

E4 Förbifart Stockholm

Teknisk beskrivning
Vattenverksamhet

Tunnel norr

2021-04-23

Rev	Ant	Ändring avser	Godkänd	Datum

Granskare	Godkänd av	Ort	Datum
Karl Persson	Therese Vestin	Solna	2021-04-23

Objektnamn	E4 Förbifart Stockholm
Entreprenadnummer	Tunnel norr
Entreprenadnamn	
Beskrivning 1	Teknisk beskrivning
Beskrivning 2	
Beskrivning 3	Huvuddokument
Beskrivning 4	
Status	
Diarienummer	
Konstruktionsnummer	
Objektnummer	8448590
Projekteringssteg	
Statusbenämning	
Företag	Trafikverket/ Bergab
Författare/Konstruktör	Linda Lundgren, Therese Vestin, Peter Dahlin, Ola Forssberg
Externnummer	

Innehåll

1	Inledning och syfte.....	4
2	Plan- och höjdsystem.....	6
2.1	Referenssystem.....	6
2.2	Fixpunkt.....	6
3	Tunnelanläggningen.....	6
4	Geologiska förutsättningar.....	8
4.1	Inledning.....	8
4.2	Avvikelser i hydrogeologiska förhållanden.....	8
4.3	Kompletterande undersökningar i ej utsprängt berg.....	10
5	Principer för tunneltätning i E4 Förbifart Stockholm.....	11
5.1	Inledning.....	11
5.2	Utvecklingen av injekteringsmetodiken.....	12
5.3	Aktuellt injekteringskoncept.....	13
5.4	Förväntat inläckage med utvecklad tätningsmetodik.....	14
6	Skyddsinfiltration.....	17
6.1	Tekniskt utförande av infiltration.....	17
6.2	Infiltration inom utökat påverkansområde.....	19
6.3	Försörjning av vatten till infiltrationsanläggningar.....	20
7	Betonglining.....	21
8	Sammanfattning.....	21
9	Ordlista.....	22
10	Referenser.....	24

Bilaga 1 – Fixpunkt

Bilaga 2 – Anläggningsdelar

Bilaga 3 – PM Injekteringstekniska åtgärder

Bilaga 4 – PM Inläckageberäkningar

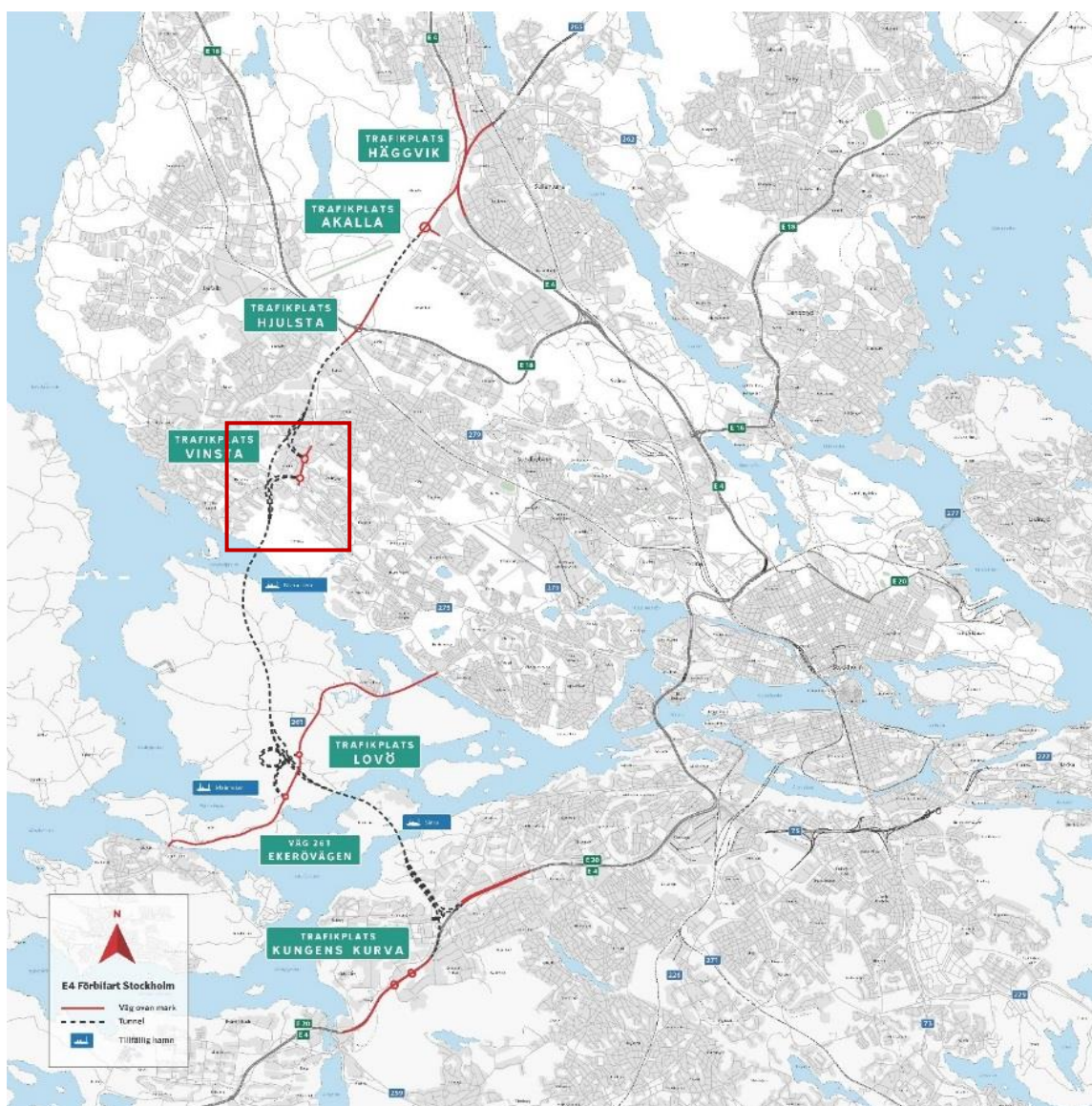
Bilaga 5 – Infiltrationsanläggningar

Bilaga 6 – PM Betonglining

1 Inledning och syfte

Denna tekniska beskrivning är en del av Trafikverkets ansökan om tillstånd för ökad grundvattenbortledning och skyddsinfiltration under framtida drift av E4 Förbifart Stockholm, längs sträckan mellan Lambarfjärden och södra Kälvesta, se Figur 1. Ansökan avser delsträckorna D10 och D11 och ett påverkansområde utmed dessa sträckor. Delsträckorna går under Grimsta, Hässelby gård, Vinsta och de södra delarna av Kälvesta.

E4 Förbifart Stockholm är en 21 km lång ny sträckning av E4:an som håller på att anläggas mellan Kungens kurva i söder till Häggvik i norr. Större delen av vägen, cirka 18 km, går i tunnel. Byggandet har pågått sedan år 2015 och idag har drygt 70 % av tunneln drivits ut och drygt 60 % av arbetet med trafikplatserna är utfört. E4 Förbifart Stockholm är planerat att öppna för trafik år 2030.



Figur 1. E4 Förbifart Stockholms sträckning från Kungens kurva i söder till Häggvik i norr samt lokaliseringen av sträckan Lambarfjärden till södra Kälvesta, markerad med rött.

Trafikverket har tillstånd att leda bort inläckande grundvatten under byggande och drift av E4 Förbifart Stockholm, samt att skyddsinfiltrera vatten. Mängden grundvatten som får ledas bort under drifttiden begränsas av villkor 7 som anger mängden vatten som får läcka in i bergtunnlarna under drifttiden. Tillståndet omfattar även ett villkor 5 och 6 med krav på åtgärder i bygg- och driftskedet för att motverka att grundvattennivåerna påverkas på sådant sätt att det uppkommer skada i omgivningen.

Under arbetets gång har det visat sig svårt att uppnå tillräcklig tätning av tunnlar. Trots mycket omfattande arbeten har Trafikverket gjort bedömningen att villkoret om inläckage i driftskedet inte kommer att kunna uppfyllas i alla delar. En större mängd grundvatten än vad som medges i inläckagevillkoren kommer att läcka in i färdig tunnel längs två delsträckor. Av denna anledning ansöker Trafikverket om att få leda bort ytterligare mängder grundvatten i förhållande till meddelat tillstånd längs dessa två delsträckor. Det gäller ett ökat inläckage på delsträcka D10 från 280 liter/minut till 540 liter/min och på delsträcka D11 från 220 liter/minut till 310/liter/minut. Vidare ansöker Trafikverket om att, i förhållande till vad som beskrevs i tidigare ansökan, få genomföra ytterligare skyddsinfiltration inom utökat påverkansområde.

Den tekniska beskrivningen fokuserar på att beskriva varför tunneln inte har kunnat bli så tät som antogs i tidigare prövning, att injekteringsarbetet (tätningen) har drivits så långt som är tekniskt möjligt och vilket inläckage som kan förväntas med nu utvecklat injekteringskoncept. Vidare redovisas inom vilka tillkommande områden som Trafikverket kan komma att behöva skyddsinfiltrera för att förebygga skador. Projektet som helhet är beskrivet och hanterat i tidigare ansökan. Syftet med den tekniska beskrivningen är att beskriva de tekniska detaljer som är av vikt för att man ska kunna förstå och behandla föreliggande ansökan om att få leda bort ytterligare grundvatten och skyddsinfiltrera inom utökat påverkansområde.

Den tekniska beskrivningen är upplagd på följande sätt:

- I Kapitel 2 redovisas grundläggande uppgifter om plan- och höjdsystem.
- I Kapitel 3 redovisas en översikt av hela tunnelanläggningen.
- I Kapitel 4 beskrivs de geologiska förutsättningarna. Hur de faktiska förutsättningarna skiljde sig från de antagna och som innebar att berget var betydligt mer svårtätat och mer vattenförande än vad den tidigare utredningen hade visat.
- I Kapitel 5 beskrivs hur Trafikverket har arbetat med att utveckla arbetet med tätning, och tätningsmetodik för att hantera de faktiska geologiska förutsättningarna. Det redovisas hur projektet succesivt och metodiskt arbetat fram nya förbättrade koncept och metoder för injektering, som innebär att tunneln tätas så långt som är tekniskt möjligt med konventionell injekteringsteknik. Vidare redovisas i detta kapitel vilket inläckage som kan förväntas under driftskedet med denna tätning.
- Kapitel 6 beskriver den ökade skyddsinfiltration som Trafikverket ansöker om att få bedriva inom utökat påverkansområde.
- Kapitel 7 behandlar vilka åtgärder som skulle behöva vidtas för att kunna innehålla nuvarande villkor i dess helhet. Det skulle krävas en betonginklädnad av utsprängda tunnlar (s.k. betonglining). Betonglining beskrivs konceptuellt och det redovisas en bedömning av hur det tekniskt skulle gå till, vilken tid som behövs för att genomföra denna samt till vilken kostnad.

Miljökonsekvenserna av betonglining redovisas i miljökonsekvensbeskrivningen under kapitel 7 om Nollalternativet.

2 Plan- och höjdsystem

2.1 Referenssystem

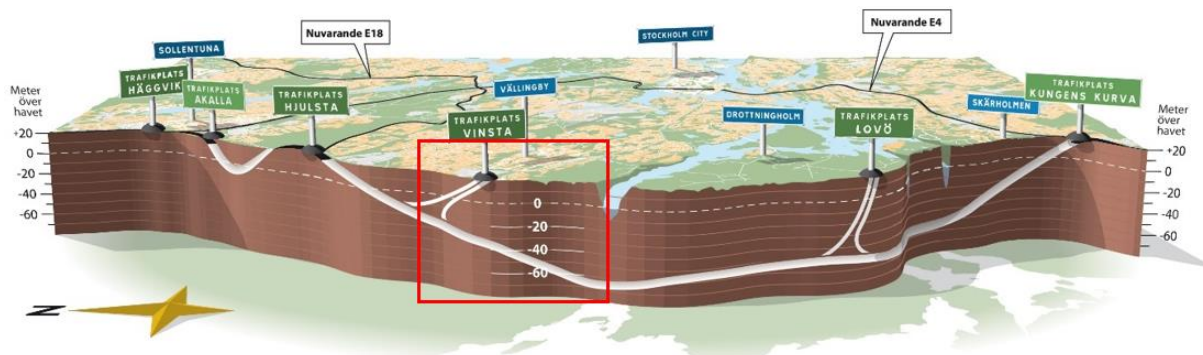
I E4 Förbifart Stockholm används det geodetiska referenssystemet Sweref 99 18 00 för plankoordinater. Nivåer anges i det projektspecifika systemet FS RH 00. FS RH är justerat med $-0,518$ m jämfört med RH 2000. FS RH 00 används för att erhålla ett enhetligt höjdsystem i E4 Förbifart Stockholm samt för att underlätta datautbyte mellan de kommuner där E4 Förbifart Stockholm anläggs.

2.2 Fixpunkt

I E4 Förbifart Stockholm används fixpunkten FS12, belägen cirka 150 m nordost om korsningen Bergslagsvägen – Ekvägen. Se Bilaga 1 för detaljer.

3 Tunnelanläggningen

Den aktuella sträckan av E4 Förbifart Stockholm går under mark, se Figur 2, och består av huvudtunnlar och ramptunnlar i berg som leder upp till trafikplatser ovan mark.

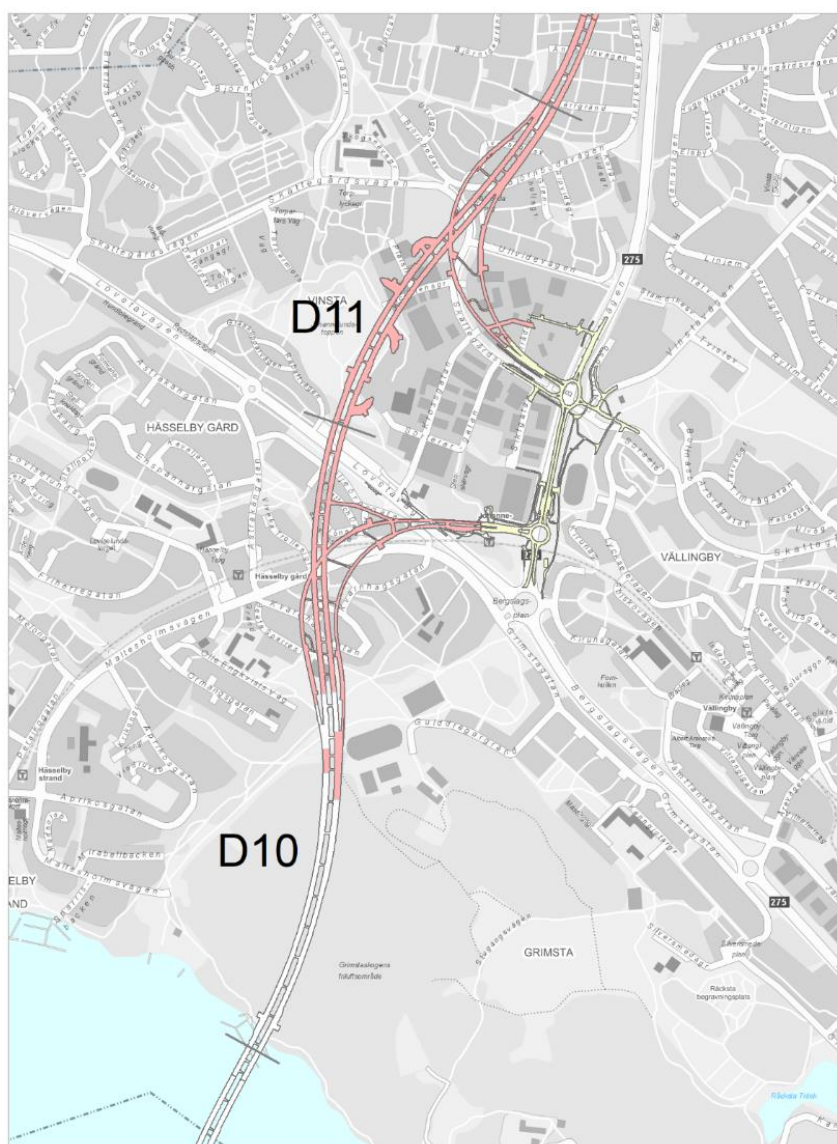


Figur 2. E4 Förbifart Stockholms sträckning från Kungens kurva i söder till Häggvik i norr, illustrerat djup.





Huvudtunnlarna är utformade som två separata tunnelrör med tre körfält i vardera körriktningen, se Bilaga 2. Huvudtunnlarna har stora spännvidder och är upp emot 16,5 m breda. Utöver huvudtunnlarna byggs även ramptunnlar för på- och avfarter till trafikplatserna. Ramptunnlarna har en spännvidd på cirka 10 m, se Bilaga 2¹. I ramprummen vid på- och avfarter, där huvudtunnel och ramptunneln byggs ihop, kan tunnlar ha en spännvidd på uppemot 30 m. För att möjliggöra evakuering i tunnelsystemet så anläggs även tvärtunnlar mellan de båda huvudtunnlarna. Tvärtunnlarna anläggs ungefär varje 100 m längs hela tunnelsträckningen. Inom de aktuella tunneldelarna anläggs även eldriftsutrymmen samt fyra vertikala ventilationsschakt från huvudtunnlarna upp till markytan och ett mindre ventilationsschakt från avfartsrampen vid Johannelund till markytan.

¹ Mått för huvud- och ramptunnlar redovisade i miljöansökan M3346-11.

E4 Förbifart Stockholm är indelad i ett antal delsträckor. Den nu aktuella tillståndsansökan berör delsträcka 10 och delsträcka 11, benämnda D10 och D11, illustrerade i Figur 3. I december 2020 var cirka 75 procent av dessa tunnlar utsprängda. Då återstod det att driva ca 40 procent av tunnelarna på delsträcka D10. På delsträcka D11 var alla tunnlar färdigdrivna, se Figur 3. Inom båda delsträckorna kvarstår dock arbeten med eftertätning av tunnelarna, så kallad efterinjektering.



Teckenförklaring

-  Utspräng bergtunnel t.o.m v50
-  Ej utsprängd bergtunnel
-  Trafikplatser ovan mark
-  Gräns för delsträckor



© Open Stockholm.

Figur 3. Aktuell del av Tunnel norr samt delsträckor D10 och D11. Rosa markering visar utsprängda tunneldelar t.o.m v 50 2020.

4 Geologiska förutsättningar

4.1 Inledning

Inför den förra tillståndsprövningen genomfördes fältundersökningar och analyser av berg, geologi och hydrogeologi. Baserat på dessa resultat gjordes prognoser för hur en tunnel skulle påverka hydrogeologin i området den passerade, och det gjordes projektering av hur tätning och andra åtgärder skulle genomföras. Med detta underlag som grund gjordes bedömningar av vilka inläckagevärden som skulle kunna innehållas för den färdiga tunneln och det resulterade i det inläckagevillkor som gäller för de olika delsträckorna (villkor 7 i tillståndsdomen).

Under byggskedet har det framkommit avvikelser från prognos avseende bergets genomsläpplighet och tätningsbarhet. Sådana avvikelser kan förväntas och på de flesta ställen har Trafikverket genom utvecklade tätningskoncept och med extra åtgärder kunnat hantera dessa.

På de aktuella (ansökta) delsträckorna har skillnader mellan prognosticerat behov av tätning och de faktiska förhållandena, som visar sig i samband med att tunneln sprängs ut, varit så stora att upplägget för injektering (tätningen) har behövt projekteras om. De verkliga bergförhållandena har visat sig vara sämre och mer svårinjekterade än vad som hade framkommit vid förundersökningar och projektering.

Orsakerna till detta har varit flera, men framförallt handlar det om att fler och bredare svaghetszoner än förväntat har påträffats. I dessa zoner är berget mer sprickigt, vilket ger ett mer genomsläppligt berg. I vissa områden har sprickorna dessutom varit lerfyllda vilket försvårar tätningen av dem.

I Bilaga 3 beskrivs de geologiska och hydrogeologiska förhållandena mer utförligt.

4.2 Avvikelser i hydrogeologiska förhållanden

I samband med både framtagandet av tidigare ansökan och i den efterkommande projekteringen av bygghandlingar genomfördes utredningar av berget för att ta reda på de hydrogeologiska förutsättningarna, dvs bergkvaliteten, bergets genomsläpplighet och förutsättningarna för att kunna täta berget. Undersökningar som utfördes var bland annat jord- och bergsonderingar, kärnborrningar, vattenförlustmätningar, inventeringar av äldre utredningar samt geofysiska mätningar. I dessa beskrivningar redovisades var de förväntade svaghetszonerna skulle passera tunneln, deras bredd och sprickighet.

Bergkvaliteten kan delas in i ett klassningssystem med bergklasser. Bergklassningen består av ett 5-gradigt system för värdering av bergets tekniska kvalitet; från klass 1 "Bra berg" till klass 5 "Extremt dåligt berg". Bergklassningen baseras på förhållandet mellan olika egenskaper hos sprickor, sprickfyllnader, bergtäckning samt spänningar i berget. Om berget värderats till klass 1 eller 2 är av mindre betydelse ur ett tätningsperspektiv. Bergklass 3 och däröver går oftast att koppla till förekomst av sprickzoner som kan vara svåra att täta.

När tunneln väl sprängs ut karterar geologer kontinuerligt de faktiska bergförhållandena som framträder allteftersom tunneln drivs framåt. Denna kartering ger dels en konstaterad "faktisk" bergklass och en konstaterad förekomst av zoner. Vid en jämförelse av prognos och konstaterade förhållanden i D10 och D11 framgår att mängden berg i bergklass 3-5 är tre till fyra gånger mer omfattande än vad som prognosticerades samt att det har tillkommit ett antal viktiga sprickzoner i berget (

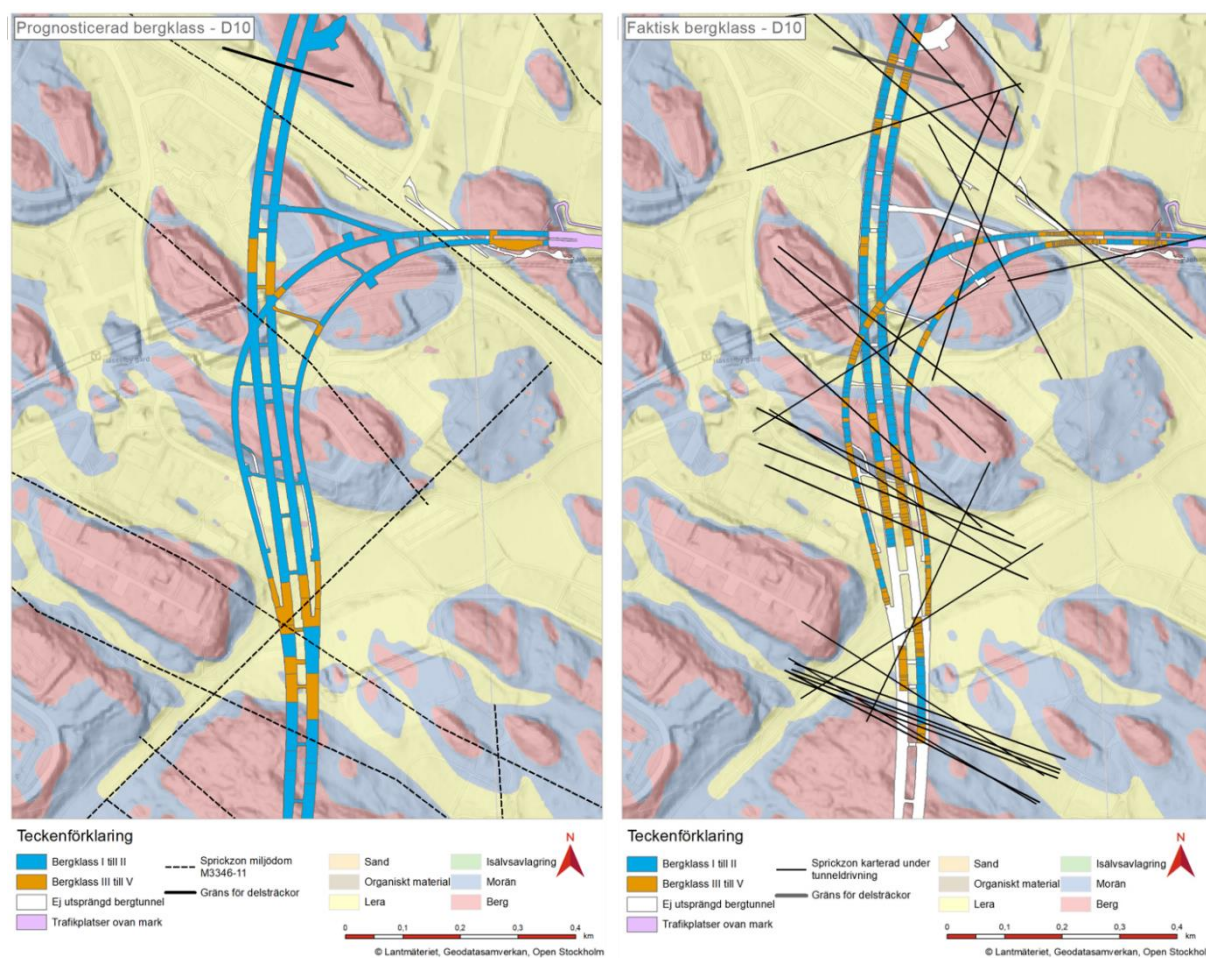
, samt Figur 4 och Figur 5).

Utöver det har det även under projektets gång visat sig att den topografiska situationen har större betydelse för de hydrogeologiska förutsättningarna än vad man förväntade sig i projekteringskedet,

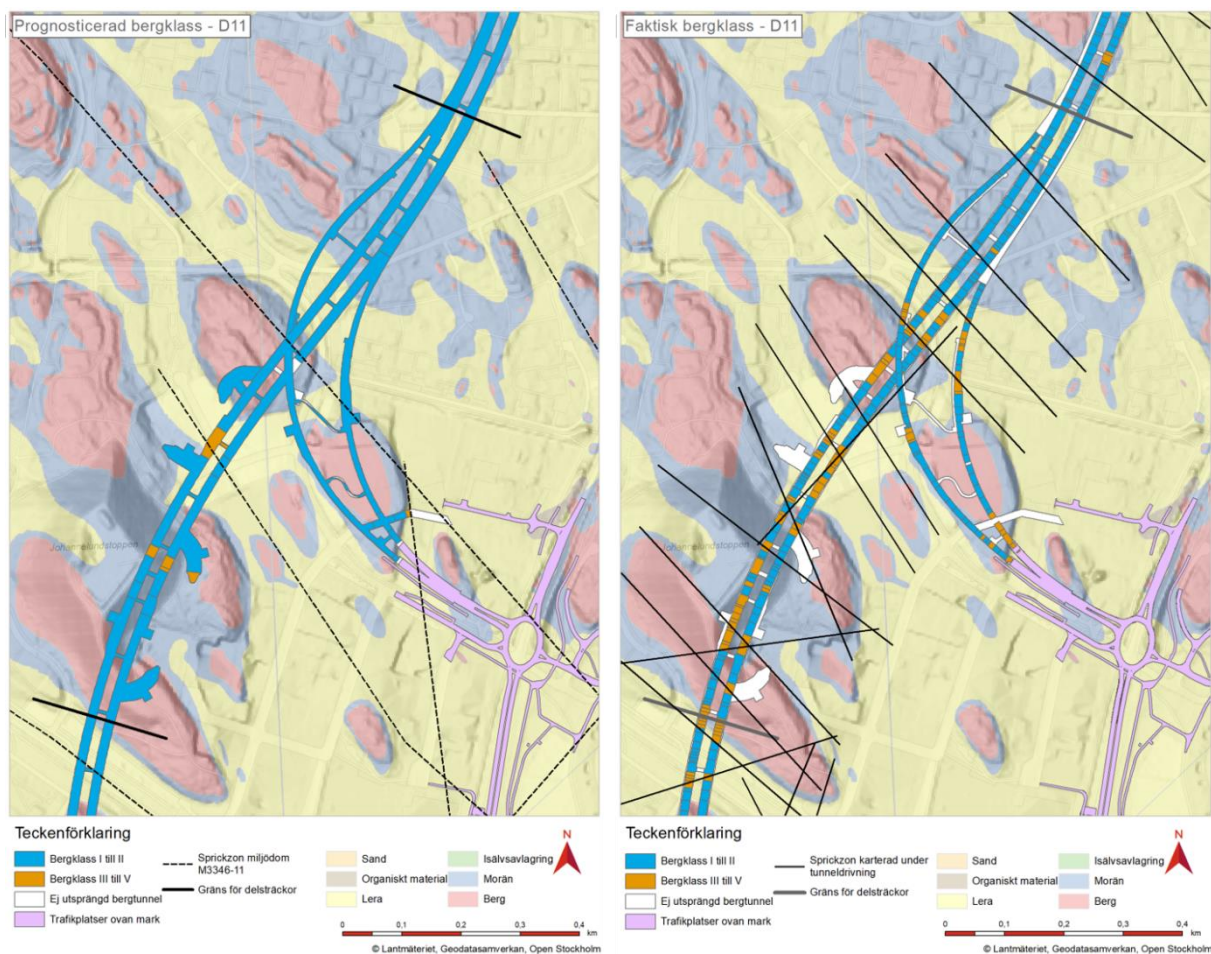
där fokus i större utsträckning lades på identifierade zoner i berget. Särskilt förekomsten av uthålligt vattenförande zoner har konstaterats ha en koppling till de topografiskt markerade sprickdalarna längsmed tunneln.

Tabell 1. Tabellen visar skillnaden i bergkvalitet mellan prognos och utfall.

	Prognosticerad bergklass 3-5	Faktisk bergklass 3-5
D10	14 %	40%
D11	5 %	22 %



Figur 4. Geologi vid delsträcka 10. Till vänster visas prognosticerad bergklass och prognosticerade sprickzoner vid tidigare prövningen M 3346-11. Till höger visas faktisk bergklass och karterade sprickzoner under tunneldrivning. Låg bergklass är det mest önskvärda vid tunneldrivning.



Figur 5. Geologi vid delsträcka 11. Till vänster visas prognosticerad bergklass och prognosticerade sprickzoner vid tidigare prövningen M 3346-11. Till höger visas faktisk bergklass och karterade sprickzoner under tunneldrivning. Låg bergklass är det mest önskvärda vid tunneldrivning.

Sammanfattningsvis innehåller de aktuella delsträckorna D10 och D11 flera avsnitt med bergklass 3 till 5 vilka har visat sig vara mer omfattande och mer svårinjeterade än vad som framkom vid tidigare utredning. Detta till följd av att fler och bredare sprickzoner än beräknat påträffats. Vid riklig förekomst av grundvatten i stora sprickzoner kan sprickorna vara svårtätade om de är fyllda med lera. Denna kombination leder till stora svårigheter med att uppnå den täthet i tunneln som villkor 7 föreskriver.

4.3 Kompletterande undersökningar i ej utsprängt berg

Ett antal kompletterande undersökningar har utförts för att undersöka bergkvaliteten i icke utsprängda delar (under Grimsta naturreservat).

De undersökningar som genomförts är kärnbörning och kärnkartering, filmning av kärnborrhål, resistivitetsundersökningar och vattenförlustmätningar i borrhål. Syftet med resistivitetsundersökningarna var att påvisa förekomst av förmodade sprickzoner och syftet med kärnbörningen och kärnkarteringen samt filmningen av kärnborrhålen var att verifiera dessa zoner. I kärnborrhålet genomfördes vattenförlustmätningar för att ge kunskap om bergets genomsläpplighet.

Efter undersökningarna har den ingenjörsgelogiska prognosen av berget uppdaterats. Tydligast är att bergklass 1 som dominerar i den ursprungliga ingenjörsgelogiska prognosen har förskjutits åt sämre berg, huvudsakligen till bergklass 2 och bergklass 3.

Förhöjd genomsläpplighet uppmättes vid ett antal strukturer i berget med öppna sprickor. Strukturerna bedöms vara distinkta och möjligheten att täta dem bedöms som god.

5 Principer för tunneltätning i E4 Förbifart Stockholm

5.1 Inledning

E4 Förbifart Stockholm byggs med ”borra spräng” - metoden och tunnelns täthet (begränsning av inläckage) åstadkoms genom tätning av bergmassan. I första hand sker tätning av berget med förinjektering, dvs injektering av tätningsmedel i bergets sprickor som sker innan berget sprängs ut. Efterinjektering utförs för att komplettera tätningen på de ställen där läckage kan konstateras kvarstå när tunneln är utsprängd. Generellt är efterinjektering mindre effektivt än förinjektering. Orsakerna till detta är flera, bland annat att man inte kan jobba med samma tryck vid efterinjektering då berget inte finns kvar för mothåll, samt att strömmande vatten riskerar att skölja ur injekteringsmedel under processen. Det är således viktigt att förinjektering görs i så stor utsträckning som möjligt.

Den täthet som generellt sett uppnås beror på ett antal olika förutsättningar:

- Bergets ursprungliga täthet - där exempelvis ett sprickfattigt berg av god kvalitet även utan tätning kan ge en förhållandevis tät tunnel.
- Bergmassans injekterbarhet - där sprickbredd, sprickfyllnad, sprickriktningar, bergets vittringsgrad, bergtäckning etc. har betydelse för hur lätt det är att åstadkomma en bra tätning.
- Tätningskonceptets omfattning och flexibilitet - konceptet utformas innan upphandling för att styra entreprenörens arbete. Tätningskonceptets uppbyggnad avgör dess förmåga att anpassa sig efter bergets förutsättningar.
- Genomförande och material – tätningsmedlets egenskaper, prestanda på material och utrustning, arbetsordning, kontroller och uppföljning etc. är omständigheter som kan påverka resultatet.

På de flesta delsträckor inom projekt E4 Förbifart Stockholm har förutsättningarna varit sådana att en bra tätning har åstadkommit med den ursprungliga tätningsmetodiken. Detta gäller exempelvis de flesta tunnlar söder om Mälaren och större delen av sträckan på Lovön.

På vissa sträckor har den ursprungliga tätningsmetodiken visat sig vara otillräcklig. Med omprojektering och med utökad efterinjektering har situationen hanterats. Detta gäller bland annat delsträckorna D12 och D13, strax norr om det område denna ansökan avser. Däremot har detta inte räckt till på delsträckorna D10 och D11.

I Bilaga 3 lämnas en utförlig redovisning av principer och centrala begrepp gällande tunneldrivning och bergtätning.

5.2 Utvecklingen av injekteringsmetodiken

I Bilaga 3 finns en utförlig redogörelse för hur Trafikverket har utvecklat injekteringsmetodiken för tätning av berget under drivningen av tunnelarna för E4 Förbifart Stockholm norr om Lambarfjärden. Nedan följer en kortfattad sammanfattning av arbetet som har skett.

Tunneldrivningen i E4 Förbifart Stockholm har pågått sedan arbetstunnelarna började tas ut 2015. När ramptunnelarna började tas ut under våren 2017 uppmärksammades att inläckage och prognostiserad bergkvalitet avvek från de förutsättningar som man utgick ifrån vid projekteringen av bygghandlingar.

När inläckageproblemen uppdagades beslutade Trafikverket att ytterligare utöka tätningsinsatsen. Till att börja med gjordes olika justeringar av injekteringsklass C. Konzepten kallades IKC++ och IKSZ (som var särskilt avsedd för sprick/svaghetszoner). Injekteringslösningarna testades först på ett mindre avsnitt i tunneln och i den mån de gav ett positivt resultat utfördes de i större omfattning.

Under hösten 2018 konstaterades att hela injekteringsmetoden behövde ses över. Framtagandet av en ny metod beställdes vilken skulle vara bättre anpassad efter de nu kända förhållandena. En omfattande analys av drivna tunnlar gjordes, och baserat på denna togs ett koncept med flera kontrollpunkter för vägval i processen fram.

Under tiden som utvecklingen av ett koncept pågick testades en ny tillfällig injekteringsklass (B2C2) baserat på erfarenheter från tidigare tester. Resultaten var inte tillräckligt bra och under våren 2019 pausades därför framdriften i flera tunnlar för att invänta det nya konceptet som höll på att tas fram. Under tiden som framdriften pausades gjordes undantag på några drivningsfronter för att testverksamheten skulle kunna fortsätta. Det utfördes tester med nya bruk, utökad platskontroll och olika variationer i metoderna.

Strax innan sommaren 2019 hade man ett nytt koncept framme. En omfattande analys låg till grund för konceptet som byggde på ett tydligt system för aktiv uppföljning av observationer på drivningsfronten samt metodval kopplat till detta. Dessutom hade omfattningen för maximal injektering (IK C3) ökat rejält sedan ursprunglig högsta klass (IK C). Som en del av den slutliga kvalitetssäkringen återupptogs framdriften vid pausade drivningsfronter med kravet att maximal injektering skulle utföras i alla skärmar oavsett geologi. Resultatet studerades och utvärderades fram till dess att slutligt godkännande gavs.

Våren 2020 presenterades det nya koncept (ABC4) med utökad omfattning på injektering i den högsta injekteringsklassen och med ökade resultatkontroller under produktionen.

En sammanfattande tabell av injekteringsinsatserna redovisas i Tabell 2.

Tabell 2. Tidslinje och kortfattad beskrivning av utökade injekteringsinsatser.

	Benämning	Beskrivning	Tid
1.	ABC – 1	Projekterad teknisk lösning i förfrågningsunderlag.	Upphandling - 2018
2.	Test	Justering av injekteringsklass C benämnd IKC++ och IKSZ.	Hösten 2017 och våren 2018
3.		Beslut fattas att projektera ett helt nytt injekteringskoncept.	Hösten 2018

4.	B2, C2 (ABC – 2)	Interimslösning B2 och C2 implementeras under tiden som den nya injekteringsmetodik ABC- 3 tas fram.	Hösten 2018
5.	ABC – 3	Uppföljning och empiriska test vidareutvecklar B2 och C2.	Våren 2019
6.	Efter- injektering	Metod för systematisk efterinjektering tas fram och implementeras på läckande partier bland annat inom aktuella delsträckor.	Våren 2019
7.	Test	Försök med ny injekteringsmetodik (tre skärmar).	Våren 2019
8.	ABC – 4	Nu tillämpad injekteringslösning presenterades.	Våren 2020

5.3 Aktuellt injekteringskoncept

Injekteringskoncept ABC4 baseras på två nya injekteringsklasser benämnda IK1 och IK2. Förenklat beskrivet är injekteringsklasserna anpassade till bergmassans vattengenomsläpplighet och omgivningens känslighet. IK1 gäller vid gynnsamma förhållanden och IK2 gäller vid ogynnsamma förhållanden inklusive vid bekräftade svaghetszoner. Med hänsyn till förhållandena inom det ansökta området används endast den högre injekteringsklassen IK2.

Injekteringskonceptet är baserad på en stringent arbetsgång med tydliga beslutskriterier som kan justeras med hänsyn till utförande och resultat. Olika kontroller genomförs under injekteringsprocessen vilka föranleder beslut om injekteringen är tillräcklig eller om ytterligare insatser behövs.

Kontrollpunkter har förtydligats under injekteringsprocessen och dokumentationskravet har ökat så att rätt justering av acceptanskriterier och krav ställs samt att beslutsgången går att följa. Nedan följer några åtgärder som kan sättas in om kontrollpunkterna påvisar ett sådant behov.

Ett exempel är om det vid större genomsläpplighet finns behov av att öka avståndet mellan injekteringshål som borrar i en skärm. Ligger hålen för tätt uppstår samband (läckage) mellan hålen som försämrar tätningsresultatet eftersom injekteringsbruket som pumpas in i det ena hålet riskerar att åka ut genom det närliggande borrhålet istället för att tryckas ut och täta sprickorna i berget. Ett sådant scenario motverkas genom att skärm 1 delas upp i skärm 1a och skärm 1b där endast hälften av hålen utförs i första borrningen.

Ett annat exempel är att det vid IK2 är obligatoriskt med två skärmar och efterföljande kontroll med vattenförlustmätningar. Efter att två fulla skärmar utförts i ett skärmläge görs kontrollhål och vattenförlustmätningar. Om kontrollen visar på för höga flöden får skärmen underkänt och ytterligare åtgärd krävs. Det går dock inte att göra ytterligare en skärm i samma läge, eftersom berget riskerar att borrar sönder med injekteringshål. I detta läge tas endast en sprängsalva ut (dvs 6 meters framdrift istället för 18 m) innan nya skärmar kan utföras. På så vis erhålls överlapp om 18 meter istället för 6 meter.

Ett tredje exempel är att byte av injekteringsbruk kan genomföras efter injektering med startblandning. Det innebär att injekteringsbruket justeras för det fall injektering med startblandningen inte förväntas ge tillräcklig tätning (exempelvis vid genomsläppligt berg då injekteringsbruket flödar för snabbt vilket leder till svårigheter att hålla injekteringsstrycken).

Injekteringsstrategin har därtill justerats och förbättrats enligt följande:

- Injekteringsordningen har justerats så att mängden sambandshål i skärmen minskas.
- Processen har setts över och förtydligats och det ställs hårdare krav avseende antal och längd på pauser under pågående injektering.
- Trycken har reducerats med hänsyn till påverkan på bergmassan.
- Det ställs mer detaljerade krav på bruket. Mer finmalet cement (microement) ska användas.
- Stoppkriterier har setts över.

För ytterligare redovisning av tekniskt utförande, material och geometrier se Bilaga 3.

5.4 Förväntat inläckage med utvecklad tätningsmetodik

Med utvecklingen av injekteringsmetodiken som redogjorts för ovan har denna utvecklats så långt som bedöms tekniskt möjligt vid konventionell tunneldrivning. I detta avsnitt redovisas en beräkning av vilket inläckage som kan förväntas med denna injekteringsmetodik och utifrån de hydrogeologiska förutsättningar som föreligger. Mer information om inläckageberäkningar och bedömning av nya inläckagevillkor finns i bilaga 4.

En prognos av slutligt inläckage inför driftskedet har gjorts. Beroende på hur långt tunnelarbetet fortskridit i olika tunneldelar har den utförts på olika sätt. I färdigdrivna och färdigtätade tunneldelar där avsänkningarna ovan tunneln är obetydliga kan man utgå från uppmätta inläckage, medan man i de delar som ännu ej drivits får använda analytiska beräkningar och erfarenhetsmässiga bedömningar. De flesta sträckor befinner sig dock någonstans däremellan, och där uppstår en komplex avvägning mellan flera faktorer som behöver skattas utifrån den specifika situationen.

Ekvation 1 nedan använder det uppmätta inläckage (Q_1) som utgångspunkt. Sedan läggs ett antal parametrar till beroende på var i processen tunneldelen befinner sig.

$$Q_{tot} = (Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 + Q_5) \quad \text{ekvation 1}$$

Q_1 Nuvarande inläckage till aktuell sträcka.

Värdet baseras på mätningarna i mätdammar. Viss osäkerhet finns i mätdata. Felkällor är exempelvis flöde av vatten mellan olika tunneldelar, förekomst av processvatten, ökade inläckage i samband med uppborrade staghål osv.

Q_2 Kommande inläckage från återstående ej drivna tunnlar.

Antagna värden utgår från analytiska beräkningar. En fördelningsfunktion har skapats med ett lägsta, ett förväntat och ett högsta utfall, baserat på olika antaganden i beräkningarna samt erfarenheter kopplade till topografi och andra geologiska parametrar som visat sig ge avvikelser från tidigare prognoser.

Q₃ Tillkommande inläckage inom de tunnelavsnitt där ytterligare infiltration planeras.

En skattning görs av hur mycket infiltration man kommer lyckas utföra, och hur mycket inläckagen kommer stiga om man lyckas med det. Ökningen är ett resultat av att vattentillgång och tryck ökar ovan tunneln vid framgångsrik infiltration.

Q₄ Reduktion av inläckage till följd av planerad efterinjektering.

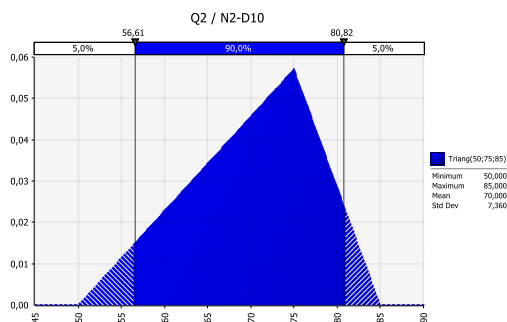
Reduktionen baseras på en skattning av tätningens förväntade effekt. Underlag till skattningen är vilka sträckor som planeras för efterinjektering, samt komplexiteten hos de läckage som där finns.

Q₅ Årstidsvariation.

Utgör en tilläggsfaktor för att få ett värde som är representativt för medelsäsongen.

Parameterskattning

Då det saknas kvantitativt dataunderlag för de nämnda parametrarna Q₁ till Q₅ har utfallet för respektive Q skattats. Skattningen har gjorts med hjälp av expertelicitering (eng: expert elicitation). Det innebär att en expertgrupp tillsammans resonerar och skattar rimliga utfall. I det här fallet har expertgruppen bestått av i projektet väl insatta hydrogeologer och experter inom bergteknik och injektering, samt väl insatta personer från produktionsledningen. Skattningen görs i form av fördelningsfunktioner med ett förväntat värde samt ett spann som tar hänsyn till systemets interna variation och osäkerhet. För skattningen har triangelfördelningar valts. Expertgruppen skattar således min-, max- samt mest sannolikt utfall, vilket skapar en triangel för respektive parameter och tunnelsträcka, se Figur 6. **Hittar inte referenskölla..**



Figur 6. Exempel på triangelfördelning för en parameter i beräkningarna.

Monte Carlo-simulering

För att summera termerna till inläckage för en delsträcka behöver fördelningsfunktionerna kombineras enligt ekvation 1. Det görs med Monte Carlo-simulering, som innebär att värden för respektive parameter slumpas i enlighet med fördelningsfunktionerna. Slumpning och summering enligt ekvation 1 utförs tusentals gånger och utfallen skapar en ny fördelningsfunktion.

Verifiering över tid

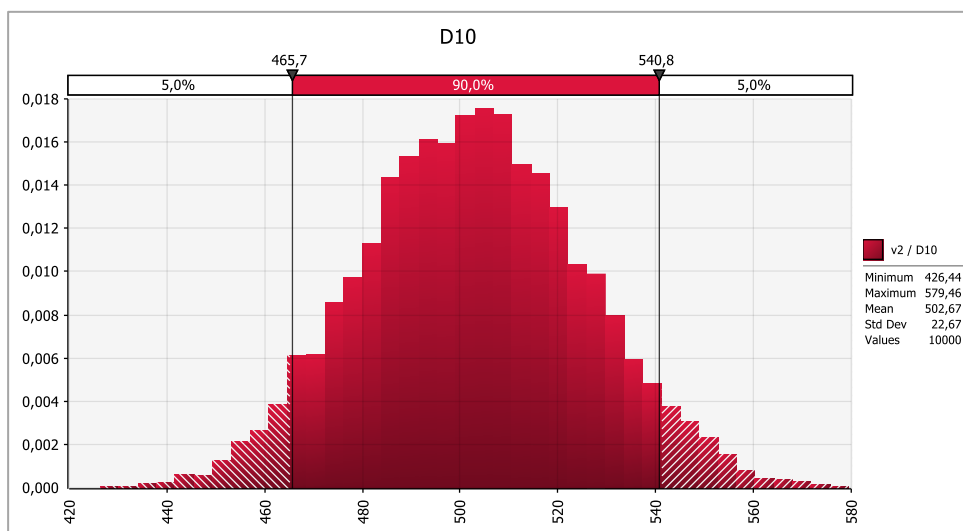
Då projektet pågår parallellt med pågående beräkningar har kontrollberäkningar behövt göras i efterhand för att se att prognosen fortsatt ligger inom det tidigare skattade spannet. I praktiken blir efterkontrollerna en slags verifiering av bedömningarna och skattningens giltighet. Uppdateringarna görs genom att ingående termer (Q₁-Q₅) och deras fördelningsfunktioner för olika tunnelsträckor justeras efter den nya situationen.

I praktiken betyder det att Q_1 ökar i betydelse medan övriga parametrar minskar. Av naturliga skäl kan man förvänta sig att säkerheten i prognoser bli bättre allt eftersom tunnlar och infiltrationsanläggningarna färdigställs. Med tiden kommer effekterna av planerad efterinjektering och tillkommande infiltration (Q_4 respektive Q_3) att vara inkluderade i det inläckage som faktiskt mäts vid en viss tidpunkt (Q_1).

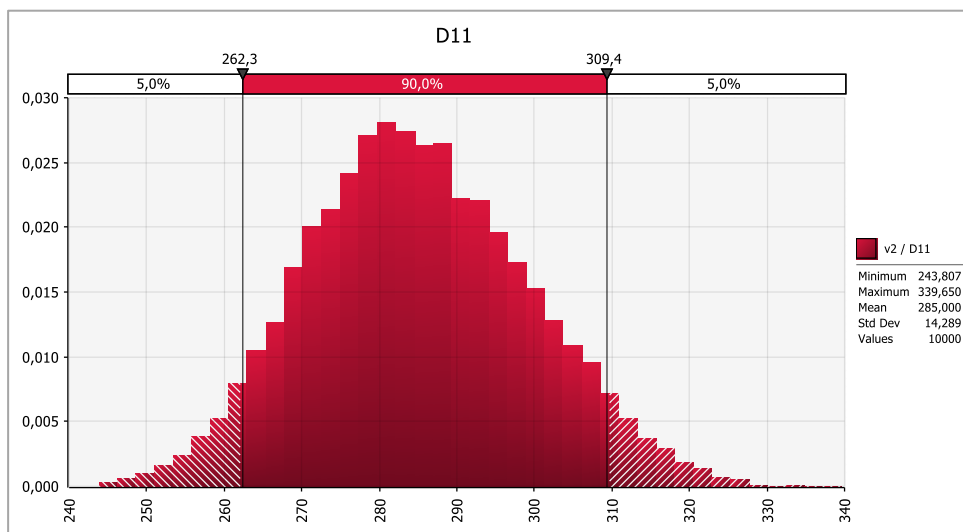
Resultat

Fördelningsfunktionen i Figur 7 **Fel! Hittar inte referenskälla.** erhölls för delsträcka D10 baserat på 10 000 simuleringar. Ur diagrammet kan bland annat utläsas att inläckaget med 95% sannolikhet bedöms underskrida 541 l/min. Medelvärdet för beräkningen är 503 l/min.

Figur 8 **Fel! Hittar inte referenskälla.** visar motsvarande fördelningsfunktion för delsträcka D11 baserat på 10 000 simuleringar. Ur diagrammen kan bland annat utläsas att inläckaget med 95% sannolikhet bedöms underskrida 310 l/min. Medelvärdet för beräknat inläckage är 285 l/min.



Figur 7. Fördelningsfunktion för beräknat inläckage på delsträcka D10.



Figur 8. Fördelningsfunktion för beräknat inläckage på delsträcka D11.

Med utgångspunkt från genomförda beräkningar föreslås nya begränsningsvärden för inläckage istället för de gällande villkoren på samma delsträckor, se Tabell 3 **Fel! Hittar inte referenskälla..** För båda delsträckorna har valts inläckaget som bedöms motsvara 95% sannolikhet för underskridande.

Tabell 3. Gällande villkor enligt miljödom M3346-11 samt förslag till nya villkor.

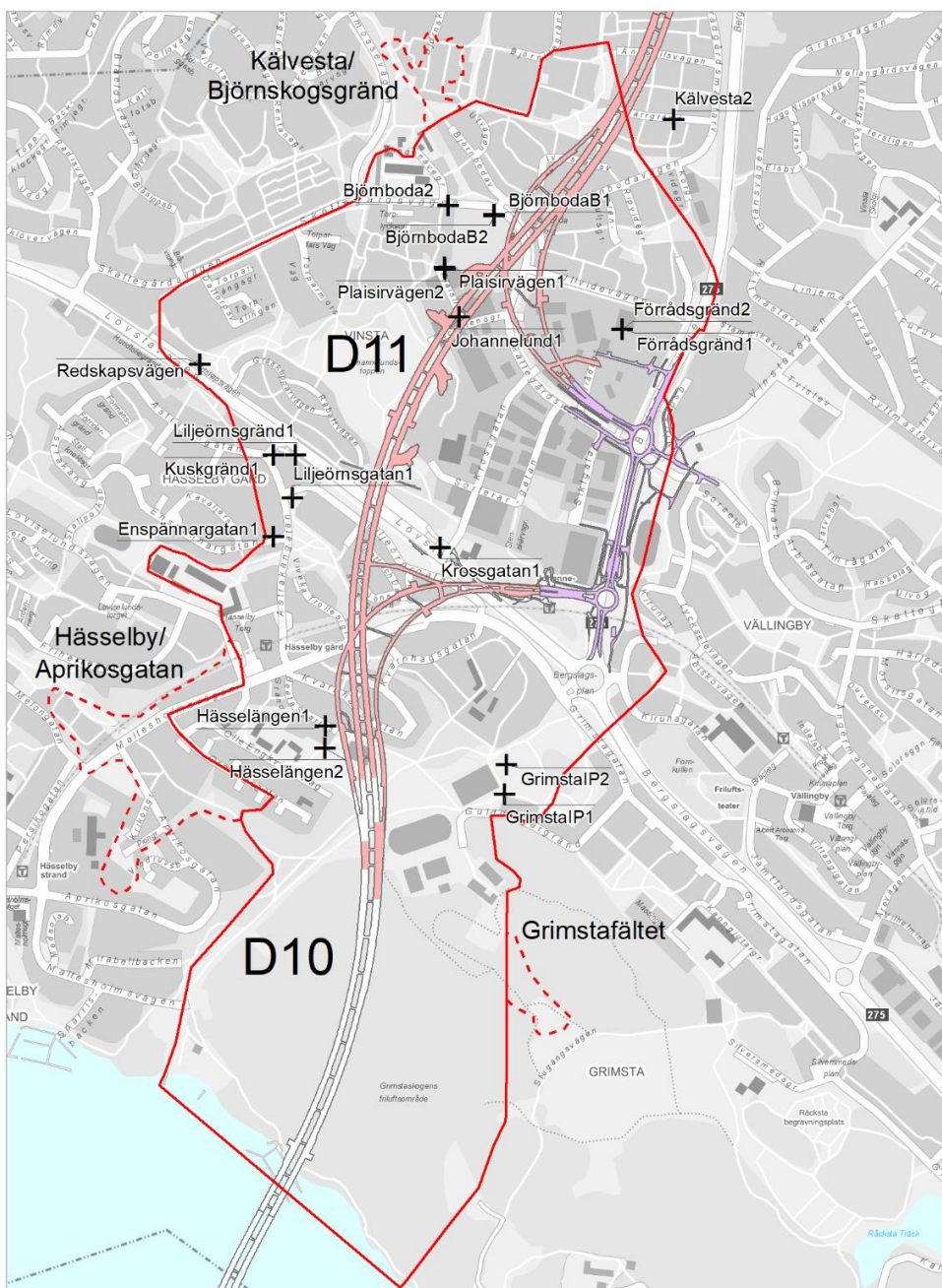
Delsträcka	Gällande villkor (l/min)	Föreslaget villkor (l/min)
D10	280	540
D11	220	310

6 Skyddsinfiltration

6.1 Tekniskt utförande av infiltration



Trafikverket har enligt gällande tillstånd rätt att, på fastigheter inom påverkansområdet för miljödom M3346-11, vid behov infiltrera vatten i jord och/eller berg för att upprätthålla godtagbara grundvattennivåer för att undvika skada, samt att anlägga och bibehålla nödvändiga anläggningar för sådan infiltration. Skyddsinfiltration innebär att vatten tillförs grundvattenmagasinen genom infiltrationsanläggningar. Dessa kan vara infiltrationsbrunnar i jord eller berg. Val av typ och utformning anpassas efter behov och förutsättningar.


Många av de infiltrationsanläggningar som idag används under byggskedet inom E4 Förbifart Stockholms påverkansområde kommer att behövas även i driftskedet och ytterligare några kan tillkomma. I Figur 9 redovisas var nuvarande infiltrationsanläggningar är belägna.



Teckenförklaring

-  Infiltrationsanläggningar
-  Utökat påverkansområde
-  Påverkansområde miljödom M3346-11 vid D10 och D11
-  Utspräng bergtunnel t.o.m v50, 2020
-  Ej utsprängd bergtunnel

-  Trafikplatser ovan mark
-  Gräns för delsträckor



0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 km

© Open Stockholm,

Figur 9. Infiltrationsanläggningarnas placering i förhållande till tunnlar för E4 Förbifart Stockholm och lokalisering av delsträcka 10 och 11 samt de utökade påverkansområdena som benämns Kälvesta/Björnskoogsgränd, Hässelby/Aprikosgatan samt Grimstafältet.

Infiltrationsbrunnar i jord

Infiltrationsbrunnar i jord görs dels i grundvattenmagasin för att fylla på dessa och därmed motverka ett underskott i vattenbalansen som uppstår när vatten rinner ner i berg och in i tunnlarna. Dels i övergången mellan två grundvattenmagasin för att motverka att sänkning i ett magasin sprider sig vidare in i nästa. I båda fallen borrar ett filterförsedd rör ner i marken. Filtret installeras i det vattenförande jordlagret närmast bergytan, det vill säga i det undre grundvattenmagasinet. Det anpassas efter jordlagerförhållanden på platsen. Utformningen av infiltrationsbrunnar i jord visas i Bilaga 5.

Styrning av infiltrationsflödet placeras vanligtvis i ett styrschåp ovan mark, se Bilaga 5. Styrningen av infiltrationsflödet kan även förläggas i en nedstigningsbrunn under mark om det inte är möjligt att ha ett styrschåp ovan mark.

Helt avgörande för en infiltrationsanläggnings kapacitet är hur vattenförande jordlagren är. Oavsett brunnens tekniska utförande går det inte att infiltrera vatten snabbare än jorden kan leda bort det från brunnen, men kapaciteten kan också påverkas av brunnens tekniska utformning (filtrets utformning, filterlängden, och rördiametern etc).

Ett sätt att höja infiltrationskapaciteten i en brunn är att tillsätta vattnet med övertryck. Normalt används vattentrycket vid markytan, men genom att höja trycket med några meter vattenpelare kan flödet öka. Höjs trycket för mycket finns risk att vattnet letar sig upp till markytan och brunnen blir förstörd. Inom området har tryckhöjning använts i brunnar som fungerat dåligt och i några fall mer än fördubblat infiltrationskapaciteten.

Infiltrationsbrunnar i berg

Infiltration i berg görs med borrhål i berg där vatten tillförs bergets sprickor och därmed håller upp grundvattentrycket i de vattenförande strukturerna. Vid lyckad infiltration avstannar läckaget av vatten från grundvattenmagasinen i jord ner i berget. Vattnet kan också tränga upp i jordmagasinet och fylla på det underifrån. En nackdel med infiltration i berg är att det i högre grad än vid infiltration ökar inläckagen i tunnlarna, effektiviteten är på så vis lägre än vid infiltration i jord.

Borrning görs vanligtvis mot kända vattenförande strukturer som exempelvis karterats i tunnlarna. Borrhålen kan antingen borrar från tunneln eller från markytan. I området för ansökan har hittills två infiltrationsbrunnar i berg anlagts och dessa är borrade från markytan.

Vid borrning från markytan borrar först ett tätt foderrör ner genom jordlagren som förankras i det ytliga berget. Borrhålet förlängs därefter vidare ner i berget till dess att vattenförande strukturer påträffas där vattnet kan tryckas ut. Vid infiltration i berg kan övertryck appliceras för att uppnå god effektivitet i anläggningen. Utformningen av infiltrationsbrunnar i berg visas i Bilaga 5.

6.2 Infiltration inom utökat påverkansområde

Påverkansområdet avser det område i jord och berg där grundvatten kan komma att påverkas under bygg- och driftskedet. Ett tidigare påverkansområde redovisades i miljödomen M3346-11. Detta område har setts över med anledning av observerad omgivningspåverkan och den aktuella ansökan om ökad grundvattenbortledning. Översynen har resulterat i en utökning av påverkansområdet, se Figur 9 ovan.

De utökade påverkansområdena avser tre tillkommande områden:

- Kälvesta/Björnskogsgränd
- Hässelby/Aprikosgatan
- Grimstafältet

För att kunna motverka eventuella skador på sätt som föreskrivs i villkor 6 i nuvarande miljöödom har Trafikverket ansökt om möjligheten att få skyddsinfiltreera i dessa tillkommande områden.

6.3 Försörjning av vatten till infiltrationsanläggningar

Infiltrationsanläggningarna försörjs under byggskedet med vatten från Stockholm Vatten och avfalls ledningsnät och Trafikverket är av uppfattningen att vattenförsörjningen ska ske på samma sätt i driftskedet. Återanvändning av inläckande vatten har diskuterats men Trafikverket finner inte att det är lämpligt.

Vattnet som används för skyddsinfiltration behöver hålla en bra vattenkvalitet, både för att föroreningar inte ska tillföras grundvattnet och för att infiltrationsanläggningarnas funktion inte ska försämrats över tid. Under byggskedet blandas inläckande vatten till tunneln med processvatten och innehåller inte tillräckligt bra vattenkvalité för att kunna användas för infiltration. Även under driftskedet har det visat sig vara svårt att använda inläckande grundvatten för infiltration. Bland annat handlar det om svårigheter med att få upp vattnet från tunnelanläggningen till markytan, eftersom tunneln går relativt djupt under mark och platserna där tunneln kommer upp till markytan är begränsade. Dessutom ligger de flesta infiltrationsanläggningarna på ett större avstånd från tunnelns uppgångar. Det finns även juridiska hinder, som exempelvis avsaknad av ledningsrätt, som gör det svårt för Trafikverket att anlägga det ledningsnät som krävs för att få fram vattnet till infiltrationsanläggningarna.

Vattnet till befintliga infiltrationsanläggningar distribueras av Stockholm vatten och avfall (SVOA) och fördelarna är många. SVOA har effektiva anläggningar för vattenrening och ett väl utvecklat distributionsnät inom de områden där skyddsinfiltrationen behöver ske. SVOA har även en organisation för drift och underhåll samt ledningsrätt för utveckling av distributionsnätet. Avtal med SVOA finns för de infiltrationsanläggningar som används idag, och diskussioner om framtida behov pågår.

Hur mycket vatten som behöver skyddsinfiltreeras genom infiltrationsanläggningarna varierar naturligt under året. Årstider med mer nederbörd ger ett mindre behov av infiltration och vice versa. I infiltrationsanläggningarna inom delsträcka D10 och D11 infiltreras idag cirka 400 l/minut. I ett framtida driftskede bedömer Trafikverket att infiltrationsbehovet kommer att ligga runt 500-600 l/minut för aktuella delsträckor.

Trafikverket har en pågående dialog med Stockholm Vatten och Avlopp (SVOA) om behovet av infiltrationsvatten på kort och lång sikt. SVOA har i dessa dialoger meddelat att de kan producera och distribuera de mängder som Trafikverket behöver. SVOA producerar cirka 370 000 kubikmeter vatten per dygn (ca 260 000 l/minut).²

² Uppgifter från Stockholm Vatten och Avfalls hemsida.

7 Betonglining

För att anläggningen ska kunna innehålla befintliga inläckagevillkor i driftskedet skulle betonglining behöva utföras på delar av delsträcka D10 och D11. På grund av detta utgör utförande av tillräcklig betonglining nollalternativet för denna ansökan.

Betonglining beskrivs kortfattat här och en mer utförlig beskrivning finns i bilaga 6. Syftet med att redogöra för alternativet är att ge en uppfattning om omfattningen på ett sådant projekt, avseende teknik, tid, material och kostnad. Miljökonsekvenserna av lining redovisas i miljökonsekvensbeskrivningen.

Betonglining innebär att en platsgjuten betongtunnel byggs inne i bergtunneln och gjuts mot bergytan i denna. För att klara villkoren bedöms det att cirka 15 - 20 stycken 100 meters etapper med betonglining behöver byggas. Att utföra en liningetapp på 100 meter uppskattas ta cirka 11 – 12 månader i anspråk. Ett antal etapper skulle kunna utföras parallellt men det måste hela tiden anpassas till de ökade risker som ett parallellt arbetssätt riskerar att leda till när det gäller arbetsmiljö, utrymning och logistik.

Betongen behöver ha en avsevärd tjocklek (över en meter) för att klara att stå emot vattentryck och bergspänningar på det aktuella djupet. Eftersom den fria tunnelarean behöver vara densamma som i övrig bergtunnel, behöver bergtunnelarnas tvärsnitt därför utökas för att kunna rymma betongkonstruktionen. Det behöver sannolikt även göras justeringar av tunneltvärsnittet för att få till välvda betongelement i botten av tunneln. Den utökade typsektionen för betonglining skulle innebära att mer berg måste sprängas bort. Det är sannolikt att stora delar av den injekterade delen av berget skulle sprängas bort i samband med ett sådant genomförande, vilket i byggskedet skulle leda till högre inläckage.

Någonstans mellan 210 000 – 280 000 ton mer berg bedöms behöva sprängas ut för att inrymma betonglining. För betongkonstruktionen beräknas det gå åt cirka 74 000 – 98 000 m³ betong, cirka 5 000 – 6 000 m³ sprutbetong samt 7 000 – 10 000 ton armeringsjärn. Merkostnaden för att utföra aktuella tunneldelar med lining uppgår till någonstans mellan 5 och 9 miljarder kronor.

Byggandet av nödvändig betonglining bedöms ta ca 5 år och ge en ökad byggtid för hela projektet på cirka 4 år. E4 Förbifart Stockholms öppning för trafik skulle försenas till år 2034. Den uteblivna samhällsnyttan för en sådan försening beräknas uppgå till ca 6 miljarder kronor.

8 Sammanfattning

Under byggtiden av E4 Förbifart Stockholm norr om Lambarfjärden har det visat sig att berget längs vissa stråk som korsar tunnelarna är betydligt mer uppsprucket och vattenförande än vad som förväntades. Det har föranlett att det läcker in mer grundvatten i två delsträckor vid Hässelby (D10 och D11) än vad villkoren för drifttiden föreskriver. Trafikverket har också sett behov av att få möjlighet till att utföra skyddsinfiltration i tre tillkommande områden.

Trafikverket har under byggskedet vidareutvecklat injekteringsmetodiken för att täta berget, både gällande förinjektering och gällande efterinjektering av utsprängda tunneldelar. Metoderna är nu så långt utvecklade att Trafikverket bedömer att det inte går att göra några större ytterligare förändringar i injekteringskonceptet.

Om inläckagevårderna för driftskede i den befintliga miljödomen³ ska innehållas behöver en tät betongkonstruktion, så kallad betonglining, byggas på delar av tunnelsträckorna. Detta innebär att

³ M3346-11

tunnlarnas dimension måste utökas för att få plats med betongliningen vilket medför att ytterligare berg kring tunnarna behöver sprängas bort. Arbetena att få till betonglining är tekniskt komplicerade och är både dyra och tar lång tid. Hela projektet bedöms bli fyra år försenat och trafiköppningen kunna ske först år 2034 om betonglining behöver genomföras.

Trafikverket anser med anledning av de stora negativa konsekvenserna att nollalternativet inte är ett genomförbart alternativ, varför Trafikverket ansöker om tillstånd till ökad grundvattenbortledning i driftskedet och möjlighet till ökad skyddsinfiltration inom delvis nya områden

9 Ordlista

Nedanstående ordlista (Tabell 4) syftar till att förklara vissa tekniska ord och begrepp som används i denna tekniska beskrivning.

Tabell 4. Ordlista

Begrepp	Förklaring
Bergklass	Bergklasser är ett mått på bergets kvalitet och sprickighet. Lägre bergklass innebär god stabilitet i bergmassan och är det mest önskvärda scenariot vid tunneldrivning.
Byggskede	Det skede under vilket byggnation pågår då förändringar i vattenverksamheten kan ske, till exempel drivning av tunnel, borrhning för schakt, bergförstärkning, efterinjektering med mera.
Driftskede	Det skede som startar efter byggskedet då anläggningen är så pass färdigbyggd att ingen större förändring av vattenverksamheten längre kan ske. För ansökan om grundvattenbortledning innebär det att tunneldelar inom samma delområde är färdigutsprängda och erforderligt tätade.
Efterinjektering	Utförs som kompletterande tätning efter att utsprängning av berg färdigställts i specifika punkter/tunnelavsnitt.
Fixpunkt	En fixpunkt är en noga inmätt punkt som är en utgångspunkt för andra höjdmätningar.
Förinjektering	Runt den blivande bergtunneln borrar ett antal hål så att de korsar bergets spricksystem. Sedan pressas en blandning av cement och vatten under högt tryck in i borrhålen och vidare ut i bergets sprickor. När cementen stelnat bildas en tätad zon runt den blivande bergtunneln.
Grundvatten	Vatten som finns under markytan i den mättade zonen och som står i direkt kontakt med marken eller underliggande jordlager. I jord finns grundvattnet i porutrymmet mellan jordpartiklarna. Grundvatten i berg finns i sprickor och mellan sprickorna anses bergmassan vara tät.

Grundvattenmagasin	Ansamling av grundvatten som finns i jordlager samt sprickor i berggrunden. Begränsas av grundvattendelare.
Injektering	Tätning av bergets naturliga sprickor och hålrum (under tryck) med olika typer injekteringsmedel.
Påverkansområde	Avser det område i jord och berg som kan komma att påverkas av en grundvattennivåsänkning under bygg- och driftskedet.
Skyddsinfiltration	Skyddsinfiltration innebär att rent vatten tillsätts grundvattenmagasinen genom en så kallad infiltrationsanläggning. Detta görs i syfte att upprätthålla grundvattennivåer i jord för att motverka sättningar som kan medföra en oförutsedd skada på grundvattenberoende byggnader, anläggningar eller naturmiljöer.
Vattenförlustmätning	Detta är en metod som använder vatten och tryck i borrhål för att erhålla information om bergmassans genomsläpplighet.

10 Referenser

Trafikverket, 2011. Ansökan om tillstånd enligt miljöbalken i Mark- och miljödomstolens mål nr M3346-11. Diarienummer: TRV2011/6214.

Trafikverket, 2011. Teknisk beskrivning, dok nr. OG14H031.

Trafikverket, 2020. PM: Injekteringstekniska åtgärder i Tunnel Norr.

Trafikverket, 2020. PM: Utvärderingsrapport kärnkartering 19A403K, Undersökningsprogram Grimsta.

Intervju med Thomas Dalmalm, 2020. Injekteringskoncept och metodik gällande för- och efterinjektering, E4 Förbifart Stockholm.

Intervju med Tomas Hellström, 2020. Sprickzoner och lerinnehåll, E4 Förbifart Stockholm.

Stockholm vatten och avfall hemsida, 2021. <https://www.stockholmvattenochavfall.se/vatten-och-avlopp/dricksvatten/vattenverk/>