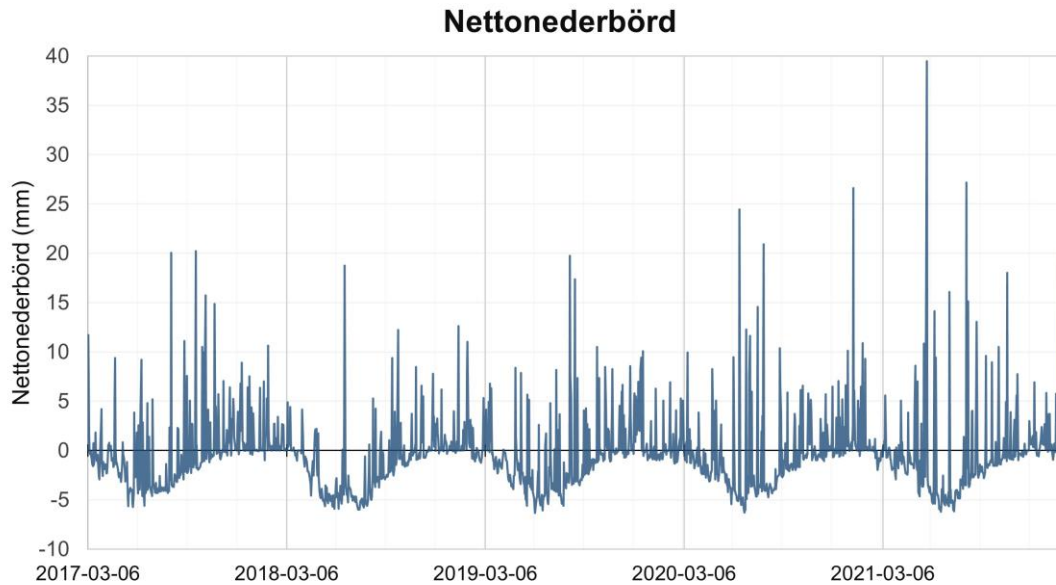
I en artikel av Sweetenham et al. (2017) har inläckaget i en bergtunnel på 10 meters djup (över grundvattenytan) studerats med hjälp av en integrerad, hydrologisk modell. Framför allt är det fördröjningen mellan nederbörd och en ökning i inläckage som har studerats. Utöver en basmodell, där ett sprickigt berg täcks av ett tunt lager genomsläppligt jordmaterial, modellerades scenarion med mindre genomsläppligt jordmaterial, tjockare jordlager, lägre sprickfrekvens i berget, större tunneldjup etc. Studien visade att fördröjningen mellan ett nederbördsevent och inläckage ökade mest för scenariot med ett tjockare jordlager, och något mindre om ett mindre permeabelt jordlager lades in i modellen. Ett ökat tunneldjup gav endast en liten ökning i fördröjningen. Intressant nog ökade fördröjningen mellan ett nederbördsevent och inläckageökning något mer för en tunnel i berg med sänkt sprickfrekvens, än för en tunnel på större djup. Sweetenham et al. (2017) förklarar detta med att en högre sprickfrekvens innebär fler läckvägar, vilket i sin tur innebär en högre sannolikhet att perkolerande vatten leds runt tunneln. När sprickfrekvensen är mindre, och en större spricka korsar tunneln, leds en större andel av det infiltrerade vattnet genom denna spricka mot tunneln. Det bör noteras att modellen är byggd för att representera semiarida områden, samt att tunneln i modellen ligger över grundvattennivån, vilket inte är fallet för majoriteten av Förbifart Stockholms tunnlar.

## 5.2 Översikt data

Dataanalysen inleds med en enkel grafisk jämförelse av tidsserierna för inläckage, nettonederbörd och grundvattennivåer. I avsnittet ges först en översikt av de två olika typer av data som använts för att uppskatta grundvattenbildningen.

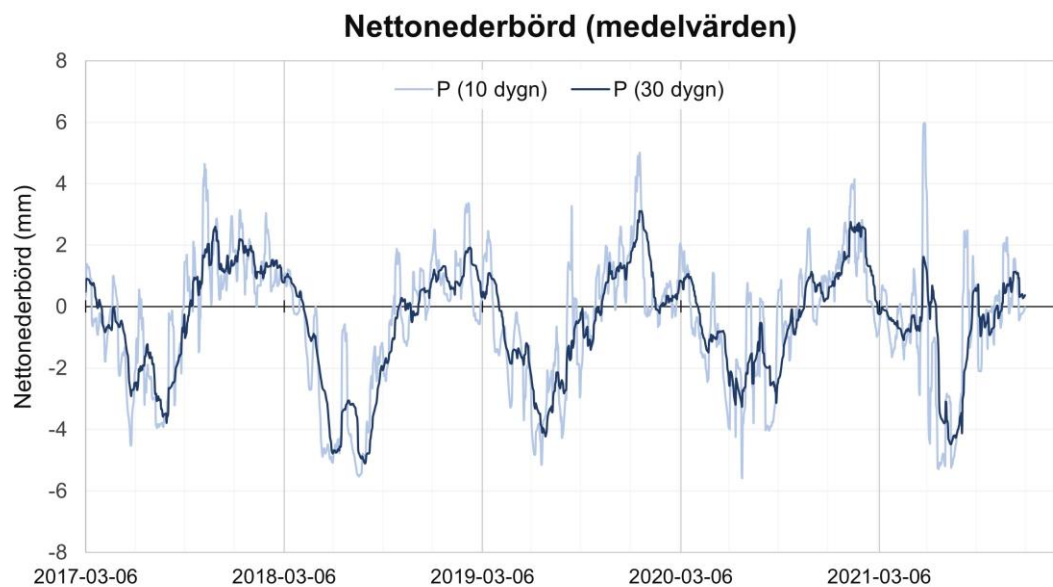
### 5.2.1 Grundvattenbildningsdata

I Figur 11 nedan visas nettonederbörden som dygnsmedelvärden. I figuren framgår det att framför allt lägstanivån uppvisar ett tydligt årstidsmönster, med negativa värden under sommarmånaderna (ett resultat av evapotranspirationen). Nettonederbörden kan dock vara positiv vid kraftiga regn även under sommaren.



Figur 11. Beräknad nettonederbörd per dygn för Stockholmsområdet mellan 2017 och 2022. Värdena baseras på uppmätt nederbörd samt en uppskattning av avdunstningen enligt Ekvation 5.

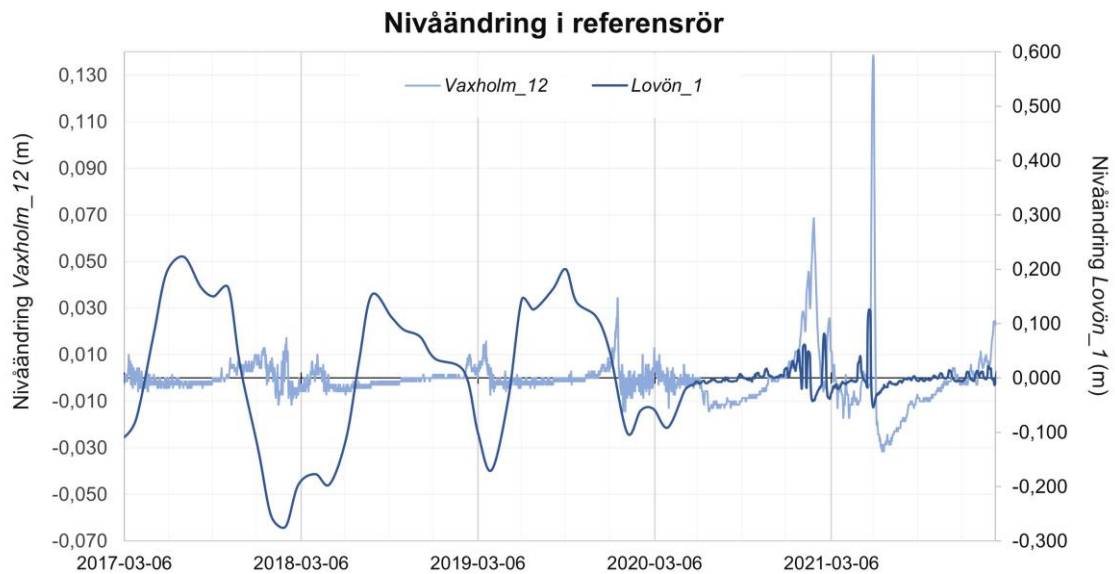
När nettonederbörden räknas om till glidande medelvärden framträder årstidsmönstret tydligare, medan enskilda nederbördstillfällen tonas ned och ”försvinner”, se Figur 12 nedan.



Figur 12. 10- respektive 30-dygns glidande medelvärden för nettonederbörden.

Förutom nettonederbörden användes ändringar i grundvattennivån hos två referensrör (*Lövön\_1* och *Vaxholm\_12*) som mått på grundvattenbildning på dygnsbasis. Figur 13 visar ändringarna i grundvattennivån hos dessa två referensrör, omräknade till glidande medelvärden. Det är endast dessa medelvärden som har använts för analysen, eftersom de dygnsvisa ändringarna i grundvattennivån generellt sett har varit mycket små. Nivån hos de två referensrören uppvisar ett likartat mönster mot slutet av mätperioden. Framför allt finns en överensstämmelse mellan kraftigare toppar i data.

Innan 2020 var mätfrekvensen hos *Lovön\_1* betydligt lägre än den hos *Vaxholm\_12*. Det gör att nivåändringarna inte går att beräkna dygnsvis, vilket leder till att nivåändringarna verkar kraftigare i början av tidsserien för *Lovön\_1*. Av denna anledning har endast värden från 2020 och framåt använts vid analysen av nivåförändringar (för *Lovön\_1*).



Figur 13. Uppmätt nivåändring per dygn hos grundvattnet i referensrören *Lovön\_1* och *Vaxholm\_12* (7-dygns glidande medelvärden).

## 5.2.2 Jämförelser med inläckage

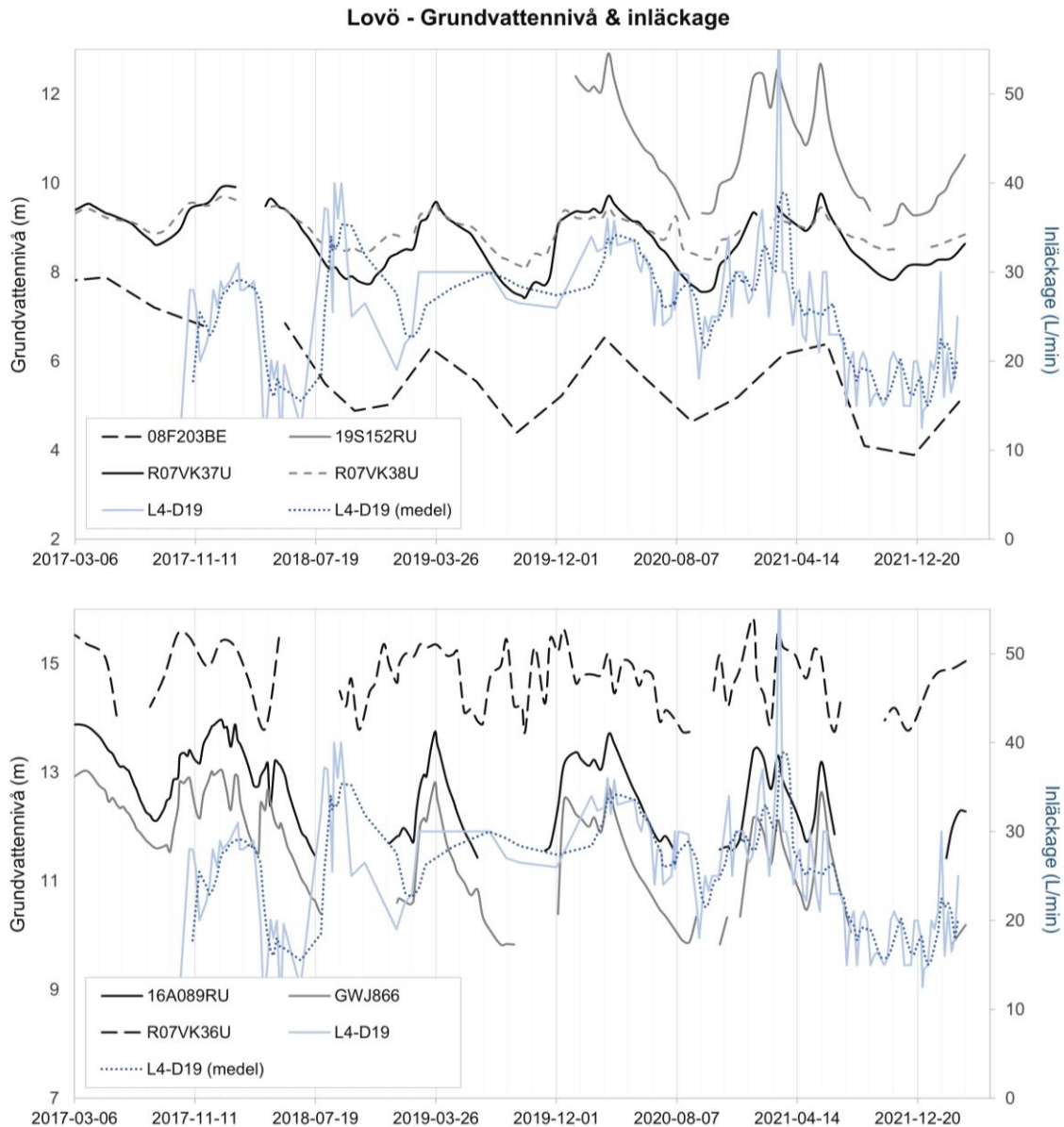
I detta avsnitt presenteras visuella jämförelser mellan inläckage och grundvattennivåer respektive grundvattenbildningsuppskattningar. Observera att höjdsystemet RH00 används för alla grundvattennivåer (nivån anges i meter i figurerna nedan).

### 5.2.2.1 Arbetstunnel Lovö

På Lovö verkar den tydliga årstidsvariationen hos inläckaget på denna sträcka utkristalliseras mot slutet av mätperioden, dvs från och med slutet av 2019 (se *L4-D19* i Figur 14 nedan). Det är också från och med denna tidpunkt som en tydlig samvariation med grundvattennivån i alla grundvattenrör kan observeras. Att det inte verkar finnas ett tydligt samband innan detta kan t.ex. bero på påverkan från de närliggande huvudtunnlarna eller oregelbundenheten i mätfrekvensen under 2019. Det kan också vara en kombination av båda faktorerna.

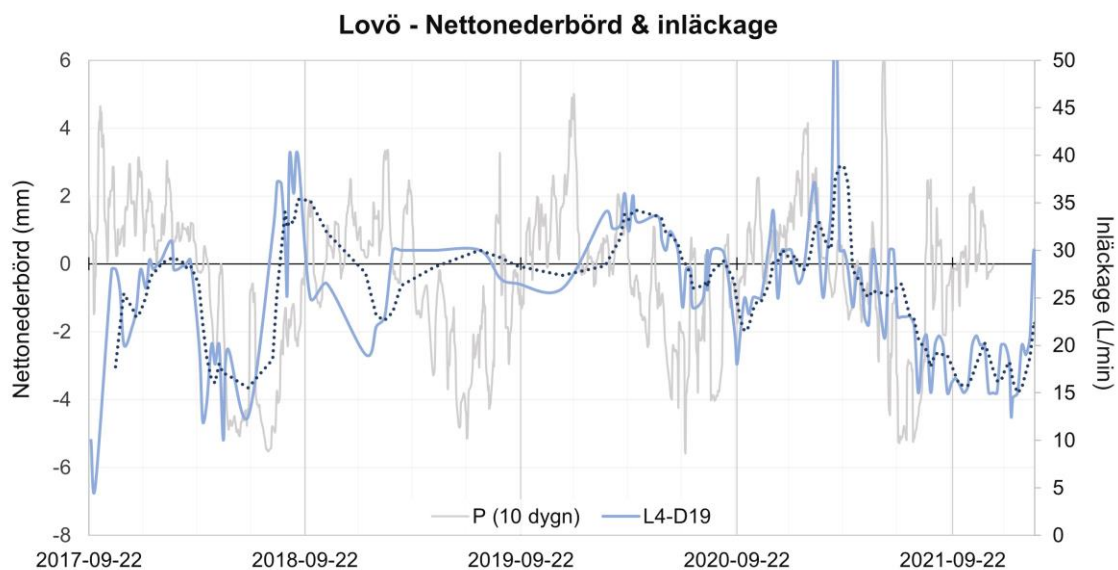
Alla grundvattenrör uppvisar en mycket likartad årstidsvariation, se Figur 14. Enda undantaget är R07VK36U, där fluktuationerna är mindre uttalade. Notera även torrläggningen av de grundvattenrör som ligger i utkanten av dalgången (16A089RU och GWJ866 i det undre diagrammet i Figur 14, samt 19S152RU i det övre diagrammet). Grundvattenrörens position kan ses i Figur 5. Med fokus på den senare delen av mätserierna kan det konstateras att samvariationen mellan inläckage och grundvattennivåer överensstämmer i tid, dvs att ökningarna och minskningarna av de båda faktorerna sker ungefär samtidigt.





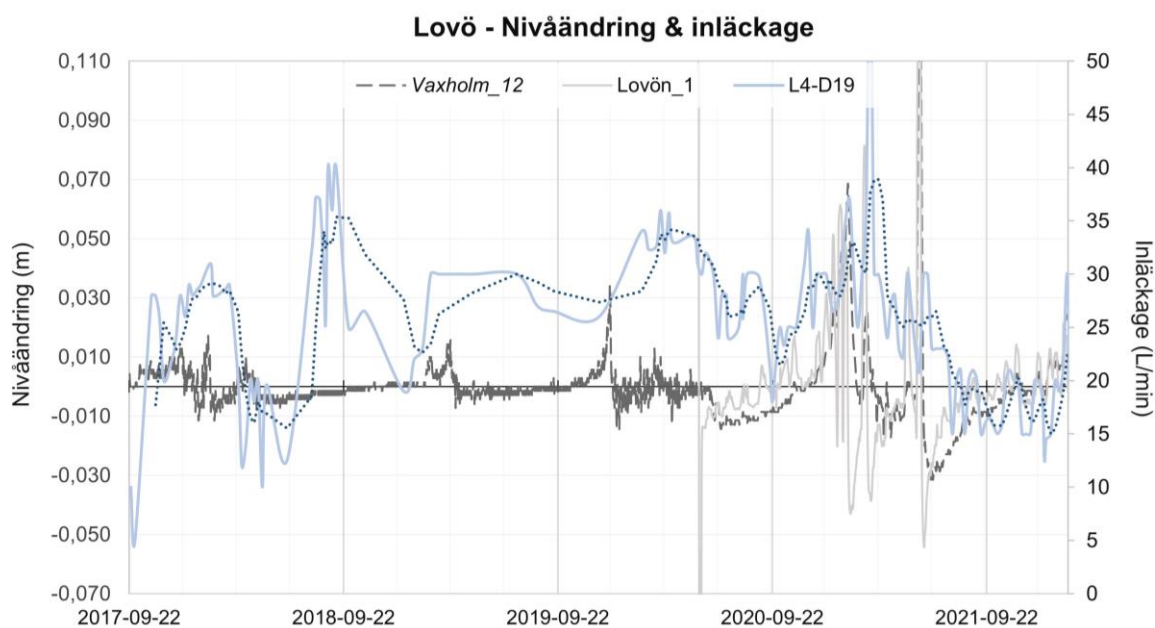
Figur 14. Jämförelse mellan inläckage i arbetstunneln (L4-D19) på Lovö och grundvattennivån i utvalda grundvattenrör och bergbrunnar (08F203BE är en bergbrunn). Observera att de två diagrammen har olika skala för grundvattennivån.

Inläckaget har, av tydlighetsskäl, främst jämförts med glidande medelvärden för nettonederbörden, se Figur 15 nedan. Vid första anblicken framgår inget direkt samband. Om något så verkar inläckaget öka några månader efter att nettonederbörden varit hög i den högra delen av diagrammet. Eventuellt kan också lokala toppar i inläckagedatan hänga samman med kraftigare lokala toppar i nettonederbörden. Den låga mätfrekvensen och störningarna hos inläckagedatan försvårar dock en sådan detaljanalys.



Figur 15. Jämförelse mellan inläckage i arbetstunneln på Lovö (L4-D19) och nettonederbörden (10-dygnns glidande medelvärde). Den mörkblå, prickade linjen är ett glidande medelvärde för inläckaget (L4-D19).

Det går inte att se något direkt samband mellan nivåändringar i referensrören och inläckaget (se Figur 16 nedan). Eventuellt blir sambandet något tydligare mot slutet av tidsperioden (åtminstone med referensröret *Vaxholm\_12*), med enskilda toppar som matchar inläckaget mycket väl kring årsskiftet 2020/2021.



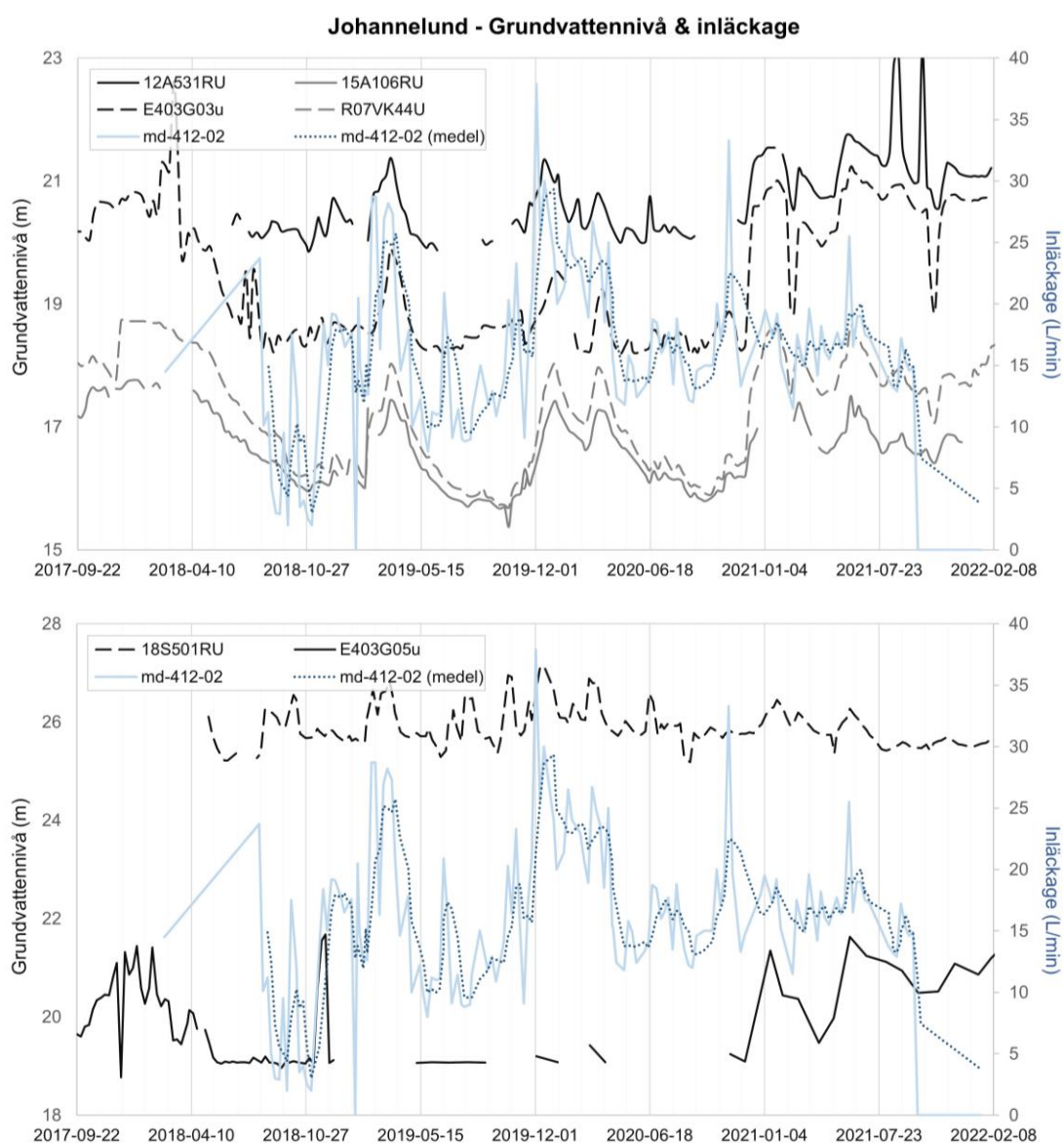
Figur 16. Jämförelse mellan inläckage i arbetstunneln på Lovö (L4-D19) och nivåändringen i de två referensrören (7-dygnns glidande medelvärden). Den mörkblå, prickade linjen är ett glidande medelvärde för inläckaget (L4-D19).

### 5.2.2.2 Ramptunnel Johannelund

I Johannelund verkar det ske en förändring av både inläckage och grundvattennivåer från och med 2021, då skyddsinfiltration påbörjas (se Figur 17 nedan). De starkaste sambanden med grundvattennivån finns också före denna tidpunkt, även om det går att se ett samband mellan enskilda, mindre toppar hos de båda parametrarna även senare.

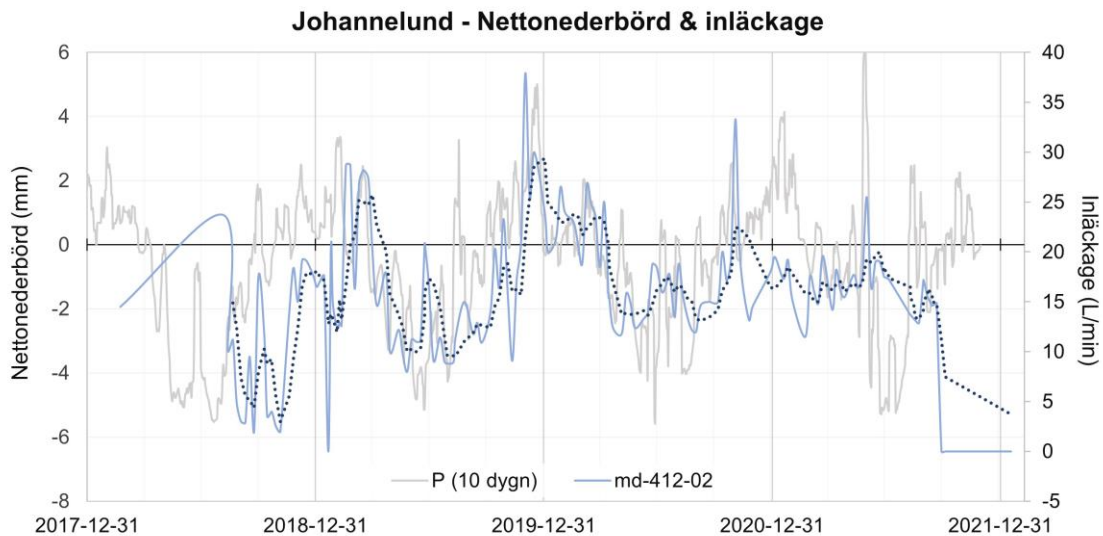
Det verkar finnas ett tydligt samband mellan inläckage och nivån i rören 15A106RU och R07VK44RU, som ligger i lerområdet norr om tunnelpåslaget (se Figur 7 i avsnitt 3.2.2 ovan för karta), samt med E403G03u och 12A531RU som ligger i dalgången som tunneln korsar. Det verkar även finnas ett relativt tydligt samband med 18S501RU, som ligger på andra sidan huvudtunnelarna sett från den aktuella tunnelsträckan. Alla rör uppvisar en tydlig avsänkning jämfört med nivåerna som uppmätts innan tunnelbygget. E403G05u (nedre diagrammet i Figur 17 nedan), som ligger i sluttningen väster om dalgången, är nästan helt torrlagd fram till dess att infiltrationen påbörjas, och det är därför svårt att uttala sig om något samband. Torrläggningen syns som avbrott i diagrammet.

Till skillnad från mätningarna på Lovön (avsnitt 5.2.2.1 ovan) verkar toppar i inläckaget komma något före toppar i grundvattennivån, framför allt gäller detta i mitten av mätserien (2019/2020). Detta skulle kanske kunna tolkas som att grundvattennivån inte är främsta orsaken till ökningarna i inläckage.



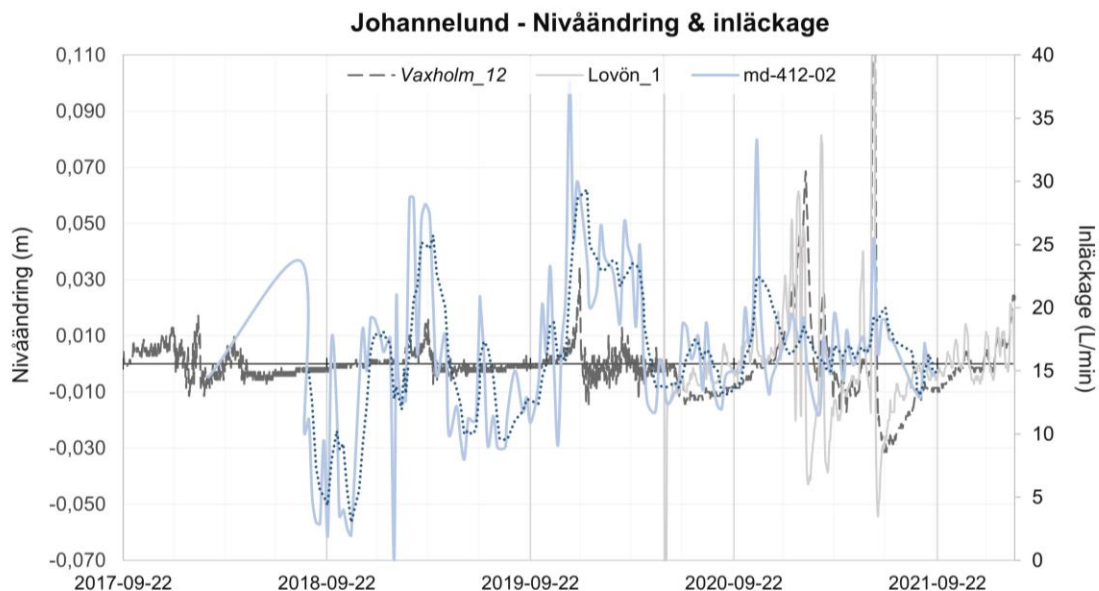
Figur 17. Jämförelse mellan inläckage i ramtunneln i Johannelund (md-412-02) och grundvattennivån i utvalda grundvattentrör. Observera att de två diagrammen har olika skala för grundvattennivån.

I Figur 18 nedan jämförs inläckaget och nettonederbörden (10-dagars medelvärde). Mönstret verkar vara ganska likt det på Lovö, dvs ingen exakt matchning i tid med det översiktliga årstidsmönstret. Däremot kan ett samband skönjas mellan vissa lokala toppar i inläckaget och kortare perioder med hög nettonederbörd, t.ex. i slutet av 2019.



Figur 18. Jämförelse mellan inläckage i ramptunneln i Johannelund (md-412-02) och nettonederbörden (10-dygns glidande medelvärde). Den mörkblå, prickade linjen är ett glidande medelvärde för inläckaget (md-412-02).

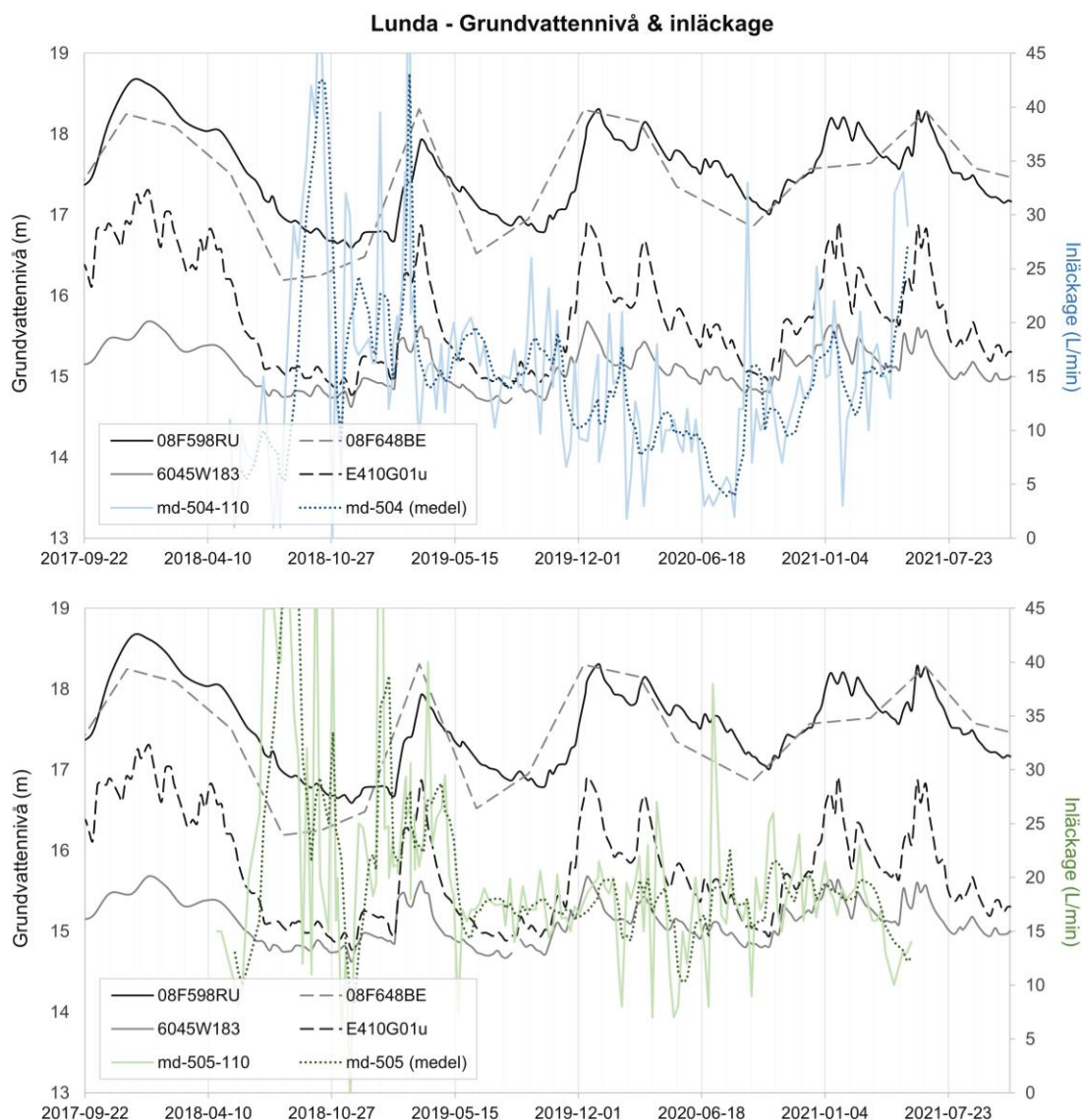
Det är svårt att urskilja något tydligt samband mellan variationer i referensrören och inläckaget, framförallt med rör *Lövön\_1* (se Figur 19 nedan). Eventuellt finns en generell överensstämmelse mellan *Vaxholm\_12* och inläckaget när det gäller dominerande toppar i de båda dataserierna, framför allt i början av mätperioden.



Figur 19. Jämförelse mellan inläckage i ramptunneln i Johannelund (md-412-02) och nivåändringen i de två referensrören (7-dygns glidande medelvärden). Den mörkblå, prickade linjen är ett glidande medelvärde för inläckaget (md-412-02).

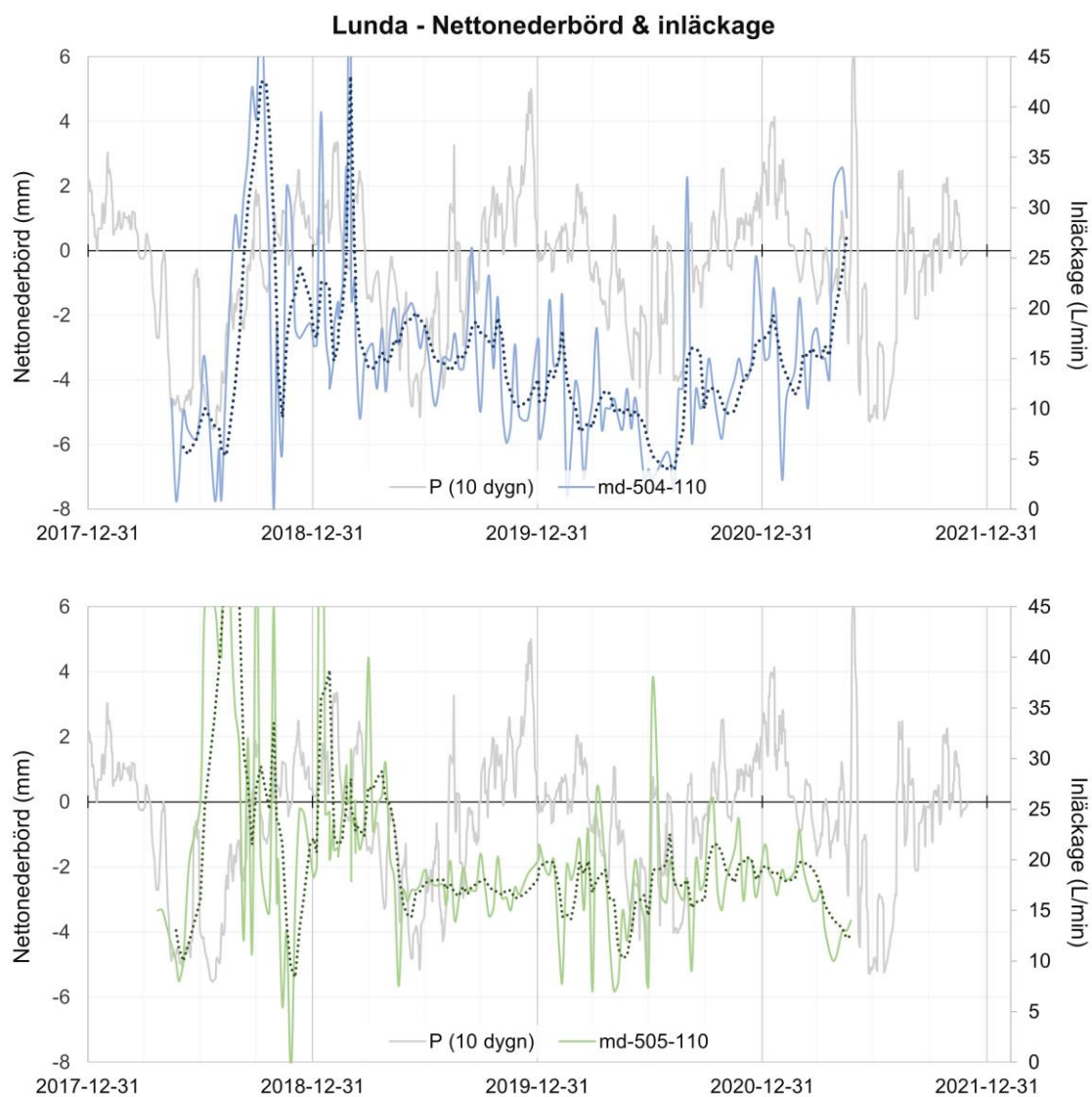
### 5.2.2.3 Huvudtunnlar Lunda

Inläckagemätningarna i Lunda-tunnlarna är mycket starkt påverkade av avvikande värden och det är svårt att se något samband med grundvattennivån, framför allt för det ena tunnelröret (505) där inläckaget i princip inte uppvisar någon större variation efter 2019. Se Figur 20 nedan. Eventuellt kan ett samband börja skönjas för tunnelrör 504 (övre diagrammet) mot slutet av mätperioden, där både grundvattennivåer och inläckage sakta minskar för att sedan öka igen i slutet av 2021. Dock sammanfaller inläckageminskningens början med en ökning hos grundvattennivån, vilket talar emot att det är grundvattennivån som orsakar minskningen. I Figur 20 nedan visas grundvattennivåerna för ett urval av grundvattenrören och en av bergbrunnarna. Diagram för övriga grundvattenrör finns i Bilaga A.



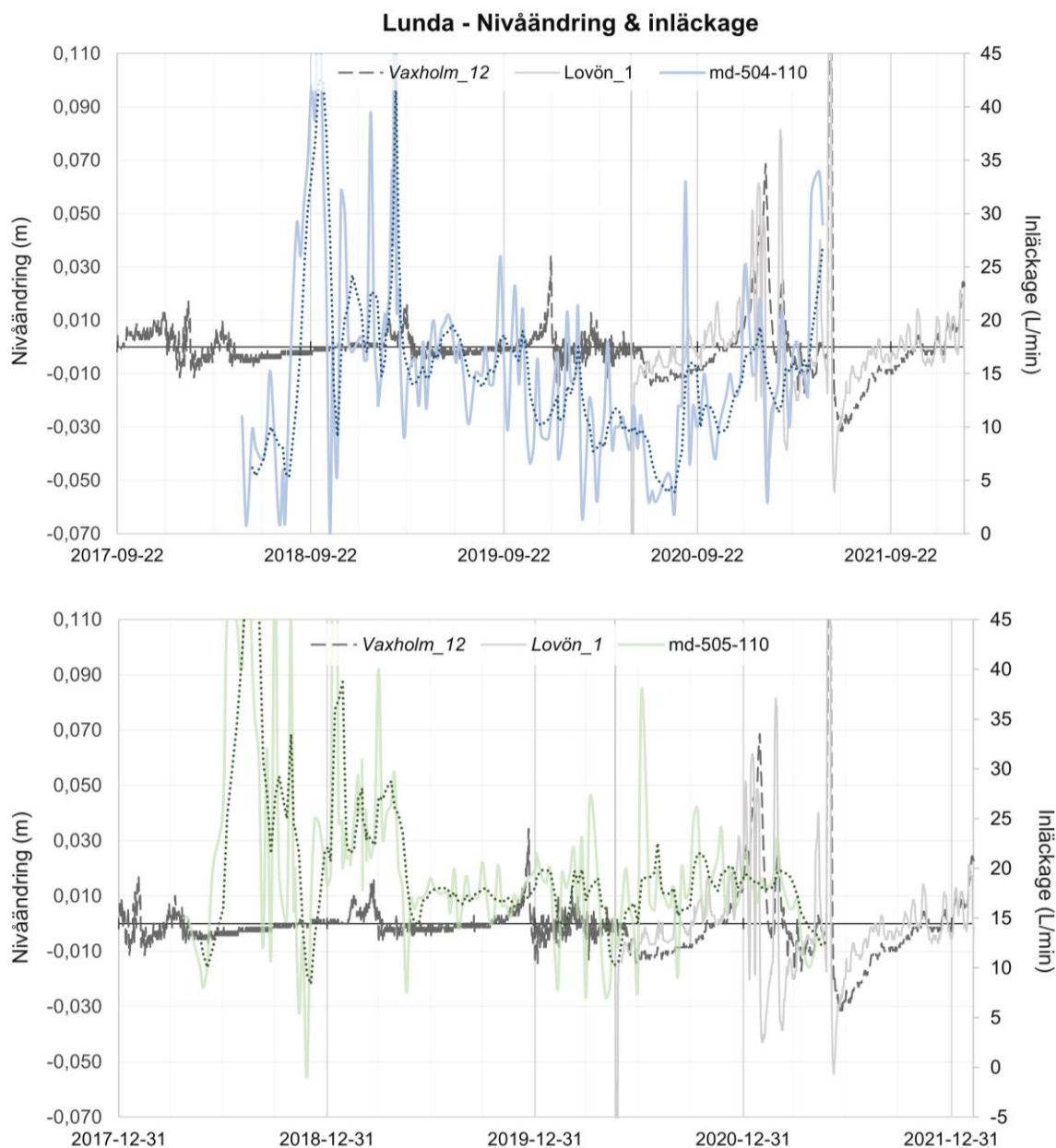
Figur 20. Jämförelse mellan inläckage i huvudtunnlarna i Lunda och grundvattennivån i utvalda grundvattenrör och bergbrunnar. Den övre figuren visar inläckaget i tunnelrör 504 och den undre i tunnelrör 505.

Figur 21 nedan jämför inläckaget och nettonederbörden. Återigen syns inget samband med tunnelrör 505 (nedre diagrammet), eftersom det knappt finns någon fluktuation. Dock verkar det finnas ett samband mellan det generella årstidsmönstret hos nettonederbörden och inläckagets variation i 504. Korrelationen mellan enskilda, lokala toppar är dock inte särskilt god.



Figur 21. Jämförelse mellan inläckage i huvudtunnlarna i Lunda och nettonederbörden (10-dygns glidande medelvärde). De prickade linjerna är glidande medelvärden för inläckaget. Den övre figuren visar inläckaget i tunnelrör 504 och den undre i tunnelrör 505.

Samma mönster återkommer när inläckaget jämförs med nivåändringen i referensrör, se Figur 22 nedan. Inget samband verkar finnas för 505 (nedre diagrammet), medan ett samband kan skönjas för 504 (övre diagrammet) mot slutet av mätperioden. Detta gäller åtminstone för referensrör *Vaxholm\_12*.



Figur 22. Jämförelse mellan inläckage i huvudtunnlarna i Lunda och nivåändringen i de två referensrören (7-dygns glidande medelvärde). De prickade linjerna är glidande medelvärden för inläckaget. Den övre figuren visar inläckaget i tunnelrör 504 och den undre i tunnelrör 505.

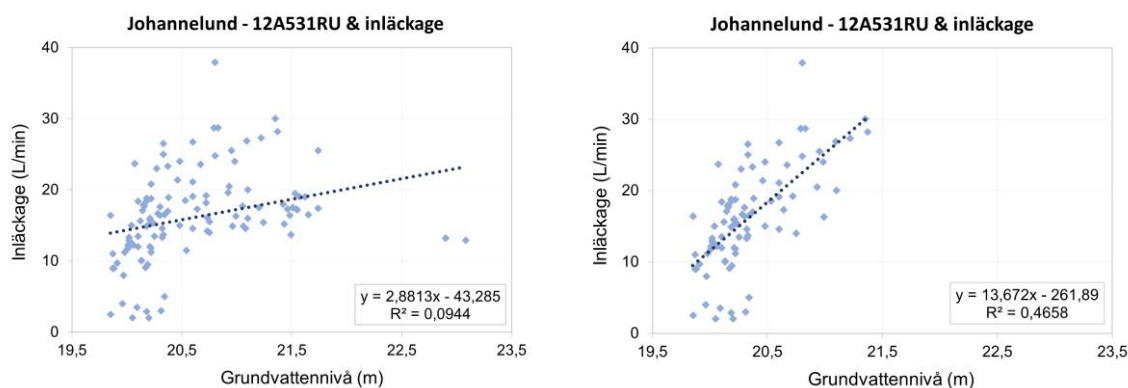
## 5.3 Regressionsanalys

Huvuddelen av analysen i detta arbete baseras på resultaten av regressionsanalysen. I avsnittet presenteras framför allt genomsnittliga korrelationskoefficienter och R<sup>2</sup>-värden för sambanden. Detaljerade resultat samt ett urval av spridningsdiagram går att finna i Bilaga B.

### 5.3.1 Beskrivningar av försök och indelningar av data

Metodiken i detta arbete har, som tidigare nämnts, utvecklats iterativt under processens gång. Till en början jämfördes obehandlad inläckagedata med tidsmässigt matchade värden för grundvattennivå och grundvattenbildning, varefter olika modifieringar av datan gjordes.

Framför allt avlägsnades störande delar av tidsserierna för Lovö och Johannelund i senare delar av analysen. Motiveringen till denna modifiering är att de undersökta tunnarna är under ständig förändring på grund av den pågående byggnationen, och därmed kommer störande data att dölja sambanden om de inte tas bort. Till exempel verkar skyddsinfiltration kring Johannelund ha haft stor påverkan på både inläckage och grundvattennivåer. I Figur 23 nedan visas ett exempel på hur den linjära regressionen fungerade innan och efter att avvikande värden tagits bort, och det framgår tydligt hur mycket de avvikande värdena påverkar analysen. I den högra figuren är det både en större lutning hos den linjära ekvationen och ett högre R<sup>2</sup>-värde.



Figur 23. Exempel på hur sambandet mellan grundvattennivå och inläckage förbättras om avvikande värden tas bort. Till vänster i figuren har hela dataserien från grundvattenrör 12A531RU använts, och i den högra används endast värden som uppmätts innan år 2021.

Datan har även kombinerats till olika glidande medelvärden för att undersöka påverkan från längre perioders trender, samt förskjutits i ett försök att undersöka fördröjningseffekter. I Tabell 1 nedan finns en sammanställning av de olika undersökningar eller jämförelser som genomförts. De siffror som presenteras nedan utgår från de försök som åstadkom de bästa resultaten (markerade med fetstil i tabellen ovan).

Tabell 1. Översikt av de olika jämförelser som gjorts mellan inläckage och de aktuella parametrarna. Fetstil markerar de försök som använts i den vidare analysen.

	Grundvattennivå	Grundvattenbildning	
		Nettonederbörd	Nivåändring
Lovö	Basdata	Basdata - 10-dagars medel - 30-dagars medel	Basdata 7-dagarsmedel (2 referensrör)
	<b>Störande data borttagen</b>		<b>Störande data borttagen</b>
			<b>Förskjutning 1 vecka</b>
Johannelund	Basdata	Basdata - 10-dagars medel - 30-dagars medel	Basdata 7-dagarsmedel (2 referensrör)
	<b>Störande data borttagen</b>	<b>Störande data borttagen</b> - 10-dagars medel - 30-dagars medel	<b>Störande data borttagen</b>
			Förskjutning 1 vecka
Lunda	Basdata	Basdata - 10-dagars medel - 30-dagars medel	<b>Basdata 7-dagarsmedel (2 referensrör)</b>
			Förskjutning 1 vecka



### 5.3.2 Grundvattennivåer

Utifrån regressionsanalysen kan det konstateras att det finns ett (i sammanhanget) starkt samband mellan grundvattennivån och inläckaget. Detta gäller dock inte huvudtunnlarna i Lunda, där korrelationskoefficienterna för alla undersökta grundvattenrör är under 0,3. En sammanställning av genomsnittliga regressionsparametrar presenteras i Tabell 2 nedan.

Tabell 2. Genomsnittliga R<sup>2</sup>-värden och korrelationskoefficienter (C) för de olika tunnelavsnitten. Värdet i parentes avser alla grundvattenrör som analyserats, medan det första värdet endast inkluderar rör med statistiskt signifikant korrelation.

	Lovö	Johannelund	Lunda
<b>R<sup>2</sup></b>	0,34 (0,21)	0,26 (0,23)	0,05 (0,03)
<b>C</b>	0,58 (0,42)	0,50 (0,46)	0,22 (0,16)

För Lovö och Johannelund är den genomsnittliga korrelationskoefficienten 0,58 respektive 0,50 (detta gäller grundvattenrör med statistiskt signifikant korrelation). På Lovö finns dock några rör utan statistiskt signifikant korrelation, där korrelationen också är negativ, och även i Johannelund har ett rör ett något för högt p-värde (0,09). På Lovö är det bergbrunnen 08F203BE, samt grundvattenrör GWJ866 och R07VK36U som inte uppvisar ett statistiskt signifikant samband. För bergbrunnens del skulle det kunna handla om att det finns mycket få mätvärden, eller att bergbrunnen helt enkelt inte står i kontakt med de spricksystem som når tunneln. R07VK36U ligger utanför dalgången söder om tunneln, vilket skulle kunna vara en anledning till det svagare sambandet. GWJ866 ligger nästan mitt ovanför tunneln i dalgångens norra gräns, och rent visuellt ser det ut att finnas ett samband mellan tidsserierna (se Figur 14 avsnitt 5.2.2.1). Bristen på samband skulle i detta fall snarare kunna tillskrivas det faktum att röret står torrt under långa perioder på somrarna. Den databehandling som gjorts för att kunna genomföra regressionsanalysen lyckas inte fånga upp dessa värden på ett bra sätt, och det stör troligtvis analysen. Samma förklaring stämmer förmodligen också för E403G05u i Johannelund, eftersom även detta rör står torrt stora delar av året.

Baserat på det genomsnittliga R<sup>2</sup>-värdet kan grundvattennivån förklara ca 34% av variationen i inläckaget för arbetstunneln på Lovön, och 26 % av variationen i inläckage för ramptunneln i Johannelund. Dessa siffror är jämförbara med värden som erhöles för enskilda parametrar i t.ex. Cesano et al. (2000), som bl.a. fann att antalet sprickor förklarade 27% av de mindre inläckagen om förinjekteringens effekt togs bort. I sammanhanget bedöms alltså de korrelationskoefficienter och R<sup>2</sup>-värden som erhållits i denna analys vara tillräckligt höga för att anses relevanta.

I Lunda är däremot sambandet med grundvattennivån svagt eller obefintligt. Ett flertal rör har ingen statistiskt signifikant korrelation, och den genomsnittliga korrelationskoefficienten för övriga rör är 0,21 respektive 0,23 för de två huvudtunnelrören (504 och 505). Det genomsnittliga R<sup>2</sup>-värdet är ca 0,05 för båda tunnlarerna, dvs mycket lågt. En trolig anledning till det svaga sambandet är att det genomförts efterinjektering på sträckan, vilket troligtvis täppt igen den typen av sprickor som orsakar inläckagesambanden på de andra tunnelsträckorna. En annan möjlig förklaring är att det aktuella tunnelavsnittet, till skillnad från arbets- och ramptunnlarerna ovan, ligger på ett konsekvent större djup. Tunnelavsnittet går alltså inte i det mer uppspruckna ytligare berget, och det finns inget tunnelpåslag vid ytan. Det verkar dock troligare att det är efterinjekteringen som är orsaken, eftersom det går att se en tydlig utplaning av inläckagevärdena en tid efter att mätningarna initierades. Det är värt att påpeka att sambandet inte verkar bli tydligt bättre när datan delas upp i innan och efter

störningarna, vilket tyder på att det inte funnits något tydligt samband mellan inläckagevariationer och grundvattennivåer i detta område ens innan efterinjekteringen påbörjades.

### 5.3.3 Uppskattningar av grundvattenbildning

Inget av de två sätten att uppskatta grundvattenbildning uppvisade ett starkt samband med inläckaget, se Tabell 3 nedan. Med nettonederbörden fanns inget statistiskt signifikant samband med inläckaget i Lovö-tunneln. Inte heller för tunnel 505 i Lunda fanns något samband. För tunnel 504 i Lunda är sambandet med nettonederbörden statistiskt signifikant (p-värde kring 0,05), men R2-värdet och korrelationen är mycket låga (C = 0,15 för 10-dagars medelvärde).

För Johannelund var sambandet mellan inläckaget och nettonederbörden både statistiskt signifikant och starkare än för övriga tunnelsträckor. Om endast den ostörda delen av mätserien används ger ett 10-dagars glidande medelvärde för nettonederbörden R2 värdet 0,10 och korrelationskoefficienten 0,31. Nettonederbörden kan alltså anses förklara 10 % av variationen i inläckaget. Sambandet var starkare för 30-dagars medelvärdet, med en korrelationskoefficient på 0,42. Det kan dock diskuteras om ett 30-dagars glidande medelvärde innefattar en för lång period för att kunna kopplas till den typen av samband som undersöks i detta arbete. Det skulle kunna ses som ett mått på om grundvattennivån är hög eller låg, snarare än hur den direkta grundvattenbildningen påverkar inläckaget (enligt förklaringsmodell 2). Oavsett kan det konstateras att sambandet med nettonederbörden är starkare i Johannelund än på övriga tunnelavsnitt, även om sambandet inte kan benämnas som starkt.

Tabell 3. R2-värden och korrelationskoefficienter för de olika tunnelavsnitten, där värden i parentes inte är statistiskt signifikanta.

Värden för nivåändringar är genomsnittet för de två referensrören Lovön\_1 och Vaxholm\_12. "Förskjutning" och "modifierad" refererar till vilket försök som gav de aktuella siffrorna (se Tabell 1 ovan).

		Lovö	Johannelund	Lunda (504 / 505)
Nettonederbörd 10-dygn   30-dygn	R2	(0,001)   (0,001)	0,098   0,175	(0,023) / (0,018)   0,039 / (0,013)
	C	(0,038)   (0,032)	0,31   0,42	(0,15) / (0,043)   0,20 / (0,11)
Nivåändring	R2	0,043 (Förskjutning)	0,19 (Modifierad)	(<0,001)
	C	0,20	0,43	-

Med nivåändringen i referensrör som ett mått på grundvattenbildningen upprepar sig ungefär samma mönster för de undersökta tunnelavsnitten. Sammanfattande statistik finns i Tabell 3 ovan. För Lunda är majoriteten av R2-värdena under 0,01, och det går alltså inte att tala om något samband här. För Lovötunneln är sambanden återigen mycket svaga. Om hela mätserien används och förskjuts en vecka är sambandet statistiskt signifikant, men den genomsnittliga korrelationskoefficienten för de två referensrören är fortfarande endast 0,2.

För Johannelund är sambandet återigen något starkare än för övriga tunnelsträckor, precis som med nettonederbörden. Korrelationen är inte statistiskt signifikant vid en förskjutning av datan, men om de avvikande värdena efter 2020 tas bort blir sambandet statistiskt signifikant med en genomsnittlig korrelationskoefficient på 0,43. Det ska dock noteras att det blir ganska få datapunkter kvar för grundvattenröret Lovön\_1 i detta fall, vilket gör att korrelationen för denna data (C = 0,51) förmodligen bör tolkas med försiktighet. Det kan dock konstateras att

det åtminstone verkar finnas ett något starkare samband med grundvattenbildningen i Johannelund.

### 5.3.4 Multipel regression

Ramptunneln i Johannelund var alltså den sträcka som visade starkast samband med grundvattenbildning, utöver ett starkt samband med grundvattennivåerna i området. För att undersöka den kombinerade effekten av dessa faktorer genomfördes multipel regression, med syftet att se om ett förbättrat samband kunde påvisas. Korrelationskoefficienten för alla enskilda grundvattenrör förbättrades något (några procentenheter) när grundvattenbildningen lades till. Detta gällde för båda sätten att uppskatta grundvattenbildning. Dock var inte lutningskoefficienten för grundvattenbildningsparametern statistiskt signifikant, dvs det gick inte att med 95% konfidensgrad säga att det finns ett positivt samband med grundvattenbildningen när man tagit hänsyn till grundvattennivån. Detta gällde grundvattenrör 12A531RU, samt E403G03u (endast nettonederbörd). Sammantaget förbättrades inte den genomsnittliga korrelationskoefficienten för grundvattenrör med statistiskt signifikant korrelation jämfört med när endast grundvattennivån beaktades (se Bilaga B för detaljerade resultat).

### 5.3.5 Residualer

Residualanalys kan användas för att bedöma huruvida det ansatta sambandet verkar förklara variationen, eller om det kvarstår ett samband även efter att man har tagit hänsyn till en faktor, till exempel grundvattennivån. Vid en perfekt passform hos det undersökta sambandet ska punkterna i ett residualdiagram uppvisa en helt slumpmässig spridning kring x-axeln ( $y = 0$ ). I detta arbete genomfördes en enkel residualanalys i samband med regressionsanalysen. I och med att grundvattenflöden i berg och inläckage i bergtunnlar styrs av ett stort antal parametrar (sprickfrekvens, grundvattentryck, injekteringens omfattning, grundvattenbildning, skinfaktor osv) är det inte förväntat att linjär regression med enskilda parametrar kan förklara hela den observerade variationen hos det uppmätta inläckaget. Det är därmed förväntat att det kvarstår mönster i residualerna, och det gör det svårt att dra slutsatser om det antagna sambandets relevans utifrån dessa. Det går endast att göra enklare observationer av mönster som skulle kunna antyda en stark påverkan från andra variabler, eller en icke-linjär karaktär hos det föreslagna sambanden. Nedan följer en kort redogörelse av residualanalysen. En mer utförlig redogörelse går att finna i Bilaga B.

Det fanns inga betydande samband mellan grundvattennivåer och inläckage i Lunda (se avsnitt 5.3.2 ovan), varför det inte heller blir meningsfullt att analysera residualerna för detta område. För Lovö och Johannelund finns enstaka grundvattenrör där residualerna verkar ha en slumpmässig fördelning, men för de flesta finns en antydning om någon form av mönster. Mönstret antar antingen en böjd, icke-linjär karaktär, eller så minskar spridningen i datan med ökande grundvattennivå (se exempel i Bilaga B). Detta skulle kunna betyda att sambandet egentligen är icke-linjärt, eller att det finns en annan variabel som samspelar med grundvattennivån.

För nettonederbörden som mått på grundvattenbildning är det endast Johannelund som uppvisar en statistiskt signifikant korrelation med inläckaget. Residualerna för detta område uppvisar dock ett tydligt andragsmönster. Detta kan bero på att det linjära sambandet inte passar, men det kan också vara ett resultat av databehandlingen (se Bilaga B för ett utökat resonemang). För nivåändring i referensrör finns svaga men signifikanta korrelationer för både Lovö och Johannelund. Residualerna för båda områdena uppvisade dock tydliga

mönster, något som skulle kunna tyda på att det finns andra variabler som påverkar inläckaget. Det finns dock avvikande värden i datan (outliers) som har stark påverkan på sambandet och därmed också på residualerna.

## 5.4 Korskorrelation

Målet med att beräkna korskorrelation var dels att få ett ytterligare mått på de samband som kunde skönjas i regressionsanalysen, samt att undersöka hur sambandet påverkades av förskjutningar i tidsserierna. Det visade sig dock vara svårt att applicera metoden på grund av den låga kvaliteten på datan. Inläckagemätningarna är gjorda ungefär en gång per vecka, men det finns många tidsmässiga glapp i datan som beror på att man inte kunnat genomföra mätningar på grund av störande arbeten i tunneln och liknande. Det innebär att det blir svårt att utvärdera påverkan av förskjutningar i dataserierna, eftersom ett stegs förskjutning ibland motsvarar 7 dagar och ibland 21 dagar.

Den låga mätfrekvensen hos inläckagedatan gjorde dessutom att det inte blir särskilt meningsfullt att undersöka sambandet där det gick att ta fram jämna tidsserier. Detta eftersom responsen hos inläckaget på ett större grundvattenbildningstillfälle borde ta mindre än en vecka, under antagandet att vattnet läcker in genom en någorlunda konduktiv spricka (ex  $K = 10^{-4}$  m/s). Enkla beräkningar för rinntid finns i Bilaga D. Ett stegs förskjutning skulle innebära en förskjutning på en vecka, vilket inte är meningsfullt att göra i mer än ett eller två steg när den förväntade "reaktionstiden" är kortare än så.

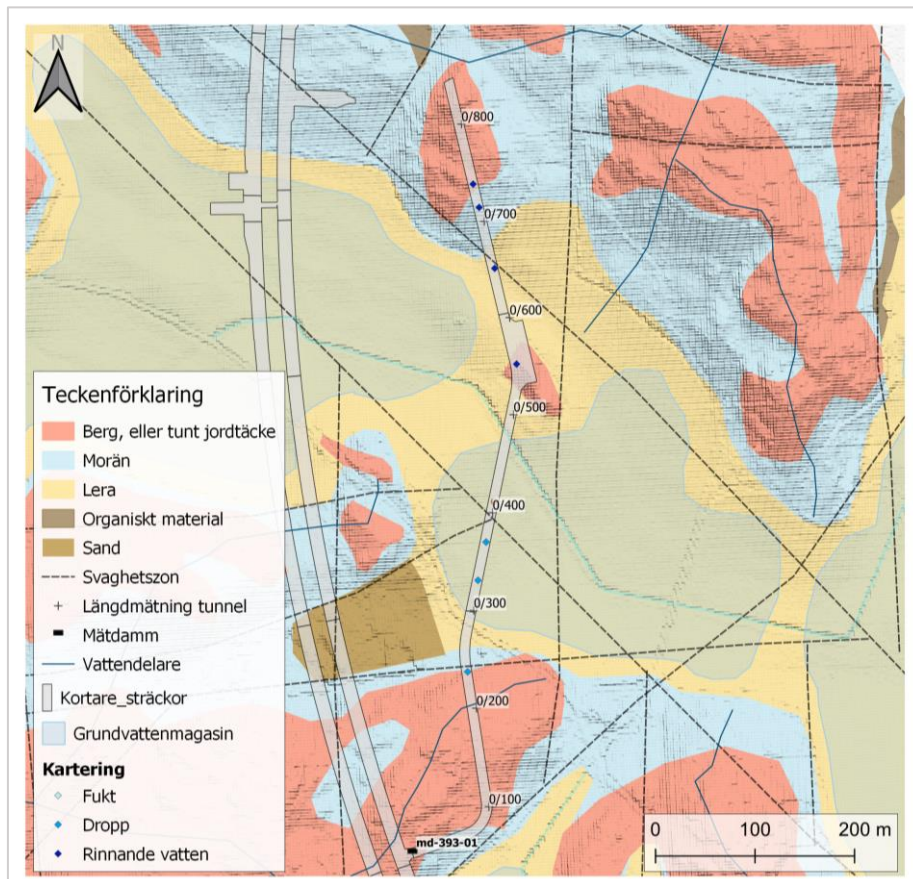
Sammanfattningsvis var det inte möjligt att genomföra en fullständig korskorrelationsanalys på datan. Korskorrelation genomfördes dock utan förskjutning för de olika grundvattenrören, för den effektiva nederbörden samt förändringar i grundvattenivån mot inläckaget i de olika tunnelsträckorna. Sammanställda resultat finns i Bilaga C. Korrelationskoefficienterna utan förskjutning bekräftar åtminstone till viss del mönstren från regressionsanalysen. Höga korrelationskoefficienter (oftast högre än 0,9) erhöles mellan nivåer i de olika grundvattenrören och inläckaget, framförallt för tunnlarna på Lovön och i Johannelund. Korrelationskoefficienterna för Lunda var lägre, generellt sett kring 0,7. Precis som i regressionsanalysen var korrelationen med de olika måtten på grundvattenbildning svaga, och i de flesta fall också negativa, vilket inte är vad som förväntats.

## 5.5 Geologiska kartor och karteringar

För att kunna koppla de observerade statistiska sambanden med de olika förklaringsmodellerna har geologisk information sammanställts för de olika områdena. Denna information innefattar till exempel marktäckning, förekomst av svaghetszoner, uppskattade gränser för grundvattenmagasin samt information från geologiska karteringar. Det är svårt eller rent av omöjligt att med den tillgängliga informationen identifiera enskilda läckande sprickor, även om det mycket väl skulle kunna handla om några få konduktiva sprickor som orsakar ökningen i inläckage vid ökad grundvattenbildning. Istället har fokus i detta arbete legat på att kartlägga generella geologiska egenskaper samt att identifiera större svaghetszoner där det finns en större sannolikhet att träffa på konduktiva sprickor jämfört med omgivande berg.

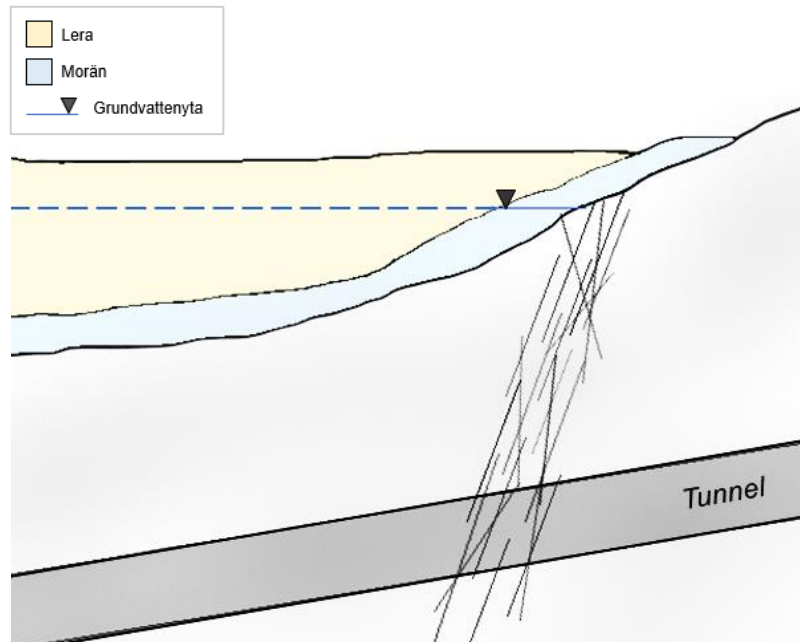
### 5.5.1 Arbetstunnel Lovö

Flera av områdets dominerande svaghetszoner finns i arbetstunnelns närhet, och de anges ha nära vertikal stupning (Berzell, 2011). Dominerande svaghetszoner är sådana som bedöms ha högre vattengenomsläpplighet eller mer signifikant utbredning. Dalgången som tunneln passerar är täckt med lera, och det ytliga lagret dräneras av ett dike som leder vattnet till Mälaren i nordöst (se Figur 24). Undre grundvattenmagasin som kan stå i kontakt med berget finns i ett friktionsjordlager under lerlagret. Dalgången är troligtvis uppdelad i flera olika grundvattenmagasin av lokala bergtrösklar.



Figur 24. Kartan visar arbetstunneln på Lovö, mättdammens position samt förekomster av inläckage som observerats under den geologiska karteringen.

I det aktuella tunnelavsnittet har flera punkter med droppande eller rinnande vatten karterats (blå markeringar i Figur 24 ovan). Rinnande vatten har framförallt observerats i de mer ytliga delarna (längdmätning 0/500-800), men det förekommer också droppande vatten på större djup (0/300-400). De observerade inläckagen uppträder ungefär kring två svaghetszoner utmed sidorna av dalgången, samt i höjd med den åkerholme som sticker upp över leran i dalgången. Med tanke på svaghetszonernas lägen och att inläckage observerats kring dem, skulle ett samband enligt förklaringsmodell 3 vara möjligt, d.v.s. grundvattenmagasinen ökar i utbredning vid en höjd grundvattennivå och då kommer i kontakt med nya sprickor, eller en svaghetszon, i utkanten av magasinet. Se Figur 25 nedan för en konceptuell modell. Detta stöds av det faktum att det finns tydliga samband med grundvattennivån men inte med grundvattenbildning i regressionsanalysen (se avsnitt 5.3 ovan).

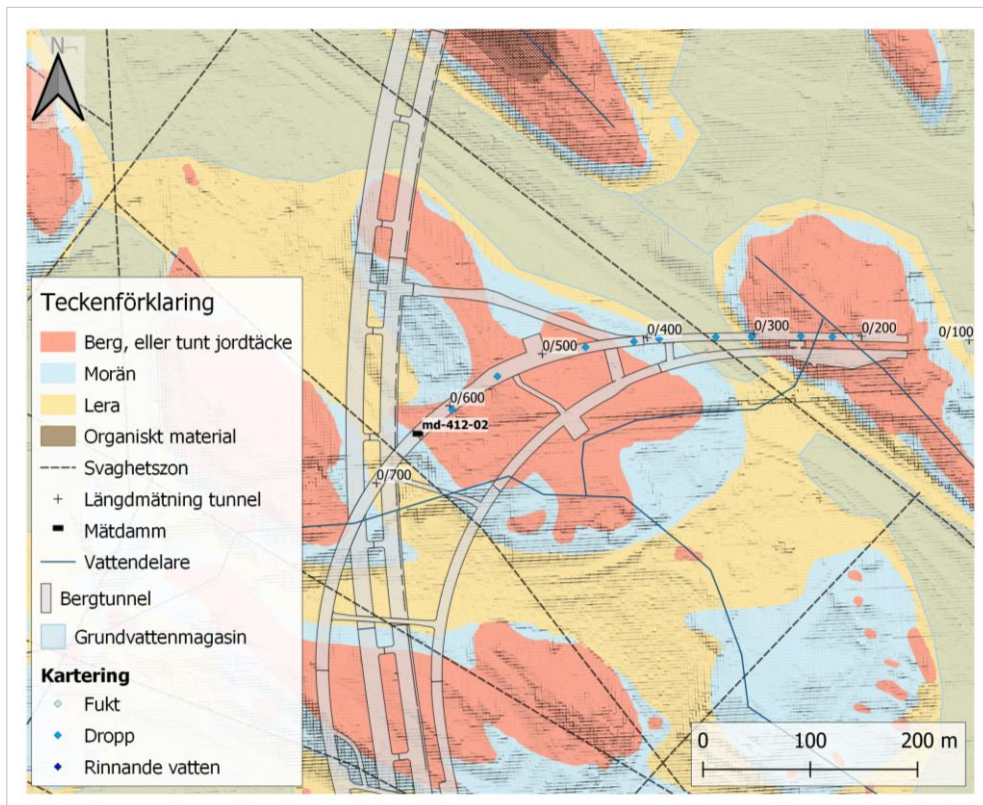


Figur 25. Svaghetszon i utkanten av ett grundvattenmagasin. Konceptuell bild av den geologiska struktur som skulle kunna kopplas till förklaringsmodell 3.

### 5.5.2 Ramptunnel Johannelund

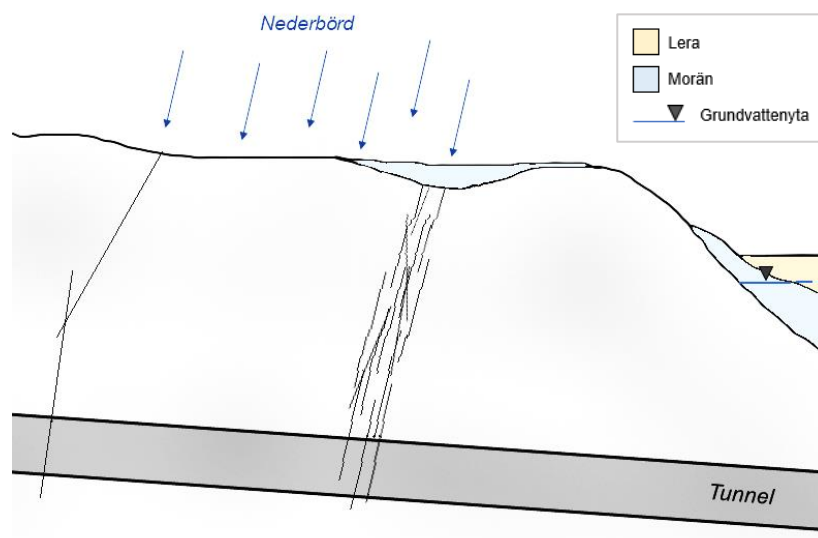
I Johannelund består majoriteten av markytan ovanför den aktuella tunnelsträckan av morän och berg i dagen, dvs höjdområden där grundvattenbildning kan ske. Det finns inga svaghetszoner i dessa höjdområden (se Figur 26 nedan). Tunneln korsar dock också en smalare dalgång med lera som präglas av en kraftig svaghetszon. Enligt den ingenjörsgelogiska prognosen är bergtäckningen mycket liten här, och man har använt sig av jetinjektering i sedimenten ovanför tunneln för att förstärka tunneltaket (A. Strandanger, personlig kommunikation, 13 maj, 2022). Vidare är detta den mest ytliga tunneln totalt sett, med ett medeldjup på mindre än 20 meter (övriga tunnlar har medeldjup på 47 respektive 30 m). Enligt Berzell (2011) består det undre friktionsjordslagret strax sydost om tunneln av sandig morän som antas ha god vattengenomsläpplighet. Dalgången som tunneln korsar finns precis i utkanten av ett stort grundvattenmagasin, med en vattendelare ca 100 m söder om tunneln.

Droppande vatten finns karterat lite spritt utmed hela sträckan, men framförallt mellan ca 0/290-330, där en krosszon markerats. Se de blå markeringarna i kartan nedan (Figur 26). Detta innebär att svaghetszonen troligtvis finns i den östra utkanten av dalgången. Det är möjligt att svaghetszonens position vid bergytan skiljer sig från dess position i tunnelkonturen. Dock har Rhén et al. (1997) funnit att samtliga sprickor som identifierats vid ytkartering i ett annat område även går att observera på större djup, och därmed är det sannolikt att svaghetszonens läge i tunneln är någorlunda representativt för dess ytläge, framförallt med tanke på att ramptunneln på denna plats har ett relativt ytnära läge. Strax efter svaghetszonen har jet-injektering noterats i tunneltaket, och även kring denna finns en del dropp (strax innan 0/350). Den stora andelen höjdområden, det faktum att inläckageökningen verkar komma innan ökningen i grundvattennivå, samt det i sammanhanget starkare sambandet med grundvattenbildning pekar mot ett samband enligt förklaringsmodell 2, d.v.s. att torrlagda sprickor fylls med vatten och orsakar inläckage vid nederbörd. Dock antyder mängden dropp kring den karterade svaghetszonen och sambandet med grundvattennivån i regressionsanalysen även ett samband enligt förklaringsmodell 3.



Figur 26. Kartan visar ramptunneln i Johannelund, mätdammens position samt förekomster av inläckage som observerats under den geologiska karteringen.

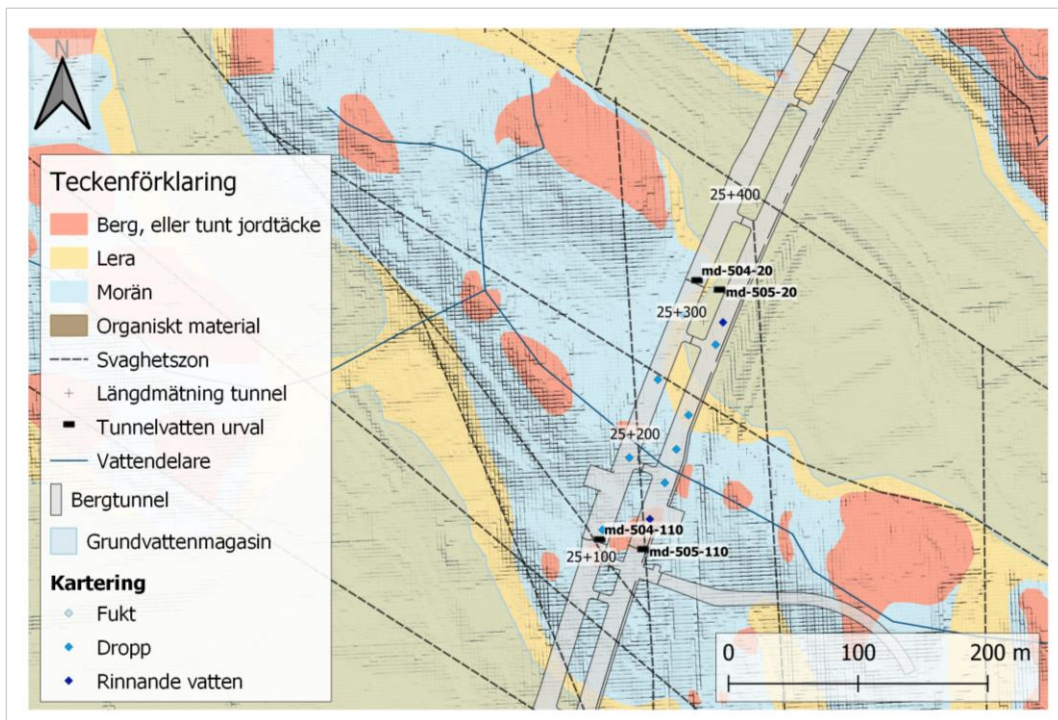
Figur 27 visar en konceptuell modell över hur ett samband enligt förklaringsmodell 2. skulle kunna se ut. En förekomst av svaghetszoner i höjdområdena öka sannolikheten för det föreslagna sambandet. Svaghetszoner hänger också ofta samman med lokala svackor i landskapet, vilket har visats vara en viktig förutsättning för grundvattenbildning från jord till berg (Olofsson, 1994). I Johannelund finns inga svaghetszoner utmarkerade i de geologiska kartorna, men det finns en svaghetszon med dropp karterad i själva tunneln kring 0/475. Svaghetszoner är dock inte en förutsättning för den här typen av inläckage, utan det kan handla om enskilda konduktiva sprickor i bergytan.



Figur 27. Spricka och svaghetszon i höjdområde. Konceptuell bild av geologiska strukturer som skulle kunna kopplas till förklaringsmodell 2.

### 5.5.3 Huvudtunnlar Lunda

Tunnelavsnittet börjar under ett höjdområde som till största del är täckt av morän, och endast de sista 100 m finns under en lertäckt dalgång, se Figur 28 nedan. Tunneln passerar under en förmodad vattendelare och går in under ett grundvattenmagasin i dalgången. Det bedöms finnas ytterligare ett grundvattenmagasin uppströms åt nordväst (strax utanför kartan), som avgränsas med en bergtröskel. Flera svaghetszoner med stor utbredning korsar tunneln i det aktuella tunnelavsnittets närområde enligt Berzell (2011), men ligger till synes utanför den aktuella sträckan. På andra geologiska kartor (t.ex. i Trafikverkets TMO) syns några möjliga svaghetszoner som korsar tunnelavsnittet i höjdområdet. Dessa syns i Figur 28 nedan. Enligt den ingenjörsgelogiska prognosen finns områden med sämre berg strax innan och strax efter sträckan.



Figur 28. Kartan visar huvudtunnlarna vid Lunda, mätdammarnas position samt förekomster av inläckage som observerats under den geologiska karteringen.

I detta examensarbete har geologin i Lunda inte undersökts särskilt, eftersom inga tydliga samband kunde observeras mellan inläckage och grundvattennivåer eller de två grundvattenbildningsuppskattningarna, samt att inläckagedatan är kraftigt påverkad av efterinjektering. Det hade annars varit en intressant sträcka att titta på eftersom den är relativt kort och ligger konsekvent på ett större djup utan ytkoppling (Lovö-tunneln går ner på nästan 100 m djup, men har också en ytkoppling). Den geologiska miljön hade kunnat tala för ett samband både enligt förklaringsmodell 2 och 3. Det kan dock påpekas att det observerats spridda fall av dropp längs hela tunnelavsnittet i den geologiska karteringen (se de blå markeringarna i Figur 28 ovan), vilket också gör det svårt att peka på enskilda strukturer som skulle kunna orsaka kopplingen med grundvattenbildning.



## 6 Diskussion

Ett av huvudsyftena med detta examensarbete är att beskriva några fall av varierande inläckage som observerats vid bygget av Förbifart Stockholm, samt att påvisa och försöka förklara dessa variationer i inläckage och hur de hänger samman med grundvattennivåer och olika uppskattningar av grundvattenbildning. Som en del av detta utreds också variationens koppling till föreslagna förklaringsmodeller. Arbetssättet har utvecklats iterativt under arbetets gång, och i slutändan är det framför allt regressionsanalys i kombination med geologisk information som använts för att undersöka och tolka mönster i data från de utvalda tunnelsträckorna.

Den genomsnittliga korrelationskoefficienten för grundvattennivåer och inläckage på Lovö är 0.58 för de rör som har ett statistiskt signifikant samband (se Tabell 2 i avsnitt 5.3.2). Detta innebär att ca 34 % av variationen i inläckaget kan förklaras enbart av grundvattennivån. Utifrån de tolkningar som gjorts av Cesano et al. (2000) och Holmøy and Nilsen (2014) kan detta tolkas som ett starkt samband. Det här resultatet indikerar att ett samband enligt förklaringsmodell 3 är möjligt (grundvattenmagasin som ökar i utbredning vid grundvattenbildning). Faktorer som skulle tala för detta är att de grundvattenrör som ligger på sluttningar i utkanten av dalgången/grundvattenmagasinet blir torrlagda någon gång under sommarmånaderna (16A098RU, 19S152RU, GWJ866 och R07VK36U, se Figur 5 i avsnitt 3.2.1). Det betyder alltså att grundvattnet faktiskt sjunker undan från dessa högre belägna områden under perioder med låg grundvattenbildning, och att sprickor som står i kontakt med tunneln i dessa områden kan bli helt dränerade och därmed inte bidra till inläckaget under den torra perioden. Vidare kan man utifrån karteringar och med hjälp av information från byggledningen på entreprenaden konstatera att inläckaget framför allt sker i de norra delarna av tunneln (se Figur 24). Allra främst sker inläckaget på en kort sträcka under åkerholmen där svaghetszoner har karterats. Två svaghetszoner finns i närheten av detta område enligt de geologiska kartor som använts i studien, och enligt PM Hydrogeologi (Berzell, 2011) finns sannolikt en bergtröskel under leran som delar av de två grundvattenmagasinen från varandra. Det finns alltså förutsättningar precis här för att grundvattennivån höjs och sänks periodvis och kommer i och ur kontakt med vattenbärande svaghetszoner. En av svaghetszonerna har dessutom en utbredning längs dalgångens norra utkant, vilket teoretiskt sett möjliggör liknande förhållanden med periodvis kontakt med grundvattnet för denna svaghetszon. Förutsatt att svaghetszonen är någorlunda vattenförande kan det ske en transport och dränering av grundvatten till tunneln från större avstånd längs dalgången.

För ramptunneln i Johannelund är motsvarande korrelation med grundvattennivån i 0,5 i snitt, vilket innebär ett något svagare men fortfarande starkt samband. Dalgången som tunneln korsar innehåller en stor svaghetszon (se Figur 26 för karta). Utifrån dess placering enligt karteringsdokumentet (ca 0/280-320), ligger den nära den nordöstra utkanten av dalgången, vilket innebär att det sannolikt finns sprickor i kontakt med svaghetszonen som ibland står torrlagda för att sedan fyllas med vatten när grundvattennivån höjs och magasinet ökar i utbredning, enligt förklaringsmodell 3. Två av brunnarna som ligger i dalgången i nära anslutning till svaghetszonen visar också på en fluktuation och en periodvis torrläggning, vilket talar för sambandet. Det som skulle tala emot ett samband av denna typ, eller

åtminstone att det inte är den enda förklaringen, är att inläckageökningen verkar komma redan innan grundvattennivåerna börjar öka (se Figur 17 avsnitt 5.2.2.2). Det skulle kunna betyda att bara en liten ökning i grundvattennivån räcker för att magasinet ska komma i kontakt med torrlagda sprickor och aktivera nya läckvägar. En annan möjlighet är att inläckaget även har en koppling till direkt grundvattenbildning, och att ökningen i inläckage kommer mer direkt som en reaktion på ökad grundvattenbildning (exempelvis nederbörd), innan denna grundvattenbildning leder till en ökad nivå i grundvattenmagasinet. Det skulle alltså även kunna finnas ett samband enligt förklaringsmodell 2. Det som också talar för detta är till exempel att majoriteten av tunnelsträckan ligger under höjdområden där det inte finns permanenta grundvattenmagasin i jord, och där grundvattenbildning är teoretiskt möjlig tack vare bristen på lertäckning. I de geologiska kartorna finns ingen svaghetszon markerad i höjdområdena, men vid 0/475 finns en svaghetszon (NNÖ-SSV) utmarkerad i de geologiska karteringarna av tunnelväggar och tak. Utspritt längs med tunneln, långt från dalgången, har också droppande sprickor karterats (se Figur 26), vilket skulle tyda på ett inläckage från grundvattenbildningsområdena. Det har inte gått att definitivt påvisa något starkt samband med de olika grundvattenbildningsmåttent rent statistiskt, men sambandet är starkare i Johannelund än i övriga områden.

Inget samband går att påvisa i Lunda, till skillnad från de andra tunnelavsnitten. De genomsnittliga korrelationskoefficienterna för grundvattennivå i båda tunnelrören ligger kring 0,2. I korskorrelationsanalysen är korrelationskoefficienterna relativt höga, men osäkerheterna i användningen av denna metod är så stora att det inte går att säga något utifrån dess resultat. Samband med nettonederbörden går eventuellt att skönja för ett av tunnelrören (504) vid en visuell analys av tidsserierna, men det går alltså inte att bekräfta detta samband statistiskt. Utifrån detta skulle förekomsten av ett samband i området kunna avfärdas, och en analys av skillnader mellan detta och övriga områden skulle kunna göras. Till exempel skulle djupberoende och påverkan från tunnelpåslag vid ytan kunna diskuteras, eftersom detta är faktorer som skiljer detta tunnelavsnitt från de övriga som undersökts. Det är dock svårt att göra några sådana jämförelser eftersom det genomförts omfattande efterinjektering på denna sträcka, något som inte har gjorts på övriga tunnelsträckor som undersökts. Efterinjekteringen minskar inläckaget och tätar läckvägar som kan tänkas kvarstå i de andra tunnelavsnitten.

## 6.1 Metodval

I detta arbete har analysmetoderna utvecklats iterativt, och det bör därför diskuteras hur väl de valda parametrarna och metoderna mäter det som faktiskt skulle undersökas.

Linjär regressionsanalys är en etablerad metod för att undersöka samband mellan parametrar. Metoden har också använts i tidigare studier specifikt för att utvärdera olika parametrars påverkan på inläckage (Cesano et al., 2000; Holmøy & Nilsen, 2014). Det ska dock noteras att metoden inte ger någon indikation om sambandets karaktär, utan endast om det finns ett samband eller inte. I och med detta kan det vara svårt att skilja på olika underliggande orsaker till sambandet, såsom vilken mekanism som gör att en höjd grundvattennivå ger ökat inläckage. Jämförelser av de olika sambandens lutningskoefficienter, samt jämförelse med annan kompletterande information (geologi, analytiska ekvationer) behövs för att kunna tolka resultatet. För denna studie, vars syfte främst var att påvisa samband som tidigare observerats men inte studerats närmare, räcker detta som analysmetod. För djupare studier av sambandets karaktär krävs dock andra metoder.

Residualanalys är ett viktigt komplement för att tolka resultaten från en regressionsanalys. Till exempel kan residualerna ge information om huruvida den oberoende parametern i det

antagna sambandet kan förklara hela variationen, eller om sambandet är icke-linjärt. I fallet med inläckage och grundvatten i berg är det dock svårt att göra några djupare tolkningar, eftersom inläckaget naturligt beror på ett flertal faktorer såsom bergets lokala permeabilitet, egenskaper hos överliggande jordlager och tunneltätningen.

Korskorrelationsanalys hade kunnat ge kompletterande och tydligare information om sambandens tidsmässiga beroende och fördröjningar, men den data som användes för denna studie lämpade sig inte för denna typ av analys. Korskorrelation har dock stor potential för att undersöka sambandet vidare, förutsatt att mer högupplösta data kan göras tillgängliga.

### **6.1.1 Grundvattennivåmätningar**

Syftet med att jämföra inläckaget med grundvattennivåmätningarna var att finna bevis för ett samband enligt förklaringsmodell 3. Grundvattennivåmätningarna är ett konkret mått på det grundläggande sambandet – att en höjd grundvattennivå skapar förutsättningar för ökat inläckage. Det som är svårare att påvisa är att ökningen beror specifikt på att nya läckvägar aktiveras, och inte på någon annan faktor. Sambandet enligt förklaringsmodell 3 hade sannolikt kunnat vara icke-linjärt: ökningen i inläckage med ökande grundvattennivå hade kunnat tänkas ske ”stegvis” med brytpunkter varje gång en ny spricka aktiveras, eller någon form av exponentiell ökning i och med att fler och fler konduktiva sprickor bidrar till inläckaget. Det finns dock inga indikationer på den här typen av samband i mätvärdena som analyserats i denna studie, och det är också svårt att veta vad för mönster som ska sökas eftersom det inte verkar ha gjorts några studier på just detta tidigare.

Att inläckageökningen vid en höjd grundvattennivå endast skulle bero på en ökad hydraulisk gradient mot tunneln kan dock avfärdas i och med att lutningskoefficienten hos det linjära sambandet (från regressionsanalysen) är starkare än vad som ges av ekvationen från Gustafson (2009) (se figur i Bilaga D). Detta talar alltså för att det finns fler aspekter av grundvattennivån som påverkar inläckaget. För att kunna bekräfta det specifika sambandet som föreslagits behöver det göras närmare studier av de lokala förhållandena.

### **6.1.2 Grundvattenbildning**

Den direkta grundvattenbildningen uppskattades med två olika mått, och syftet var att undersöka samband enligt förklaringsmodell 2. Grundvattenbildning är mycket svårt att mäta och uppskatta, och därmed medför de antaganden som gjorts vid valet av grundvattenbildningsmått flera potentiella felkällor. De mått som använt i detta arbete är enkla att ta fram, men de är också mycket grova. Nettonederbörden som mått tar exempelvis inte hänsyn till infiltrationsegenskaperna hos jordlagret vid markytan. Användningen av nivåförändringen i referensrör förutsätter i stället att grundvattenbildningen vid referensrören motsvarar de lokala förhållandena vid de aktuella tunnelsträckorna, samt att nederbördsmönstret är lika på båda platserna, även om de ligger en bit ifrån varandra. De mått som använts ger troligtvis en acceptabel uppskattning av när nettonederbörden varit positiv och det finns potential för grundvattenbildning, men det är alltså grova uppskattningar.

En ytterligare komplikation är att det inte direkt med de metoder som använts går att bekräfta att orsaken till sambandet är precis det som föreslås, precis som för grundvattennivån i avsnittet ovan. En förutsättning för ett samband enligt förklaringsmodell 2 är en förekomst av ytliga hållar och moränområden, vilket kan bekräftas i geologiska kartor. Men det krävs också att det finns ytliga, öppna sprickor som dessutom bör ligga i flacka områden eller till och med lokala svackor, för att infiltration ska kunna ske på det sätt som föreslås (Olofsson, 1994). Det hade alltså krävts närmare fältstudier för att säkert kunna bekräfta detta samband. Ett annat

sätt att undersöka sambandet hade varit att göra närmare beräkningar av flödestiden från yta till tunnel i en spricka (enkla sådana beräkningar finns i Bilaga D), och att använda mer högupplöst nederbörds- och inläckagedata för att jämföra flödestiden med fördröjningen mellan ökningarna i de båda parametrarna. Detta hade t.ex. kunnat göras med korskorrelation, men det kräver alltså en helt annat typ av data än den som använts i denna studie.

I denna studie har glidande medelvärden använts för att analysera grundvattenbildningsuppskattningarna. Syftet med detta är bl.a. att skapa tydligare mönster i de relativt brusiga mätvärdena. För nivåförändringarna i referensrören har ett 7-dagars medelvärde använts, eftersom inläckagedatans mätfrekvens för det mesta ligger på ca 1 gång/vecka. För nettonederbörden har olika perioders medelvärden använts, bl.a. för att jämföra effekten från längre perioders vädermönster. Sambandet med nederbörden blir starkare när en längre periods glidande medelvärde jämförs med inläckaget (30-dagars jämfört med 10-dagars). Denna längre periods medelvärde skulle kunna kopplas till en höjd grundvattennivå, som sannolikt följer efter perioder med högre nettonederbörd. I det fallet är inte längre nettonederbörden ett mått på det samband som sökt, nämligen sambandet med direkt grundvattenbildning (förklaringsmodell 2). En alternativ tolkning av detta är att sambandet med nederbörd är större under perioder när grundvattenbildningen generellt sett är stor. Detta hade t.ex. kunnat bero på att effekter av luftbubblor och annat minskar när sprickorna är mättade med vatten (Sweetenham et al., 2017).

## 6.2 Osäkerheter

Det finns en rad osäkerheter och felkällor som påverkar och försvårar analysen i detta arbete. I avsnittet nedan diskuteras ett antal av dessa och vad som hade behövt göras för att komma till rätta med dem.

### 6.2.1 Data och mätosäkerheter

En mycket grundläggande felkälla är mätosäkerheter i inläckagedatan. Mätningarna av inläckage sker för det mesta med hink och klocka vid mätdammar, alternativt utifrån flödesmätningar vid pumpgropar. Denna data blir känslig för mänskliga fel vid mättillfället, utöver de fel som kan härledas till problem med mätutrustningen i sig. Framför allt vid höga flöden blir det svårt eller rent av omöjligt att mäta flödet med hög noggrannhet, antingen för att det är så kraftigt att den som mäter får svårt att hinna registrera flödet, eller att mätdammar svämmer över och hela flödet därmed inte kan fångas i mätpunkten. Spross (2011) har undersökt mätningar av inläckage vid bygget av Norra Länken, och lyfter även andra möjliga felkällor, som t.ex. att vatten ibland pumpas mellan olika mätområden på väg upp ur tunneln, samt att inläckagemätningar kan störas av vatten som rinner mellan olika tunnelrör via utrymningsvägar och tvärtunnlar.

Ett annat problem med mätningarna vid bygget av Förbifart Stockholm är att de är gjorda under pågående tunneldrivning. För att komma runt störningar orsakade av artificiellt tillfört processvatten i tunnarna, genomförs mätningar i regel i efter helgen då det varit uppehåll i byggnationen under ett par dygn (Spross, 2011). Ibland genomförs dock arbeten även på helgen, vilket gör att tillfört vatten måste dras bort manuellt från mätvärdena. Även om dessa potentiella störningar hanteras kvarstår problem med en tunnel och en geologisk miljö i ständig förändring i och med den fortsatta framdriften och byggnationen. Detta försvårar tolkningen av andra effekter, såsom ökningarna i grundvattennivå eller grundvattenbildning. På grund av störningar orsakade av tunnelbyggnationen saknas mätningar för vissa tidpunkter,

vilket leder till ojämna data där mätfrekvensen redan är låg. Även i de fall där mätserierna är relativt jämna är det svårt att analysera mönster över tid, eftersom mätdammarna endast har funnits under det fåtal år som gått sedan den aktuella tunnelsektionen drevs ut. De mätdammar som används under byggtiden rivs också när det är dags för vägläggning och andra installationer i tunneln. Sammanfattningsvis behövs längre och mer ostörda dataserier, t.ex. från en färdigställd tunnel, för att kunna göra en säkrare analys. En studie på en färdig tunnel hade dessutom varit mer relevant för att bedöma de undersökta sambandens långvariga omgivningspåverkan, och därmed också sambandets betydelse vid tillståndsansökningar.

Vidare påverkas resultaten av databehandlingen, framför allt vad gäller grundvattennivån. I detta arbete har datapunkter där det saknas ett uppmätt värde på inläckaget eller en grundvattennivå helt enkelt tagits bort, vilket innebär att "lågpunkter" i datan där ett grundvattenrör står torrlagt inte markeras lika tydligt i analysen. För de rör som ligger utanför permanenta grundvattenmagasin, t.ex. i sluttningar, kan detta alltså ha gjort att sambanden blivit svagare än förväntat.

## 6.2.2 Grundvattenbildning

Grundvattenbildning, och i synnerhet grundvattenbildning till berg, är en komplex process som både är svår att mäta och uppskatta analytiskt. Det pågår i dagsläget fortsatt forskning för att få en bättre förståelse för grundvattenbildningens mekanismer och hur de kan uppskattas. Ett flertal olika sätt att uppskatta grundvattenbildning används vid t.ex. modellering och uppskattning av inläckage till tunnlrar, där nettonederbörd och infiltrationskoefficienter för olika marktyper spelar en stor roll (Andersson, 2019; Barkels & Silva Parra, 2010; Berzell, 2011; Floren, 2015). Vattenbalansberäkningar kan också användas, men de kräver kunskap om övriga parametrar i vattenbalanskvationen (Ekvation 4), såsom avrinning och förändring av mängd magasinerat vatten.

I detta arbete har enkla och relativt grova uppskattningar av grundvattenbildning använts, eftersom huvudsyftet inte har varit att i detalj beskriva grundvattenbildningen. Att använda nettonederbörden som ett mått på grundvattenbildning motsvarar en grov uppskattning av den potentiella grundvattenbildningen, och den kan ge en generell uppfattning om huruvida mycket eller lite vatten tillförs systemet under en viss period. I ett längre perspektiv, dvs flera år, är detta en något mer korrekt beskrivning av grundvattenbildningen, eftersom den i detta tidsperspektiv motsvarar avrinningen från ett område där all nederbörd kan infiltrera i marken (Rodhe et al., 2006). Det ska dock inte ses om ett mått på den faktiska grundvattenbildningen till berg i det kortare tidsperspektiv som gäller för denna undersökning, eftersom grundvattenbildningen även beror på faktorer såsom markens infiltrationsförmåga, processer i markvattenzonen, kontakten mellan berg- och jordmagasin osv.

Den ekvation för avdunstning som använts ger den maximala potentiella avdunstningen, och beräkningssättet är empiriskt (se avsnitt 4.2.1). Ekvationen kan anses ta hänsyn till variationer mellan åren, i och med att avdunstningen är proportionell mot den faktiska uppmätta temperaturen, och till växtsäsongen, i och med att sinus-komponenten ger en högre avdunstning på sommaren när växterna är aktiva, oavsett temperatur. I beräkningen av avdunstningen tas också hänsyn till minusgrader, i och med att avdunstningen då sätts till noll. Konceptuellt fungerar alltså ekvationen väl, men i verkligheten beror avdunstningen på fler faktorer, såsom vindhastighet, luftfuktighet, markförhållanden etc. Även om avdunstning är mycket svårt att uppskatta, är det inte bara den som bidrar med osäkerhet. I nederbördsdatan tas ingen hänsyn till om nederbörden faller som snö eller regn, även om detta spelar stor roll för hur snabbt nederbörden kan infiltrera och bilda grundvatten. Inte heller det faktum att frusen mark kan förekomma och förhindra grundvattenbildning vid plusgrader

beaktas med denna modell. Sammanfattningsvis finns många svagheter med detta sätt att uppskatta grundvattenbildning, men det kan åtminstone anses ge en grov uppskattning av den potentiella grundvattenbildningen som är tillräcklig för denna inledande undersökning av de observerade sambanden.

Genom att använda förändring i grundvattennivån som mått på grundvattenbildning, enligt vattenbalansen som beskriver vattnets kretslopp, behövs inga uppskattningar av avdunstning eller infiltrationskoefficienter – ändringen är ett mått på det vatten som faktiskt har nått ett grundvattenmagasin. De grundvattenrör som använts för att uppskatta grundvattenbildningen i denna studie är dock kopplade till ett grundvattenmagasin i jord, och det kan diskuteras huruvida dessa mäter det som eftersöks. Syftet med att jämföra den direkta grundvattenbildningen med inläckaget är främst att försöka påvisa möjligheten för ett samband enligt förklaringsmodell 2, som bygger på ett inläckage kopplat till sprickor på öppna hållar utan koppling till jordmagasin och alla de processer som styr grundvattenbildningen till dessa. Infiltrationskoefficienten för berghällar är till exempel lägre än för jordarter, framför allt grövre jordarter som t.ex. sand, samtidigt som sprickor i berghällar sannolikt inte direkt påverkas av växternas transpiration. Att det sker en ökning av grundvattennivån i ett jordmagasin innebär alltså inte nödvändigtvis att motsvarande mängd vatten kommer ett öppet bergmagasin till del, och innebär därmed inte att det också sker lika stor grundvattenbildning till öppna bergsprickor. Slutligen är det värt att påpeka att de referensrör som valts (*Lövön\_1* och *Vaxholm\_12*), inte ligger i direkt anslutning till de aktuella tunnelsträckorna. Även om de ligger i samma region kan egenskaperna hos grundvattenmagasin variera stort och det är inte givet att de berörda grundvattenmagasinen och grundvattenbildningsområdena kring tunnelsträckorna uppvisar ett motsvarande beteende.

Även om en mer avancerad modell för grundvattenbildningen hade tagits fram, hade detta inte nödvändigtvis underlättat analysen i detta arbete. Detta eftersom det finns problem med datan i denna undersökning som omöjliggör en rättvisande analys av sambandet med inläckage i tunnlar. Det är framför allt själva inläckagedatan som är den svaga punkten. Dels finns det mätosäkerheter som kan knytas till mätmetoden, enligt vad som diskuteras i avsnitt 6.2.1 ovan. Det största problemet för analysen av grundvattenbildningssambandet är dock den låga mätfrekvensen och oregelbundenheten hos mätningarna. Olofsson (1994) har visat att grundvatten från jordlager kan flöda snabbt ner till flera 100 meters djup om det finns konduktiva sprickor. Den låga mätfrekvensen på max ett mättillfälle per vecka gör att det inte går att fånga ökning i inläckage som sker med en responstid på någon eller några dagar efter ett större nederbördsevent, vilket är vad som borde förväntas om den här ökningen orsakas av direkt infiltration i konduktiva sprickor på berghällar och liknande. Oregelbundenheten gör det dessutom omöjligt att genomföra en korskorrelationsanalys där data förskjuts för att undersöka fördröjningen i responsen hos inläckaget. I ett vidare arbete hade det alltså varit intressant att försöka påvisa ett samband med bättre data, dvs inläckagedata med högre mätfrekvens och mindre störningar.

### 6.2.3 Val av statistiska metoder

Regressionsanalys som verktyg för att upptäcka den här typen av samband kan diskuteras. Dels skulle man kunna tänka sig att ökningen med en ökad grundvattennivå borde vara icke-linjär (t.ex. stegvis) eftersom det är nya läckvägar som aktiveras och ger en ”plötslig” ökning i den potentiella flödesvolymen till tunneln, något som också omnämns i avsnitt 6.1. Det som framför allt kan diskuteras kring metoden är alltså regressionsanalysens antagande om att sambandet mellan parametrarna är linjärt, något som inte är givet och som enligt observationer i det ursprungliga exjobbetsförslaget inte tycks stämma (Forsberg &

Strandanger, 2021). I denna situation, när det inte finns någon indikation om hur det faktiska sambandet ser ut, är det dock inte heller motiverat att ansätta något annat samband än det linjära. Detta resonemang har också använts av bl.a. Cesano et al. (2000), och även Holmøy and Nilsen (2014) använder sig av linjär regression för att testa sina hypoteser. Antagandet i denna studie är att inläckaget ökar med ökad grundvattenbildning och/eller högre grundvattennivå i intilliggande akviferer. Ett linjärt samband kan åtminstone visa om det finns tyngd bakom dessa generella antaganden.

Korskorrelation kunde inte genomföras fullt ut på grund av brister i data, vilket diskuteras under avsnitt 5.4 ovan samt i Bilaga C. Korskorrelation hade dock varit intressant, framför allt för att undersöka sambandet mellan parametrarna vid olika tidpunkter. Mendoza et al. (2008) har till exempel använt korskorrelation för att undersöka samband och förskjutningar i tid mellan flödet i en flod och nivån i omgivande grundvattenrör. Metodiken hade framför allt varit intressant för att undersöka sambandet mellan grundvattenbildning och inläckage. För att kunna applicera motsvarande metodik hade det dock behövts mer högupplöst data, dvs med mätningar varje dag eller till och med varje timme.

#### **6.2.4 Val av tunnelsträckor och inverkan av geologiska aspekter**

Förutom störningar från bygget och närheten till andra tunnelavsnitt härstammar en del av osäkerheterna i denna studie troligtvis från valet av tunnelsträckor samt de geologiska förhållanden och byggnadstekniska val som dessa associeras med.

De tunnelsträckor som valts ut är långa. Framför allt arbetstunneln på Lovön är nästan 1 km lång, och övriga tunnelsträckor uppgår till flera 100 m. Det blir därför svårt att göra jämförelser mellan påverkan från enskilda geologiska strukturer och huruvida tunneldjupet påverkar sambanden som observerats. En del specificerande information om inläckaget går att få från geologiska karteringar som finns tillgängliga inom projektet. Även om dessa i första hand är gjorda för att bedöma bergets hållfasthet och behovet av mekanisk förstärkning finns noteringar av inflödande vatten av olika magnitud (fukt, droppande vatten och rinnande vatten). Bedömningarna av flödesmängderna är dock subjektiva och upp till den enskilde geologen, vilket gör att det ändå är svårt att avgöra var det mest signifikanta inläckaget finns. En annan svårighet med denna typ av information är att den endast fås i direkt kommunikation med anställda i projektet.

Ofta har det ytligaste berglagret utsatts för mer erosion och sprickbildande processer än den underliggande bergmassan, vilket innebär att detta ytliga lager har högre genomsläpplighet. Båda tunnlar där starkare samband kunde erhållas har en direkt koppling till en tunnelmynning och kan därmed antas ligga, åtminstone delvis, i ytligt och mer konduktivt berg. I underlaget till detta exjobb (Forssberg & Strandanger, 2021) konstateras det att inläckaget är större i ytliga system, men det är svårt att göra någon analys av djupberoendet av två skäl. För det första innefattar tunnelavsnitten med ytnära sektioner också sektioner på större djup: uppåt 30 meter i Johannelund och närmare 100 meter i de djupaste delarna av arbetstunneln på Lovön. Dessutom är datan från det enda tunnelavsnittet som konsekvent ligger på större djup (dvs >20 meter) starkt påverkat av efterinjektering (Lunda), och det har inte gått att observera något samband med vare sig grundvattennivån eller den uppskattade direkta grundvattenbildningen för detta avsnitt.

Både för- och efterinjektering påverkar det naturliga flödesmönstret i stor utsträckning, även om ett inläckage kan ledas om till mindre sprickor och kvarstå även efter att injektering har genomförts. Det hade dock inte varit intressant att undersöka helt oinjekterade tunnlar i detta arbete, eftersom majoriteten av alla bergtunnlar är förinjekterade, och syftet med arbetet är att

undersöka verkliga samband som påverkar tunnelbyggen. Däremot hade det varit mer meningsfullt att jämföra tre tunnlar med ungefär samma injekteringsförfarande. I ett av områdena i denna studie (Lunda) har efterinjektering genomförts på hela sträckan, vilket sannolikt avlägsnat eventuella kvarvarande samband efter förinjekteringen. Det är troligen en anledning till att inläckaget visar liten variation och endast i liten utsträckning påverkas av grundvattennivå och grundvattenbildning.

Slutligen är det svårt att tolka vad ett samband mellan inläckage i ett tunnelavsnitt och grundvattennivån i enskilda rör egentligen betyder. De flesta rör som undersökts ligger i samma grundvattenmagasin, så vad betyder det att det finns skillnader i korrelationen med inläckaget? Betyder det att sambandet med grundvattennivån i vissa områden spelar större roll än i andra, och betyder det i sin tur att det är variationen hos de geologiska strukturerna i detta område som har störst betydelse för variationen i inläckage? Mendoza et al. (2008) har använt skillnader i korrelationskoefficienten för att, tillsammans med geofysiska data, dra slutsatser om flödesvägar och ursprunget hos vattnet i en flod och olika grundvattenrör i omgivningen. Om det antas att denna metodik kan appliceras även på andra former av grundvattenflöden, såsom inläckage till tunnlar, skulle korrelationskoefficienter kunna användas för att avgöra var betydande geologiska strukturer finns. Dessa förutsätter dock förmodligen en komplett korskorrelationsanalys, för att avgöra vilken parameter som är den beroende faktorn, samt ytterligare data som skulle kunna användas för att bekräfta geologiska strukturer eller flödesriktningar, såsom geofysiska undersökningar eller temperatur och grundvattenkemiska data för att kunna spåra flödesriktningen.

## 6.3 Förklaringsmodellernas lämplighet

En frågeställning i detta arbete var huruvida det finns andra förklaringsmodeller i litteraturen utöver de som föreslagits av Trafikverket. Inga ytterligare förslag på förklaringsmodeller har dock funnits under litteraturstudien till detta arbete. Därmed är det framför allt de ursprungliga förklaringsmodellernas lämplighet som utvärderats i dataanalysen. I detta avsnitt sammanfattas och diskuteras de tre ursprungliga förklaringsmodellernas relevans och möjliga förutsättningar som krävs för att de ska uppstå.

### 6.3.1 Förklaringsmodell 1

#### *En ökad grundvattennivå ger en ökad hydraulisk gradient*

Ett grundläggande antagande som motiverar behovet av detta examensarbete är att denna förklaringsmodell inte ensam kan förklara variationen i inläckage. Tryckökning som en faktor för ökat inläckage kan inte avfärdas, men precis som förväntat verkar variationen i inläckage vara större än vad som kan förklaras med endast denna faktor. Lutningskoefficienten för den analytiska ekvationen (Ekvation 2) motsvarar inte den faktiska lutningen när uppmätt data som används i spridningsdiagram (se Bilaga D för exempel), och stickprovsberäkningarna med den analytiska ekvationen visar att en tryckökning inte ger korrekta ökning i inläckage med ökad grundvattennivå. Se resultat från beräkningarna i Bilaga D. Ekvationen ger värden i rätt storleksordning, men kan alltså inte fånga hela ökningen i inläckage med en ökad grundvattennivå. Därmed antas förklaringsmodellen vara tillämplig, men inte tillräcklig för att förklara de samband som observerats.

Den analytiska ekvationens (Gustafson, 2009) lämplighet för den aktuella typen av samband kan diskuteras. Ekvationen bygger på antaganden om bl.a. stationärt tillstånd, något som inte



stämmer särskilt väl för de undersökta tunnelsträckorna. Vidare bygger ekvationen till stor del på en uniform hydraulisk konduktivitet hos bergmassan, något som sannolikt inte gäller i mindre skala. De beräkningar som gjorts för att bedöma ekvationens och trycknivåns roll för sambandet kan anses påvisa bristerna med denna förklaringsmodell, men själva beräkningarna måste ses som grova uppskattningar.

### 6.3.2 Förklaringsmodell 2

#### *Tidigare dränerade sprickor på t.ex. berghällar fylls med vatten vid grundvattenbildning (nederbörd)*

Det är inte möjligt att påvisa något tydligt samband mellan den uppskattade direkta grundvattenbildningen och inläckage enligt de kriterier som använts i andra studier (Cesano et al., 2000; Holmøy & Nilsen, 2014), även om ett samband kan skönjas i en visuell analys av tidsserierna för inläckage och de olika grundvattenbildningsuppskattningarna. En möjlig slutsats av detta är givetvis att det inte finns något samband enligt förklaringsmodell 2, åtminstone för Lovö och Lunda. Det är dock svårt att dra definitiva slutsatser om den direkta grundvattenbildningen dels på grund av osäkerheterna i själva metoderna för att uppskatta grundvattenbildning, dels på grund av bristande dataunderlag (för låg mätfrekvens för att kunna fånga mönster). Ett exempel är mätfrekvensen för inläckaget. Det bör inte ta mer än några enstaka dagar för att vattnet ska kunna rinna från en spricköppning på en berghäll till tunneln, medan mätfrekvensen för inläckaget är maximalt en gång i veckan. För att kunna dra några tydligare slutsatser om denna förklaringsmodell behöver sambandet undersökas med bättre data, samt eventuellt mer utvecklade uppskattningar av den direkta grundvattenbildningen.

Den tunnelsträcka där sambandet är starkast, om än inte helt tydligt, är kring ramptunneln i Johannelund. I tidsserierna från detta område verkar toppar i inläckage förekomma ökningen i grundvattennivå i närliggande grundvattenrör (se Figur 17 i avsnitt 5.2.2.2). Detta kan ses som en indikation på att det inte endast är grundvattennivån som orsakar en ökning i inläckage. Inläckage som skulle kunna förklaras av denna modell har observerats i områden med ytliga hållar, och i detta område finns också en större andel potentiella grundvattenbildningsområden med hållar och morän. För att infiltration i ytliga sprickor ska vara möjlig kan det krävas speciella förhållanden med flacka hållar och öppna sprickor, samt eventuellt även förekomst av små lokala svackor för att generera den här typen av läckage i någon betydande mängd. Sådana förhållanden har dock inte undersökts närmare i denna studie.

### 6.3.3 Förklaringsmodell 3

#### *Grundvattenbildning leder till en höjd grundvattennivå och ökad lateral utbredning av grundvattenmagasin, vilket aktiverar tidigare dränerade sprickor*

Resultatet av denna studie ger starkast stöd för denna förklaringsmodell. Korrelationskoefficienter visar att sambandet med grundvattennivån är relativt sett starkt och går utöver det som förklaras av tryckökningen som en höjd grundvattennivå orsakar, åtminstone i Johannelund och på Lovö. Utöver starka korrelationer mellan grundvattennivå och inläckage finns geologiska strukturer som skulle kunna förklara sambandet. Med dessa strukturer avses svaghetszoner utmed utkanten av grundvattenmagasin, som med stor sannolikhet innehåller konduktiva sprickor som kan aktiveras vid en högre grundvattennivå, men som vid andra tidpunkter står torrlagda. Det skulle kunna finnas enskilda, ”fristående”

sprickor som orsakar en ökning i inläckaget, men sannolikheten att sådana påträffas är mycket högre i en svaghetszon.

## 6.4 Omgivningspåverkan och applicerbarhet

Konsekvenser och omgivningspåverkan av de samband som diskuterats i detta arbete har inte utretts särskilt i denna studie. Inläckage och variation av denna är i sig inget miljöproblem, så länge det inte påverkar grundvattnet negativt. De samband som diskuteras i detta arbete handlar snarare om hur inläckaget ökar och minskar som ett resultat av vattentillgången i omgivningen, något som inte nödvändigtvis orsakar en mer omfattande negativ påverkan på grundvattnet. Möjligtvis hade t.ex. ett samband enligt förklaringsmodell 3 kunnat innebära att grundvattenmagasinens högstanivå begränsas, i och med att inläckaget ökar mer vid en höjd grundvattennivå på grund av de aktiverade, tidigare torra sprickorna. Påverkan på grundvattnet från områden med eller utan den här typen av samband bör undersökas i vidare studier för att bedöma om detta är något som bör tas i beaktande vid tillståndsansökningar för tunnelbyggnation.

Konsekvenserna av de samband som diskuteras i detta arbete kan vara av betydelse för tunnelbyggaren och tillståndprocessen, oavsett om det får utökande konsekvenser för omgivningen eller inte. Om tillstånd för grundvattenbortledning ansätts med konventionella metoder utan att ta hänsyn till att inläckaget kan variera med grundvattenbildning och tillgång, finns det risk att inläckagekraven blir onödigt strikta och kräver en orimlig mängd tätning. Injekteringsbruk och injekteringsprocessen förbrukar också resurser, vilket medför större kostnader för samhälle och miljö samtidigt som omgivningspåverkan från säsongsbundet höga inläckage kanske inte är så stor.

De metoder som använts vid förundersökningarna för Förbifart Stockholm tar inte hänsyn till årstidsvariationer, utan bygger endast på årsmedelvärden för grundvattenbildningsparametrarna. Om de undersökta sambanden visar sig ha en omgivningspåverkan, eller en negativ påverkan på själva tunneln på grund av stora vattenmängder, blir det relevant att kunna förutsäga var denna typ av mönster kan uppkomma.

## 7 Slutsatser och rekommendationer

Detta examensarbete har undersökt samband mellan inläckage till tunnlar i berg och grundvattenbildning samt grundvattennivåer. Ett mönster i inläckaget har observerats av Trafikverket under bygget av Förbifart Stockholm, och syftet med detta arbete har varit att studera några fall av inläckage som uppvisar detta mönster, att undersöka möjliga förklaringsmodeller samt att undersöka om förklaringsmodellerna kan verifieras med data från tunnelprojektet.

Även om det finns ett stort antal studier om tunnelprojekt och inläckage, så handlar de oftast om modellering och omgivningspåverkan, snarare än om hur grundvattenbildning och relaterade faktorer påverkar inläckaget. Därmed är en slutsats att det inte verkar finnas några förslag på förklaringsmodeller i litteraturen, utöver de som föreslogs i den ursprungliga problemställningen från Trafikverket.

I detta arbete har tre olika tunnelavsnitt i Förbifart Stockholm studerats, framför allt genom regressionsanalys av inläckagedata. De tre tunnelavsnitten är en arbetstunnel på Lovön, en ramptunnel i Johannelund samt huvudtunnlar i Lunda. Det går att observera ett samband mellan variationer i inläckage och grundvattennivåer, utöver det som kan förklaras med endast en trycknivåökning, för två av tre tunnelsträckor. Detta skulle kunna indikera ett samband enligt förklaringsmodell 3, som innebär att grundvattenmagasin ökar i utbredning vid en ökad grundvattennivå och aktiverar torrlagda sprickor i kontakt med tunneln. Den geologiska förklaringen till sambandet föreslås vara svaghetszoner nära utkanten av grundvattenmagasin. För den tredje tunnelsträckan (Lunda) är datan tydligt påverkad av efterinjektering, vilket antas vara en stor anledning till att inget samband kan observeras.

Det verkar inte finnas några starka samband mellan inläckage och direkt grundvattenbildning i form av nettonederbörd eller grundvattennivåförändringar i referensmagasin. Ett något starkare samband finns för en av tunnelsträckorna (Johannelund), även om det inte är lika starkt som sambandet med grundvattennivån (se föregående stycke). I detta område består också en större del av markytan av höjdområden där grundvattenbildning förväntas ske. Detta kan indikera ett samband enligt förklaringsmodell 2, vilket innebär att torrlagda sprickor eller svaghetszoner på hållar och ytligt berg (utan permanenta grundvattenmagasin) aktiveras vid grundvattenbildningstillfällena och ger kortvarigare inläckageökningar. Det finns dock stora problem med mätfrekvensen hos datan som omöjliggör en fullständig analys av grundvattenbildningens påverkan. Det är därmed en aspekt som bör undersökas med bättre data i framtida studier. Andra stora osäkerheter, förutom mätosäkerheter och bristande mätfrekvens, är påverkan från valet av tunnelsträckor, osäkerheter i antagandena för linjär regression samt förenklingar i beräkningarna för grundvattenbildning.

Detta arbete påvisar, trots osäkerheterna, att ett samband mellan grundvattenbildning, grundvattennivåer och inläckage beror av fler faktorer än bara tryckökningar i samband med en ökande grundvattennivå. Detta stämmer väl överens med grundläggande principer för kristallint berg, såsom dess heterogenitet och enskilda spricksystems stora påverkan på grundvattenflödet. Det krävs dock fler studier för att verifiera sambandet och undersöka dess betydelse vid planeringen av tunnelprojekt.

## 7.1 Rekommendationer för framtida studier

Denna studie är endast första steget i en undersökning av sambandet mellan grundvattenbildning, grundvattennivå och inläckage, och kan inte appliceras vid exempelvis planeringen av nya tunnelprojekt. Resultatet visar dock att data från Förbifart Stockholm kan styrka att det finns ett samband som utöver det som kan förklaras med traditionella antaganden, samt att det finns geologiska förutsättningar för de förklaringsmodeller som föreslagits.

Därmed visar också detta examensarbete på behovet av vidare studier, och kan utgöra en grund för fortsatta undersökningar. Till exempel behöver den direkta grundvattenbildningen enligt förklaringsmodell 2 utvärderas och uppskattas med andra metoder, eller åtminstone med en annan typ av data för att fånga snabbare och mer kortvariga impulser i inläckaget. Kontinuerliga mätningar av inläckaget hade varit det bästa. Det hade även varit intressant att titta närmare på olika metoder för att uppskatta grundvattenbildning. Ett ytterligare förslag är att utvärdera inläckaget i andra tunnlar med samma metoder för att bekräfta resultaten från denna studie. Framför allt bör samma metoder appliceras på färdigställda tunnlar med längre mätserier. Det hade även varit av intresse att jämföra en ytlig och en djupt liggande tunnel under liknande geologiska förutsättningar.

För att kunna kartlägga och diskutera eventuell omgivningspåverkan från de observerade sambanden krävs mer kunskap om vilka geologiska strukturer som kan ligga bakom dessa. Ett mer omfattande arbete hade därför kunnat innefatta sammanställning av detaljerad geologisk information kombinerat med eget fältarbete för att närmare studera de strukturer som identifierats i denna studie. Det hade även kunnat vara intressant att använda vattenkemi eller isotoper för att utvärdera det inläckande vattnets härkomst. Tunnlar som är under konstruktion lämpar sig dock inte för detta, eftersom det inläckande vattnets kemi kan påverkas av sprängämnesrester, injekteringsmedel osv. Andra förslag på fortsatta studier är att utvärdera de föreslagna geologiska strukturerna eller förklaringsmodellerna genom modellering. Längre fram hade det kunnat vara intressant att undersöka andra faktorer påverkan på grundvattenbildning och inläckage, såsom t.ex. dränering av ytliga magasin via diken, läckage från vattenledningar och påverkan från närliggande större ytvattenreserver, för att få en mer detaljerad bild av ytterligare aspekter som kan vara av vikt för inläckaget.

Om faktiska strukturer som orsakar den här typen av samband kan identifieras hade det varit av intresse att utvärdera och utveckla olika förundersöknings- och beräkningsmetoders möjligheter att upptäcka strukturerna. I förlängningen bör man också försöka definiera konkreta metoder för att förutsäga var den här typen av samband kan uppkomma.

## 8 Referenser

- Andersson, A. (2019). *Utvärdering av prediktion och utfall av inläckage i bergtunnel: Fallstudie E4 Förbifart Stockholm* [Examensarbete, Uppsala Universitet]. Institutionen för geovetenskaper. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1320334&dswid=4258>
- Andersson, P., & Sellner, A. (2000). *Tätning av bergtunnlar – förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser* (2000:101). Vägverket. [https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10421/RelatedFiles/2000\\_101\\_tatning\\_av\\_bergtunnlar.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10421/RelatedFiles/2000_101_tatning_av_bergtunnlar.pdf)
- Axelsson, C.-L., & Follin, S. (2000). *Grundvattensänkning och dess effekter vid byggnation och drift av ett djupförvar* (SKB Rapport R-00-21). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Banks, D., Robins, N., & Robins, N. (2002). *An introduction to groundwater in crystalline bedrock*. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Barkels, D., & Silva Parra, A. (2010). *ANALYS ÖVER INLÄCKAGE AV GRUNDVATTEN TILL FÖRBIFART STOCKHOLM FÖR DELTUNNEL UNDER LOVÖ* [Kandidatarbete, KTH]. Mark- och Vattenteknik. Stockholm.
- Berzell, A. (2011). *E4 Förbifart Stockholm. PM Hydrogeologi*. Trafikverket. <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/vi-bygger-och-forbattrar/Forbifart-stockholm/Dokument/>
- Blomberg, F. (2015). *Inläckage i dagbrott: En jämförelse mellan beräknade och uppmätta värden i dagbrott i norra Sverige* [Examensarbete, Stockholms universitet]. Institutionen för naturgeografi. Stockholm. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:853666/FULLTEXT02.pdf>
- Cameron, A. C. (2009). *Excel 2007: Multiple Regression*. Dept. of Economics, University of California - Davis. Retrieved 2002-05-24 from <http://cameron.econ.ucdavis.edu/excel/ex61multipleregression.html>
- Cesano, D., Olofsson, B., & Bagtzoglou, A. C. (2000). Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels—a statistical study of the Bolmen tunnel in Southern Sweden. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), 153-165. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00043-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00043-2)
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology* (Vol. 506). Wiley New York.
- Engström, A., Persson, K., & Gustafsson, G. (2009). *Nytan av vattenförlustmätningar vid tätning av tunnlar = The use of water pressure tests (WPT) in sealing of tunnels*. Stiftelsen bergteknisk forskning.
- Eveborn, D., Vikberg, E., Thunholm, B., Hjerne, C., & Gustafsson, M. (2017). *Grundvattenbildning och grundvattentillgång i Sverige* (RR 2017:09). Sveriges Geologiska Undersökning. <http://resource.sgu.se/produkter/regeringsrapporter/2017/RR1709.pdf>
- Farhadian, H., & Nikvar-Hassani, A. (2019). Water flow into tunnels in discontinuous rock: a short critical review of the analytical solution of the art. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3833-3849. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1348-9>
- Fetter, C. W. (2014). *Applied hydrogeology*. Pearson Education.
- Floren, S. (2015). *Grundvattenbildning till berg : en litteraturstudie samt fallstudie av järnvägstunneln delen Varberg-Hamra* [Examensarbete, Lunds universitet]. Miljövetenskap, Centrum för klimat- och miljöforskning. <http://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=catt07147a&AN=lub.4700729&site=eds-live&scope=site>
- Forsberg, O., & Strandanger, A. (2021). *Samband mellan grundvattenbildning och inläckage till tunnlar - Input till examensarbete*.

- Forsberg, O., Strandanger, A., Båtelsson, O., Jenryd, R., & Petersson, T. (2022). *Uppföljning av kontrollprogram vattenverksamhet - Rapport 26. Period från December 2021 till februari 2022*. Trafikverket.
- Fransson, Å., & Gustafson, G. (2008). *Efterinjektering - Sammanställning och kompletterande analys för efterinjekteringsarbeten i Hallandsås och Nygårdstunneln* (SveBeFo rapport 90). STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING.
- Gustafson, G. (2009). *Hydrogeologi för bergbyggare*. Formas.
- Hamnö, A. (2017). *E4 Förbifart Stockholm. Teknisk beskrivning - Tillståndsansökan för vattenverksamhet*. Trafikverket. <https://bransch.trafikverket.se/forbifartstockholm-dokument>
- Holmøy, K., & Nilsen, B. (2014). Significance of geological parameters for predicting water inflow in hard rock tunnels. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(3), 853-868. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00603-013-0384-9>
- Kvaerner, J., & Snilsberg, P. (2013). Hydrogeological impacts of a railway tunnel in fractured Precambrian gneiss rocks (south-eastern Norway). *Hydrogeology Journal*, 21(7), 1633-1653. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1014-z>
- MathWorks. (u.å.). *xcorr*. Retrieved 2022-08-12 from <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/xcorr.html>
- Mendoza, A., Ulriksen, P., Picado, F., & Dahlin, T. (2008). Aquifer interactions with a polluted mountain river of Nicaragua. *Hydrological Processes*, 22(13), 2264-2273. <https://doi.org/10.1002/hyp.6822>
- Olofsson, B. (1994). Flow Of Groundwater From Soil To Crystalline Rock. *Applied Hydrogeology*, 2(3), 71-83. <https://doi.org/10.1007/s100400050052>
- Onkenhout, J. (2011). *E4 Förbifart Stockholm PM Hydrogeologi - Bilaga 5 Hydrogeologiska beräkningar*. Trafikverket.
- Ormann, L. (2006). *Grundvattenpåverkan kring järnvägstunnlar i berg* [Examensarbete, Uppsala universitet]. Institutionen för geovetenskaper. [http://www.w-program.nu/filer/exjobb/Linda\\_Ormann.pdf](http://www.w-program.nu/filer/exjobb/Linda_Ormann.pdf)
- Ragvald, J. (2012). *Ett gruvschakts påverkan på grundvattnets nivå och strömning i det omgivande berget* [Examensarbete, Uppsala Universitet]. Institutionen för geovetenskaper. [http://www.w-program.nu/filer/exjobb/Johanna\\_Ragvald.pdf](http://www.w-program.nu/filer/exjobb/Johanna_Ragvald.pdf)
- Rhén, I., Bäckbom, G., Gustafson, G., Stanfors, R., & Wikberg, P. (1997). Results from pre-investigations and detailed site characterization, Summary Report. In: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Stockholm.
- Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J., & Pers, C. (2006). *Grundvattenbildning i svenska typjordar—översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell* (Report Series A No. 66 ). Geotryckeriet Uppsala Universitet.
- Samuelsson, I. (2007). *Utvärdering av inläckande grundvatten i bergtunnlarna inom projekt Södra Länken* [Examensarbete, Uppsala Universitet]. Institutionen för geovetenskaper. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-397846>
- Spross, J. (2011). *Mätning av inläckande vatten i bergtunnlarna inom projekt Norra länken* (2011:137). Trafikverket.
- Stockholm Vatten och Avfall. (2022, 10 mars). *Så byggs tunneln*. Retrieved 2022-04-28 from <https://www.stockholmvattenochavfall.se/framtidensavloppsrening/ny-avloppstunnel/tunnelfakta/sa-byggs-tunneln/>
- Sweetenham, M. G., Maxwell, R. M., & Santi, P. M. (2017). Assessing the timing and magnitude of precipitation-induced seepage into tunnels bored through fractured rock. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 65, 62-75. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.02.003>
- Thelander, F. (2021). *Modellering av grundvattennivån i samband med tunnelbyggnation* [Examensarbete, Uppsala Universitet]. Institutionen för geovetenskaper. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1583837/FULLTEXT01.pdf>
- Tilly, L. (2001). *E4 Förbifart Stockholm - MKB Vattenverksamhet*. Trafikverket. <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/vi-bygger-och-forbattrar/Forbifart-stockholm/Dokument/>
- Trafikverket. (2014). *E4 Förbifart Stockholm - Presentation mark- och miljödomstolen - dag 2, del 2*. <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/vi-bygger-och-forbattrar/Forbifart-stockholm/Dokument/>

- Trafikverket. (2021). *Om E4 Förbifart Stockholm-projektet*. Retrieved 2022-03-10 from <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/vi-bygger-och-forbattrar/Forbifart-stockholm/Om-projektet/>
- Vännman, K., & Dunkels, A. (2002). *Matematisk statistik*. Studentlitteratur.
- Wahlgren, C., Schoning, K., Tenne, M., & Hansen, L. (2018). *Stockholmsområdets berggrund, jordarter, geologiska utveckling och erfarenheter från infrastrukturprojekt* (SGU-rapport 2018:08). Sveriges Geologiska Undersökning.
- Werner, K. (2006). *Slutförvar Forsmark, Simpevarp och Laxemar. Inläckage av grundvatten samt påverkan på hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden* Svensk Kärnbränslehantering AB.

# Bilagor

<b>A. Använda mätdammar och grundvattenrör</b>	1
<b>B. Detaljerade resultat av regressionsanalysen</b>	2
<b>C. Korskorrelation</b>	7
<b>D. Beräkningar</b>	8



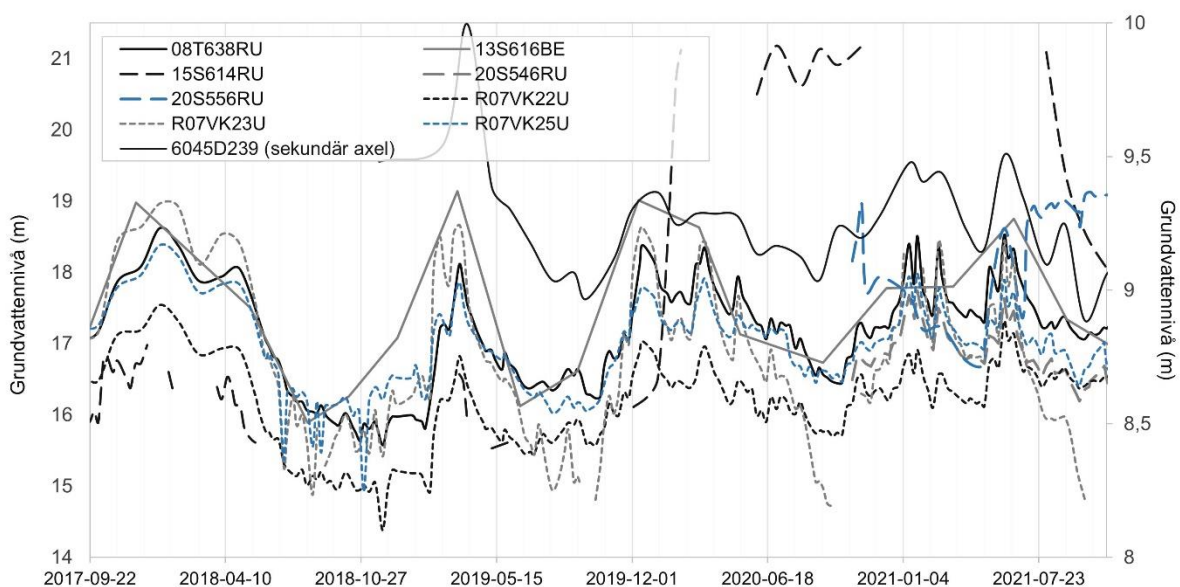
## A. Använda mätdammar och grundvattenrör

Tabell A-1. Lista över de mätdammar och grundvattenrör varifrån data har hämtats för de olika områdena.

	Lovö	Johannelund	Lunda
Inläckagemätningar	L4-D19 (delsträcka)	md-412-02 (mätdamm)	md-504-110 (mätdamm) md-504-20 (mätdamm)
	Innefattar värden från: Stuff-393 md-393-01 (mätdamm) md-393-02 (mätdamm)		md-505-110 (mätdamm) md-505-20 (mätdamm)
Grundvattenrör	08F203BE (bergbrunn)	12A531RU	13S616BE (bergbrunn)
	16A089RU	15A106RU	08F648BE (bergbrunn)
	19S152RU	18S501RU	08F598RU
	GWJ866	E403G03	08T638RU
	R07VK36U	E403G05u	6045D239
	R07VK37U	R07VK44U	6045W183
	R07VK38U		E410G01u
			R07VK22U
			R07VK23U
			R07VK25U

### A1. Grundvattennivåer i Lunda

Figur A-1 nedan visar grundvattennivåer i Lunda för de grundvattenrör som inte presenterades i avsnitt 5.2.1.3.



Figur A-1. Grundvattennivåer i Lunda. För grundvattennivån används höjdsystemet RH00.

## B. Detaljerade resultat av regressionsanalysen

I rapporten redovisades endast urval och genomsnitt av de resultat som erhöles under dataanalysen. I denna bilaga presenteras detaljerade resultat för alla grundvattenrör och de olika försöken.

Tabell B-1. Detaljerade resultat från regressionsanalysen av grundvattennivåer och inläckage. Benämningar märkta med \* innebär att endast den ostörda delen av tidsserierna har använts vid analysen.

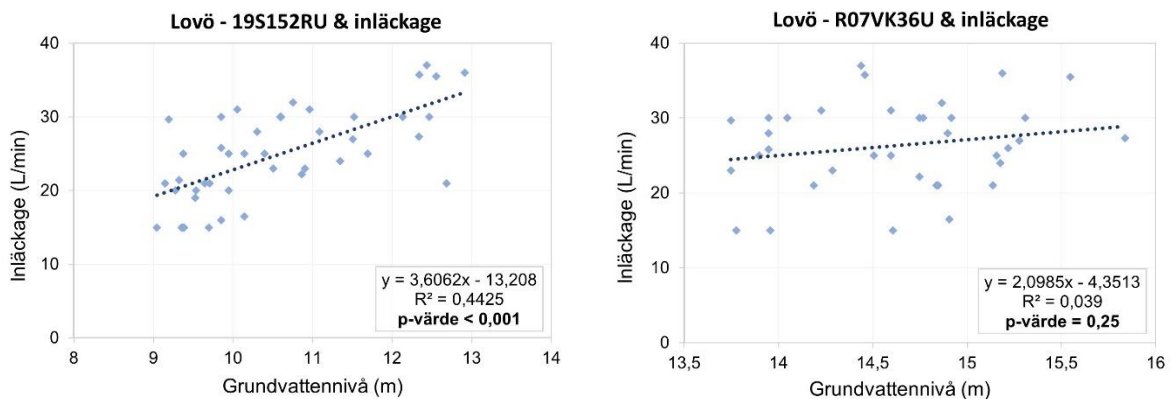
Lovö		08F203BE	16A089RU*	19S152RU	GWJ866	R07VK36U*	R07VK37U*	R07VK38U*
	<b>R2</b>	0,083	0,26	0,44	0,013	0,039	0,31	0,33
	<b>C</b>	0,29	0,51	0,67	0,11	0,20	0,56	0,57
	<b>p-värde</b>	0,28	0,004	<0,001	0,48	0,25	<0,001	<0,001
Johannelund		12A531RU*	15A106RU*	18S501RU*	E403G03u*	E403G05u*	R07VK44U*	
	<b>R2</b>	0,47	0,21	0,16	0,26	0,074	0,22	
	<b>C</b>	0,68	0,46	0,40	0,51	0,27	0,46	
	<b>p-värde</b>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,089	<0,001	
Lunda		08F598RU	08T368RU	6046W183	E410G01u	R07VK22U	R07VK23U	R07VK25U
504	<b>R2</b>	0,062	0,040	0,004	0,0009	0,042	0,0005	0,039
505		0,034	0,062	0,005	0,010	0,067	0,004	0,056
	<b>C</b>	0,025 0,019	0,20 0,25	0,065 0,072	0,029 0,098	0,20 0,26	0,022 0,061	0,20 0,24
	<b>p-värde</b>	0,002 0,024	0,016 0,002	0,43 0,38	0,72 0,22	0,012 0,001	0,80 0,47	0,017 0,003
504	<b>R2</b>	0,16	0,092	0,12	Dessa bergbrunnar och grundvattenrör hade mycket låg mätfrekvens eller matchade dåligt rent tidsmässigt med inläckagedatan.			
505		0,089	0,022	0,43				

Tabell B-2. Detaljerade resultat från regressionsanalysen av nettonederbörd samt nivåändring i referensrör (uppskattnings av grundvattenbildning) och inläckage. 10-dygn och 30-dygn avser vilket glidande medelvärde som använts. Mod. Innebär att endast den ostörda delen av tidsserierna har använts vid analysen. Den röda texten för Johannelund innebär att resultatet ska tolkas med försiktighet, eftersom det baseras på ett litet antal mätpunkter.

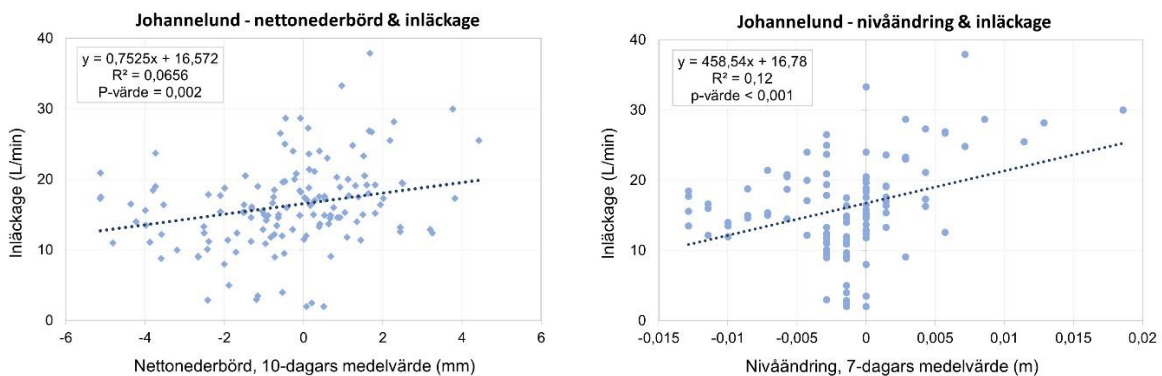
		Nettonederbörd		Nivåändring i referensrör			
		10-dygn	30-dygn	Lovön_1		Vaxholm_12	
				Mod.	Förskj.	Mod.	Förskj.
Lovö	<b>R2</b>	0,001	0,001	0,008	0,063	0,012	0,022
	<b>C</b>	0,038	0,032	0,088	0,25	0,11	0,15
	<b>p-värde</b>	0,65	0,69	0,41	0,018	0,27	0,073
Johannelund	<b>R2</b>	0,098	0,18	0,26	0,008	0,12	0,015
	<b>C</b>	0,31	0,42	0,51	0,089	0,34	0,12
	<b>p-värde</b>	0,002	<0,001	0,013	0,5	<0,001	0,14

Lunda	504	0,023	0,039	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	505	0,002	0,013	0,013	0,039	<0,01	<0,01
	<b>R2</b>	0,15	0,20				
	<b>C</b>	0,043	0,11				
		0,06	0,013				
		<b>p-värde</b>	0,59	0,16			

Figurerna nedan är ett urval av spridningsdiagram från regressionsanalysen av de olika parametrarna: grundvattennivå, nettonederbörd och nivåändring.



Figur B-1. Exempel på spridningsdiagram från regressionsanalys av grundvattennivå och inläckage. Diagrammet till vänster visar ett grundvattenrör där sambandet med inläckaget är statistiskt signifikant ( $p < 0,05$ ), medan figuren till höger visar ett samband som inte är statistiskt signifikant.



Figur B-2. Exempel på spridningsdiagram från regressionsanalys av direkt grundvattenbildning. I vänstra figuren visas sambandet mellan nettonederbörd och inläckage, medan den högra figuren visar nivåändringen i referensför Vaxholm\_12 jämfört med inläckaget.

## B1. Multipel regression

Tabell B-3 nedan visar regressionsparametrar från den multipla regressionen som genomfördes för Johannelund. Ett värde beräknades för varje grundvattenrör i kombination med ett mått på direkt grundvattenbildning åt gången. Vid jämförelse med Tabell B-1 ovan framgår det att korrelationskoefficienter och R2-värden förbättras för alla grundvattenrör, dock endast med några få procentenheter. Vidare är inte alla ansatta samband statistiskt signifikanta ( $p < 0,05$ ).

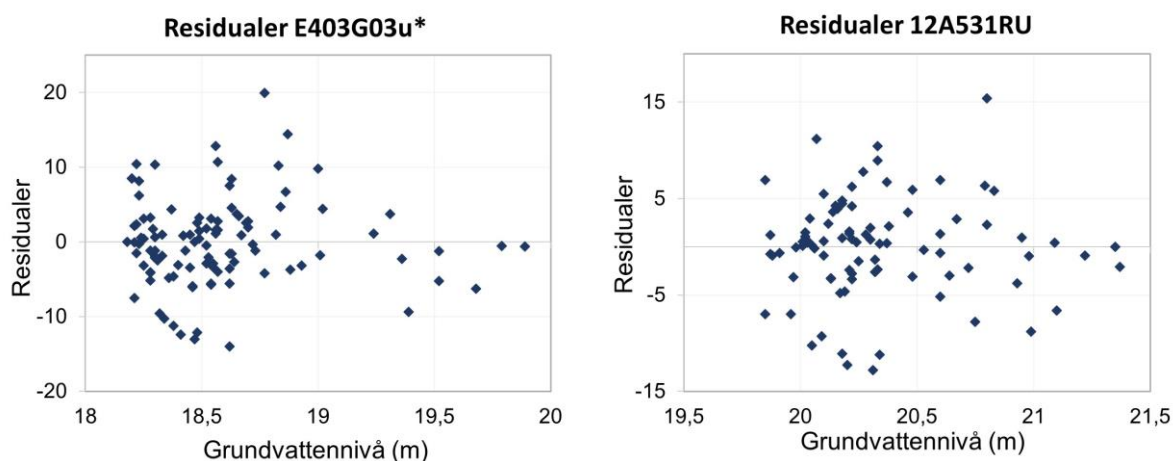
Tabell B-3. Detaljerade resultat från multipel regression för Johannelund, där både grundvattennivån och ett mått på den direkta grundvattenbildningen ansattes som oberoende variabler för regressionen. Benämningar märkta med \* innebär att endast den ostörda delen av tidsserierna har använts vid analysen.

Nettonederbörd 10-dygns medelvärde	12A531RU*	15A106RU*	18S501RU*	E403G03u*	R07VK44U*
<b>R2</b>	0,47	0,27	0,19	0,28	0,27
<b>C</b>	0,68	0,52	0,43	0,53	0,52
<b>p-värde</b>	0,58	0,005	0,05	0,11	0,004
Nivåändring, Vaxholm_12 7-dygns medelvärde					
<b>R2</b>	0,47	0,25	0,19	0,29	0,26
<b>C</b>	0,68	0,50	0,44	0,54	0,51
<b>p-värde</b>	0,78	0,035	0,035	0,029	0,01

## B2. Residualer

En detaljerad residualstudie är inte central i detta arbete, och det går inte heller att dra några större slutsatser av residualerna, eftersom det är givet att variationen i inläckage styrs av mer än en faktor. Analysen kan endast ge en indikation hur stark påverkan från andra faktorer kan förväntas vara.

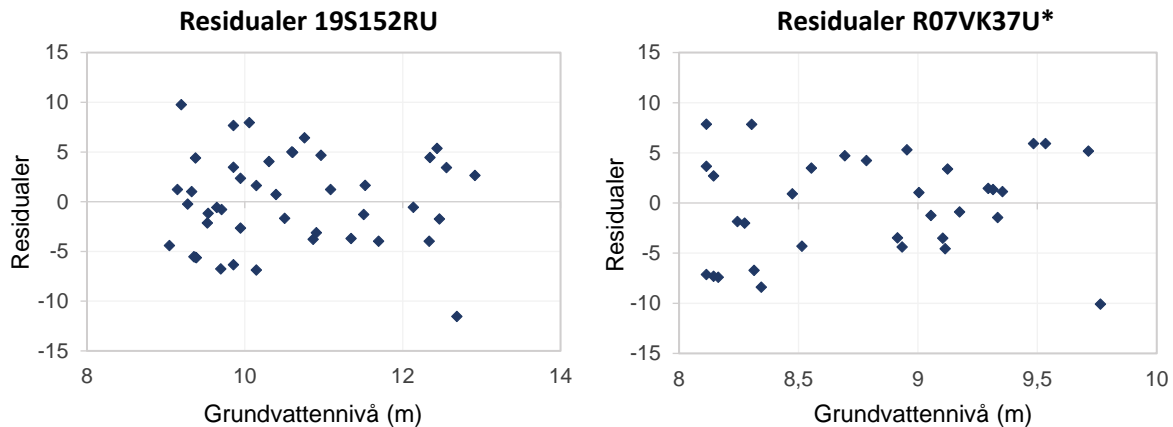
För grundvattennivåerna på Lovön och i Johannelund ser residualerna ut att vara relativt jämnt fördelade kring x-axeln för de grundvattenrör som uppvisar ett samband med inläckaget. Residualerna ser också ut att bli betydligt mer slumpmässigt fördelade om störande delar av dataserien tas bort, vilket är rimligt i och med att passformen av den linjära regressionen också blev bättre i detta fall. Det ser dock ut att kvarstå ett visst mönster framförallt för grundvattenrören kring Johannelund. Mönstret antar antingen en böjd, icke-linjär karaktär, eller så minskar spridningen i datan med ökande grundvattennivå. Se exempel på detta i Figur B-3 nedan.



Figur B-3. Exempel på residualplottar för Johannelund (grundvattenrör E403G03u och 12A531RU).

Residualerna för grundvattennivåerna på Lovö uppvisar en något mer slumpmässig fördelning jämfört med de i Johannelund, men det finns fortfarande en antydning till ett mönster (se Figur B-4 nedan). Mönstret ser också likartat ut för alla rör med stark korrelation till inläckaget. Detta

skulle kunna betyda att sambandet egentligen är icke-linjärt, eller att det finns en annan variabel som samspelar med grundvattennivån.

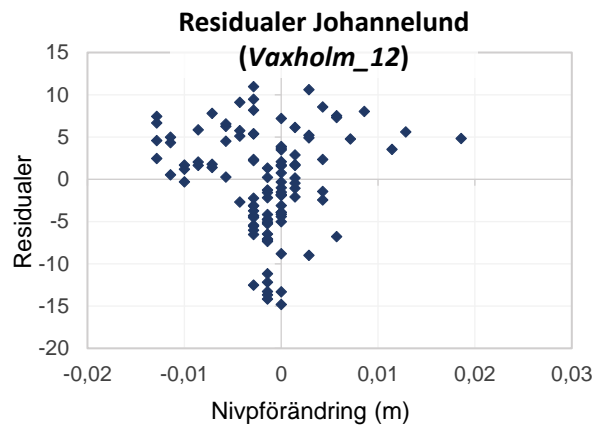
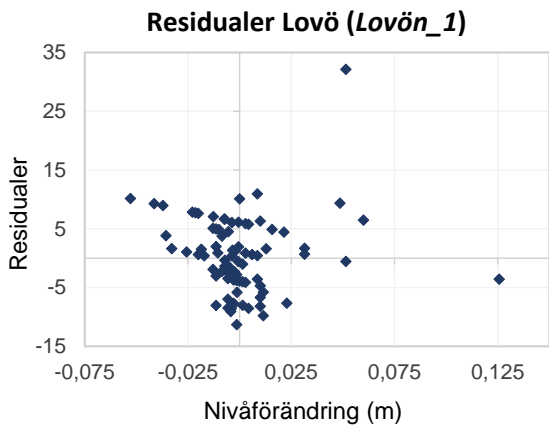


Figur B-4. Exempel på residualplottar för Lovö (grundvattenrör 19S152RU och R07VK37U).

I och med de låga korrelationerna för de båda tunnelrören och grundvattennivåerna i Lunda, är det också svårt att göra en meningsfull tolkning av residualerna. Residualerna ser för det mesta ut att ha en relativt slumpmässig fördelning, men det betyder inte så mycket när sambandet mellan grundvattennivå och inläckage ser ut så redan från början. Eventuellt antyds ett andrags-likande mönster hos vissa av residualerna.

Samma gäller vid en residualanalys för nettonederbörd som grundvattenbildningsmått i Lunda, samt på Lovön. Själva sambandet är mer eller mindre obefintligt, vilket gör en residualanalys redundant. I Johannelund finns en statistiskt signifikant ( $p < 0,05$ ) korrelation med nettonederbörden. Residualerna uppvisar dock ett tydligt andragsmönster, vilket tyder på att det antagna linjära sambandet inte passar. Det skulle dock också kunna bero på databehandlingen. I avsnitt 5.2.1 demonstrerades skillnaden mellan den rena nettonederbördsdatan och de glidande medelvärdena, dvs. att enskilda stora regnevent under sommarmånaderna inte framgår i de glidande medelvärdena. Toppar i inläckage under perioder med negativ nettonederbörd skulle kunna bero på sådana enskilda, stora regnevent under perioder med låg nettonederbörd i övrigt. Sambandet blir dock inte heller bättre av att använda den obehandlade nettonederbördsdatan (dvs inte nettonederbörd), snarare sämre. Troligtvis beror detta på att datafrekvensen hos inläckagemätningarna är så låg att flera av nederbördstopparna inte fångas upp i analysen.

Då nivåförändringar i referensrör användes som mått på grundvattenbildningen fanns svaga men signifikanta korrelationer för både Lovö och Johannelund. På Lovö är sambanden återigen svagare än i Johannelund, och i residualerna för datavarianten med starkast samband finns ett tydligt mönster (se Figur B-5 nedan), som skulle kunna indikera att andra faktorer spelar roll, vilket redan har bekräftats i analysen av grundvattenrören. Det finns dock tydliga outliers som har stark påverkan på sambandet och därmed också residualerna. Även hos residualerna för Johannelund finns ett tydligt mönster, med en mycket kraftigare spridning kring nivåförändringar nära noll.



Figur B-5. Exempel på residualer för nivåförändringar i referensrör. Till vänster för referensrör Lovön\_1 och inläckage på Lovö, och till höger för referensrör Vaxholm\_12 och inläckage i Johannelund.

## C. Korskorrelation

Korskorrelationsanalysen kunde inte genomföras fullt ut på grund av brister i data. En korrelationskoefficient för oförskjutna data beräknades dock för alla grundvattenrör och de olika måtten på grundvattenbildning. I tabellen nedan visas genomsnittsvärden.

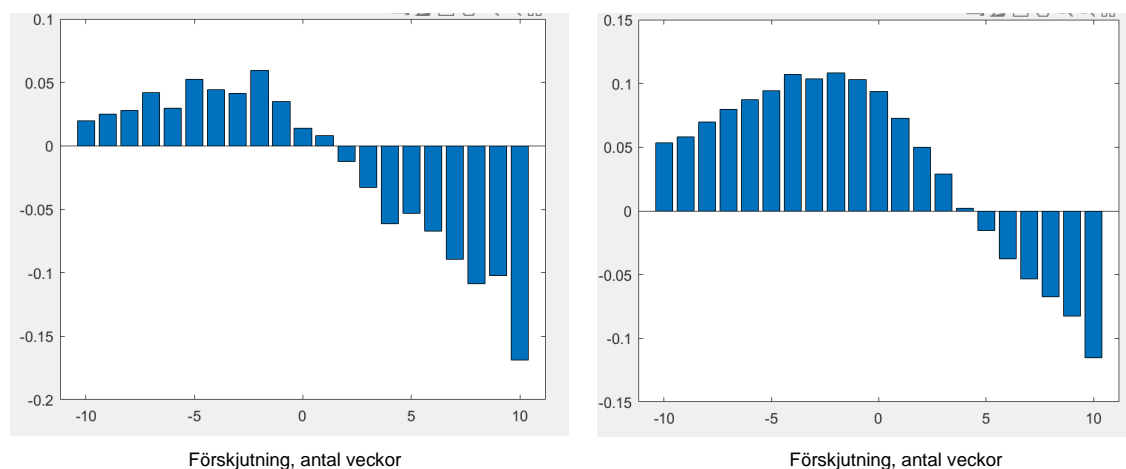
Tabell C-1. Genomsnittsvärden för korskorrelationskoefficienter (utan förskjutning).

	Lovö	Johannelund	Lunda (504   505)
Grundvattenrör	0,965	0,943	0,844   0,903
Nettonederbörd	-0,10	-0,15	-0,11   -0,25
Nivåändring	-0,154	-0,20	-

Notera att beräkningssättet som används av Matlabs `xcorr`-funktion har en påverkan på resultatet. Korrelationskoefficienten beräknas genom att de faktiska mätvärdena för de två variablerna vid en tidpunkt multipliceras, varefter produkterna för alla punkter summeras. Summan är korrelationskoefficienten för den aktuella förskjutningen av data. Värdet kan sedan normaliseras genom att sätta autokorrelationen utan förskjutning till 1. Detta innebär alltså att om parametrar av olika storleksordning jämförs (t.ex. grundvattennivåer och nettonederbörd) kommer korrelationskoefficienten skilja stort, även om matchningen skulle vara ungefär lika god. Denna korrelationskoefficient passar alltså främst för just jämförelser av förskjutningar mellan samma tidsserier, och inte för att direkt jämförelse mellan korrelationskoefficienter för olika parametrar.

För Lovö fanns en period med jämn mätfrekvens, vilket möjliggör en förskjutning av datan. Mätfrekvensen är dock endast en gång/vecka, vilket är för sällan för att finna mönster enligt förklaringsmodell 2 (se Bilaga D2). Diagrammen i

Figur C-1 kan alltså endast ge en fingervisning om samband i ett större tidsperspektiv. Figuren visar att det finns en starkare positiv korrelation mellan inläckage och nettonederbörd om de matchas med nederbördvärden från ett par veckor tillbaka. Detta skulle t.ex. kunna indikera ett samband mellan påfyllnad av grundvattenmagasin och ett ökat inläckage, men detta hade behövt verifieras med andra metoder.



Figur C-1. Korrelationskoefficienter (y-axeln) för nettonederbörd och inläckage på Lovö, till vänster för 10-dagars glidande medelvärde och till höger 30-dagars glidande medelvärde. X-axeln visar förskjutningen, där ett steg motsvarar en vecka.

## D. Beräkningar

### D1. Analytisk formel

I Tabell D-1 nedan presenteras de ansatta värden på parametrar i den analytiska formeln för beräkning av inläckage (Ekvation 2). Tunneldjupet är ett approximativt medeldjup för sträckan utifrån den ingenjörsgelogiska prognosen. Injekteringsklassen, och därmed  $K_{inj}$ , för de olika sträckorna har också hämtats från den ingenjörsgelogiska prognosen. I de fall då flera olika injekteringsklasser har angetts på sträckan har ett viktat medelvärde beräknats.

Tryckhöjden ( $H$ ) i ekvationen beräknas som tunneldjupet minus avståndet från markytan till grundvattenytan (som beror på grundvattennivån).

Tabell D-1. Ansatta värden på parametrar för beräkning av inläckage enligt Ekvation 2.

Källa		Lovö	Johannelund	Lunda
PM Hydrogeologi	$K$	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$5 \times 10^{-8}$
	Injekteringsklass	I $\rightarrow K_{inj} = 10^{-8}$ II $\rightarrow K_{inj} = 3 \times 10^{-9}$		
PM hydrogeologi Bilaga 5	$t$	5 m		
	$r_i$	10 m		
	$\xi$	2		
Ingenjörsgelogisk prognos	Tunneldjup	46,8 m	18,6 m	30 m
	$L$	850 m	450 m	250 m
	$K_{inj}^*$	$9,5 \times 10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$
Grundvattenrör (för beräkning av $H$ )		19S152RU	12A531RU	R07VK22U
	H (Högt   Lågt)	44,0 m   40,8 m	15,9 m   15,0 m	27,1 m   26,3 m

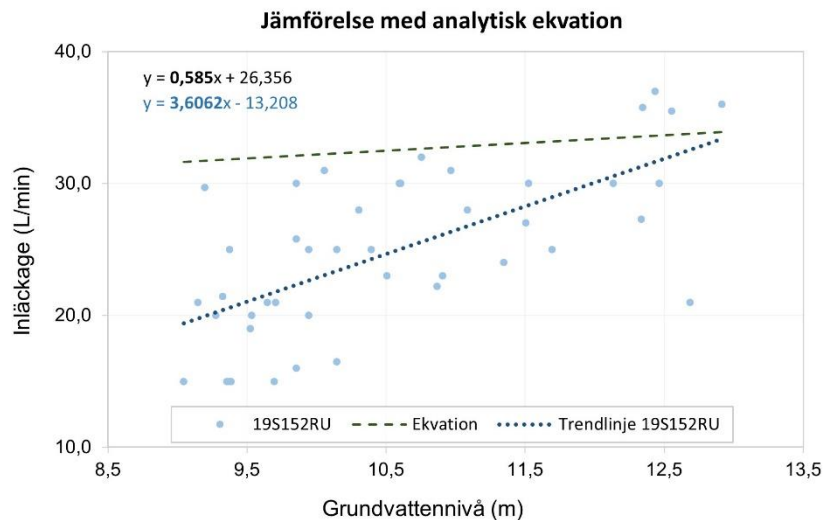
Resultaten av beräkningarna visas i Tabell D-2 nedan. I och med detta resultat kan det konstateras att inte heller den mer utförliga versionen av Gustafsons formel räcker för att förklara inläckageökningen vid en ökad grundvattennivå. Det bekräftar också att det inte enbart är en tryckökning som orsakar det ökade inläckaget vid en högre grundvattennivå, utan att det måste finnas en annan anledning till det observerade mönstret.

Tabell D-2. Resultat av beräkningarna med den analytiska formeln för inläckage (Ekvation 2).

		Lovö	Johannelund	Lunda (504   505)
Uppmätt inläckage (L/min)	Lågt Högt	29,7 37	11 20	14,8   19,9 21,5   20,7
Låg grundvattennivå Grundvattennivå   Inläckage		19,20 m   31,7 L/min	19,87 m   8,24 L/min	15,72m   23,5 L/min
Hög grundvattennivå Grundvattennivå   Inläckage		12,44 m   33,6 L/min	21,2 m   8,55 L/min	16,51 m   24,0 L/min



Resultatet i Tabell D-2 kan också illustreras genom att jämföra den lutning som ekvationen medför med de ekvationer som ansåts till uppmätta data vid den linjära regressionsanalysen. I Figur D-1 nedan går det att se en tydlig skillnad mellan lutningen hos den analytiska ekvationen och trendlinjen som passats till data från grundvattenrör 19S152RU. Skillnaden i lutning kan också ses rent numeriskt genom lutningskoefficienterna för respektive linjes ekvation. Detta resultat tolkas som att det finns ett samband med grundvattennivån som inte kan förklaras med bara den hydrauliska gradienten.



Figur D-1. I diagrammet jämförs den analytiska ekvationen för inläckage (Ekvation 2) med det observerade inläckaget på Lovö. Grundvattennivådata som använts för regression samt beräkningar kommer från grundvattenrör 19S152RU.

## D2. Rinntid i spricka

Som ett underlag för att diskutera använda data och analysmetoder för förklaringsmodell 2 gjordes enkla beräkningar för att uppskatta hur lång tid det tar för regnvatten att nå tunneln genom en konduktiv spricka.

Vid beräkningarna antas inflödet ske via en vertikal spricka med jämn apertur. Konduktiviteten ( $K$ ) hos sprickan har satts till  $10^{-4}$  m/s, vilket baseras på konduktiviteten hos sprickig berggrund (Domenico & Schwartz, 1998). Eftersom det är tunneln i Johannelund som uppvisat större indikationer på ett samband antas ett tunneldjup (motsvarar längden på sprickan,  $L$ ) på 20 m. Detta ger en rinntid ( $t$ ) på drygt två dygn enligt ekvationen nedan:

$$t = \frac{L}{K} = \frac{20}{0,0001} s = 200000 s \approx \mathbf{56 \text{ timmar}}$$