

E4 Förbifart Stockholm

**FSK02
Bergtunnlar**

**Bilaga 3, PM
Injekteringstekniska åtgärder i Tunnel Norr**

2021-04-23

4B143063-FSK02

Rev	Ant	Ändring avser	Godkänd	Datum

Granskare	Godkänd av	Ort	Datum
P.Aronsson	Fredrik Nylén	Solna	2021-04-23

Objekt namn E4 Förbifart Stockholm
 Entreprenadnummer FSK02
 Entreprenadnamn Bergtunnlar
 Beskrivning 1 Bilaga 3, PM
 Beskrivning 2 Injekteringstekniska åtgärder
 Beskrivning 3
 Beskrivning 4
 Status
 Diarienummer
 Konstruktionsnummer
 Objekt nummer 8448590
 Projekteringssteg
 Statusbenämning
 Företag AFRY/AECOM
 Författare/Konstruktör Björn Stille
 Externnummer



TRAFIKVERKET

Innehåll

1	Introduktion	4
1.1	Bakgrund	4
1.2	Förbifart Stockholm orientering av tunnelanläggningen	4
1.3	Tidslinje för justering av injekteringsinsatserna	5
1.4	Syfte	6
1.5	Disposition	7
1.6	Beteckningar	8
2	Geologiska förhållanden och bergmassans genomsläpplighet	9
2.1	Klassificering av bergmassan	9
2.2	Jämförelse med prognos och verkligt utfall	10
2.3	Omfattning av efterinjekteringsarbeten	21
3	Tätning av bergtunnlar genom förinjektering	22
3.1	Syfte med tätning mot inläckande grundvatten	22
3.1.1	Yttre miljö och risken för skadlig omgivningspåverkan	22
3.2	Krav på tätning mot inläckande grundvatten	23
3.2.1	Allmänt	23
3.2.2	Förbifart Stockholm	24
3.3	Tätande huvudsystem (Tätning åtgärder i en bergtunnel)	25
3.3.1	Allmänt	25
3.3.2	Utformning av ett tätande huvudsystem	27
3.4	Tätningsteknik	29
3.4.1	Allmänt	29
3.4.2	Injekteringsprocessen	29
3.5	Cementbaserade injekteringsmedels inträngningsförmåga	32
3.5.1	Allmänt	32
3.5.2	Geologiska egenskaper på injekteringsmedel	35
3.5.3	Inträngningsförmåga	36
3.5.4	Inträngningslängd och injekteringstid	39
3.6	Injekteringstryck	41
3.7	Skärmgeometri	41
3.8	Antal injekteringsomgångar	41
3.9	Keminjektering	42
3.9.1	Polyuretan	42
3.9.2	Kolloidal silika	43
3.9.3	Polyakrylat gel	43
3.9.4	Utrustning	43
3.9.5	Injekteringsborrhål	44
3.9.6	Utbildning	44
3.9.7	Miljö och arbetsmiljörisker med keminjektering	44
4	Förinjektering teknisk lösning	44

4.1	Allmänt.....	44
4.2	Miljödomsansökan	45
4.2.1	Allmänt.....	45
4.2.2	Injekteringsstrategi	45
4.2.3	Injekteringskärm, geometri och antal omgångar.....	45
4.2.4	Injekteringstryck	45
4.2.5	Injekteringsbruk	45
4.2.6	Stoppkriterier.....	45
4.3	Injekteringslösning enligt förfrågningsunderlag ABC	46
4.3.1	Allmänt.....	46
4.3.2	Injekteringsstrategi	46
4.3.3	Injekteringskärm, geometri och antal omgångar.....	46
4.3.1	Injekteringstryck	46
4.3.2	Injekteringsbruk	46
4.3.3	Stoppkriterier.....	46
4.4	Interimslösning B2 och C2.....	47
4.4.1	Allmänt.....	47
4.4.2	Injekteringsstrategi	47
4.4.3	Injekteringskärm, geometri och antal omgångar.....	48
4.4.4	Injekteringstryck	48
4.4.5	Injekteringsbruk	48
4.4.6	Stoppkriterier.....	48
4.5	Injekteringslösning ABC-3.....	48
4.5.1	Allmänt.....	48
4.5.2	Injekteringsstrategi	48
4.5.3	Injekteringskärm, geometri och antal omgångar.....	49
4.5.4	Injekteringstryck	49
4.5.5	Injekteringsbruk	49
4.5.6	Stoppkriterier.....	49
4.6	Injekteringslösning ABC-4.....	50
4.6.1	Allmänt.....	50
4.6.2	Injekteringsstrategi	50
4.6.3	Injekteringskärm, geometri och antal omgångar.....	50
4.6.4	Injekteringstryck	51
4.6.5	Injekteringsbruk	51
4.6.6	Stoppkriterier.....	51
4.7	Sammanfattning	51
5	Efterinjektering teknisk lösning.....	52
5.1	Allmänt.....	52
5.2	Systematisk efterinjektering	53
5.2.1	Injekteringsstrategi	53
5.2.2	Injekteringskärm, geometri och antal omgångar.....	54
5.2.3	Injekteringstryck	55
5.2.4	Injekteringsbruk	56
5.2.5	Stoppkriterier.....	56
6	Sammanfattning och diskussion	56
6.1	Geologiska förhållanden och bergmassans genomsläpplighet	56
6.2	Injekteringstekniska lösningar	56
6.3	Efterinjektering.....	57
6.4	Diskussion.....	57
7	Underlag karterade bergklasser	58

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

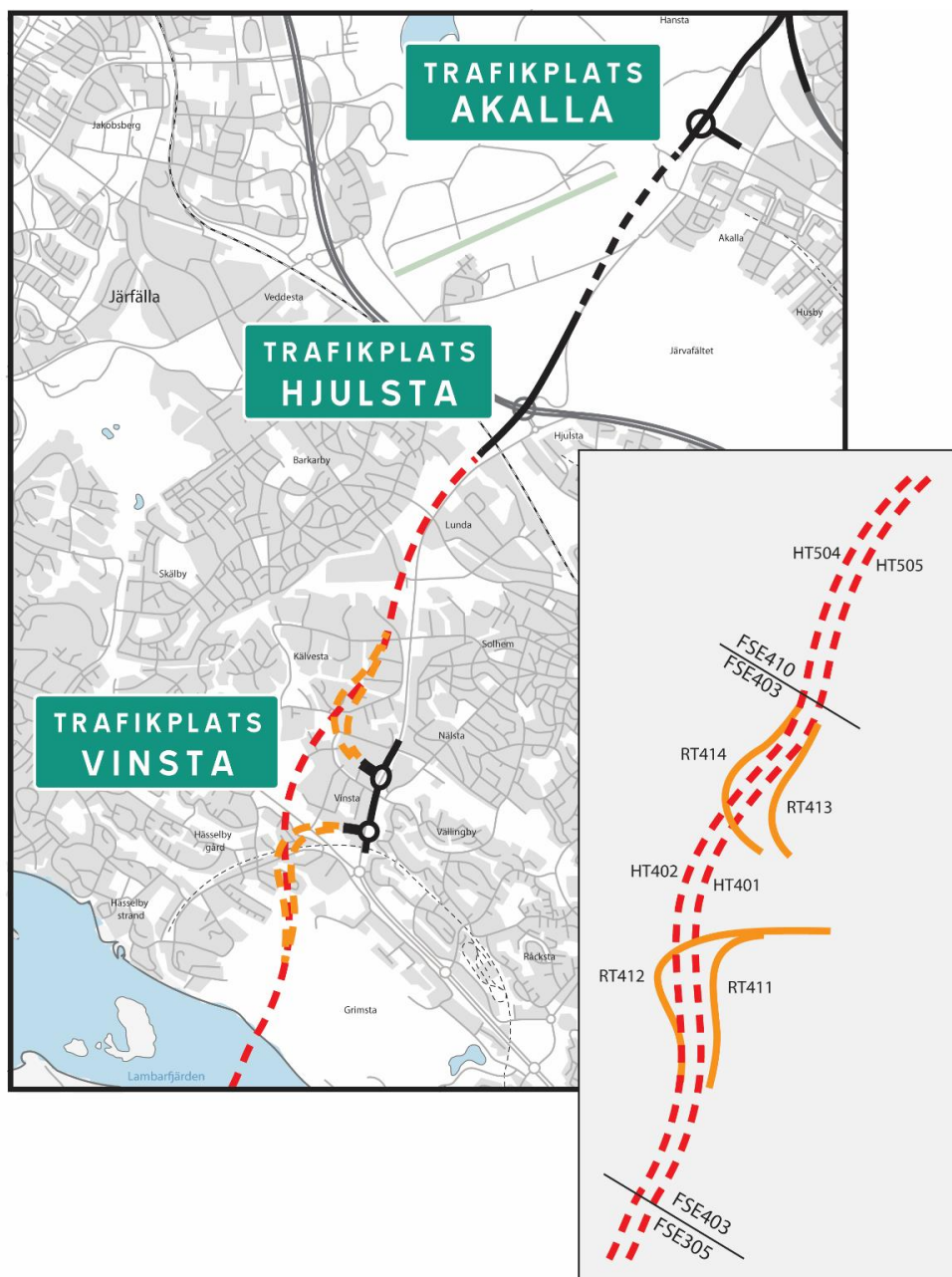
Detta PM över injekteringstekniska åtgärder utgör ett tekniskt underlag för ny tillståndsansökan till Miljödomstolen avseende vattenverksamhet för Förbifart Stockholms anläggningar i delar av Tunnel Norr. Denna tekniska beskrivning syftar till att beskriva de insatser och åtgärder som utförts för att minska inläckagen och bakgrunden till dessa. Den presenterar också de bergtekniska förhållanden som kraftigt avviker från det ursprungliga antagandet om bergkvalitet och genomsläpplighet samt omfattningen på utförd injektering, som exempelvis injekterad mängd cement och antal injekteringsskärmar vilka kraftigt ökar med förändringar i injekteringsmetodiken.

Generellt gäller en tillståndsansökan för vattenverksamhet och avser verksamheter med grundvattenbortledning och ytvattenverksamheter. Denna tekniska beskrivning omfattar de tunnelanläggningar som medför grundvattenbortledning både under bygg- och driftskede inom del av Tunnel Norr. De tekniska underlagen i den nya tillståndsansökan består av flera dokument med olika inriktning. I detta dokument beskrivs exempelvis inte andra naturliga förutsättningar (än bergkvaliteten längs med tunnlar) eller miljökonsekvenser.

1.2 Förbifart Stockholm orientering av tunnelanläggningen

Förbifart Stockholm har delats i tre områden, projekt Tunnel Norr, projekt Tunnel Lovön och projekt Tunnel Söder. Inom Tunnel Norr görs utbyggnaden i tre tunnelentreprenader, Förbifart Stockholm FSE 403 som omfattar områden Johannelund och Skattegårdsvägen, FSE410 som omfattar Lunda och FSE613 som omfattar Akalla. Endast FSE 403 ingår i denna ansökan. Tunnelarna omfattar två huvudtunnlar och fyra ramptunnlar, Figur 1-1.

I rapporten redovisas tunnelnamn och ibland entreprenadnummer. Varje entreprenad omfattar ett geografiskt område och varje tunnelavsnitt har ett eget identitetsnummer för att underlätta orienteringen i projektet. I figuren visas tunnelarna i plan med entreprenadnamn och tunnelnummer där HT står för huvudtunnel, RT står för Ramptunnel och FSE står för "Förbifart Stockholm Entreprenad".



Figur 1-1. Delprojekt Norr och tunnelentreprenad 403 och 410. Tunnelnumrering med huvudtunnel (HT) och ramptunnel (RT) används i rapporten. Heldragen orange linje visar ramptunnel och streckad röd och streckad svart linje visar huvudtunnel i berg. Heldragen svart linje visar väg ovanjord.

1.3 Tidslinje för justering av injekteringsinsatserna

Tunneldrivningen i Förbifart Stockholm har pågått sedan arbetstunnlarna började tas ut 2015. Men det var inte förrän ramptunnlarna började tas ut under våren 2017 som det uppmärksammades att inläckage och prognostiserad bergkvalitet avviker från de förutsättningar som beskrivs i miljödomsönskan.

Efterhand som tunneln byggdes och risken ökade för att inte kunna innehålla inläckagevillkoren i gällande miljödömdom, beslutade Trafikverket att utöka tättningsinsatsen för att minska fortsatta inläckage under tunneldrivningen. Injekteringslösningarna provades först på ett mindre avsnitt och sedan i den mån de bedömdes lyckosamma infördes dessa för de områden som riskerade att överskrida miljödömdomen.

Förutom den projekterade injekteringslösningen ABC infördes gradvis utökade injekteringsinsatser enligt följande övergripande beskrivning, Tabell 1-1.

Tabell 1-1. Tidslinje och kortfattad beskrivning av utökade injekteringsinsatser inom Tunnel Norr.

	Benämning	Beskrivning	Tid
1.	ABC	Projekterad teknisk lösning i förfrågningsunderlag.	Upphandling - 2018
2.	Test	Justering av injekteringsklass C benämnd IKC++ och därefter IKSZ.	Våren och Sommaren 2018
3.		Beslut fattas att upprätta en ny injekteringsmetodik.	Hösten 2018
4.	B2, C2 (ABC – 2)	Interimslösning B2 och C2 implementeras under tiden som den nya injekteringsmetodiken 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 inom FSE403 och FSE410.	Våren 2019
7.	Test	Försök med ny injekteringsmetodik (tre skärmar) inom FSE613.	Våren 2019
8.	ABC – 4	Nu tillämpad injekteringslösning godkänd.	Våren 2020

1.4 Syfte

Syftet med denna rapport är att visa vilka större injekteringstekniska åtgärder Trafikverket har vidtagit för att hantera och komma till rätta med inläckaget i tunnarna inom Tunnel Norr. Åtgärderna är stegvis implementerade och avspeglar de gradvis ökande inläckagen och oron med avseende på miljödömdomen. Därutöver har andra åtgärder vidtagits, t ex utökad övervakning av grundvattentrycknivåer och markrörelser/sättningar samt grundvatteninfiltration. Dessa beskrivs inte vidare i denna rapport.

Vidare presenteras den geologiska prognosen (antagen bergkvalité vid ursprunglig miljödömdomsansökan och grunden till projektering av injekteringslösning ABC) och verklig bergkvalitet efter att tunnel avsnittet tagits ut. Syftet med jämförelsen mellan prognos och verklighet är att illustrera skillnad i bergkvalitet vilket även visar på skillnader i förutsättning både för injekteringslösning och för miljödömdomsansökan.

Omfattning på injekteringsinsatserna presenteras för samma tunnelavsnitt som för redovisningen av den geologiska prognosen/verklig bergkvalitet. Syftet med denna redovisning är dels att stödja tolkningen att en bergmassa med bättre kvalitet också generellt är mindre uppsprucken och genomsläpplig och vice versa. Vidare syftar redovisningen till att visa att förändringarna i injekteringsförfarande är mycket omfattande jämfört med ursprunglig injekteringslösning (och enligt ursprunglig ansats givet att bergmassas förutsattes vara relativt sprickfattig och generellt mindre genomsläpplig).

1.5 Disposition

Rapportens är indelad i fem huvudavsnitt:

Avsnitt 1 beskriver inledning och rapportens bakgrund, syfte och struktur och en beteckning/nomenklaturlista.

Avsnitt 2 beskriver prognosticerad bergkvalitet och verklig bergkvalitet i tunnlar. Avsnittet visar också injekterade bruksmängder, injekteringsklass/metodik.

Avsnitt 3 beskriver generellt bakgrund till injekteringslösningarna och sakfrågor och teori som beaktas i samband med utformning av en injekteringslösning.

Avsnitt 4 beskriver de större förändringar som Trafikverket har genomfört i takt med att inläckage problematiken växt. Beskrivningen omfattar ansats enligt Miljödomsönsökan, ursprunglig projekterad lösning ABC, Interimslösning B2, C2 (ABC-2) under tiden fortsatt lösning utarbetas, ABC-3 empirisk lösning framtestad under interimperioden, ABC-4 projekterad lösning baserad på uppföljning av ABC-3 och teori.

Avsnitt 5 beskriver omfattning på planerad och hittills utförd efterinjektering samt teknisk lösning för efterinjektering.

Avsnitt 6 sammanfattar och diskuterar avsnitt 2 till 5 med avseende på bergmassans täthet och injekteringslösningen.

1.6 Beteckningar

Följande beteckningar/nomenklatur används i rapporten.

Tabell 1-2. Beteckningar och begrepp med förklaring.

Beteckning	Förklaring
ABC	Ursprunglig injekteringsmetodik i Förbifart Stockholm
IK-SZ	Injekteringsklass för svaghetszon prövades i huvudtunnel 402 i en svaghetszon (ca 100 m).
B2-C2	Empirisk injekteringsmetodik utfördes i avvaktan på resultat av test med ABC-3
ABC-3	Injekteringsmetodik empiriskt framtagen inom Tunnel Norr
ABC-4	Injekteringsmetodik projekterad och anpassad till resultat från ABC-3
Bergklass	Ett mått på bergkvalitet (bergets karakteristika som exempelvis blockighet och sprickors struktur och vittringsgrad)
Anvisad bergklass	Baserat på karterad geologi i tunneln anvisas bergklass för beställning av bergförstärkning.
Begränsningsvärde	Tillåtet inläckage enligt miljödom
Dispergering	Separation av cementpartiklar vid blandning av injekteringsbruk
d ₉₅	Mått på kornstorleken i ett cement där 95% av mängden cement passerar en viss siktvidd, exempelvis 30 micrometer för ett injekteringscement eller 20 micrometer för ett microcement
Flockning	Cementpartiklar attraheras till varandra och samlas i större sammansatta partiklar, motverkas med flytmedel.
Kontrollvärde	Tillåtet inläckage (reducerat av Trafikverket) för att styra entreprenadernas injekteringsinsats.
Konduktivitet (hydraulisk)	Genomsläpplighet (för vatten), i detta fall bergmassans
Lineament	Geometriska indikatorer på en geologisk struktur exempelvis en utsträckt dalgång
FU	Förfrågningsunderlag – handlingar framtagna för att entreprenören ska kunna lämna anbud.
IP	Ingenjörsgelogisk prognos – antagen bergkvalitet redovisad i förfrågningsunderlaget (FU)

Q-system	System för bestämning av bergmassans kvalitet och omfattning av bergförstärkning. Innehåller sex parametrar: RQD, J_n , J_r , J_a , J_w och SRF
Q-värde	Värde som representerar bergmassans kvalitet. Högre värde – bra berg, Lägre värde – sämre berg
RQD	”Rock Quality Designation” - ett mått på bergmassans uppsprickningsgrad
J_n	”Joint set number” – ett mått på antal sprickgrupper
J_r	”Joint roughness number” – ett mått på sprickytornas råhet
J_a	”Joint Alteration Number” – ett mått på sprickytornas omvandlingsgrad
J_w	”Joint water reduction factor” – ett mått på vatteninläckage i relation till påverkan av bergmekaniska förhållanden
SRF	”Stress Reduction Factor” – en bergmekanisk justering med hänsyn till geometriska förhållande och bergspänningsförhållanden
Svaghetszon	Område i bergmassan med svagare berg, vanligen även mer genomsläppligt
vct	Vattencementtal, vikt vatten delat med vikt cement i en blandning.

2 Geologiska förhållanden och bergmassans genomsläpplighet

2.1 Klassificering av bergmassan

Bergmassan karakteriseras med ett system för att dokumentera bergförhållandena som kallas för Q-systemet. Systemet poängsätter vissa parametrar och dessa beräknas till ett sammansatt värde som representerar bergmassans kvalitet. Systemet tar hänsyn till antal spricksystem och den allmänna uppsprickningsgraden samt sprickornas vittringsgrad och struktur. Q-systemet hanterar också vissa bergtekniska parametrar som vatten, tunnelkorsningar, liten bergtäckning och bergspänningsförhållanden. Bergmassan delas sedan in i klasser som definieras med Q-värdes intervall enligt systemets standard.

Principiellt beskriver alltså Q-systemet bergmassans kvalitet men eftersom det framförallt är sprickorna som karakteriseras kan systemet principiellt även beskriva förhållanden som påverkar genomsläppligheten. Q-systemet används normalt inte för att besluta om tätningmetod utan används för att anvisa bergförstärkning. Grovt kan sägas att bättre bergklasser ofta kräver mindre injektering och är lättare att täta, medan sämre bergklasser är mer svårtätade.

Q-systemet är framtaget för nordiska förhållanden.

Q-värdet kan variera längs tunneln och ett berg av god kvalitet har ett högt värde och ett sämre berg här lägre värde. Q – värdet beräknas med ekvation (1):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Där RQD = uppsprickningsgrad
 J_n = antal sprickgrupper
 J_r = sprickytans råhet
 J_a = sprickans omvandlingsdrag
 J_w = vatteninläckage
 SRF = spänningsreduktionsfaktor.

Värdena från den geologiska karteringen är hämtade från Chaos, Trafikverkets databas.

Bergklasserna definieras av ett Q-värdes intervall enligt Tabell 2-1. Större värde indikerar bättre berg vilket leder till mindre förstärkning och vanligen en tätare bergmassa.

Tabell 2-1. Definition av bergklass inom Förbifart Stockholm med Q-värdesintervall

Q-värdes intervall	Bergklass
$Q > 10$	I
$10 \geq Q > 4$	II
$4 \geq Q > 1$	III
$1 \geq Q > 0,1$	IV
$0,1 > Q$	V

I avsnitt 2.2 redovisas bergklasserna för uttagen (byggd) tunnel till och med mars 2021. För att få en bättre koppling till förmodat behov/mängd injektering redovisas bergklass 1 och 2 ihop, och bergklass 3-5 som en helhet. Karterade bergklasser 1-5 redovisas i avsnitt 7.

I avsnitt 2.2 redovisas även bergtäckning och prognosticerade svaghetszoner. Svaghetszonerna är markerade i den grafiska framställningen vid mitten av deras förmodade utbredning på markytan. En zon klassas som tydlig om den har verifierats genom t.ex. borrhärdar eller befintliga tunnlar. En trolig zon är baserad på lineamenttolkning samt en indikering av zon i karterat sidoberg. Möjliga zoner är enbart baserade på lineamenttolkning.

2.2 Jämförelse med prognos och verkligt utfall

För att redovisa verkliga geologiska förhållanden i tunneln visas anvisade bergklasser efter att tunneln tagits ut och jämförs med prognosticerad bergklass. Bergklass 1 och 2 redovisas som en klass och 3-5 redovisas som en klass. Den prognosticerade bergklassen visar vad Trafikverket utgick ifrån när

teknisk beskrivning skrevs för miljödomsansökan (avsnitt 4.2) och vid projektering av den första injekteringslösningen (avsnitt 4.3). Prognosticerade bergklasser 1-5 redovisas i avsnitt 7.

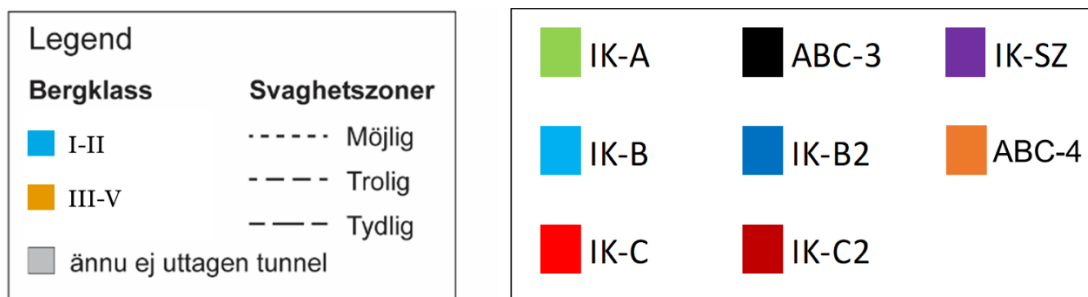
Redovisningen görs för huvudtunnlar och ramptunnlar inom projekt Tunnel Norr kontrakt FSE403 och FSE410 (den prognostiserade bergklassfördelningen i figurerna avser båda tunnlar), Figur 2-1 till Figur 2-10. Redovisningen börjar från söder vid Grimsta (Lambarfjärden) och sträcker sig norrut längs huvudtunnlarna HT401 (norrgående) och HT402 (södergående) inom kontrakt FSE403. I kontrakt FSE410 byter huvudtullarna namn till HT505 (norrgående) och HT504 (södergående).

I figurerna redovisas även injekteringsmetodik och den bruksmängd som injekterats i tunnlar. Ramptunnlar redovisas i nummerordning 411, 412, 413 och 414. Därefter redovisas huvudtunnlar i stigande längdmätning med start från Grimsta (Lambarfjärden). På grund av varierande bruksåtgång är det olika skala på Y-axeln (redovisar injekterad mängd ton cement). X-axeln redovisar tunnelns längdmätning där stapeln för bruksåtgång är placerad i injekteringsskärmens startpunkt. I redovisningen framgår avstånden mellan injekteringsskärmarna, från början ca 18 m, men avstånden mellan skärmarna är tydligt mindre för ABC-3, se exempelvis Figur 2-3, ramptunnel 412, från längdmätning 0/950 – 1/110 där injekteringsskärmarna borrats efter varje salva, ca 6 m avstånd. Vilket illustreras i redovisningen genom att staplarna för bruksåtgång går ihop.

Bruksåtgång varierar med hänsyn till bergmassans genomsläpplighet men också med hänsyn till injekteringstryck, antal hål och antal omgångar (summerat i stapeln). Generellt kan sägas att en bruksåtgång större än ca 5 ton indikerar ett mer genomsläppligt berg. När tunneln är nära bergytan (liten bergtäckning) används låga injekteringstryck vilket också ger liten bruksåtgång. Därför kan bergmassan fortfarande vara genomsläpplig i sådana partier vilket exempelvis gäller ramptunnel 411, Figur 2-2, vid längdmätning ca 1/150 och ramptunnel 412, Figur 2-3, vid längdmätning ca 0/300 (korsning med Löfstavägen). När det gäller områden med fler omgångar och fler injekteringshål som för ABC-3 kan ca 5 ton fortfarande anses vara en rimlig gräns men uppskattningsvis kan något högre bruksåtgång förväntas även för ett mindre genomsläppligt berg på grund av att bergmassan injekteras med större antal hål men med kortare avstånd mellan skärmarna.

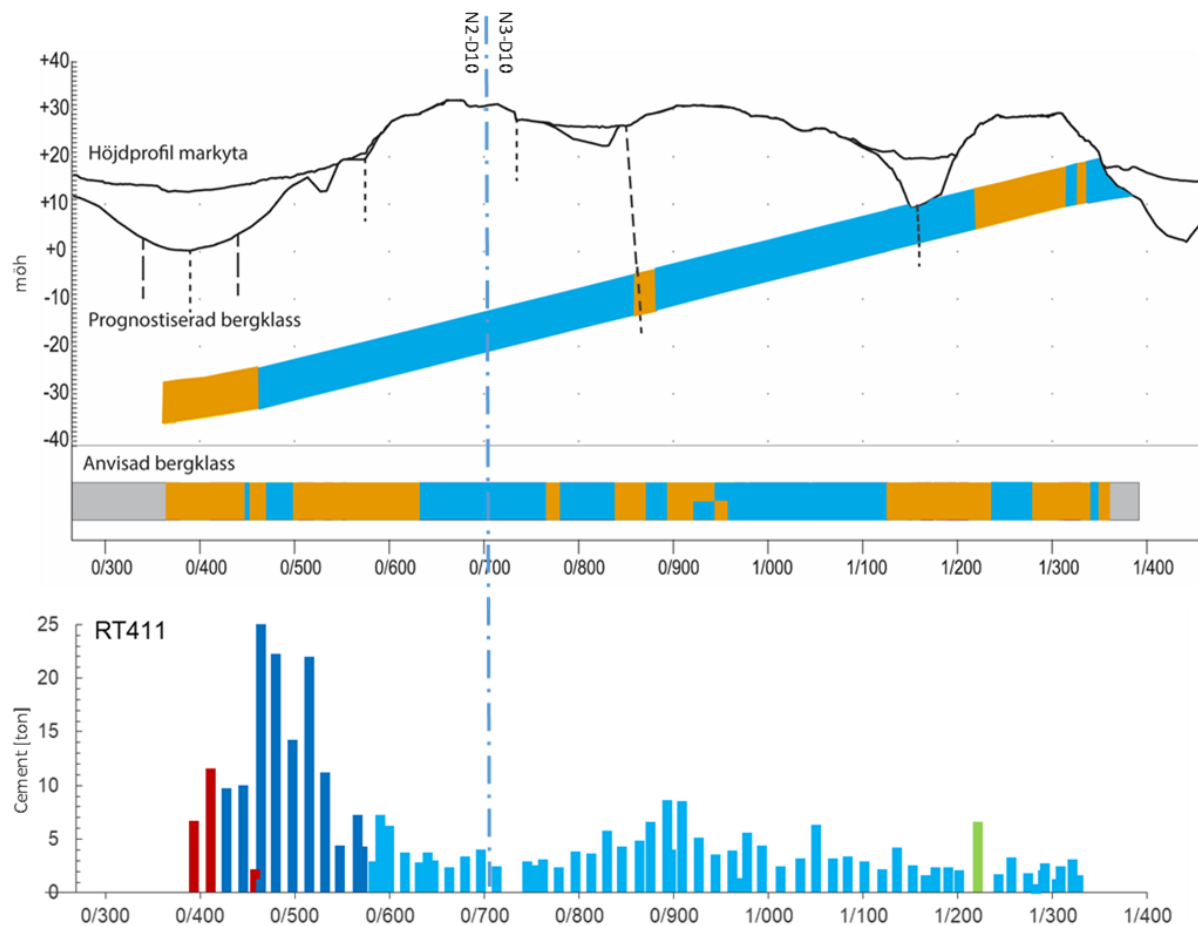
I stora drag korrelerar sämre bergkvalitet med större bruksåtgång. Man kan också konstatera att för långa områden i exempelvis HT504 och HT505, Figur 2-9 och Figur 2-10, är bruksåtgången närmare 10 ton per skärm vilket indikerar ett mer uppsprucket och mer genomsläppligt berg i en omfattning som vida överstiger antaganden i prognos och ursprunglig miljödomsansökan.

Omfattningen med hänsyn till bruksåtgång och antal skärmar ökar tydligt för IK-B2, C2 och ABC-3 vilket visar vilket allvar Trafikverket tar på omgivningspåverkan och ökande inläckage i tunneln. Det visar också vilken stor insats Trafikverket har gjort för att reducera ytterligare inläckage.



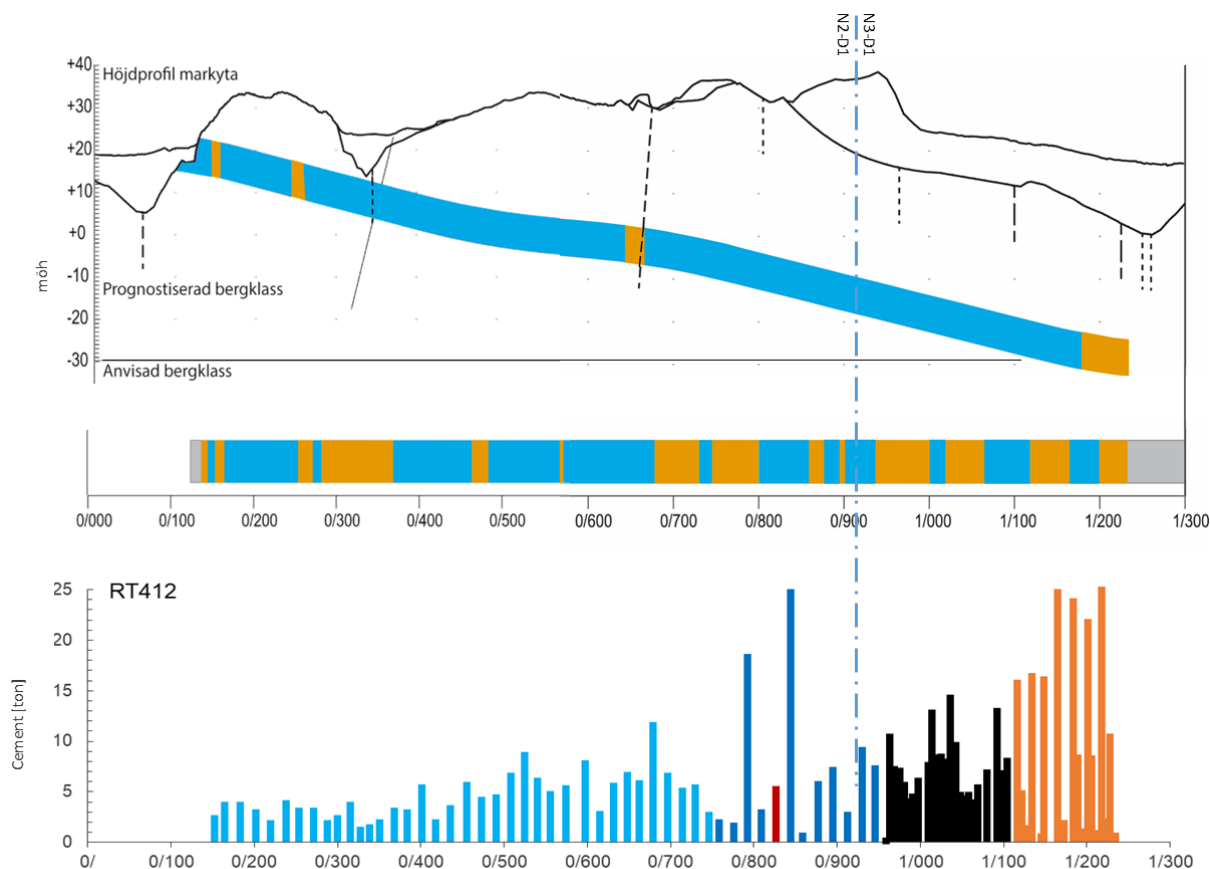
Figur 2-1. Färgkodning för bergklass enligt prognos och uttagen tunnel (enligt karterad geologi och anvisad bergklass) samt linjetyper för prognosticerade svaghetszoner. IK-A, IK-B etc. anger beteckning för injekteringsmetodik (ABC, B2-C2, ABC-3, ABC-4) och injekteringsklass (A, B, C, B2, etc.).

Figur 2-1 redovisar teckenförklaringen och färgkodningen i Figur 2-2 till Figur 2-10. I figurerna redovisas bara de prognosticerade svaghetszonerna. Verkliga karterade svaghetszoner har inte redovisats på grund av att kartering ännu inte fullständigt digitaliserats.



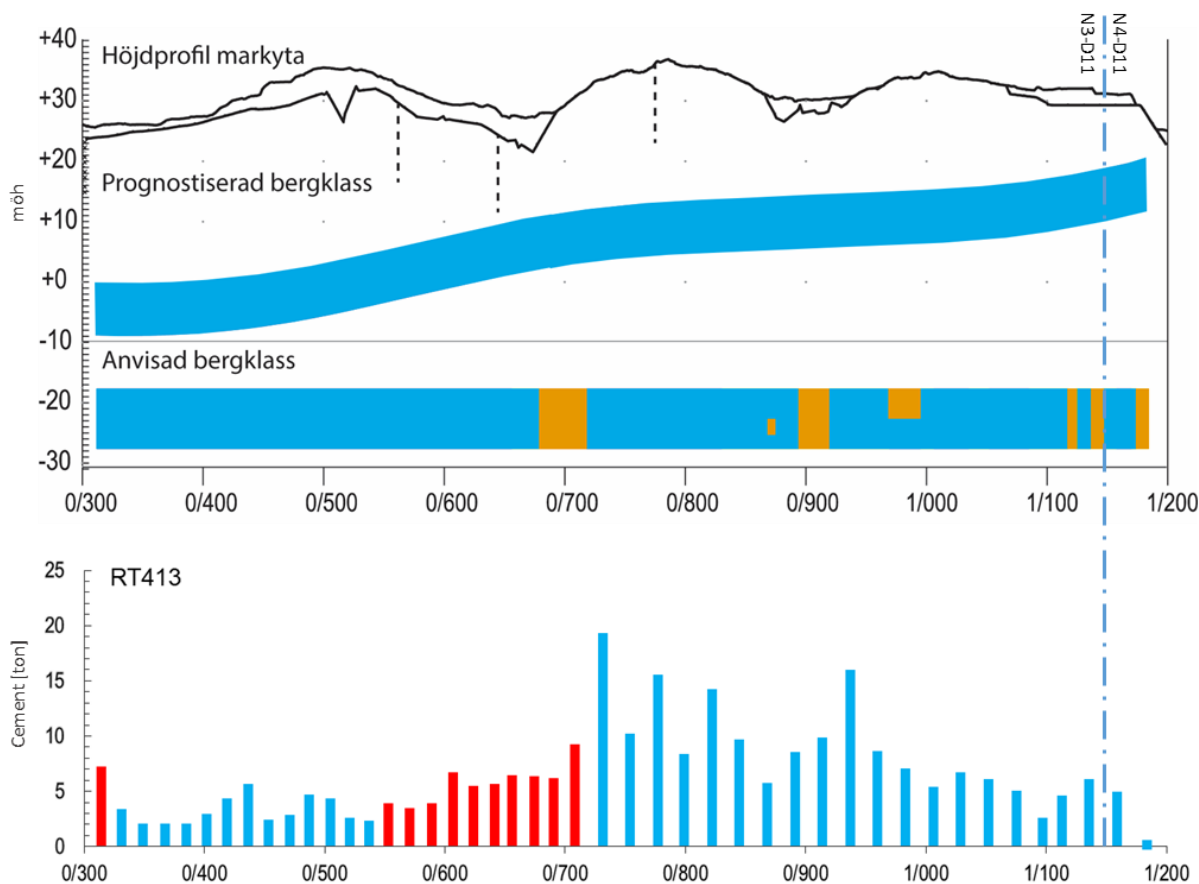
Figur 2-2. Ramptunnel 411, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning 0/360 – 1/360 och injekterad bruksmängd för RT411 mellan längdmätning 0/390 och 1/330.

Figur 2-2 visar hur bruksmängd ökat i områden kring lm 0/900 och mellan lm 0/400 och 0/600. Dessa områden sammanfaller med sämre berg i RT411. I starten på tunneln är korrelationen mellan bruksåtgång och bergklass svag beroende på de mycket låga injekteringstryck som använts i ytnära läge. Figuren visar också hur bruksåtgång kraftigt ökat efter byte av injekteringsmetodik till B2-C2 jämfört med ABC.



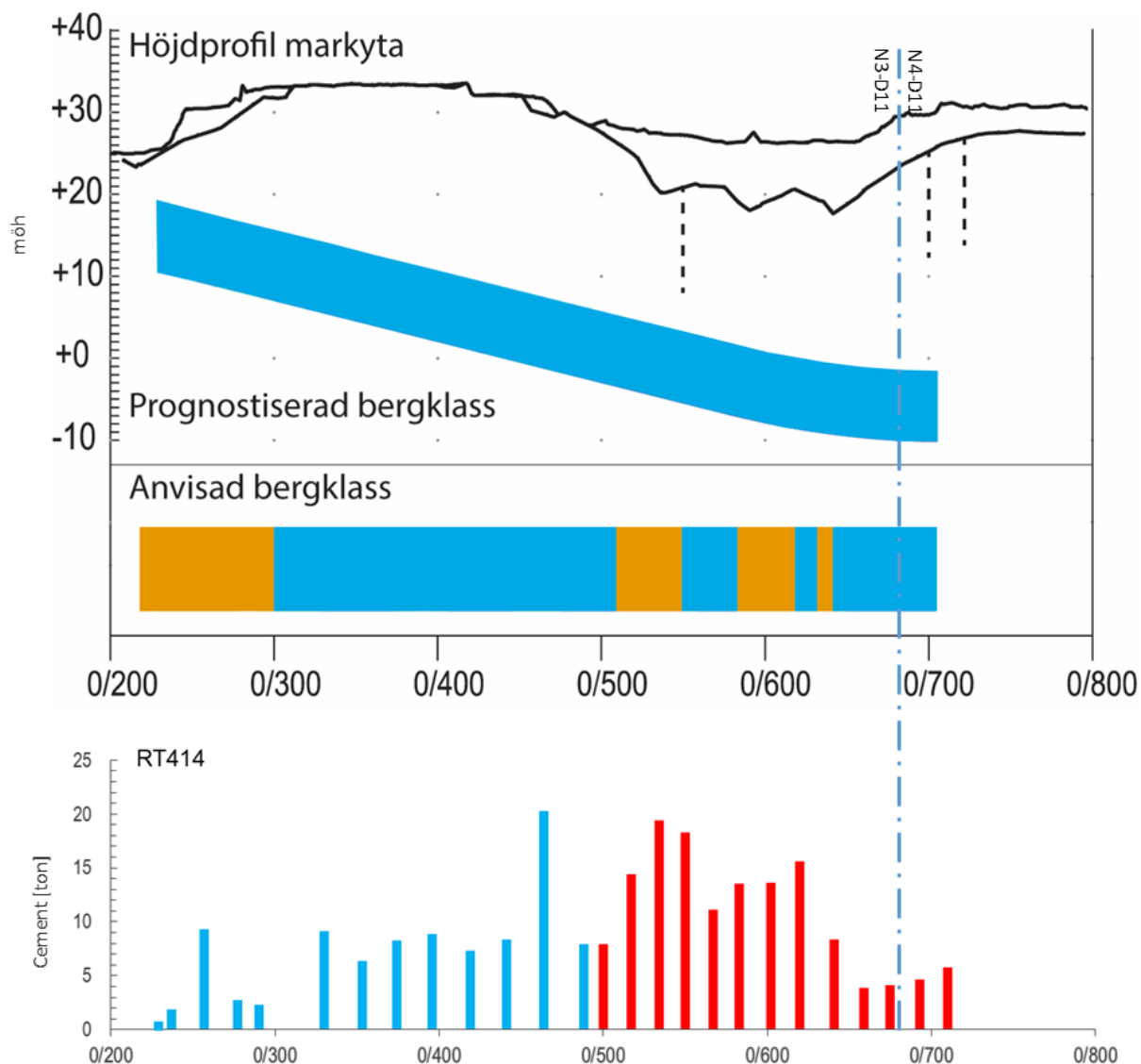
Figur 2-3. Ramptunnel 412, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning ca 0/140 – 1/230 och injekterad bruksmängd mellan längdmätning 0/150 och 1/230.

Figur 2-3 visar hur bruksmängd ökat i distinkta områden som exempelvis lm 0/520, 0/600, 0/670 och 0/800. Mellan ca lm 0/900 och 1/100 är ett sammanhängande område med större bruksåtgång. Vissa av dessa distinkta områden sammanfaller med sämre berg i RT412 vilket även kan observeras i området mellan ca lm 0/920 och 1/250. Där syns även att i partierna med bättre berg synes bruksåtgången minska. I starten på tunneln är korrelationen mellan bruksåtgång och bergklass svag beroende på de mycket låga injekteringstryck som använts i ytnära läge. Figuren visar också exempel på hur bruksåtgång kraftigt ökat efter byte av injekteringsmetodik till B2-C2 jämfört med ABC. Figuren visar också hur tätt staplarna i ABC-3 sitter vilket beror på en kraftig ökning av antal injekteringsskärmar i tunneln (i området tre gånger så tätt som normalt).



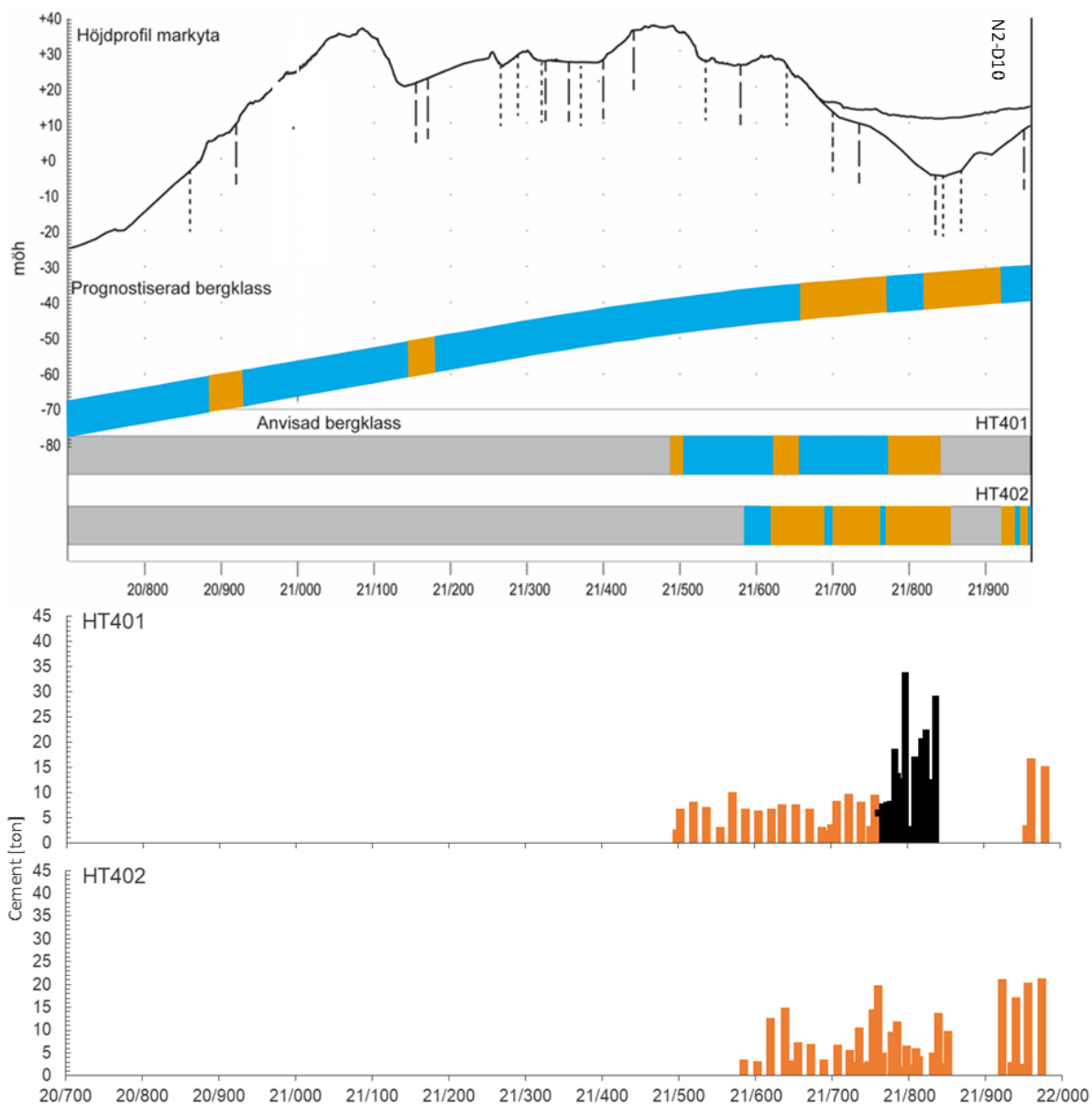
Figur 2-4. Ramptunnel 413, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass samt injikerad bruksmängd längs tunnelsträckningen från längdmätning ca 0/310 – 1/180.

Figur 2-4 visar hur bruksmängd är större mellan lm 0/700 och 1/000. Dessa områden sammanfaller delvis med sämre berg i RT413. Värt att notera är även det längre området med bättre berg mellan 0/300 – 0/650 där generell bruksåtgången även varit låg. I starten på tunneln är korrelationen mellan bruksåtgång och bergklass svag beroende på de mycket låga injekteringstryck som använts i ytnära läge. Injekteringsmetodik i figuren är enbart ABC och tunneln togs ut innan någon annan injekteringsmetodik prövades.



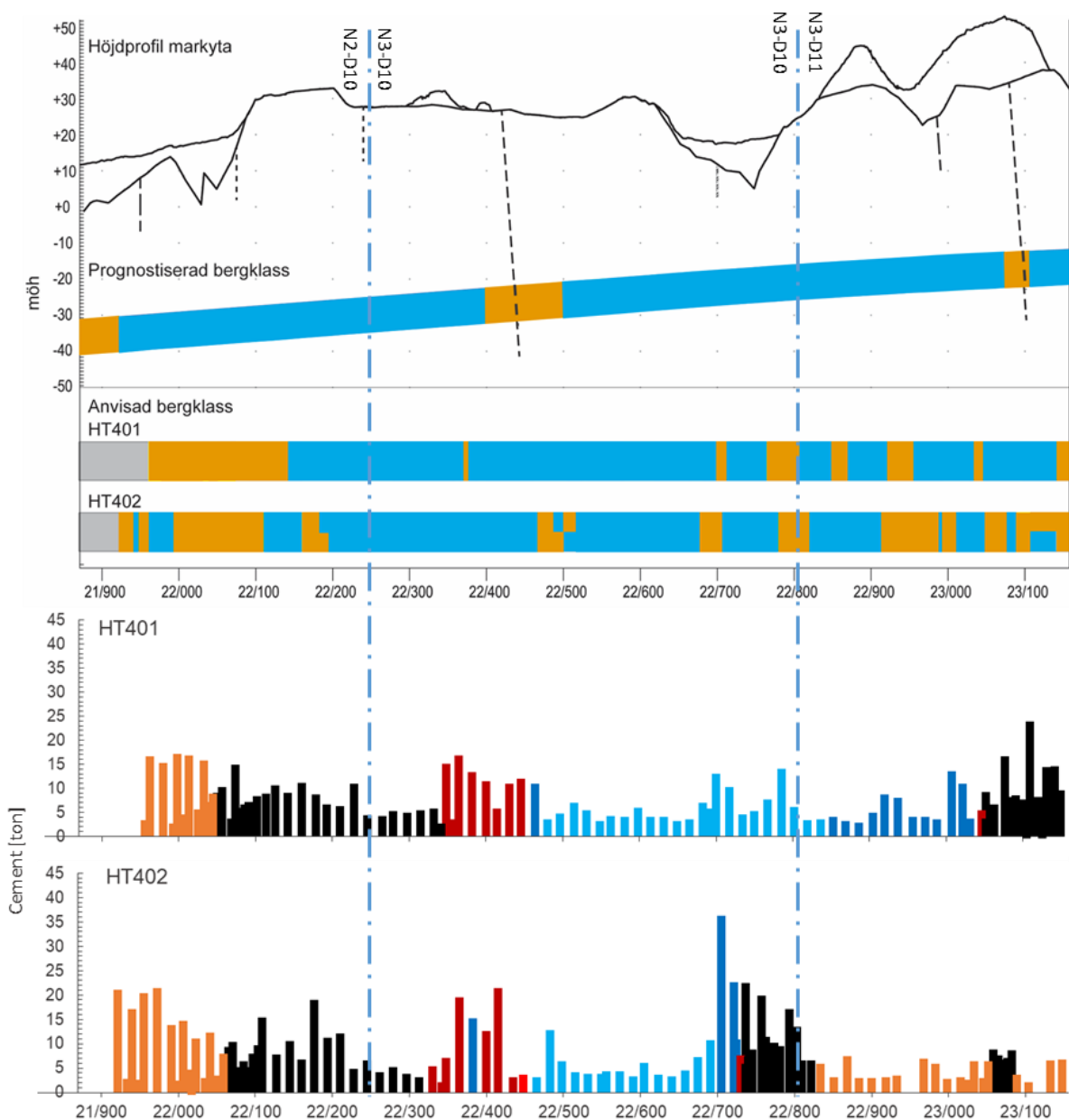
Figur 2-5. Ramptunnel 414, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning ca 0/220 – 0/700 och injekterad bruksmängd mellan 0/220 och 0/710.

Figur 2-5 visar hur injekterad bruksmängd är större i distinkta områden vid lm 0/250, 0/330, 0/460 och i ett sammanhängande område mellan 0/520 och 0/640. Dessa områden sammanfaller i huvudsak med sämre berg i RT413. Värt att notera är även områden med bättre berg där bruksåtgången generellt även varit låg. I starten på tunneln är korrelationen mellan bruksåtgång och bergklass generellt svag beroende på de mycket låga injekteringstryck som använts i ytnära läge. Injekteringsmetodiken i figuren är enbart ABC och tunneln togs ut innan någon annan injekteringsmetodik prövades.



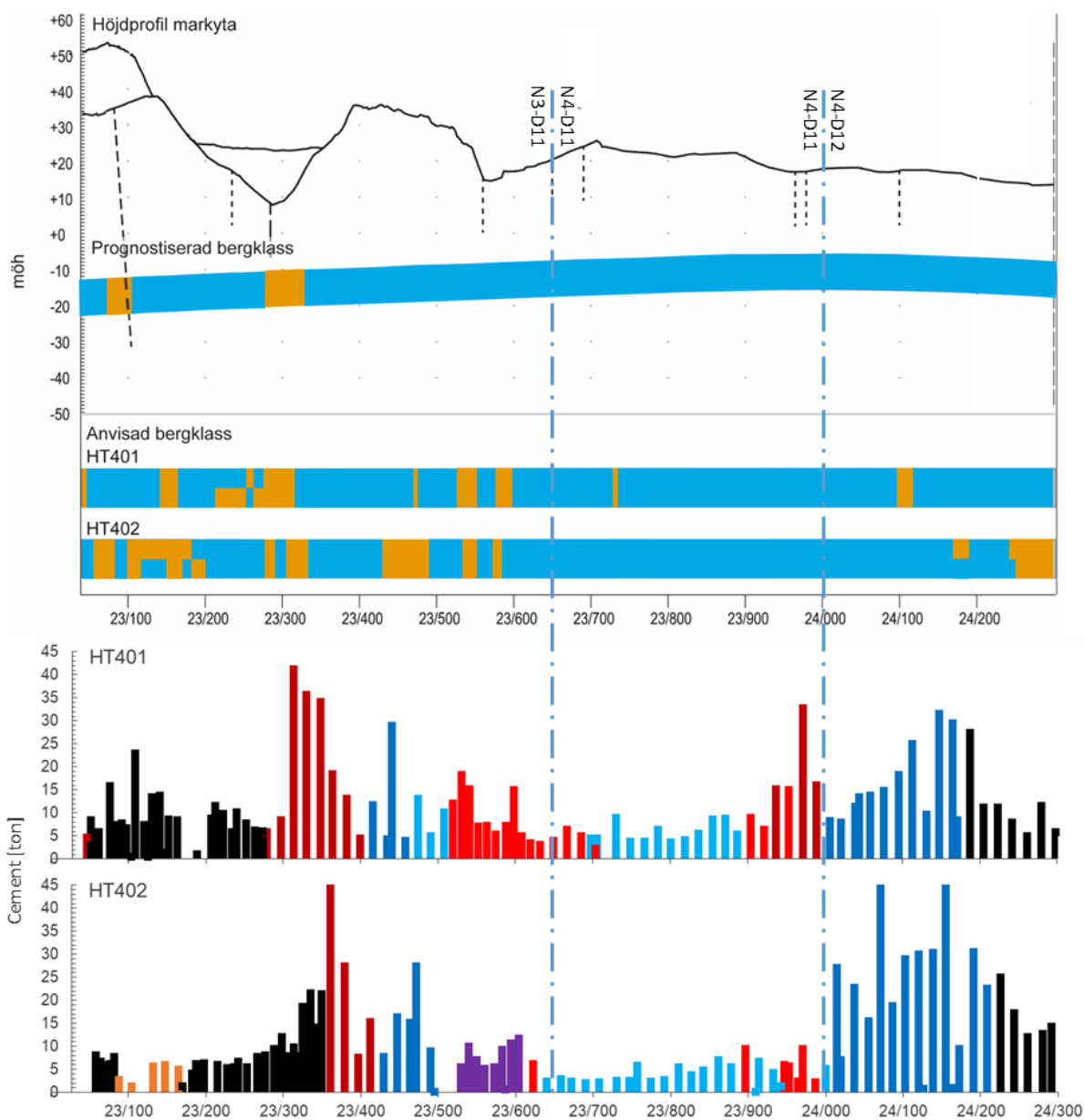
Figur 2-6. Huvudtunnlar 401 och 402, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning 21/490 – 21/840 (HT402: 21/580–21/960) och injekterad bruksmängd mellan 21/490 och 21/970. Grå områden visar ej uttagen tunnel.

Figur 2-6 visar hur injekterad bruksmängd är stor i området vid lm 21/800. Detta område sammanfaller i huvudsak med sämre berg i HT401. I området har injekteringsmetodik enligt ABC-3 och ABC-4 utförts. Tätheten på staplarna visar ur många injekteringsskärmar som utförts. I området är dessa utförda efter varje salva, tre gånger så tätt som normalt.



Figur 2-7. Huvudtunnlar 401 och 402, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning 21/930 – 23/150 och injikerad bruksmängd mellan 21/930 – 23/150. Grå områden visar ej uttagen tunnel.

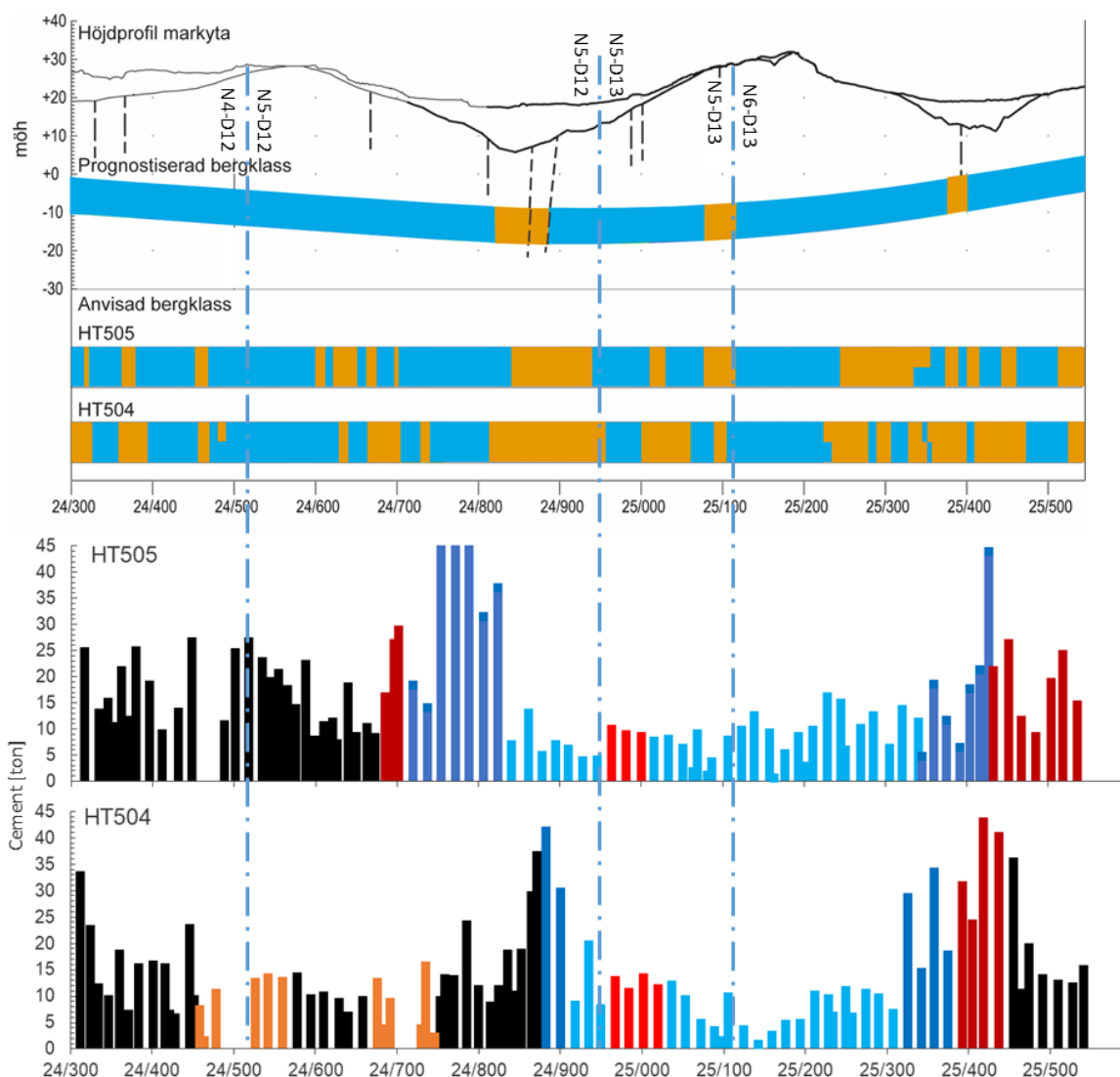
Figur 2-7 visar att områden med större injikerad bruksmängd sammanfaller i huvudsak med sämre berg i båda huvudtunnlarna 401 och 402. Injikerad bruksmängd är större i distinkta områden vid lm 22/080 till 22/240 och 22/340 till 22/470, 22/700 till 22/800, 22/900 till 22/940 och 23/000 till 23/150. Injekteringsmetodiken i figuren visar en markant skillnad i bruksåtgång vid övergång från ABC till B2-C2 och den markanta ökningen av antal injekteringsskärmar för ABC-3.



Figur 2-8. Huvudtunnlar 401 och 402, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass samt injekterad bruksmängd längs tunnelsträckningen från längdmätning ca 23/000 – 24/300.

Figur 2-8 visar hur injekterad bruksmängd i huvudtunnel 401 är större i flera sammanhängande områden mellan 23/000 och 23/250, 23/300 och 23/370, i distinkta områden vid lm 23/440, 450, 510, 530, 550, 600, 730 och sedan i huvudsak i ett sammanhängande område mellan lm 23/860 och 24/300. Bergkvaliteten i huvudtunnel 402 ser något bättre ut jämfört med HT401 vilket också korrelerar med en något lägre bruksåtgång. I huvudtunnel 402 finns sammanhängande områden mellan lm 23/050 och 23/090, 23/170 och 23/360, i distinkta områden vid lm 23/410, 23/450, 23/470 och i ett sammanhängande område mellan 23/530 och 23/600 samt mellan 24/000 och 24/300 där injekterad bruksmängd är relativt hög. I huvudsak är injekterad bruksmängd större i områden med sämre berg och även i närheten av svackor i terrängen vilka sannolikt indikerar

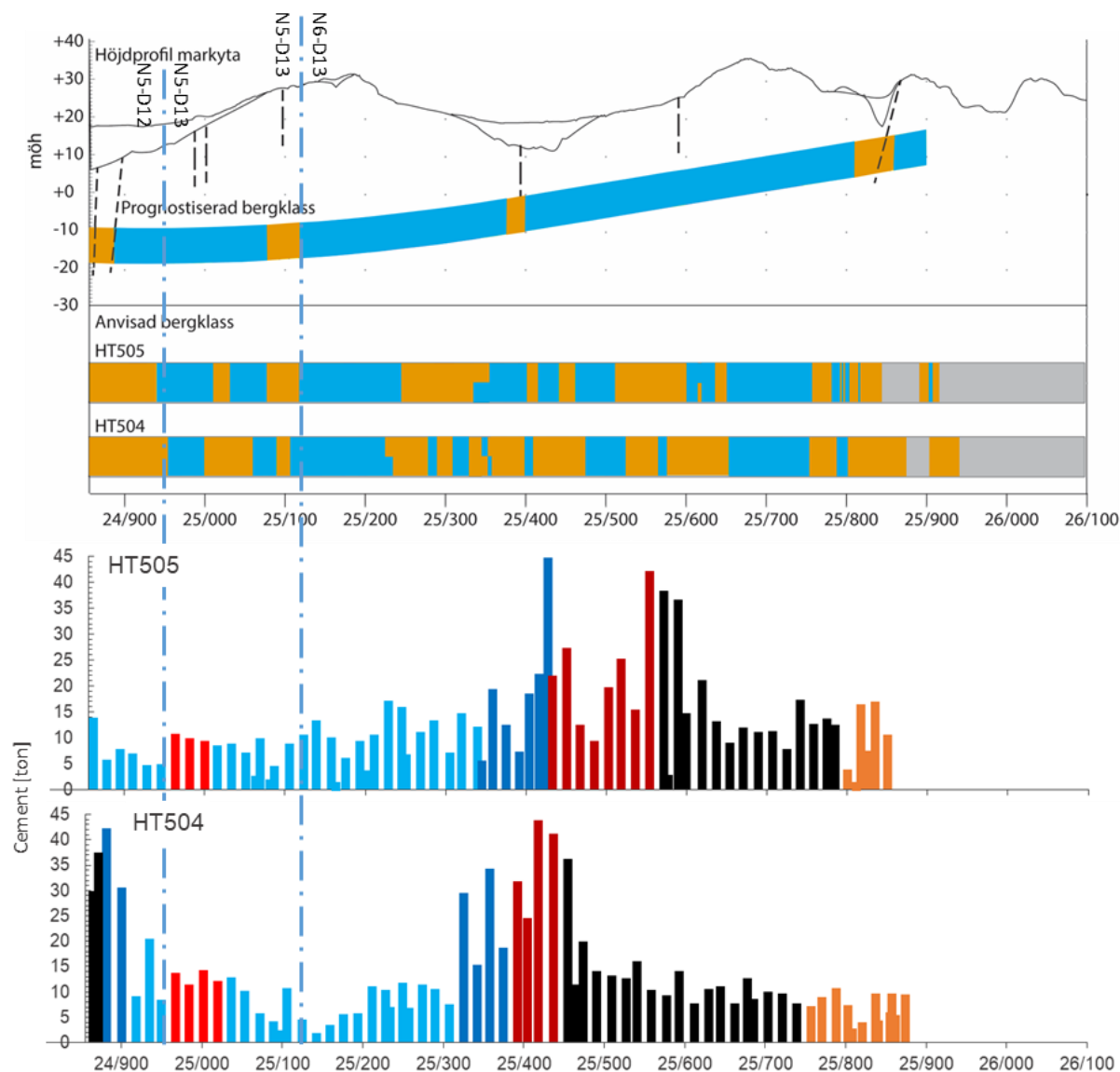
svaghetszoner. Värt att notera är området med bättre berg mellan lm 23/650 och 23/950 där bergkvaliteteten är bättre och där bruksåtgången är tydligt mindre (framförallt för huvudtunnel 402). Figuren visar också en markant skillnad i bruksåtgång vid övergång från ABC till B2-C2 och den markanta ökningen av antal injekteringsskärmar för ABC-3. I figuren visas också ett område där injekteringstekniken IK-SZ prövades (23/530 - 23/600), en förlaga till ABC-3 och ABC-4.



Figur 2-9. Huvudtunnel 505 och 504, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass och injekterad bruksmängd längs tunnelsträckningen från längdmätning 24/300 – 25/500.

Figur 2-9 visar huvudtunnlar 504 och 505. Bergkvaliteten i området skiljer sig markant från prognos vilket också bruksåtgången visar. Generellt är bruksåtgången relativt stor med några mindre områden med mindre bruksåtgång. Exempelvis mellan längdmätning 25/100 och 25/200 är bruksåtgången mindre i HT504 vilket sammanfaller med ett område med bättre berg. Ställvis är korrelationen sämre mellan dåligt berg och bruksåtgång vilket illustreras vid längdmätning 24/500 till 24/600 och 24/680 till 24/820 i huvudtunnel 505 där stora mängder bruk injekterats och bergkvaliteten bedömts bättre. Orsaken kan vara närliggande svaghetszoner som inte karterats i tunneln eller i det senare fallet

svackan i bergytan. Figuren visar också en markant skillnad i bruksåtgång vid övergång från ABC till B2-C2 och den markanta ökningen av antal injekteringsskärmar för ABC-3.



Figur 2-10. Huvudtunnel 505 och 504, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning 24/870 – 25/900 och injekterad bruksmängd mellan 24/870 - 25/880. De små områden som visas vid längdmätning ca 25/900 är utförda från ovanjordsentreprenaden. Grå områden visar ej uttagen tunnel.

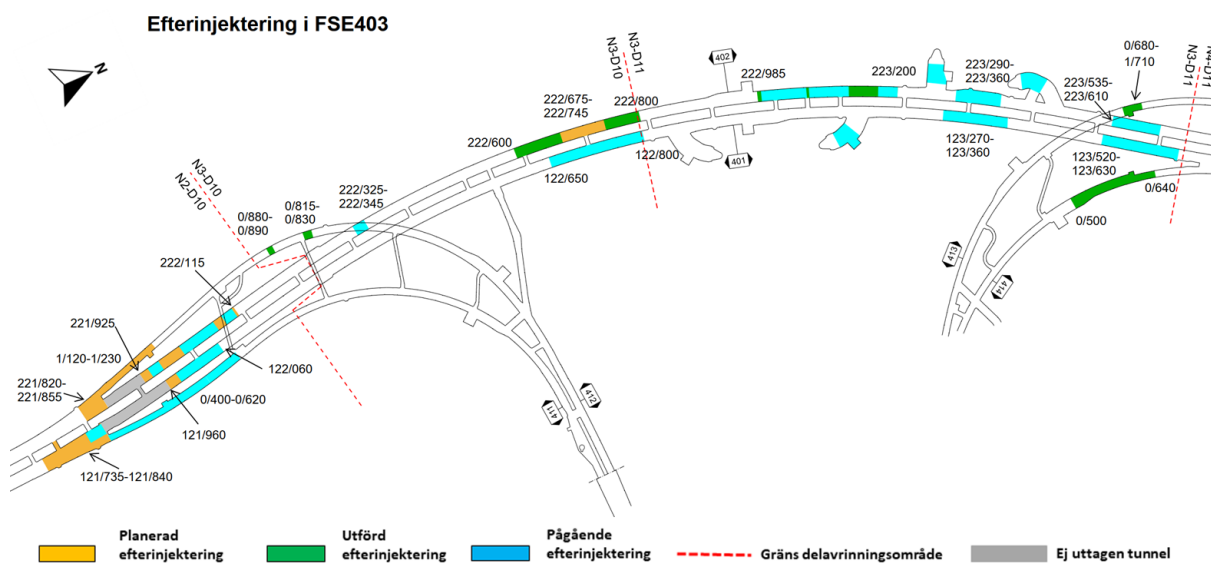
Figur 2-10 visar huvudtunnlar 504 och 505. Bergkvaliteten i området skiljer sig markant från prognos vilket också bruksåtgången visar. Generellt är bruksåtgången relativt stor med några mindre områden med mindre bruksåtgång. Särskilt i området mellan 25/300 och 25/600 är bruksåtgången mycket stor vilket sammanfaller med sämre berg. Exempelvis mellan längdmätning 25/100 och 25/200 är bruksåtgången mindre i HT504 vilket även sammanfaller med ett område med bättre berg. Figuren visar också en markant skillnad i bruksåtgång vid övergång från ABC till B2-C2 och den markanta ökningen av antal injekteringsskärmar för ABC-3.

Redovisningen illustrerar tydligt att bergmassan generellt är av sämre kvalitet jämfört med vad Trafikverket visste vid tidpunkten då miljödöm och projektering utfördes. Vartefter tunnlnarna togs ut blev det allt tydligare för Trafikverket att bergmassan kräver en helt annan omfattning av förinjektering.

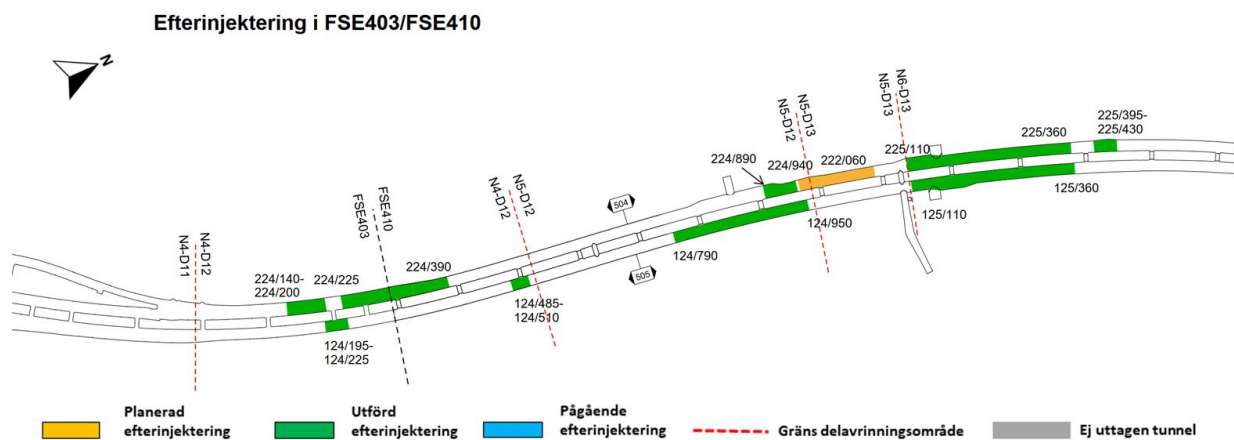
2.3 Omfattning av efterinjekteringsarbeten

Rekommenderade och utförda efterinjekteringsarbeten redovisas i Figur 2-11 och Figur 2-12. Det kommer att tillkomma områden i relativt nyligen utsprängd tunnel där behov av efterinjektering ännu inte bedömts.

I huvudsak kan områden med efterinjektering korreleras mot områden med sämre bergkvalitet enligt redovisningen i avsnitt 2.2. Omfattningen varierar därför längs med tunnelinjen där värst drabbat är området vid Lunda i FSE410 mellan längdmätning ca 24/800 och ca 25/400, se även Figur 2-9. I figurerna redovisas områden där efterinjektering utförts i grön färg och där efterinjektering planeras att utföras redovisas i gul färg.



Figur 2-11. Efterinjektering i tunnlnarna vid Johannelund, FSE403. Gråfärgade områden redovisar ej uttagen tunnel. Beteckningar D10 och D11 visar områden med specifikt inläckagekrav enligt miljödöm.



Figur 2-12. Efterinjektering i tunnarna vid Skattegårdsvägen och Lunda, FSE403 och FSE410. Gråfärgade områden redovisar ej uttagen tunnel. Beteckningar D11, D12 och D13 visar områden med specifikt inläckagekrav enligt miljödom.

3 Tätning av bergtunnlar genom förinjektering

3.1 Syfte med tätning mot inläckande grundvatten

Tätningens syfte kan beskrivas av två olika funktioner:

- Den inre tunnelmiljön (säkra funktion för tunnelns nyttjare)
- Den yttre miljön (minimera skadlig omgivningspåverkan med hänsyn till planerad grundvattenbortledning)

Den inre tunnelmiljön säkras i huvudsak i Förbifart Stockholm genom en tak- och vägginklädnad som separerar inläckande vatten från ytor nyttjade vid tunnelns drift ex körbanor och eldriftutrymmen.

För att säkra den yttre miljön och minimera risken för omgivningspåverkan tätas bergmassan under byggnationen för att förhindra eller minska inläckage av grundvatten. Det är enbart den yttre miljön som regleras i tillståndsansökan och tätningsarbeten som utreds i denna rapport.

Permanent tätning av bergmassan görs för skandinaviska förhållanden vanligen genom förinjektering och är en del av processen vid byggnation av bergtunnlar för infrastruktur, se exempelvis Trafikverkets illustrationer:

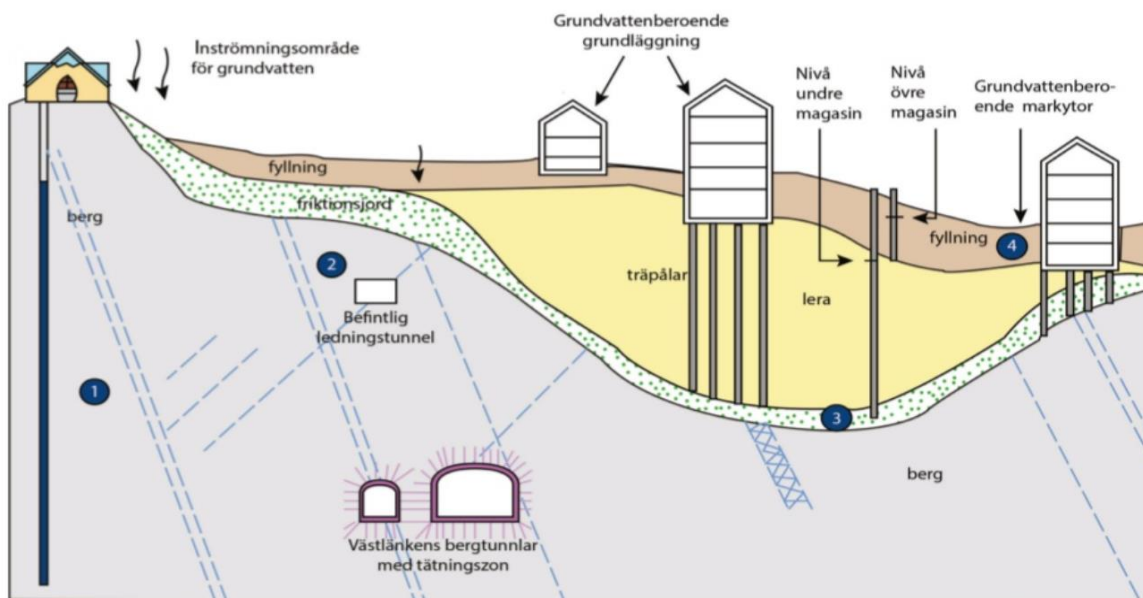
<https://www.Trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/vi-bygger-och-forbatttrar/Forbifart-stockholm/Tunnlar/Sa-bygger-vi-tunnlarna/>

3.1.1 Yttre miljö och risken för skadlig omgivningspåverkan

I samband med att en bergtunnel dimensioneras prognosticeras och bedöms konsekvenserna av en bortledning av grundvatten. Planerade tätningsåtgärder införs därefter för att minimera risken för skadlig omgivningspåverkan.

Bortledning av grundvatten medför en risk för skadlig omgivningspåverkan om inläckagen är för stora i förhållande till vad rådande hydrogeologiska förutsättningar tillåter, Figur 3-1.

Risken hanteras i första hand genom tätning av berg och i andra hand genom infiltration eller grundförstärkning etc.



Figur 3-1. Exempel på risker för omgivningspåverkan vid tunnelbygge.

Illustrationen i figuren ovan visar potentiella risker för skadlig omgivningspåverkan vid grundvattenbortledning i samband med byggnation av en bergtunnel i urban miljö:

- Vatten- och energibrunnar sinar (1)
- Befintliga tunnlar påverkas och/eller att grundvattenbortledning från både nya och befintliga tunnlar samverkar och ger upphov till ökad grundvattenbortledning (2)
- Avsänkning av grundvattentrycknivåerna (3), vilket kan få till följd att konsolideringssättningar i ovanliggande jordlager uppstår med risk för skador på befintliga byggnader, anläggningar och mark (4).

3.2 Krav på tätning mot inläckande grundvatten

3.2.1 Allmänt

Krav på tätning mot inläckande grundvatten för en bergtunnel tas fram genom att göra en hydrogeologisk utredning, geoteknisk riskbedömning och eventuellt stabilitetsutredning.

Med hänsyn till risken för skadlig omgivningspåverkan beaktas bland annat följande faktorer:

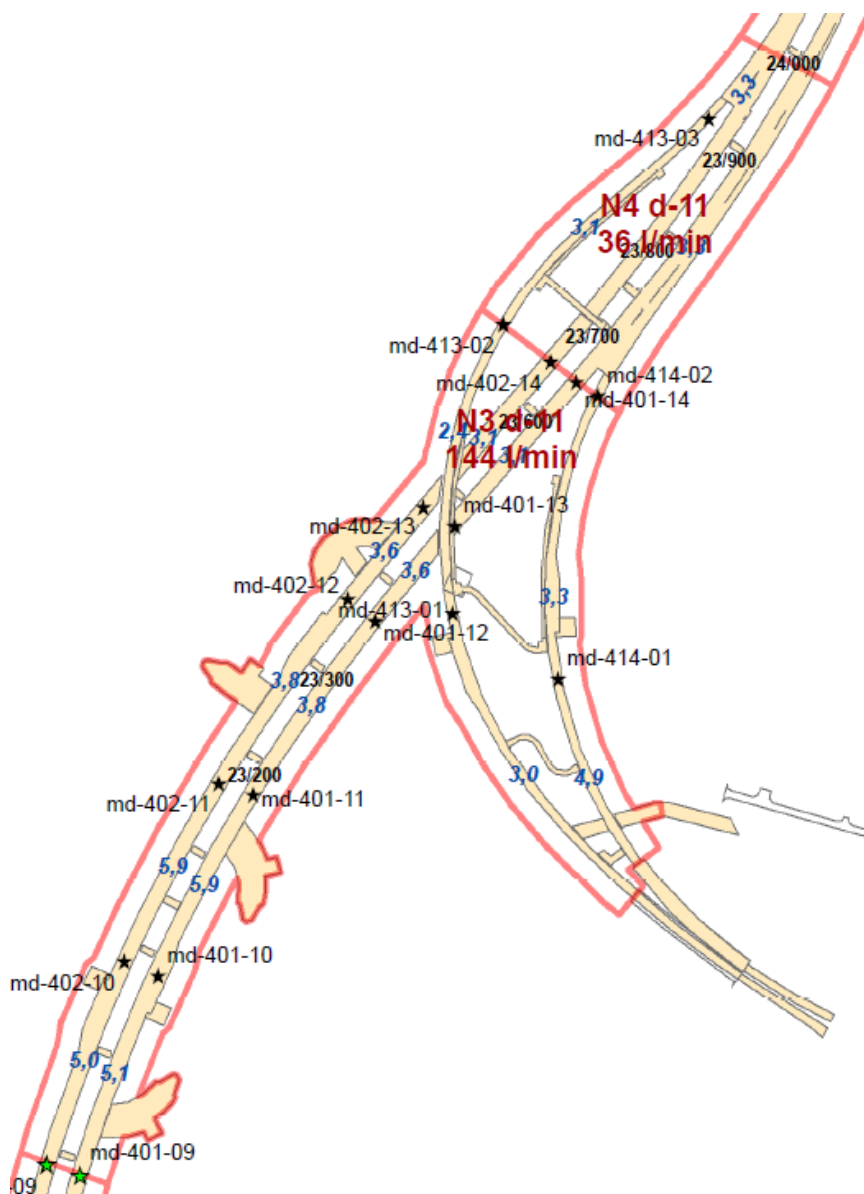
Bergmassans vattengenomsläpplighet
Jordlagerföljd och dess känslighet för grundvattensänkning/grundvattenbortledning
Grundvattenbalansen i området
Bedömning av påverkansområden vid grundvattenbortledning
Identifiering av skyddsobjekt
Riskbedömning och riskhantering med hänsyn till skyddsobjekt

Dessa faktorer sammanvägs och beskrivs i miljödomsönsökan vilket resulterar i en miljödom. Miljödomen stipulerar krav på tillåtet inläckage med hänsyn till risken för skadlig

omgivningspåverkan och kan anges som maximalt tillåtna inläckagevärden för t.ex. totalinflöde till tunneln eller inläckage per en angiven delsträcka i tunneln.

3.2.2 Förbifart Stockholm

I den nuvarande Miljödomen (M3346-11) anges villkor (begränsningsvärden) för hur mycket grundvatten som tillåts läcka in i tunneln under driftskedet. Villkoren är därefter nedbrutna till dels ett kontrollvärde uttryckt som l/min (se exempelvis Figur 3-2, för område N3-d11 gäller ett kontrollvärde på 144 l/min), dels en prognosticerad täthet uttryckt som liter/minut och 100 m tunnel (blå siffror) för respektive delavrinningsområde. Syfte med detta arbete är att kunna justera injekteringsinsatserna så att begränsningsvärdet i driftskedet kan uppfyllas. Under byggskedet jämförs uppmätta inläckage för utsprängd tunnelsträcka mot dessa villkor och eventuella åtgärder följer den överenskomna åtgärdstrappan.



Figur 3-2. Plan över huvudtunnlar 401 och 402 samt ramptunnlar 413 och 414 inom kontrakt FSE403 deluppdrag Norr med inläckagekrav.

Förenklat syftar tätning till att reducera den hydrauliska konduktiveten (vattengenomsläppligheten) i bergmassans spricksystem genom injektering med cementbaserade injekteringsmedel, så att villkoren i Miljödomen innehålls.

3.3 Tätande huvudsysteem (Tätningåtgärder i en bergtunnel)

3.3.1 Allmänt

Det "tätande huvudsysteem" eller det "bärande huvudsysteem med avseende på tätning" omfattar två delar. Dels den initiala bergmassans täthet, dels den förbättring av bergmassans täthet som anses uppnås genom att dess vattenförande spricksystem injekteras.

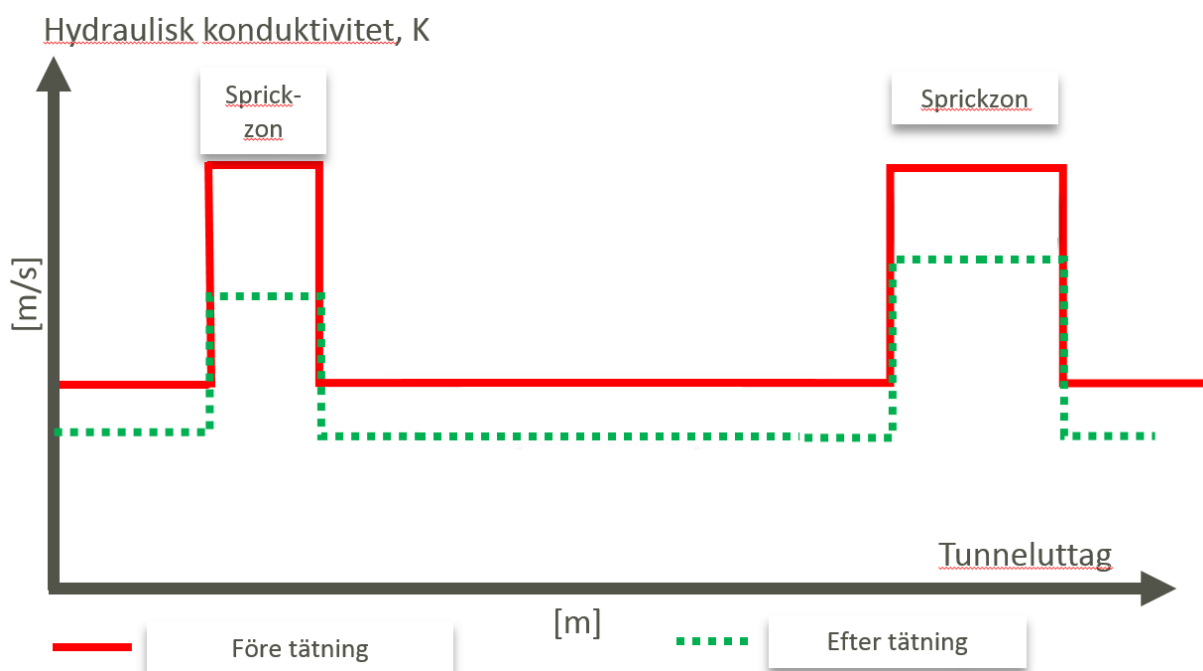
Tunnelns slutliga täthet består av en kombination av den initiala bergmassans täthet och resultatet

från utförd injektering. Analogt med krav för bergförstärkning erfordras ibland konstruktioner som kan verka oberoende av bergmassans bärighet och täthet exempelvis i form av en tät betonginklädnad (lining). En tät lining för att säkerställa det "tätande huvudsystelet" bedömdes inte nödvändigt i Förbifart Stockholm, utan systemkraven avsågs kunna hanteras genom förinjektering.

Bedömningen av bergmassans initiala täthet vilket grundar sig på dess vattengenomsläpplighet i spricksystemen är mycket komplex och prognosen är betingad med stora osäkerheter. Men bedömningen utgör en central del i utformningen av den tekniska lösningen av det tätande huvudsystelet i form av injektering.

Den resulterande tätheten är således en funktion av bergmassans initiala täthet och hur denna varierar i omfattning och genomsläpplighet samt hur väl förinjekteringen klarar av att täta spricksystemen.

Beroendet mellan bergmassans initiala täthet och utfallet av injektering i förhållande till resulterande täthet illustreras i Figur 3-3.



Figur 3-3. Principiell omfattning av genomsläppligt berg och bedömt resulterande täthet efter förinjektering.

Möjligheten att uppnå erforderlig täthet kommer alltså att bero på relationen mellan omfattning av initialt mer vattengenomsläppligt bergmassa och resultatet av injekteringsåtgärderna.

I illustrationen, Figur 3-3, visas att så länge förekomsten av initialt mer genomsläppligt bergmassa (sprickzoner) är relativt liten i förhållande till den mer tät bergmassa kan injekteringsåtgärderna totalt sett utformas mindre omfattande. Dvs ju tätare bergmassa initialt desto mindre behov av kompletterande tätning genom injektering under förutsättning att omfattningen av mycket vattenförande sprickzoner är begränsade.

3.3.2 Utformning av ett tätande huvudsystem

Utformningen av det tätande huvudsystemet baseras på en identifiering och prognostisering av bergmassans initiala vattengenomsläpplighet. Denna utförs efter en tolkning av utförda förundersökningar vilket omfattar identifiering av bergytans läge, mätning av bergmassans genomsläpplighet i utförda kärnborrhål och brunnar samt en statistisk behandling av mätresultat.

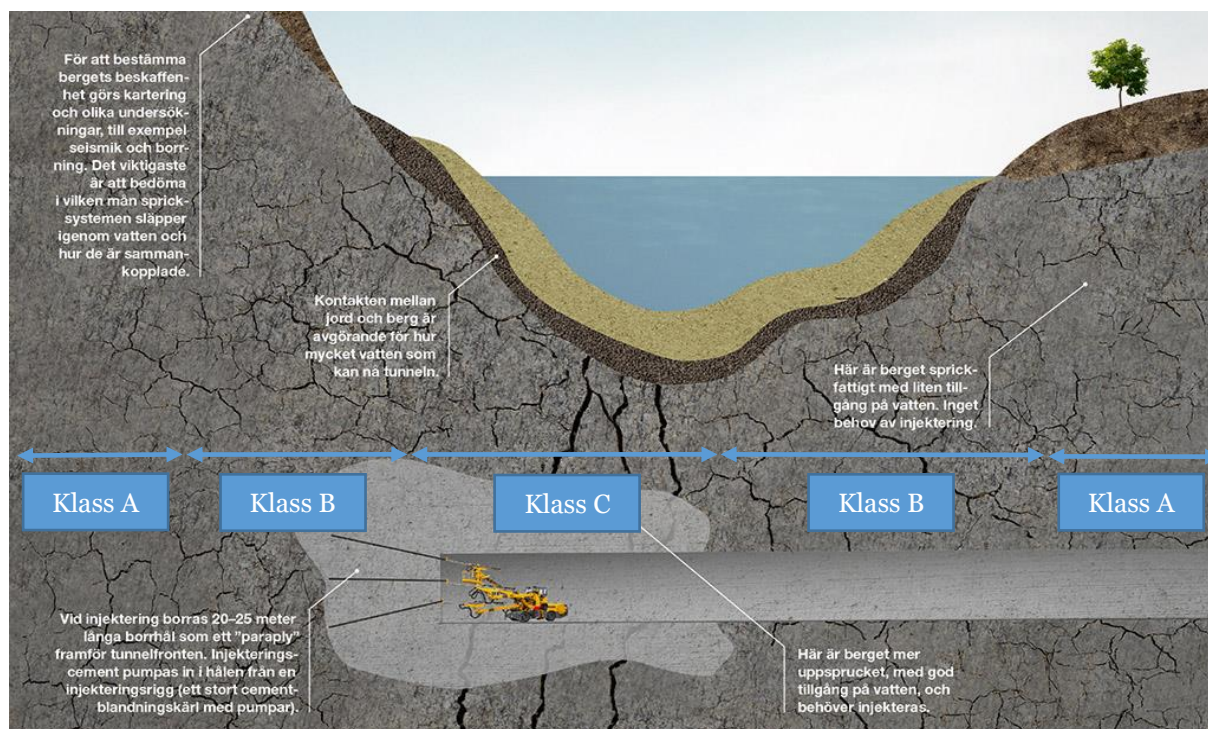
Målsättningen med förundersökningarna är att säkerställa ett tillräckligt underlag för utformning av tekniska lösningar avseende tätning av bergmassan med hänsyn till risken för skadlig omgivningspåverkan.

Utifrån dessa förutsättningar bedömdes att en injekteringsmetodik baserad på typlösningar kunde tillämpas i utformningen av det tätande huvudsystemet.

Typlösningarna utformades i projekteringskedet som injekteringsklasserna A, B och C. Dessa klasser anses motsvara ett sammanlagt behov av tätning för tre olika typer av initialt vattengenomsläpplig bergmassa enligt följande:

- Injekteringsklass A motsvarar en sprickfattig bergmassa med låg genomsläpplighet, dvs hög initial täthet och låg risk för omgivningspåverkan.
- Injekteringsklass B motsvarar en medel-sprickrik ("normal") bergmassa med medelgenomsläpplighet och risk för omgivningspåverkan.
- Injekteringsklass C motsvarar en sprickrik bergmassa med hög genomsläpplighet, dvs låg initial täthet och med stor möjlig omgivningspåverkan.

Indelningen illustreras i Figur 3-4.



Figur 3-4. Indelning i injekteringsklasser A, B och C efter bedömd initial genomsläpplighet i bergmassan.

För respektive prognosticerad bergklass beräknas inläckaget baserat på bedömd vattengenomsläpplighet och bedömt injekteringsresultat efter ansatt injekteringsklass. Inläckaget summeras över delområdet och jämförs med tillåtet värde enligt miljödom, eventuellt justeras ansatt injekteringsklass tills beräknat värde överensstämmer med tillåtet värde enligt miljödom.

Vid bedömning av tätningsresultatet utformas den tekniska lösningen för injekteringsklassen genom att justera ett antal parametrar:

- 1) Inträngningsförmåga (styr vilken minsta hydrauliska sprickvidd som kan tätas)
 - a) Cementets partikelstorlek (krav på möjlighet att tätas minsta sprickvidd)
 - b) Flytegenskaper (ett injekteringsmedel med högre vattencementtal har en bättre inträngningsförmåga och snabbare inträngning)
- 2) Spridning av injekteringsmedlet i bergmassans spricksystem (inträngningslängd)
 - a) Injekteringstid (längre injekteringstid ger större spridning)
 - b) Injekteringstryck (högre injekteringstryck ger större spridning)
 - c) Flytegenskaper (bättre flytegenskaper ger både större och snabbare spridning)
 - d) Radiell spridning
 - e) Svårighetsgrad att uppnå önskvärd täthet
- 3) Injekteringshål (skärmgeometri)
 - a) Hålspetsavstånd (inklusive största tillåtna centrumavstånd mellan injekteringshålen vid borrhålsavvikelse)
 - b) Hålstick (injekteringshålens största vertikala avstånd i botten från teoretisk tunnelkontur)
 - c) Överlapp

Här förutsätts att både en bättre inträngningsförmåga och en större spridning ger ett bättre tätningsresultat. Vidare förutsätts att tätare hållavstånd ger mindre inläckage och att större stick ger längre injekterad zon och därmed mindre inläckage.

Beträffande utförandet av injekteringen används erfarenheter från tidigare relevanta projekt för att justera ovanstående parametrar till vad som praktiskt är möjligt med hänsyn till utrustning och injekteringsförfarande. Det är även av stor vikt att beakta kända osäkerheter som begränsar tätningsresultatet som exempelvis blandningsförmåga (möjlighet att separera/dispergera cementpartiklarna), härdningstid (tid innan aggregering av cementpartiklarna startar), samband mellan injekteringshål, ytläckage och avbrott i injekteringen samt icke konstanta flytegenskaper. Möjligheten att i samband med blandning separera/dispergera cementpartiklarna påverkar valet av cementtyp. Önskvärt är att använda ett så finmalt cement som möjligt för att optimera inträngningsförmågan. Svensk forskning har dock visat att traditionella mycket finmalda typer av cement inte är praktiskt möjliga att använda då konventionella blandare erfarenhetsmässigt inte klarar av att dispergera (separera) cementpartiklarna tillräckligt effektivt. Se vidare avsnitt 3.5 nedan.

Svårighetsgraden att uppnå en önskvärd täthet beror på dels vilken tätningseffekt som krävs vilken beror av bergmassans initiala genomsläpplighet och dels vilken resulterande täthet (hydraulisk konduktivitet) på bergmassan som krävs efter injektering. En högre svårighetsgrad är förknippat med att både fler sprickor och mindre sprickvidder behöver tätas. Svårigheten att täta beror också på genomförandet, den tekniska begränsningen i material och utrustning.

Tabell 3-1. Bedömning av svårighetgrad vid injektering relativt tätningseffekt och erforderlig täthet (hydraulisk konduktivitet).

Erforderlig tätningsseffekt/ hydraulisk konduktivitet	<90%	90 - 99%	>99%
$>10^{-7}$ m/s	Okomplicerad injektering	Medelsvår injektering	Svår injektering
$10^{-7} - 10^{-8}$ m/s	Medelsvår injektering	Svår injektering	Mycket svår injektering
$<10^{-8}$ m/s	Svår injektering	Mycket svår injektering	Mycket svår injektering

3.4 Tätningsteknik

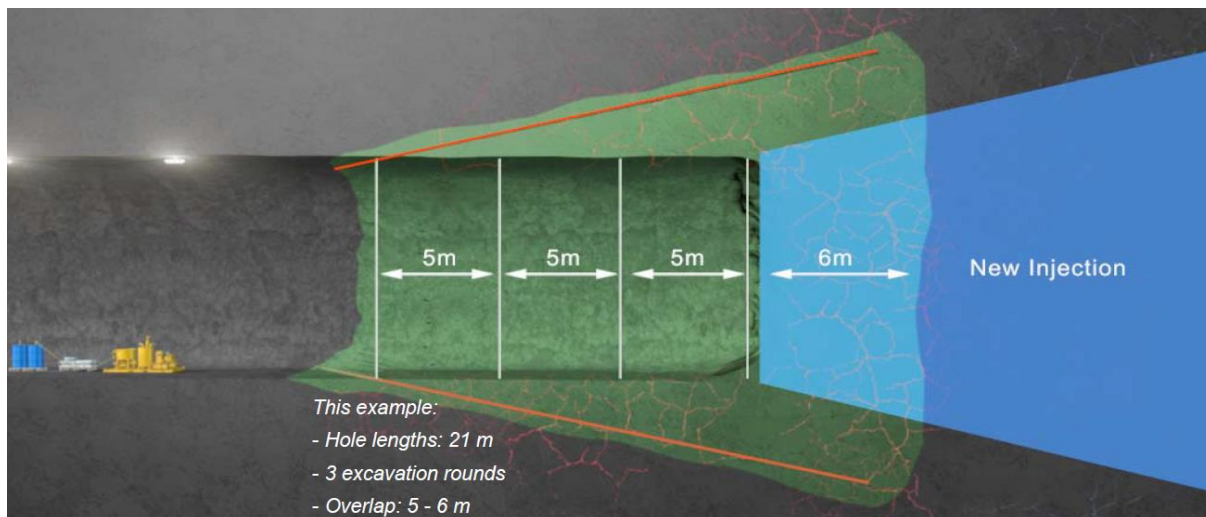
3.4.1 Allmänt

3.4.2 Injekteringsprocessen

Huvudsakligen utförs förinjekteringen med cementbaserade injekteringsmedel, dvs en cementsuspension (cementpartiklar och vatten) + eventuella tillsatsmedel. Injekteringsmedlet pumpas under tryck in i injekteringshål framför tunnelfronten och sprids i bergmassans spricksystem.

Utförandesequensen för en förinjektering är att först utföra en injekteringskärm och därefter schaktas tunneln i form av salvuttag t ex 5 m per salva, till dess att en ny injekteringskärm behöver utföras.

Hur många salvor som kan utföras mellan varje injekteringsskärm styrs huvudsakligen av krav på skärmlängd och krav på överlapp. I Figur 3-5 kan max. tre salvor om 5 m tas ut mellan respektive injekteringsskärm, eftersom skärmlängden är 21 m och med krav på överlapp 6 m.



Figur 3-5. Illustration av en injekteringsskärm (grön) och salvlängder samt krav på överlapp innan ny injekteringsskärm (blå) ska utföras.

Varje injekteringsskärm inbegriper borrning av injekteringshål enligt stipulerade krav på skärmgeometri genom att ange längd, hålspetsavstånd och hålstick.

I Figur 3-6 visas en typisk maskinutrustning för borrning av injekteringshål och i Figur 3-7 visas en typisk ansättning av injekteringshål för en injekteringsskärm.



Figur 3-6. Borrrigg uppställd för att påbörja borrning av injekteringshål.



Figur 3-7. Ansättning av injekteringshål i en storblockig bergmassa.

Efter att injekteringshålen är borrade och rengjorda kan hålen injekteras antingen som enkelhål eller som multihål, dvs en injekteringspump/hål respektive en injekteringspump/2-3 hål.

3.5 Cementbaserade injekteringsmedels inträngningsförmåga

3.5.1 Allmänt

Cementbaserade injekteringsmedel egenskaper skiljer sig från grundvattnets egenskaper. Detta får till följd att injekteringsmedlet och vattnet beter sig olika i bergmassans spricksystem.

I ett visst spricksystem beror spridningen (inträngningen) av injekteringsmedlet på dess flytegenskaper och valt injekteringsförfarande, såsom injekteringstryck och stoppkriterier (när ett injekteringshål ska avslutas). För cementbaserade injekteringsmedel är bland annat dess flyt- och inträngningsegenskaper av största betydelse och i jämförelse med vatten är de mer trögflytande (påverkar spridningen) och har en begränsad inträngningsförmåga (vilka sprickvidder som är möjliga att täta). De är även betingade med separationsbenägna och tidsberoende egenskaper (ej konstanta flyt- och inträngningsegenskaper) pga. hydratiseringsprocessen (härdning) som gör att injekteringsmedlet övergår från flytande form till fast form.

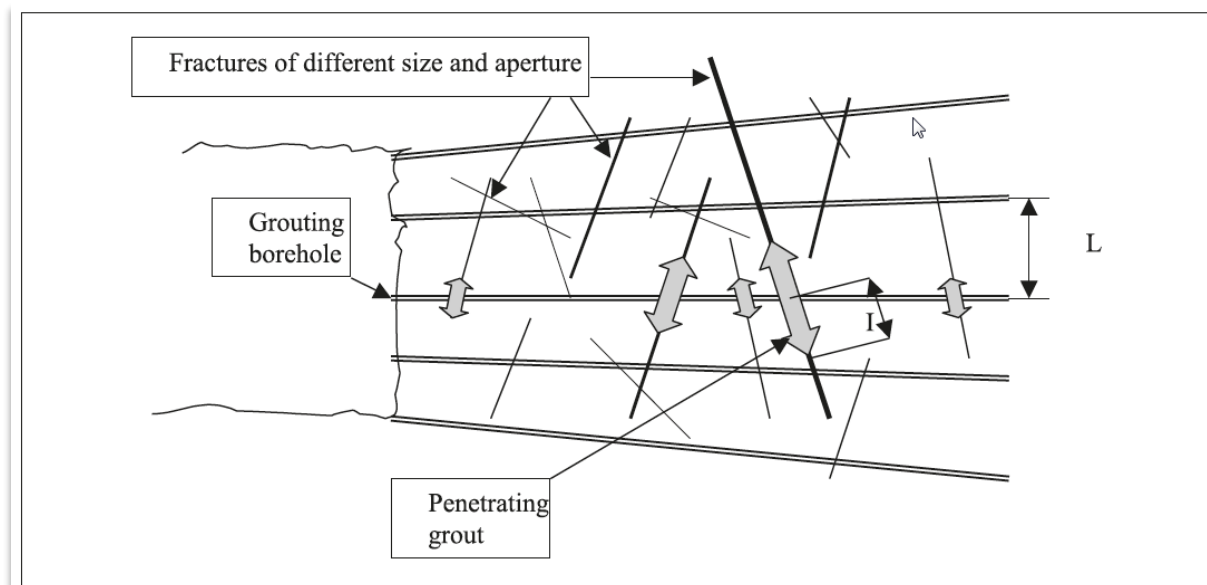
Injekteringsmedlets egenskaper styrs huvudsakligen av val av cement och eventuella tillsatsmedel samt blandningsförhållande uttryckt som vattencemental (vct). Ju högre vct desto mer lättflytande och och ju lägre vct desto mer trögflytande. Ett lättflytande injekteringsmedel har i regel även en bättre inträngningsförmåga och snabbare spridning.

Cement för tätning av hårt kristallint berg utgörs vanligen av injekteringscement ($d_{95} = 30 \mu\text{m}$) eller mikrocement ($d_{95} \leq 20 \mu\text{m}$), dvs ett mer finmalet cement jämfört med cement som används för tillverkning av betong ($d_{95} \approx 100 \mu\text{m}$). Värdet d_{95} anger för vilken maskvidd 95 % av alla partiklar passerar i samband med en siktning. Ju lägre d_{95} värdet är desto mer finmalet cement.

För att uppnå en tillräcklig tätningseffekt runt en bergtunnel krävs att injekteringsmedlet uppfyller följande:

- Tränger in i vattenförande sprickor.
- Sprider sig vidare i spricksystemet.
- Fyller ut/tätar sprickorna väl.

Detta förutsätter således att injekteringsmedlet kan tränga in i de vattenförande sprickorna. Tätningseffekten är till stor del beroende av injekteringsmedlets inträngningsförmåga i förhållande till de hydrauliska sprickvidder (del av sprickorna som för vatten) som påträffas av respektive injekteringshål. I det fall inträngning i sprickorna är möjlig kan injekteringsmedlet sprida sig vidare in i spricksystemet för att tätta bergmassan, Figur 3-8. I samband med spridningen är injekteringsmedlets flytegenskaper (reologi) och val av injekteringstryck viktiga faktorer.



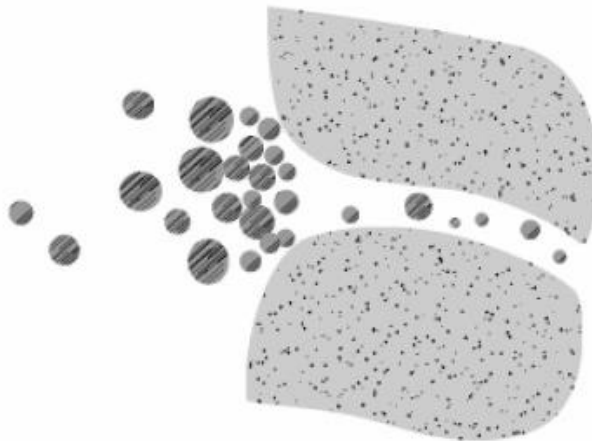
Figur 3-8 Illustration avseende hur injekteringshål teoretiskt korsar spricksystemen i bergmassan, L är avståndet mellan närliggande injekteringshål (Rock Grouting, Stille, 2015).

Dock finns en möjlighet att borrhålet missar den öppna delen av sprickan. Då kommer inte just den sprickan att injekteras med det aktuella borrhålet utan måste tätas av angränsande borrhål. Den osäkerheten ökar i komplicerade geologiska förhållanden (som exempelvis dåligt berg) vilket ökar behovet av flera injekteringsomgångar/injekteringshål och försvarar bedömningen av injekteringsresultatet.

Cementbaserade injekteringsmedel utgör en suspension, vilket är en kolloidal blandning som består av fasta cementpartiklar utblandade (dispergerade) i vätska, som efter härdning övergår till fast form.

En cementsuspension är en instabil kolloid, dvs den aggregerar (klumpar ihop sig), vilket även kallas för flockulering. För de hydrauliska sprickvidder där flockulering uppstår bildas en plugg vilket leder till att inträngningen successivt avstannar. Pluggen kan antingen förändra injekteringsmedlets flödesväg eller orsaka att inträngningen helt upphör, Figur 3-9.

Därutöver begränsas inträngningsförmågan även av partiklarnas fysiska storlek och dess form.



Figur 3-9. Illustration av pluggbildning vid inträngning i en spricka (Cementinjektering i hårt berg, Eriksson och Stille, 2005)

Ett injekteringsmedels förmåga att tränga in i bergmassans spricksystem är därmed avgörande för vilken tätningseffekt som kan uppnås, men pga dess begränsningar i inträngningsförmåga enligt ovan kommer vissa vattenförande sprickor eller delar av spricksystemet inte kunna tätas.

Relationen mellan partikelstorleken i injekteringsmedlet och den hydrauliska sprickvidden är av avgörande betydelse för att kunna bedöma inträngningsförmågan. En tumregel är att endast hydrauliska sprickvidder som är 2-3 gånger partikelstorlek kan penetreras. Men genom mångårig forskning i Sverige har det visats att det som styr inträngningsförmågan/spridningen är klart mer komplicerat än så och styrs av flera faktorer, såsom t ex osäkerheter avseende bergmassans spricksystem, sprickgeometrier och sprickfyllnadsmaterial, Figur 3-10. Figuren illustrerar hur komplext ett spricksystem kan vara och där till exempel lerfyllnad i sprickor kan begränsa inträngningsförmågan och styra spridningen till kanaler.

De bergtekniska osäkerheterna är således inte försumbara, vilket gör det svårt och komplext att i förväg förutsäga hur väl bergmassan går att tätas samt vilken tätningseffekt som kommer att uppnås.

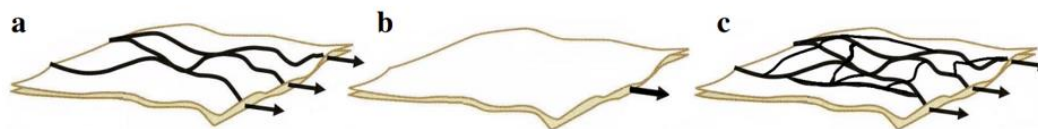
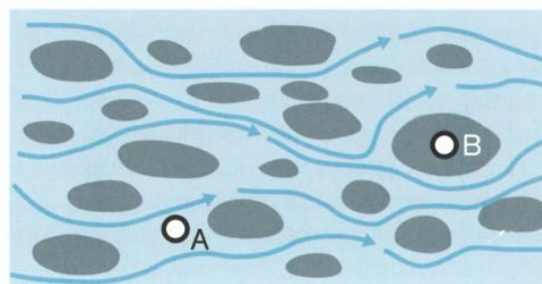


Figure 4.2 a: Fracture with channelled flow. b: Fracture where water spread radially. c: Fracture with enough channels to enable a radial spread of water. Modified from Gustafson (2009).

Figure 8.14. Fracture plane with contact surfaces (dark) and open parts where the groundwater flows. A borehole can hit the fracture in an open part, A, or low-permeable part, B.



RISK:
Part B, should be considered when encountering clay filled fractures.

Source: Hydrogeology for Rock Engineers, Gustafson (2012).

Figur 3-10. Sprickplanens betydelse för inträngning och inträngningslängd, Hydrogeology for rock engineers, Gustafson (2012).

3.5.2 Reologiska egenskaper på injekteringsmedel

Reologi är läran om materialets deformations- och flytegenskaper. Man mäter storheter som exempelvis viskositet, elasticitet och flytgränser. Viskositet beskriver materialets flytbeteende och elasticitet beskriver materialets struktur. Material som uppvisar både viskösa och elastiska egenskaper benämns viskoelastiska och de reologiska egenskaperna styrs av strukturen hos ett material.

För att beskriva de reologiska egenskaperna för ett cementbaserat injekteringsmedel används Bingham-modellen. Den beskriver injekteringsmedlets reologi genom begreppen flytgräns och viskositet.

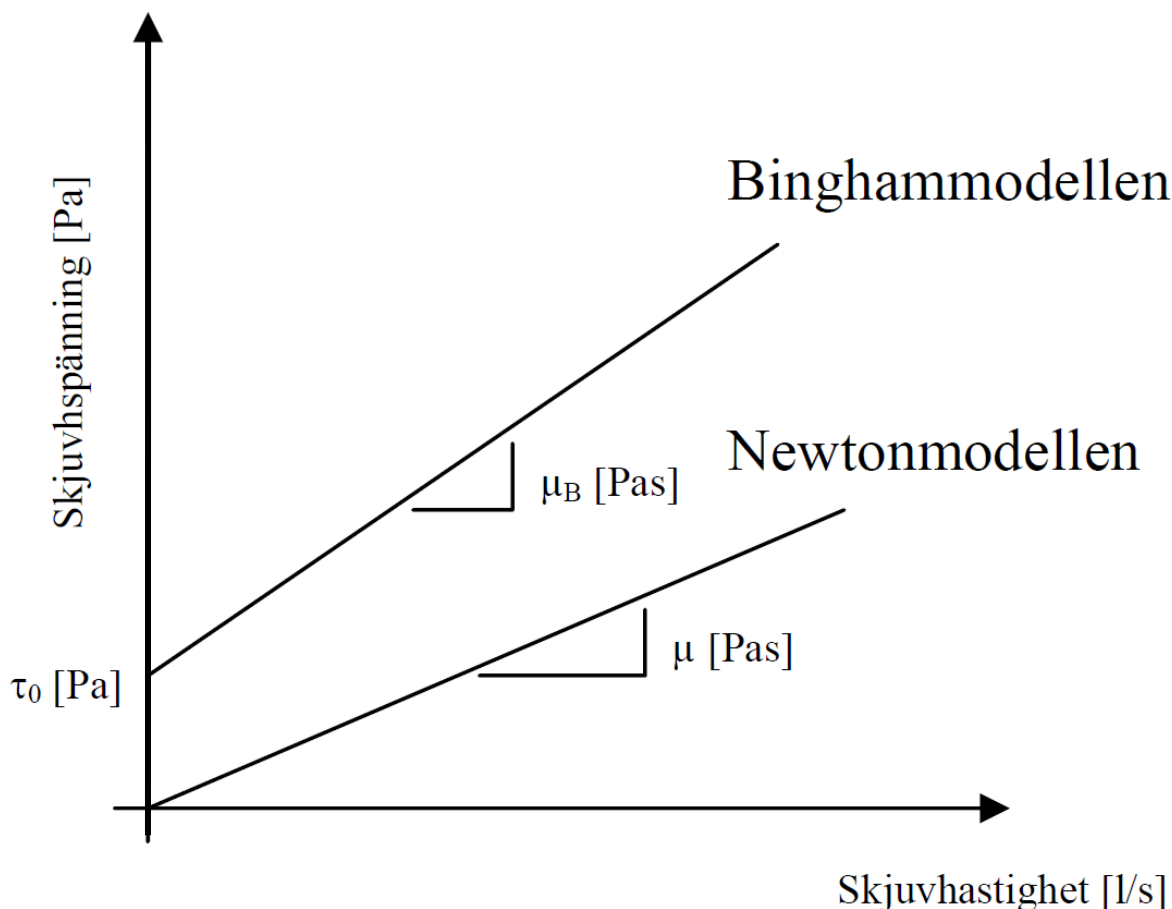
Enkelt sätt kan flytgräns och viskositet beskrivas på följande vis:

- Flytgränsen beskriver vilken tryckgradient som måste överskridas för att få injekteringsmedlet att börja flöda samt dess maximala inträngningsförmåga vid ett givet injekteringstryck och för en given hydraulisk sprickvidd.

Observera att flytgränsen är noll för vatten.

- Viskositeten beskriver hur fort injekteringsmedlet tränger in i en given hydraulisk sprickvidd för ett givet injekteringstryck. Viskositeten styr vilken injekteringstid som krävs för att teoretisk uppnå en önskvärd spridning i spricksystemet.

Figur 3-11 nedan beskriver principiella skillnader i flytegenskaper mellan en Bingham-modell som beskriver ett cementbaserat injekteringsmedel och en Newton-modellen som beskriver exempelvis vatten.



Figur 3-11. Principiella reologiska egenskaper för en Binghamvätska och en Newtonskvätska.

Reologin hos ett cementbaserat injekteringsmedel kan mätas med direkta eller indirekta metoder. För direkt mätning används exempelvis en rheometer där injekteringsmedlets skjuvspanning mäts vid olika skjuvgradients. Metoden kräver en erfaren och utbildad operatör för att utföra och utvärdera testerna. En indirekt metod utgörs av exempelvis marshkonen som är en standardiserad mätning som visar en kombination av flytgräns och viskositet.

3.5.3 Inträngningsförmåga

Inträngningsförmågan kan mätas/bedömas med flera olika metoder. Den metod som valts för Förbifart Stockholm utgörs av filterpress-metoden (förprovning) och filterpump (fortlöpande provning), Figur 3-12.

Mätningen utförs genom att de volymer som passerar filter med olika maskvidder mäts. Mätningarna börjar med ett filter med en liten maskvidd t ex $45 \mu\text{m}$ och efter detta mäts med filter med allt större maskvidd till dess att dess maximala volym (100 %) kan passera. För filterpress och filterpump är den maximala volymen 1000 ml respektive 300 ml.

De två parametrar som därefter används för utvärdering av inträngningsförmågan utgörs av b_{\min} och b_{krit} och står för följande och beskriver det fundamentala beteende avseende filtreringsprocessen (flockulering) gentemot inträngningsförmågan, se även Figur 3-13. Med sprickvidd avses injekteringsmedlets inträngningsförmåga genom en spalt, en teoretisk spricköppning.

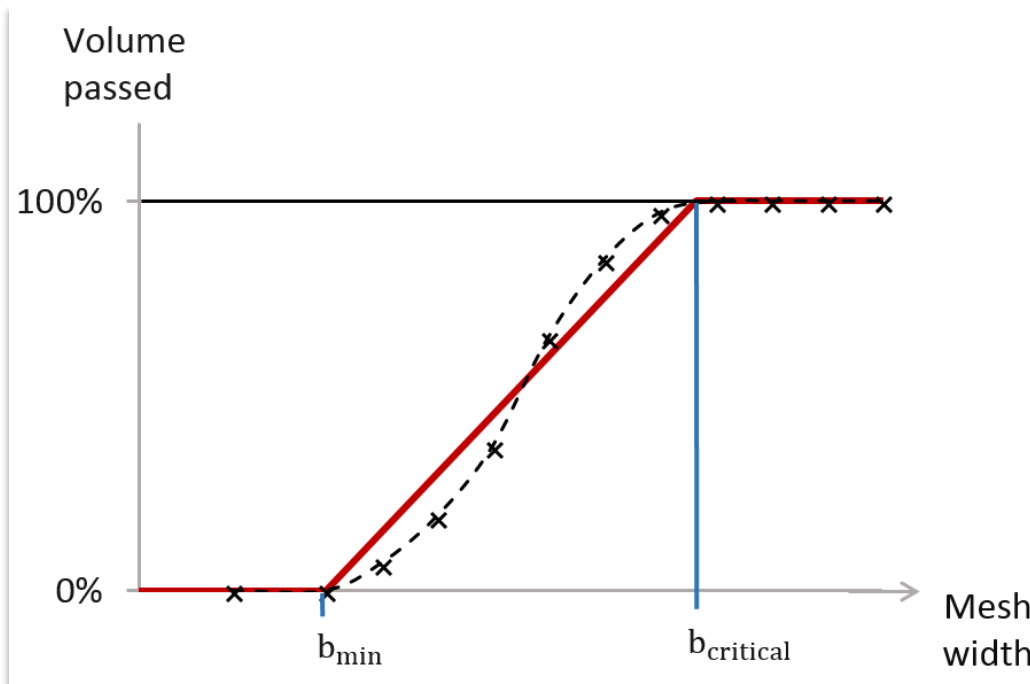
- Passerad volym $\leq b_{\min}$ innebär en sprickvidd liten nog för att en plugg bildats och inget injekteringsmedel kan penetrera sprickan.
- Passerad volym $\geq b_{\text{krit}}$ innebär en sprickvidd stor nog för att ingen plugg bildas och 100 % av injekteringsmedlet penetrerar sprickan och kan flöda fritt.
- För sprickvidder mellan b_{\min} och b_{krit} uppstår gradvis pluggbildning med viss penetrering av sprickorna till dess att en fullt utvecklad plugg utbildats.



Figur 3-12. Provnings av inträngningsförmåga med filterpress och filterpump.

Den dimensionerande hydrauliska sprickvidden b_{dim} definieras som den minsta sprickvidd som behöver tätas i samband med en förinjektering. Blandningens b_{krit} ska alltså vara mindre än eller lika med b_{dim} .

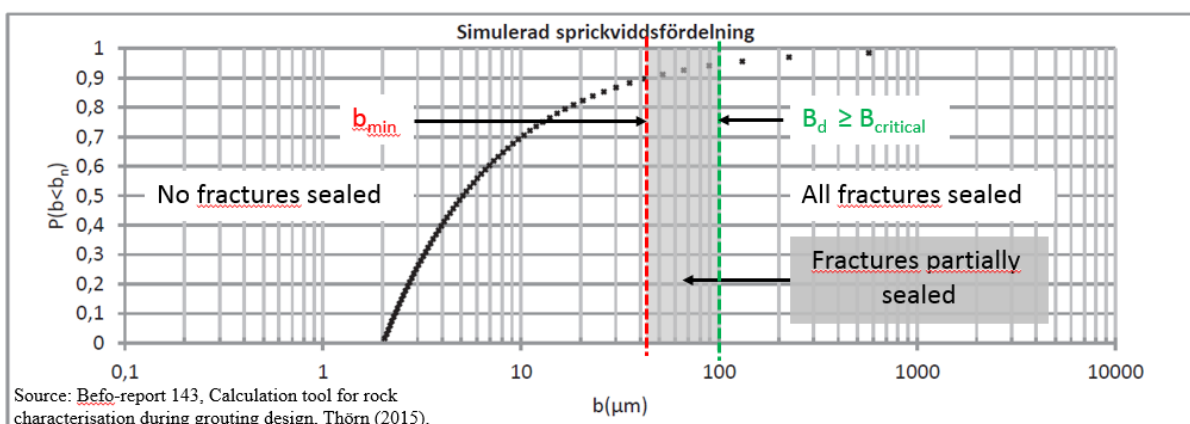
I vissa sammanhang definieras en största sprickvidd b_{max} utifrån de hydrogeologiska förutsättningarna. Denna beror alltså på bergmassans egenskaper och kan användas i dimensioneringen för att minimera risk för att cementbruk tränger upp på markytan eller att angränsande anläggningar och miljö påverkas av injekteringen.



Figur 3-13. Definition av begreppen $b_{kritisk}$ ($b_{critical}$) och b_{min} vid utvärdering av inträngningsförmåga, b står för sprickvidd.

Cementbaserade injekteringsmedel har en begränsning i vilka hydrauliska sprickvidder som är möjliga att tätas. Beroende på vilken sprickviddsfördelning som råder i bergmassan förblir olika många sprickor otätade, vilket leder till en resterande vattengenomsläpplighet. Figur 3-14 nedan illustrerar detta faktum i relation till ett injekteringsmedels inträngningsförmåga.

Av Figur 3-14 framgår att för dessa hydrogeologiska förutsättningar kommer hydrauliska sprickvidder mindre än 100 μm (0,1 mm) endast delvis eller inte alls kunna tätas.



Figur 3-14 Exempel på sannolikhetsbaserad utvärdering av sprickviddsfördelning.

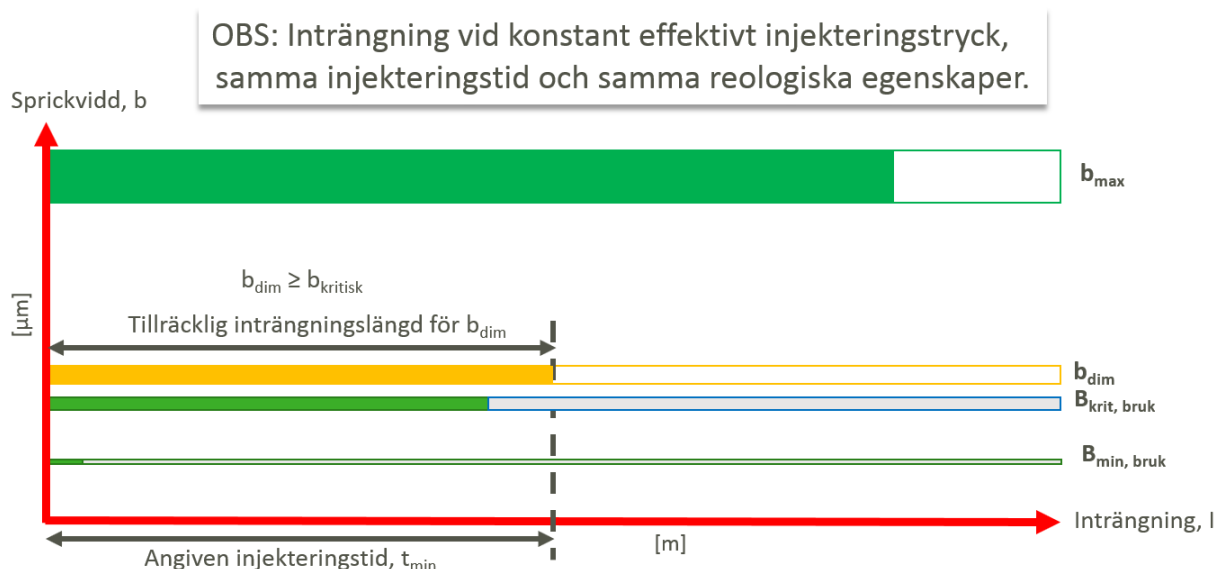
För vissa hydrogeologiska förhållanden finns behov av att säkerställa att de större sprickorna tätas i en omgång före de mindre sprickorna på grund av att de stora sprickorna påverkar hela injekteringsprocessen och de olika kraven på inträngningslängd. Det leder till ett behov av olika

bruksblandningar. I Förbifart Stockholm används blandning 1 och 2 för "fintätning" och blandning 3 för "grovtätning". I texten nedan används blandning synonymt med Mix.

3.5.4 Inträngningslängd och injekteringstid

För ett cementbaserat injekteringsmedel där vi utvärderat b_{dim} (b_{krit}) och dess reologiska egenskaper, flytgräns och viskositet, kan vi för varje givet injekteringstryck teoretiskt beräkna vilken injekteringstid som krävs för att uppnå en tillräcklig inträngning/spridning mellan respektive injekteringshål.

I det fall injekteringsmedlets egenskaper är desamma och vi antar ett konstant injekteringstryck erhåller vi olika inträngningslängder beroende på vilka sprickvidder som injekteras via injekteringshålet. Detta innebär att när ett injekteringshål är fyllt med injekteringsmedel injekteras alla sprickor $\geq b_{min}$ samtidigt, med enda skillnaden att inträngningslängden varierar för en given injekteringstid, vilket illustreras av Figur 3-15 nedan.



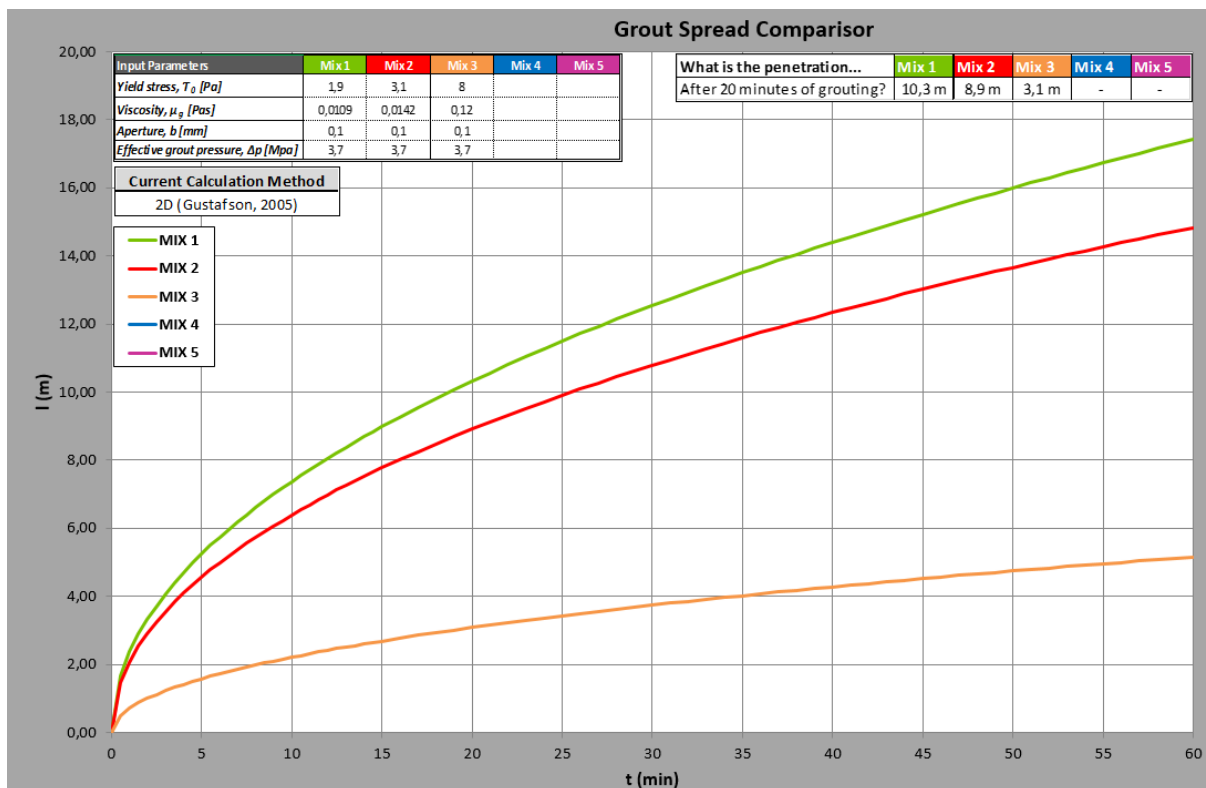
Figur 3-15. Beräknad inträngningslängd för olika sprickvidder exempelvis minsta penetrerbara sprickvidd b_{min} , b_{krit} , dimensionerande sprickvidd för att begränsa inläckagen b_{dim} och största förväntade sprickvidd b_{max} .

Vanligen är den styrande faktorn för valet av injekteringstid att tillräcklig inträngning uppnåtts i den minsta sprickvidd som erfordras för att inläckaget ska vara mindre än täthetskravet vilket motsvarar en tätning av sprickvidder $\geq b_{dim}$.

Vanligtvis dimensioneras inträngningen/spridningen för det dubbla avståndet mellan respektive injekteringshål beräknat med en radiell spridning från injekteringshålet.

Genom att känna de reologiska egenskaperna kan den injekteringstid som teoretiskt krävs för att uppnå en tillräcklig inträngning/spridning för en dimensionerande sprickvidd b_{dim} beräknas.

I Figur 3-16 redovisas ett exempel från en teoretisk beräkning av olika inträngningslängder mot injekteringstid för samma sprickvidd och konstant effektivt injekteringstryck, men med olika reologiska egenskaper. Mix 1 har lägst flytgräns och viskositet och Mix 3 har högst flytgräns och viskositet. Mix 1 och Mix 2 har även ett lägre b_{krit} jämfört med Mix 3, dvs inträngningsförmågan är bäst för Mix 1 och Mix 2. Värdena är tagna från en befintlig förprovning av injekteringsmedel från Förbifart Stockholm.



Figur 3-16. Beräkning av inträngningslängd, Y-axeln, för olika bruksblandningar Mix 1, Mix 2 och Mix 3 mot injekteringstid, X-axeln.

Av figuren framgår tydligt att det krävs en mycket längre injekteringstid för Mix 3 jämfört med Mix 1 och Mix 2 för att uppnå 5 m inträngningslängd (ca 5 min för Mix 1 och Mix 2 jämfört med 55 min för Mix 3). Blandning 1 och 2 (Mix 1 och Mix 2) är tänkt användas som startblandning. Blandning 3 (Mix 3) används i samband med konstaterade större sprickvidder vanligen i samband med bruksbyte vid injektering av respektive injekteringshål.

För att illustrera hur olika faktorer påverkar en given injekteringssituation kan dessa varieras en i taget. I Tabell 3-2 framgår hur sprickvidden (b), injekteringstrycket (P) och de reologiska egenskaperna flytgräns (τ_0) och viskositet (μ_g) påverkar injekteringsresultatet i form av injekteringstid (t) och injekteringsflöde (Q) för en given inträngningslängd (l).

Tabell 3-2. Relativ påverkan av olika faktorer på injekteringsresultat i form av injekteringstid (t) och flöde (Q).

Grouting situation	Fracture aperture	Pressure	Viscosity	Yield value	Time to reach spread l	Flow at grout spread l
Reference	b	P	μ_g	τ_0	t	Q
Double pressure	b	$2P$	μ_g	τ_0	$\approx 1/2 t$	$\approx 2Q$
Half viscosity	b	P	$1/2 \mu_g$	τ_0	$1/2 t$	$2Q$
Triple yield value	b	P	μ_g	$3\tau_0$	$\approx 1.1 t$	$\approx Q$
Double aperture	$2b$	P	μ_g	τ_0	$\approx 1/5 t$	$\approx 10Q$

Source: Rock Grouting, Stille (2015).

Av tabellen kan konstateras att tryck (P), viskositet (μ_g) och sprickvidd (b) påverkar både injekteringstid (t) och flöde (Q) på ett markant sätt. Flytgränsen (τ_o) har däremot en mindre inverkan på injekteringstid och flöde. Sprickvidden kan i princip inte påverkas utan är en inneboende egenskap i bergmassan.

Vad som även kan konstateras är att en större sprickvidd kan ge mycket stora flöden vilket kan påverka förmågan att uppnå injekteringstrycken pga. begränsningar injekteringsutrustningens flödeskapacitet. Höga flöden påverkar även blandningskapaciteten, som måste kunna matcha flödet för att kunna injektera respektive hål utan blandningspauser (kontinuerlig injektering).

3.6 Injekteringstryck

Val av injekteringstryck görs baserat på de dimensionerande inträngningslängderna för de aktuella bruksblandningarna och dimensionerande sprickvidder (b_{dim} och b_{max}).

Injekteringstrycket måste sedan kontrolleras mot ytterligare faktorer som utrustningens kapacitet och spräckning av bergmassan vilket kan leda till okontrollerad spridning av bruket.

3.7 Skärmgeometri

Skärmgeometrin definieras av riktning och placering av injekteringshålen utmed tunnelperiferin.

De parametrar som är avgörande för en injekteringsskärms geometri är följande:

- Längd
- Hålstick för respektive injekteringshål, dvs det vertikala avståndet mellan hålspets och teoretisk tunnelkontur.
- Hålspetsavstånd, dvs centrumavståndet mellan respektive injekteringshål i dess botten.
- Skärmöverlapp, dvs vilket berguttag som max, kan utföras innan nästa injekteringskärm måste utföras.

När injekteringsskärmen utformas tas hänsyn till produktionsfaktorer som exempelvis hur nära injekteringsborrhålen kan borraras varandra utan att inverka menligt på injekteringsresultatet. Sitter injekteringshålen för tätt kan dessa exempelvis uppvisa samband vid injektering vilket kan leda till en sämre täthet. Ett större stick ger i princip en större tätad zon vilket är gynnsamt för tätheten men det ger också fler injekteringshål vilka då i värsta fall kan hamna för tätt.

Injekteringsskärmen utformas för att säkerställa att injekteringen kan utföras runt hela tunneln så att inga "luckor" uppstår, för att säkerställa att parametrar som definieras i dimensioneringen uppfylls samt för att undvika problem med exempelvis samband mellan injekteringshål.

3.8 Antal injekteringsomgångar

Antal injekteringsomgångar definieras som antal injekteringsskärmar borrade i samma bergmassa (bara ett sektionläge). En injekteringsomgång borrar och injekteras klart innan nästa injekteringsomgång får utföras.

Beroende på vilken täthet som krävs i förhållande till bergmassans vattengenomsläpplighet eller av praktiska anledningar som minsta möjliga hålavstånd kan injektering behöva utföras i flera omgångar inom samma injekteringsskärm. Även svårighetsgraden att täta en bergmassa är av stor vikt att beakta i samband med val av antal injekteringsomgångar.

Förenklat gäller att desto fler injekteringsomgångar desto tätare tunnel. För ett mer genomsläppligt berg och/eller hög svårighetsgrad erfordras i allmänhet minst två injekteringsomgångar.

Antalet injekteringsomgångar styrs i regel av vilken injekteringsklass som väljs med hänsyn till dels risken för omgivningspåverkan och prognosticerad initial täthet på bergmassan.

3.9 Keminjektering

Keminjektering omfattar ett stort antal produkter med vitt skilda beteenden och egenskaper. Inom Förbifart Stockholm används 1-komponents Polyuretan, 2-komponents Polyuretan och Kolloidal Silika. Försök kommer även att göras med Polyakrylat gel.

Keminjektering är inte en beprövad metod i den meningen att den sällan används som förinjektering i hårt sprickigt berg. Trafikverket anger även i sina krav att förinjektering ska utföras med cementbaserade injekteringsmedel så långt det är tekniskt möjligt. Det finns även en miljöproblematik kring keminjektering om den används i större skala vilken ska beaktas, till exempel ska objektspecifika miljöriskutvärderingar utföras.

3.9.1 Polyuretan

1-komponents polyuretan (PU) rekommenderas användas för tätning av läckande bulthål eller för tätning av läckande sprickor och fogar i sprutbetong eller betongkonstruktioner i begränsad omfattning. 1-komponents PU består alltså av en komponent och behöver kontakt med vatten för att börja reagera/härda. Reaktionsförloppet är starkt beroende av tillgången på vatten.

1-komponents PU rekommenderas inte för injektering av berg på grund av:

- produktens stora skumningsgrad vilket kan leda till avspäckning av sprutbetong
- produkten har kort reaktionstid vilket försvårar tillräckligt spridning i bergmassan
- produkten kan ligga oreagerad under tryck i bergmassan under lång tid (månader till år) vilket kan leda till arbetsmiljörisker på grund av en så kallad "champagneflaskeeffekten" om den oreagerade produkten ex. borras på.

2-komponents polyuretan (PU) rekommenderas för injektering av sprickor i berg och konsolidering av uppsprucket berg samt i förkastningar, svaga bergszoner, sprickzoner etc. 2-komponents PU består av två komponenter en "vit" A-komponent och "svart" B-komponent. A-komponenten består av en polyol, katalysator och skumstabilisator och B-komponenten består av en diphenylmethanediisocyanat, isomerer och homologer R(20, 42).

Reaktionen startar när komponenterna blandas i en så kallad statisk mixer. För att säkerställa lång inträngning används vid berginjektering en produkt med långsam reaktionstid. Även polyuretan med låg skumbildningsfaktor väljs för att undvika sprickbildning i sprutbetongen och berget under injektering,

Polyuretanhartser skiljer sig markant från cementbaserade bruk och har många fördelar t.ex. momentan reaktion i form av polymerisering, snabb tillväxt av hållfasthet, reaktivitet med grundvatten och skumning och slutligen, tack vare detta, stort motstånd mot bortspolning.

Både 1-komponent och 2-komponents PU tillhör s.k. polymeriska injekteringsmedel definieras som hartser och skiljer sig från andra kemiska medel. PU har en betydligt bättre beständighet, mer än 100 år, än vissa kemiska injekteringsmedel som exempelvis vattenglas och antagligen även kolloidal silika och andra silikat lösningar (natrium eller sodium).

Urea-silikat eller Organo-mineral resin (OMR).

OMR rekommenderas vid injektering av mycket stora håligheter i bergmassan, starkt vattenförande breda öppna sprickor (större än 100 mm) eller katastrofalt höga vattenflöden.

OMR rekommenderas inte för injektering av berg på grund av:

- produktens stora skumningsgrad vilket kan leda till avspjälkning av sprutbetong
- produkten har kort reaktionstid vilket försvårar tillräckligt spridning i bergmassan

OMR tillhör s.k. hybrid hartser och är ”släkt” med PU där den egentliga skillnaden mellan dem ligger i utbytet av ”vit” A-komponent till sodium/natrium silikat, ”svart” B-komponent är samma som för 2-komponents PU.

3.9.2 Kolloidal silika

Kolloidal silika rekommenderas användas för fintätning av berg där osäkerheter i beständighet inte påverkar användning.

Kolloidal silika rekommenderas inte för injektering av större sprickor eller strukturer. Troligen sker någon form av ”fingering” eller utspädning vilket inte ger bättre resultat än för motsvarande cementinjektering.

Kolloidal silika är silikapartiklar i vatten som när det blandas med salt, tex. Natriumklorid, startar en reaktion och silikapartiklarna bildar kedjor, produkten ”gelar”. Reaktionstiden går att styra så att lämplig injekteringstid kan bestämmas.

3.9.3 Polyakrylat gel

Polyakrylat gel används bland annat som permanent tätning för ridåinjektering, jordinjektering och sprickinjektering i konstruktioner. Produkten är lättflytande med låg viskositet ca hälften av cementbruk och ca 1/20 - 1/40 del av 2-komp PU.

Polyakrylat gelen består av 2-komponenter, en ”A1-komponent” – akrylat och en ”A2-komponent” – tvärbinding till akrylat med bland annat N-[3-(dimethylamino)propyl]methacrylamid och en ”B-komponent” -vatten/väteperoxid blandning.

Produkten är en gel och är hydrofil, d v s kan ta upp vatten varpå produkten sväller. Produkten kan också töjas upp till 200% vilket bör vara gynnsamt då bergmassan deformeras efter uttag av tunneln.

Produkten blandas nära borrhålet och reaktionen startar när komponenterna blandas. Bindetiden eller geltiden sätts så lång som möjligt genom att minska väteperoxidkoncentrationen i B-komponenten. Injekteringen fortsätter tills produkten gel:at. Den låga viskositeten och det faktum att vi injekterar en vätska bör vara gynnsamt för tätningseffekten. Produkten har inte använts som förinjektering i hårt kristallint berg utan bör testas i mindre omfattning innan den innefattas i ett förinjekteringskoncept.

3.9.4 Utrustning

För injektering med 2-komponents PU krävs särskild utrustning med hänsyn till blandningen av de två komponenterna men även med hänsyn till de relativt höga injekteringstryck som erfordras med hänsyn till produkternas höga viskositet. De höga trycken innebär att särskilda pumpar, slangar, kopplingar och packers/manchetter anpassade till trycken erfordras. Separat trycksensor vid borrhålet erfordras.

Vid injektering med kolloidal silika används injekteringsplattformen och blandning görs direkt i omröraren. Separat våg, doseringssystem och pumpar till omröraren erfordras. Från omröraren injekteras bergmassan från injekteringsplattformen.

Polyakrylat erfordrar inte högre tryck än vid cementinjektering men separat utrustning för dosering och pumpar, slangar, blandningshuvud och separat trycksensor vid borrhålet erfordras.

3.9.5 Injekteringsborrhål

För injektering med 2-komponents PU borras normalt kortare injekteringshål upp till 12 m längd och med ca 20 graders lutning (4 m stick).

För injektering med kolloidal silika kan normal hållängd och stick användas.

Vid injektering med polyakrylat gel kan normal hållängd och stick användas.

Injektering utförs normalt med minst 6 m överlapp med alla injekteringsmedel.

3.9.6 Utbildning

2-komponents PU injektering bör enbart utföras av utbildad personal med full förståelse för injekteringsmedlets funktion och användningsområde. Arbetsmiljörisker både gällande höga tryck och kemikaliehantering kräver särskild kunskap och måste beaktas. Även utökad miljöprovtagning kan erfordras beroende på valt injekteringsmedel.

Injektering med kolloidal silika bör också utföras av utbildad personal. Arbetsmiljöriskerna är inte större än för normal cementinjektering vilket även bedöms gälla miljöriskerna.

Injektering med polyakrylat gel bör också utföras av utbildad personal. Arbetsmiljöriskerna är inte lika stora som för PU vilket även bedöms gälla miljöriskerna.

3.9.7 Miljö och arbetsmiljörisker med keminjektering.

Användning av produkter innehållande diisocyanater medför särskilda krav från Arbetsmiljöverket (se AFS 2000:4, 2005:18, 2005:17). Anvisningar i "Arbetsmiljöverkets föreskrifter, AFS 2005:18 Härdplaster" måste följas.

Vid rengöring erfordras också särskilda produkter beroende på vilken PU eller OMR som används.

PU och OMR är exoterm och kan självantända om mycket stora kvantiteter används. Vid brand eller smältning av härdad produkt kan giftiga cyanidgaser avges.

4 Förinjektering teknisk lösning

4.1 Allmänt

För att förenkla möjligheten att identifiera vilka skillnader de injekteringstekniska åtgärderna inneburit redovisas nedan de mest betydelsefulla delarna avseende den ursprungliga injekteringsdesignen.

I huvudsak har injekteringsförfarandet genomgått 3 olika större ändringar efter projektering vartefter inläckagesituationen blivit alltmer allvarlig. För att visa hela bilden avseende utveckling av injekteringskonceptet inkluderas även teknisk lösning enligt miljödomsansökan.

I detta kapitel behandlas injekteringsförfarandet enligt:

Miljödomsansökan

Förfrågningsunderlag och inledande injektering i projektet, injekteringsklasser A, B och C (ABC)

Interrimslösning injekteringsklasser B2, C2 (ABC-2)

Empirisk lösning injekteringskoncept ABC-3

Projekterad lösning injekteringskoncept ABC-4

De tekniska lösningarna redovisas här med avseende på injekteringsstrategi, injekteringshålsgeometri, injekteringstryck, injekteringsbruk och stoppkriterier.

4.2 Miljödomsansökan

4.2.1 Allmänt

Injekteringsförfarandet i miljödomsansökan är av naturliga skäl inte komplett men ansatsen i denna är en flexibel injekteringsmetodik vilken utvecklades i huvudsak i projekteringen. Exempelvis anges att förinjekteringen för injekteringsklass 1 ska vara selektiv d v s bara utföras under vissa förhållanden. Denna selektiva förinjektering övergavs i projekteringen och ersattes med kontinuerlig förinjektering.

4.2.2 Injekteringsstrategi

Injekteringsstrategin utmynnade i två generella injekteringsklasser, klass I och klass II. Dessa två injekteringsklasser förekom inom olika tunnelsträckor beroende på skadeobjektets känslighet vid en grundvattensänkning.

Två huvudprinciper gäller för de föreslagna injekteringsklasserna, dels en selektiv förinjektering som grundutförande (injekteringsklass I), dels en förutbestämd och kontinuerlig förinjektering som utförs vid mer skadekänsliga områden och i eventuella zoner (injekteringsklass II).

Beslut om injekteringsklass var tänkt att tas vid tunnelfronten. Underlaget för beslutet var tänkt att vara resultat från sondering med borrhål samt observationer från föregående injekteringsarbeten. Sondering med borrhål innebär borrhning av ett begränsat antal hål. Mätningar i dessa borrhål görs för att bedöma bergmassans vattenförande egenskaper och därmed bedöma om bergmassan framför tunnelfronten behöver injekteras för att uppfylla villkoren för inläckage i miljödomen eller ej.

4.2.3 Injekteringskärm, geometri och antal omgångar

Injekteringsklass 1 – Skärmens geometri är inte helt definierad med ansatsen är att injektering utförs selektivt i 1 omgång, injekteringshålen borraras med 5 m stick med borrhålsängder på 25 m.

Injekteringsklass 2 - Skärmens geometri är inte helt definierad men ansatsen är att injektering utförs i 1 eller flera omgångar, med mindre avstånd jämfört med injekteringsklass 1 och att injekteringshålen borraras med 5 m stick med borrhålsängder på 25 m.

Samtliga skärmar har 6 m överlapp.

4.2.4 Injekteringstryck

Injekteringstrycket är inte definierat.

4.2.5 Injekteringsbruk

Injektering ska utföras med cementbruk men blandning är inte definierat. Det anges att detta kan behöva ändras efter gjorda erfarenheter.

4.2.6 Stoppkriterier

Stoppkriterierna är inte definierat men det anges att dessa kan behöva ändras efter gjorda erfarenheter.

4.3 Injekteringslösning enligt förfrågningsunderlag ABC

4.3.1 Allmänt

Ursprunglig injekteringsmetodik i samband med att förfrågningsunderlaget gick ut till entreprenörerna utgörs av injekteringsklasser (IK) enligt tre typlösningar IKA, IKB och IKC.

Exempel på en injekteringsutrustning visas i Figur 4-1.

4.3.2 Injekteringsstrategi

För att täta bergmassan ansattes en injekteringsmetodik med kontinuerlig förinjektering (samtliga tunnelsträckor injekteras). Tunnlar i berg med lägre täthetskrav och tätt berg förutsattes kunna injekteras med A-skärmar. Tunnlar i berg med högre täthetskrav och tätt till medelgenomsläppligt berg förutsattes kunna injekteras med B-skärm. Tunnlar i berg med högre täthetskrav och medel till genomsläppligt berg förutsattes kunna injekteras med C-skärmar.

Injekteringslösningen baseras på en teoretisk modell baserad på en minsta inträngningslängd i den minsta dimensionerande sprickan för att klara inläckagekraven.

4.3.3 Injekterings-skärm, geometri och antal omgångar

IK A –skärmarna borrades i 1 omgång med 5 m hålspetsavstånd och 5 m stick med borrhålslängder på 25 m.

IK B –skärmarna borrades i 1 omgång med 2,5 m hålspetsavstånd och 5 m stick med borrhålslängder på 25 m.

IK C –skärmarna borrades i 2 omgångar med vardera 2,5 m hålspetsavstånd och 5 m stick med borrhålslängder på 25 m. Efter 2 omgångar är hålspetsavstånden 1,25 m.

Ansättning av borrhål får göras 0,5 m innanför teoretisk kontur i botten.

Samtliga skärmar har 6 m överlapp.

4.3.1 Injekteringstryck

Injekteringstrycken dimensionerades med avseende på risk för jacking. Jacking eller spräckning/hävning innebär att sprickorna i bergmassan utvidgas på grund av ”hög” injekteringstryck relativt vertikal- eller horisontalspänningen. Injekteringstrycken är generellt lägre mot bergytan 5 bar - 15 bar (0,5 – 1,5 MPa) men ökar sedan med hänsyn till bergtäckning till 25 bar (2,5 MPa) och 40 bar (4 MPa) och avspeglar prognosen att bergmassan i huvudsak är av god kvalitet.

4.3.2 Injekteringsbruk

Injektering ska utföras med cementbruk. Blandningarna är definierade till tre blandningar där två avses användas som injekteringsmedel och det tredje som hålfyllnad. Vanligt injekteringscement tillåts användas.

4.3.3 Stoppkriterier

Stoppkriterier ansätts i huvudsak som Maxtid 15 min med tillhörande volym (500 l) och flödesstoppkriterie (2 l/min under 5 min). Samma stoppkriterier gäller för alla injekteringsklasserna.



Figur 4-1. Injekteringsutrustning och förprovning av injekteringsbruk vid Akalla (FSE613).

4.4 Interimslösning B2 och C2

4.4.1 Allmänt

I augusti 2018 infördes en tillfällig (interim – tillfälligt under en övergångsperiod) justering av den gällande injekteringsmetodik för att förbättra möjligheterna att uppnå tillräcklig täthet för att uppfylla villkoren i Miljödomen. Den första justeringen inbegrep en förändring av injekteringsklasser B och C. Med hänsyn till att det var andra versionen av dessa infördes benämningen IK-B2 och IK-C2. Injekteringsklass A togs bort.

Bottenhålen förlängdes och ansättningspunkterna justerade efter botten scannats och bottenprofilen analyserats och jämförts med injekteringsskärmens geometri.

Multihålsinjekteringen togs bort vilket innebär ett robustare utförande mindre känsligt för stora bruksflöden.

De tekniska lösningarna baseras delvis på utredningar och tester som utfördes under hösten 2017 och våren 2018, t ex IKC++ och IKSZ, dvs en vidareutveckling av IKC respektive en injekteringsklass särskilt framtagen för endast områden med bekräftade svaghetszoner.

4.4.2 Injekteringsstrategi

Injekteringsstrategin baseras på injekteringen av Norra Länken med hypotesen att bättre täthet kan uppnås om injekterad volym ökar. För att vara säker på att öka injekterade volymer höjdes trycken samtidigt som tidsstoppkriteriet togs bort och volymsstoppkriteriet ökades markant. Efter en kort provotid reducerades trycken något.

Injektering omfattar även bruksbyte efter att eventuellt volyms stoppkriteriet stoppat injektering med startblandning. Injektering med bruksbyte utförs med samma stoppkriterier som injektering med startblandning.

4.4.3 Injekteringsskärm, geometri och antal omgångar

IK A – Borttagen

IK B2 –skärmarna borrades i 1 omgång med 2,5 m hålspetsavstånd och 5 m stick, i botten borrades vartannat hål med 7,5 m stick. Borrhållslängder var 25.

IK C2 –skärmarna borrades i 2 omgångar med vardera 2,5 m hålspetsavstånd och 7,5 m i första omgången och 5 m stick i andra omgången med borrhållslängder på 25 samt 28 m för att säkerställa överlapp i botten. Efter 2 omgångar är hålspetsavstånden 1,25 m.

Ansättning av borrhål görs max 0,5 m från verklig kontur.

Samtliga skärmar har 6 till 9 m överlapp (tak respektive botten).

4.4.4 Injekteringstryck

Injekteringstrycken ansattes inledningsvis till 40 bar (4 MPa) och sänktes sedan till 30 bar (3 MPa). Områden med liten bergtäckning omfattas inte av injekteringsklasser B2 och C2. Injekteringstrycken är dock generellt högre jämfört med injekteringsklass ABC för att öka bruksåtgången.

4.4.5 Injekteringsbruk

Injektering utfördes med cementbruk. Blandningarna är definierade till tre blandningar där alla tre avses användas som injekteringsmedel. Vanligt injekteringscement tillåts användas.

För hål med bruksbyte ska blandning 3 användas med vct 0,6.

Försök utfördes för att observera bland annat brukskvalitet.

Försök utfördes även med andra cementsorter se ABC-3.

4.4.6 Stoppkriterier

Tidsstoppkriteriet togs bort och volymsstoppkriteriet ökades från 500 till 1200 liter. Alternativt stoppas injektering på flödesstoppkriterie 2 l/min under 5 min (injekteringstid minst 15 min).

Efter bruksbyte ändras volymsstoppkriteriet till 2400 l. Alternativt stoppas injektering på flödesstoppkriterie 2 l/min under 5 min.

4.5 Injekteringslösning ABC-3

4.5.1 Allmänt

Våren 2019 infördes en ny injekteringsmetodik baserad på tidigare gjorda erfarenheter, fältförsök (empirisk – erfarenhet som ligger till grund för slutledning) och IKB2 och IKC2. Med hänsyn till att det var tredje versionen injekteringsmetodik infördes benämningen ABC-3. Injekteringsklass B togs bort.

4.5.2 Injekteringsstrategi

Injekteringsstrategin för ABC-3 följer i princip strategin för B2 och C2 som var baserad på injekteringen av Norra Länken med hypotesen att bättre täthet kan uppnås om injekterad volym ökar. Med hänsyn till att inläckagen inte reducerats tillräckligt infördes obligatoriskt två skärmar och kontroller med vattenförlustmätningar. Om inte kontrollen visar på godkänt resultat injekteras

kontrollhålen och efter att en salva tagits ut utförs ytterligare injekteringsskärmar. Överlappet ökas därmed från 6 m till 18 m och längs med varje tunnelmeter kommer det finnas upp till 8 injekteringsomgångar jämfört med normalt 1 till 2 för en B eller C skärm. För att öka inträngningen i mindre sprickor används microcement i större utsträckning.

Injektering omfattar även bruksbyte efter att eventuellt volyms stoppkriteriet stoppat injektering med startblandning. Injektering med bruksbyte utförs med samma stoppkriterier som injektering med startblandning.

Injekteringsstrategin omfattar alltså både ökade injekterade volymer och antal omgångar och därmed antal hål samt ökade kontroller av resultat.

4.5.3 Injekteringsskärm, geometri och antal omgångar

IK A – Borttagen

IK B – Borttagen

IK C3 –skärmarna borrades i 2 omgångar med vardera 2,5 m hålspetsavstånd och 7,5 m i första omgången och 5 m stick i andra omgången med borrhålsängder på 25 samt 28 m för att säkerställa överlapp i botten. Efter 2 omgångar är hålspetsavstånden 1,25 m.

Ansättning av borrhål görs max 0,5 m från verklig kontur.

Samtliga skärmar har 6 till 9 m överlapp (tak, vägg respektive botten).

4.5.4 Injekteringstryck

Injekteringstrycken ansattes generellt högre jämfört med ABC enligt B2, C2 lösningen. Injekteringstrycken justerades upp även för lägre bergtäckning och är generellt högre jämfört med injekteringsklass ABC för att öka bruksåtgången.

4.5.5 Injekteringsbruk

Injektering utfördes med cementbruk. Blandningarna är definierade till tre blandningar där alla tre avses användas som injekteringsmedel.

Microcement ska användas i områden med mer genomsläppligt berg.

Krav ställs på ökad inträngningsförmåga.

Krav ställs på härdningstid.

För hål med bruksbyte ska blandning 3 användas med vct 0,7 (microcement).

Fortsatta försök utförs för att observera bland annat brukskvalitet i produktion.

4.5.6 Stoppkriterier

Stoppkriterier är samma som för B2, C2 d v s tidsstoppkriteriet togs bort och volymsstoppkriteriet var 1200 liter. Alternativt stoppas injektering på flödesstoppkriterie 2 l/min under 5 min (injekteringstid minst 20 min).

Efter bruksbyte ändras volymsstoppkriteriet till 2400 l. Alternativt stoppas injektering på flödesstoppkriterie 2 l/min under 5 min.

4.6 Injekteringslösning ABC-4

4.6.1 Allmänt

Parallellt med att förinjektering utfördes enligt interimslösning, avsnitt 4.4, och injekteringslösning ABC-3, avsnitt 4.5, projekterades en ny injekteringsdesign tagits fram som godkändes våren 2020.

Injekteringsmetodiken baseras på två injekteringsklasser benämnda IK1 och IK2 (observera att dessa inte ska blandas ihop med benämningar i avsnitt 4.2). Förenklat är injekteringsklasserna anpassade till bergmassans vattengenomsläpplighet, där IK1 gäller vid gynnsamma förhållanden och där IK2 gäller vid ogynnsamma förhållanden inklusive bekräftade svaghetszoner.

Med hänsyn till situationen i delprojekt Norr implementeras enbart IK2 med hänsyn till försiktighetsprincipen.

4.6.2 Injekteringsstrategi

Injekteringsstrategin är baserad på samma geometriska utformning som ABC-3 med en stringent arbetsgång och tydliga beslutskriterier som lätt kan justeras med hänsyn till utförande och prestanda. Kontroller med vattenförustmätningar utförs på motsvarande sätt som för ABC-3. Injekteringsstrategin tar hänsyn till problem som identifierats under pågående injektering med ABC-3 knutna till utförande och bergmassans egenskaper. Vid större genomsläpplighet finns behov av att minska antal injekteringshål som borrar initialt eftersom större antal hål minskar möjligheten att tätta samtliga hål effektivt med hänsyn till samband mellan hål. Kontrollpunkter och dokumentationskrav förbättras så justering av acceptanskriterier och krav kan göras lättare.

Injekteringslösningen tar ytterligare hänsyn till:

Vid större genomsläpplighet minskas antal injekteringshål och antal omgångar ökas

Minska konsekvensen av samband mellan hål

Minska antal och längd på pauser underpågående injektering

Trycken justeras ner något med hänsyn till påverkan på bergmassan

Injekteringsordningen justeras så att mängden sambandshål i skärmen minskas.

Möjlighet finns att använda keminjektering i samband med förinjekteringen vid specifika förhållanden.

4.6.3 Injekterings-skärm, geometri och antal omgångar

IK 2 – skärmarna borrar i 2 omgångar med vardera 2,5 m hålspetsavstånd och 7,5 m stick i första omgången och 5 m stick i andra omgången med borrhålsängder på 25 respektive 28 m för att säkerställa överlapp i botten. Efter 2 omgångar är hålspetsavstånden 1,25 m.

Vid stor genomsläpplighet borrar endast hälften av första omgångens hål (5 m hålspetsavstånd) och injekteras separat. Därefter borrar andra hälften av första omgångens hål (5 m hålspetsavstånd resulterande i 2,5 m hålspetsavstånd) och injekteras separat. Omgång 2 borrar och injekteras på normalt sätt enligt IK 2.

Ansättning av borrhål görs max 0,5 m från verklig kontur.

Samtliga skärmar har 6 till 9 m överlapp (tak, vägg respektive botten).

Möjlighet till fler skärmar och omgångar baserat på godkänt eller ej godkänt injekteringsresultat.

4.6.4 Injekteringstryck

Injekteringstrycken minskas något för mer ytnära berg jämfört med ABC-3 för att undvika påverkan på bergmassan och minska risken för samband under pågående injektering.

4.6.5 Injekteringsbruk

Injektering utförs med microcement och påvisad förbättrad inträngningsförmåga.

Microcement ska användas vid all injektering.

Vid ej godkänt resultat av löpande provning ska injekteringsbruk kasseras.

4.6.6 Stoppkriterier

Injektering med startblandning stoppas på tid, 30 min (inget volymstoppkriterium). Injektering efter bruksbyte stoppas på flödesstoppkriterie 2 l/min under 5 min eller volymstoppkriterium 700 l.

Initialt ska alla hål injekteras minst 30 min även injekteringshål som tar mycket lite injekteringsbruk.

Tidsstoppkriteriet på 30 min är baserat på injektering i ett sämre berg (mer uppsprucket) där inträngningslängd och exempelvis risk för samband med stillastående injekteringsbruk står i motsatsförhållande (ju längre injekteringstid desto större risk för samband och för att injekteringsbruket blir stillastående i ännu icke injekterade hål, ju kortare injekteringstid desto större risk att inträngningslängden blir för liten i "mer uppsprucket berg").

4.7 Sammanfattning

De fyra injekteringslösningarna som använts inom Tunnel Norr påminner naturligtvis om varandra men uppvisar också stora skillnader.

Injekteringsmetodiken med ABC utfördes i princip på motsvarande sätt med samma injekteringsbruk som vid tunneldrivningen av Citybanan i Stockholm. Avvikande bergkvalitet jämfört med förväntad bergkvalitet får anses som den primära orsaken till att injekteringslösningen inte gav tillräcklig täthet jämfört med den förhållandevis täta bergmassan i Stockholms City.

Förändringen till interimslösningen IK-B2 och IK-C2 föranleddes av två försök med varianter av C-skärmarna (C++ och SZ) som inte redogörs vidare för här. Trafikverket beslutade att återgå till tidigare tekniska lösningar exempelvis från Norra länken med hypotesen att bergmassan kräver större volymer för att bli tät.

För att förbättra täthetsresultaten prövades en ny teknisk lösning ABC-3 med kontroller av täthet och en kraftig ökning av antal omgångar och antal hål. Testerna gav goda resultat trots att täthetskontrollen med vattenförlustmätning verkar ge motstridiga, ofta visande på "genomsläppligt berg" trots andra indikationer från bruksåtgång eller inläckande vatten i borrhålen visade på ett "tätt berg". Beslutet att fortsätta injektera följer dock vattenförlustmätningarna vilket innebär att mer injektering utförs än vad som eventuellt är nödvändigt. Injektering har utförts med generellt stor bruksåtgång och fler omgångar (särskilt i mer genomsläppligt berg) och tunneln injekteras efter varje salva på långa sträckor. Till sin omfattning är det knappt möjligt att utföra mer injektering med hänsyn till antal omgångar och antal hål i stufen (stor risk för kortslutning mellan hål, sönderborrat berg och andra liknande problem). Trots den omfattande insatsen blir bergmassan inte tillräckligt tät i delområden d10 och d11 för att klara inläckagekravet.

ABC-4 togs fram baserat på injekteringsteori och uppföljning av injekteringsresultat och utförande (av föregående lösningar). Denna lösning har tagit fasta på behov av struktur och tydlighet i arbetsgång och utförande samt behov av att minska identifierade specifika problem med injekteringen som kan påverka injekteringsresultatet. Dessa problem handlar bland annat om förändringar av injekteringsbrukets egenskaper med tiden i första hand för stillastående bruk i borrhål. Justering av injekteringslösningen har därför gjorts genom att återinföra tidsstoppkriteriet för injektering med startblandning samt att begränsa antal pumpar som får arbeta samtidigt så att inga onödiga stopp inträffar till följd av begränsningar i produktionsprocessen (bruksblandningskapacitet). Vidare kan det konstateras att injekteringstiden i ett mer genomsläppligt berg behöver generellt vara längre för att kompensera för en komplex sprickstruktur. Metoden behåller möjligheten från föregående teknisk lösning gällande stort antal omgångar.

Sammantaget var den ursprungliga tekniska lösningen inte anpassad till den varierande och genomsläppliga bergmassan. En återgång till tidigare empiriska lösningar, med ökning av bruksåtgång och antal omgångar, har bara delvis löst problematiken med inläckage. Injekteringsarbeten med ABC-4 fortgår och en utvärdering av denna visar att produktionstekniska problem (exempelvis samband mellan hål) har minskat och bergmassan i det "normala" berget blir relativt tät. Dock finns fortfarande problem i områden med mer uppsprucket berg (svaghetszoner) och i områden med ogynnsam sprickorientering. Trafikverket bedömer att det inte är meningsfullt att ytterligare utöka injekteringsinsatsen utan att en sådan riskerar att påverka utförandet negativt (mer borrhål ger mer problem med injekteringen, exempelvis mer ytläckage och samband) vilket bedöms ge oförändrat eller något ökat inläckage.

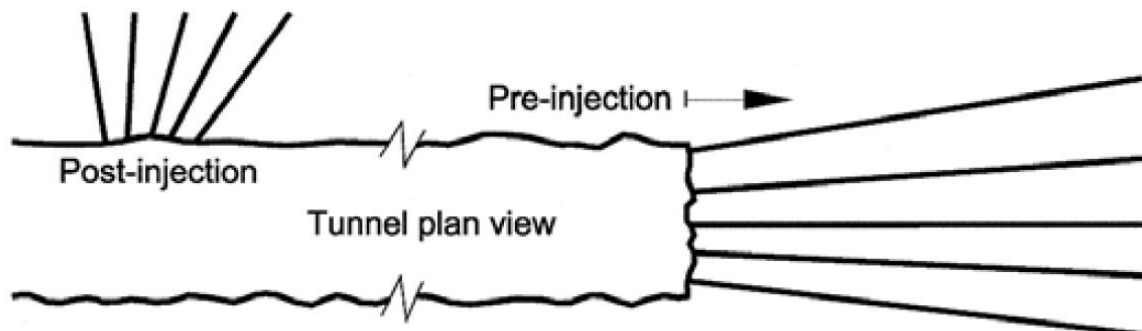
5 Efterinjektering teknisk lösning

5.1 Allmänt

Efterinjektering utförs normalt i begränsade områden där inläckagen är större än inläckagekravet eller där kraven på den inre miljön kräver ytterligare tätning. I Förbifart Stockholm konstateras att det är relativt stora områden där det läcker in för mycket vatten. Vid enstaka punktläckage kan efterinjektering utföras "selektivt" med enstaka efterinjekteringshål eller grupper av efterinjekteringshål, Figur 5-1.

Med hänsyn till att inläckagen i Förbifart Stockholm täcker större områden, ibland utan tydliga läckagepunkter, erfordras en systematisk efterinjektering. Arbetet med efterinjekteringen inleds därför med att hitta områden med betydande inläckage och därefter identifiera vilka (om möjligt) geologiska strukturer som troligtvis inte injekterats tillräckligt i samband med förinjektering. För att hitta rätt områden att prioritera för efterinjektering, studeras inläckagemätningar vid stufv under pågående tunneldrivning, inläckagemätningar vid mätdammar, förinjekteringsresultat och geologisk kartering. Därefter bedöms vilken geologisk struktur som i första hand erfordrar efterinjektering. Därefter väljs skärmgeometri för prioriterad tunnelsträcka med förstahandsval och andrahandsval om förstahandsvalet inte ger tillräckligt bra resultat.

Möjligheten att uppnå en förbättrad täthet, reduktion av inläckage, med efterinjektering inom prioriterade områden har bedömts till mellan 5 - 30 % inom området som efterinjekteras. Denna bedömning är baserad på erfarenhet från efterinjekteringsresultat från Förbifart Stockholm och från andra projekt till exempel Hallandsås och Citybanan (arbetstunnel vid Torsgatan). Även om efterinjektering inte tätar samtliga inläckage har den möjliggjort en fortsatt byggnation av tunnarna samt förbättrat möjligheterna att med alternativa åtgärder upprätthålla grundvattentrycknivåerna genom skyddsinfiltration.



Figur 5-1. Illustration som visar skillnaden mellan förinjektering (pre-injection) och lokal efterinjektering (post-injection).

5.2 Systematisk efterinjektering

Förutsättningarna för efterinjekteringen varierar inom de områden som är prioriterade för efterinjektering. Detta ställer krav på olika skärmgeometrier för att hantera aktuell bergmassa och sprickorientering (riktningar på strukturer).

Efterinjekteringen måste ta hänsyn till att tunneln redan är utsprängd vid bedömning av möjliga injekteringsstryck. Den tekniska lösningen för efterinjektering baseras därför på:

Identifiering av prioriterade områden där efterinjekteringen kan göra störst nytta.

Identifiering av geologiska strukturer som inte tätats med förinjektering

Utformning av olika skärmgeometrier som kan hantera varierande orientering på geologiska strukturer.

Efterinjektering i motsatt riktning till förinjekteringen (träffar sprickor som eventuellt missades med förinjekteringen)

Val av cementbruk som tränger in i små sprickor och är tillräckligt lättflytande för att inträngningslängden ska bli tillräcklig.

För att omhänderta observerade geologiska strukturer/sprickor och optimera möjligheten att uppnå en förbättrad täthet genom efterinjektering har tre olika skärmgeometrier tagits fram enligt nedan.

Injekteringsdesignen för efterinjektering godkändes av Trafikverket 2019-04-05. Kort därefter påbörjades de systematiska efterinjekteringsarbetena som fortfarande pågår. Före detta datum utfördes efterinjektering selektivt inom begränsade områden.

5.2.1 Injekteringsstrategi

Injekteringsstrategin för efterinjektering omfattar en utvärdering av förutsättningar för aktuellt område, erforderlig reduktion av inläckage och mätning av inläckage före efterinjektering och i samband med utvärdering av injekteringsresultaten. Strategin omfattar också en gradvis ökad omfattning av efterinjekteringsinsatserna med successiva beslut kopplat till inläckagemätningarna.

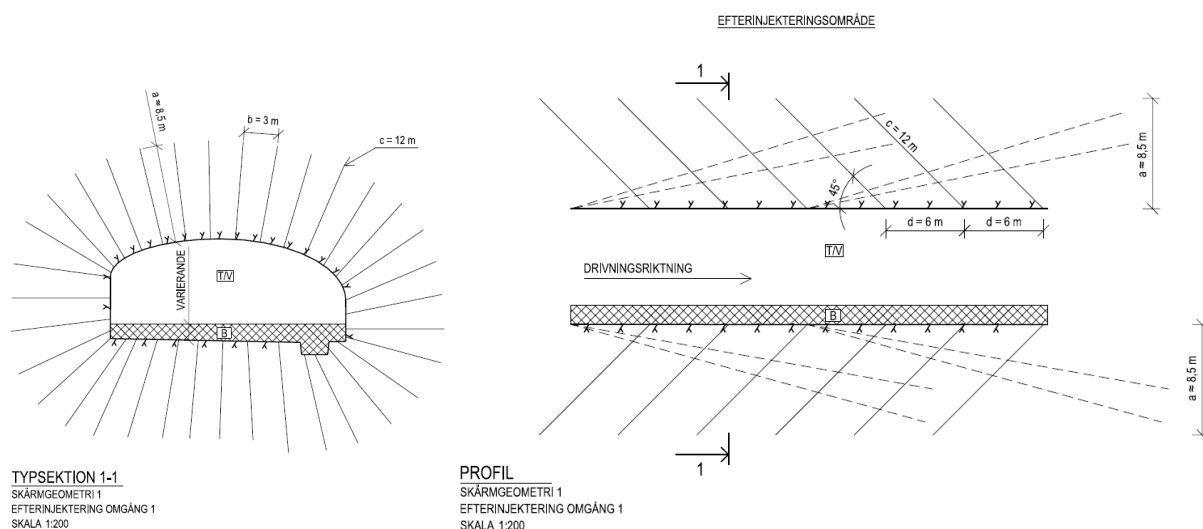
I princip så inleds efterinjekteringen med en identifiering av geologiska strukturer så att lämpligt val av injekteringsskärm(ar) kan göras. Separat inläckagemätning av mätdamm/stuff ska göras innan arbete med efterinjekteringen påbörjas. Beslut fattas därefter om efterinjektering ska göras för hela sektionen på en gång eller om den ska delas upp i exempelvis botten först och därefter tak/vägg eller vice versa. Därefter utförs efterinjektering med omgång 1 (eventuellt bara tak/vägghål eller bottenhål) och utvärderas. Utvärderingen omfattar även inläckagemätning och baserat på utvärderingen beslutas

om fler omgångar ska utföras eller om inläckagen reducerats tillräckligt. Därefter utförs vid behov ytterligare efterinjektering med omgång 2.

Om injektering görs med skärmgeometri 2 eller 3 för strukturer (sub)parallella med tunneln ska efterinjektering med skärmgeometri 1 utföras om de inledande injekteringsomgångarna med skärmgeometri 2 eller 3 inte givit tillräckligt resultat. Skärmgeometrierna redovisas i avsnitt 5.2.2.

5.2.2 Injekteringsskärm, geometri och antal omgångar

Efterinjekteringsskärmarna utförs enligt skärmgeometri 1, 2 eller 3. För de fall där ingen specifik struktur observeras eller för områden med allmänt diffusa inläckage ska efterinjektering utföras med skärmgeometri 1, Figur 5-2. Skärmgeometri 1 utförs i motstående riktning mot utförd förinjektering och har större stick (8,5 m) och kortare injekteringshål (12 m).

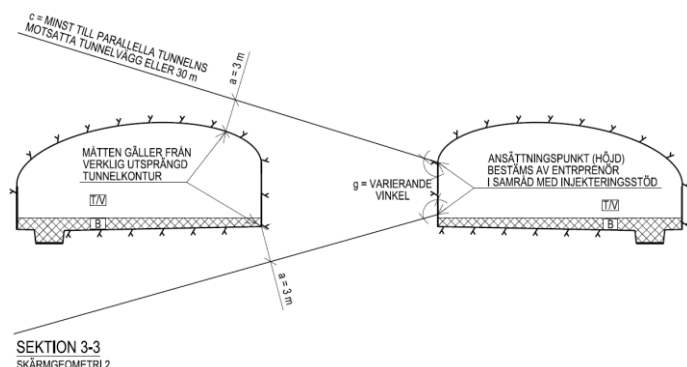


Figur 5-2. Skärmgeometri 1, systematisk efterinjektering omgång 1, streckade injekteringshål representerar förinjektering. T/V = Tak/Vägg, B = Botten.

Injektering utförs med 6 m radavstånd i omgång 1 och omgång två utförs ”split-spacing” metodik d v s radavstånd halveras.

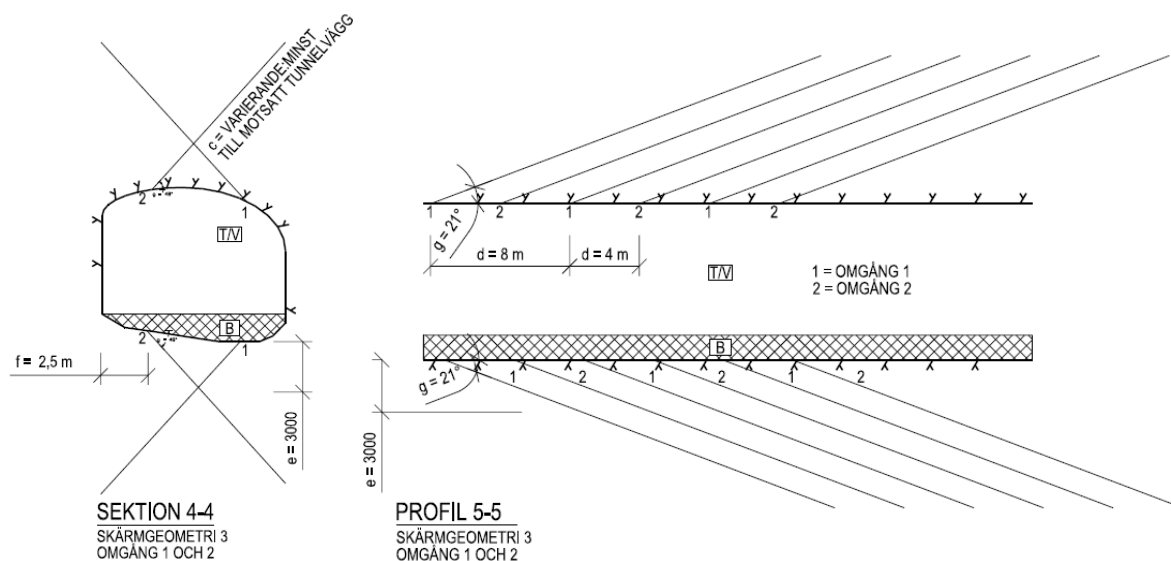
Vid identifierade brantstående geologiska strukturer utförs efterinjektering med skärmgeometri 2 eller 3 och kompletteras eventuellt med skärmgeometri 1.

Skärmgeometri 2 visas i Figur 5-3 och är anpassad för brantstående strukturer parallellt med tunneln som kan nå från parallell tunnel. Begränsningen är möjliga hållängder (30 m) med hänsyn till magasin kapacitet på borrhagnar.



Figur 5-3. Skärmgeometri 2, systematisk efterinjektering omgång 1. T/V = Tak/Vägg, B = Botten. Efterinjektering utförs från angränsande tunnel.

Skärmgeometri 3 visas i Figur 5-4 och används då skärmgeometri 2 inte når aktuella strukturer eller där en parallell tunnel saknas som exempelvis vanligen i ramptunnlarna. För skärmgeometri 3 borrar efterinjekteringshål snett över tunneln för att korsa parallella brantstående strukturer. Begränsning och hänsyn måste tas till borrarutrustningens utrymmesbehov.



Figur 5-4. Skärmgeometri 3, systematisk efterinjektering omgång 1 och omgång 2. T/V = Tak/Vägg, B = Botten. Utförs då ingen angränsande tunnel finns.

Efterinjektering utförs vanligen succesivt med omgång 1 för tak/vägg och därefter omgång 2 tak/vägg. I ett senare skede efterinjekteras omgång 1 för botten och därefter omgång 2 för botten. I områden med genomsläppligt berg och stor bruksåtgång kan även efterinjektering utföras med omgång 3.

5.2.3 Injekteringstryck

Vid val av injekteringstryck i samband med efterinjektering måste trycket reduceras med hänsyn till uttagen bergtunnel (vilket även omfattar risk för påverkan på bergförstärkning och arbetsmiljöfrågor).

Injekteringstryck är därför valt till 10 bar (1MPa).

Stor försiktighet ska råda med hänsyn till risk för påverkan på bergmassan (till exempel oönskad hävning av bergmassan in mot tunneln).

5.2.4 Injekteringsbruk

Efterinjektering ska utföras med ett microcement vilket har bättre inträngningsegenskaper jämfört med ordinarie injekteringscement.

Alternativt kan skemiska injekteringsmedel användas, se även avsnitt 3.9. 2-komponents PU har prövats i samband med efterinjektering inom Tunnel Norr. Resultatet är blandat dvs det har både givit goda och mindre goda resultat. Injekteringsstrycken vid injektering med 2-komponents PU är vanligen mycket stora vilket kan medföra arbetsmiljörisker vid efterinjektering då bergförstärkning kan skadas av tryckinducerade deformationer. Vidare begränsas möjligheten att systematiskt genomföra efterinjektering över större ytor av resursbrist där idag endast några enstaka personer i Sverige har kompetensen att använda 2-komponents PU. Injektering utförs också som enkelhålsinjektering vilket medför reducerad kapacitet.

Med hänsyn till det blandade resultatet, svårigheter att använda tekniken utan arbetsmiljörisker, begränsningar i resurser och kapacitet samt att kemiska injekteringsmedel kan ha negativ miljöpåverkan och kan påverka arbetsmiljön negativt rekommenderas därför i första hand att cementbaserade injekteringsmedel används. I särskilda områden kan dock keminjektering övervägas.

5.2.5 Stoppkriterier

Stoppkriterier för efterinjektering baseras på tid. Vid injektering med startblandning stoppas injektering efter 30 min injekteringstid. Vid bruksbyte till styvare bruk stoppas injektering efter ytterligare 20 min injekteringstid.

Samtliga hål injekteras full tid.

6 Sammanfattning och diskussion

6.1 Geologiska förhållanden och bergmassans genomsläpplighet

Det kan konstateras att det är väsentlig skillnad i förutsättningarna för ursprunglig miljödomsansökan med avseende på bergkvalitet jämfört med verklig bergkvalitet i tunneln. Uppföljningen visar att det i samtliga tunnlar generellt är sämre bergkvalitet och att det i området vid Lunda (FSE410) på ett relativt långt avsnitt är sämre berg än enligt prognos.

Konsekvensen av ett sämre berg är att bergmassan generellt också är mer genomsläpplig. Det kan konstateras att det finns en korrelation mellan det sämre berget framförallt i svackor och svaghetszoner och ökad bruksåtgång och även ökat inläckage.

Uppföljningen av injekteringsinsatserna (bruksåtgång) bekräftar bilden av ett sämre och ett mer genomsläppligt berg jämfört med prognos.

Trots att det varit en kraftig ökning av bruksåtgången, antal borrhål och antal omgångar verkar dock inläckagen fortfarande vara högre än villkoret enligt miljödomen för delsträckor d10 och d11.

6.2 Injekteringstekniska lösningar

De tekniska lösningarna har följt gällande praxis med hänsyn till injekteringsteori (ABC och ABC-4). Vidare har injektering utförts med tidigare beprövade metodik (IKB2 och IKC2 och ABC-3). Inget av de koncepten har givit tillräckligt täta tunnlar.

Utveckling av den tekniska lösningen har diskuterats och ansatserna i antaganden har prövats inom projektet. Det konstateras att injekteringslösningarna har utgått ifrån de bästa antagande som funnits till hands för respektive ansats. Till exempel är det en empirisk ansats att vi uppnår ett tätare berg med en större injekterad volym. Den senaste lösningen (ABC-4) har varit en sammanslagning av teori och praktiska erfarenheter från projektet utan att begränsa bruksåtgången (enligt empirisk metod).

Att ytterligare öka injekteringsinsatsen med hänsyn till antal omgångar och antal hål bedöms som mycket svårt i de områden där injektering utförts idag efter varje salva. Tvärtom kan en ytterligare ökning av antal hål försämra resultatet med hänsyn till praktiska följdproblem som exempelvis ökning av antal sambandshål eller förlängning av injekteringstiderna.

ABC-4 kommer eventuellt att även omfatta keminjektering. Eftersom keminjektering inte är en beprövad metod som förinjektering i hårt sprickigt berg kommer injekteringsmedel, borrhålsgeometri, arbetsgång och stoppkriterier att testas med fältförsök. Två produkter planeras att prövas, 2-komponents PU och Polyakrylat gel. Syftet med testet är primärt att undersöka om keminjektering ger tillräcklig täthet i ett sämre berg och sekundärt välja vilket av kembruken som är lämpligt att använda som en del av förinjekterings lösningen. Försöket planeras att utföras vår/sommar 2021.

6.3 Efterinjektering

Efterinjektering har eller kommer att genomföras i de områden som identifierats som genomsläppliga. Dessa sammanfaller vanligen med svackor eller svaghetszoner. I dessa områden är inläckagen ofta diffusa d v s utspridda över området jmf med ett punktläckage. Diffusa inläckage är erfarenhetsmässigt svårare att täta och bedömningen är att inläckagen i dessa områden kanske kan reduceras med 5-30%. Eftersom även andra områden läcker vatten är det inte troligt att man med efterinjektering kan reducera inläckagen mer än med ca 25%. Det kan konstateras att effekten av efterinjektering är betydligt mindre än effekten av förinjektering där en tätningseffekt större än 90% förväntas.

6.4 Diskussion

Det kan konstateras att det är av yttersta vikt att den geologiska prognosen och prognosen av bergmassans genomsläpplighet är representativ för bergmassan. I ett tidigt skede blir omfattning av förundersökningar och statistisk analys av mätdata därför central för miljödömsansökan, prognoser och projektering av teknisk lösning. I byggskedet kan det konstateras att bergmassan i Tunnel Norr (Johannelund, Lunda och Akalla) tyvärr är av sämre kvalitet än prognosticerat vilket leder till större inläckage och förändrat utförande (mer omfattande injekteringsinsatser).

En följd av att bergmassan generellt är mer genomsläpplig är att svårighetsgraden att nå önskad tätningseffekt ökar. Att nå en förväntad reell täthet i form av ett specificerat mål (och inte ett relativt mål som 90%) kan bli nästan omöjligt att uppnå. Detta faktum bör beaktas vid diskussion av resultat och jämförelse med andra projekt.

Det kan också konstateras att avsänkningen av grundvattennivåerna leder till mindre inläckage. En konsekvens av utökad infiltration är att grundvattennivåerna höjs och områden som tidigare bedömts täta kan börja läcka vatten. Generellt gäller att eftersom inläckaget är proportionellt mot grundvattennivån ökar således allt inläckage.

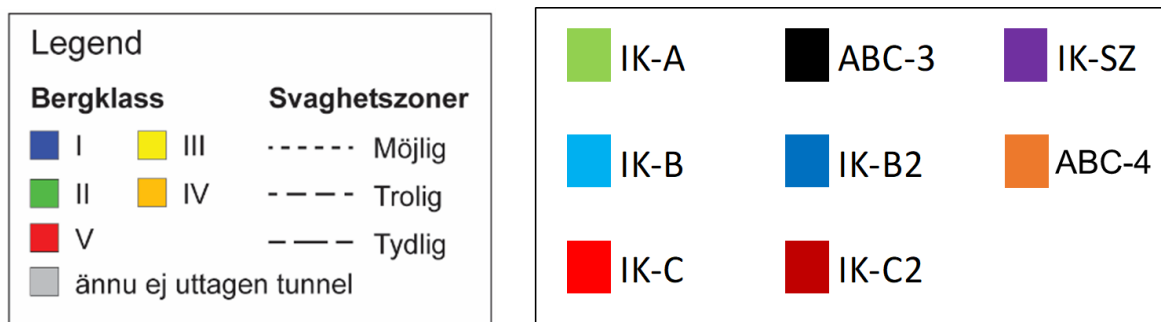
Injekteringsinsatserna som genomförts inom Tunnel Norr är mycket omfattande och det bedöms inte möjligt att göra stora förändringar av konceptet där antal omgångar, antal hål och bruksval nått en kritisk omfattning. Mindre justeringar utförs löpande för att anpassa den tekniska lösningen till aktuella förhållanden.

7 Underlag karterade bergklasser

I avsnitt 2 redovisas en sammanfattning av prognos och karterade bergklasser där bergklass 1–2 redovisas i ljusblå och bergklass 3–5 redovisas i orange. I detta avsnitt redovisas både prognos och faktisk kartering i bergklass 1 – 5.

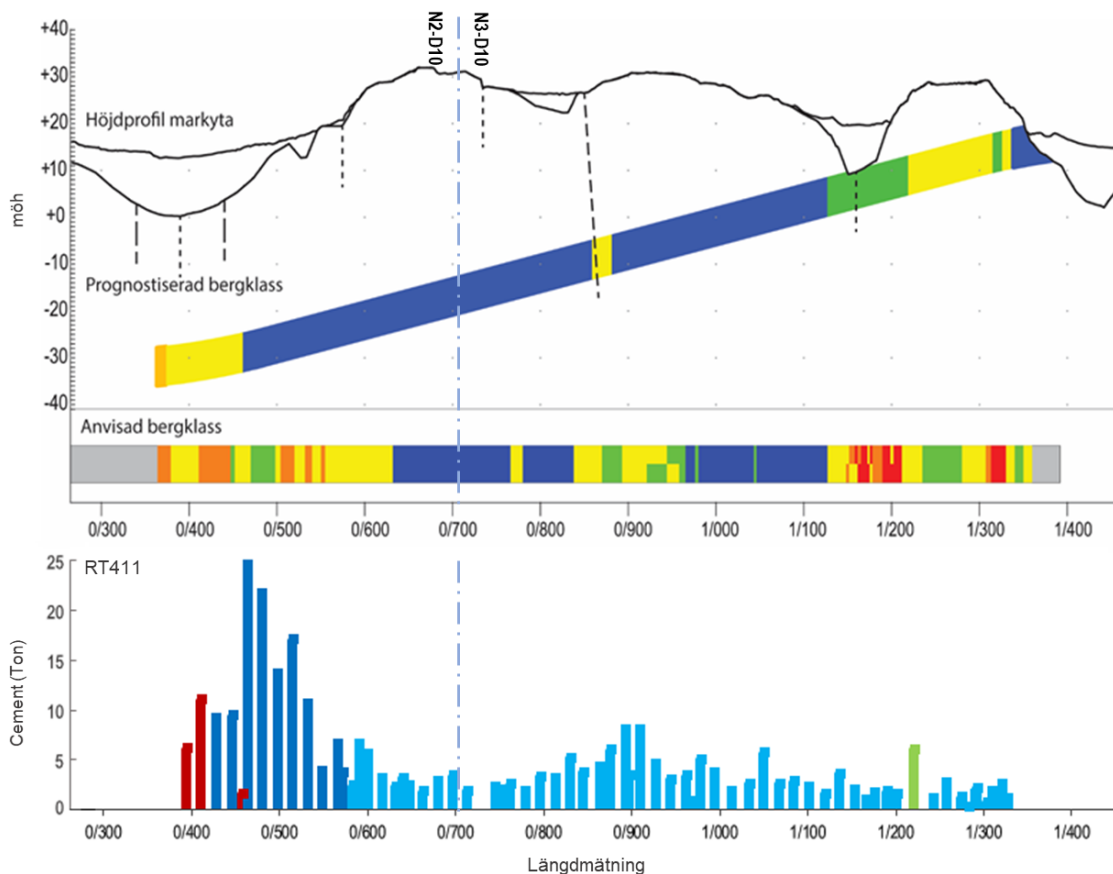
Denna redovisning avser enbart tydliggöra underlaget till bedömningarna i avsnitt 2.

Omfattningen med hänsyn till bruksåtgång och antal skärmar ökar tydligt för IK-B2, C2 och ABC-3 vilket visar vilket allvar Trafikverket tar på omgivningspåverkan och ökande inläckage i tunneln. Det visar också vilken stor insats Trafikverket har gjort för att reducera ytterligare inläckage.

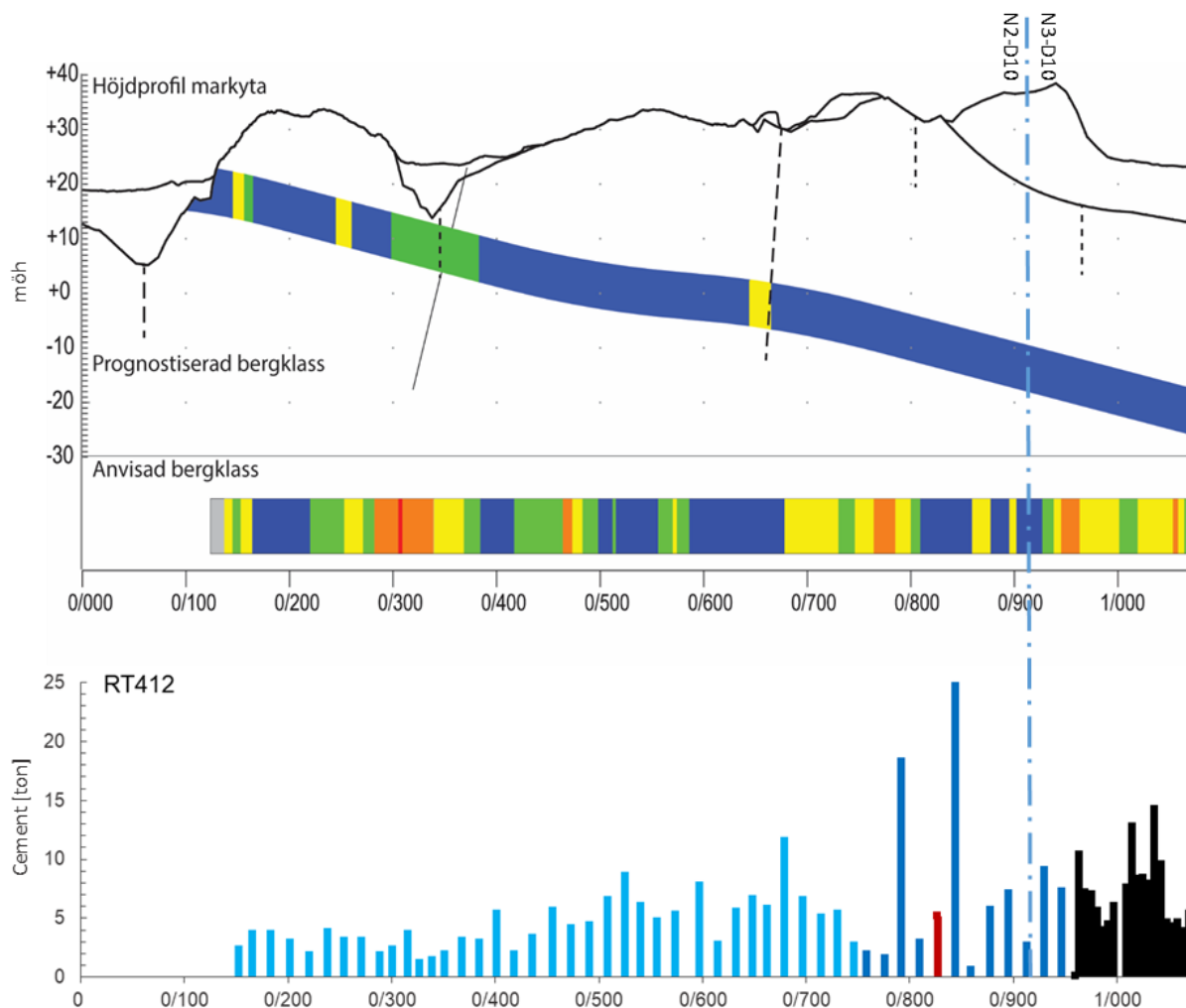


Figur 7-1: Färgkodning för bergklass enligt prognos och uttagen tunnel (enligt karterad geologi och anvisad bergklass) samt linjetyper för prognosticerade svaghetszoner. IK-A, IK-B etc. anger beteckning för injekteringsmetodik (ABC, B2-C2, ABC-3, ABC-4) och injekteringsklass (A, B, C, B2, etc.).

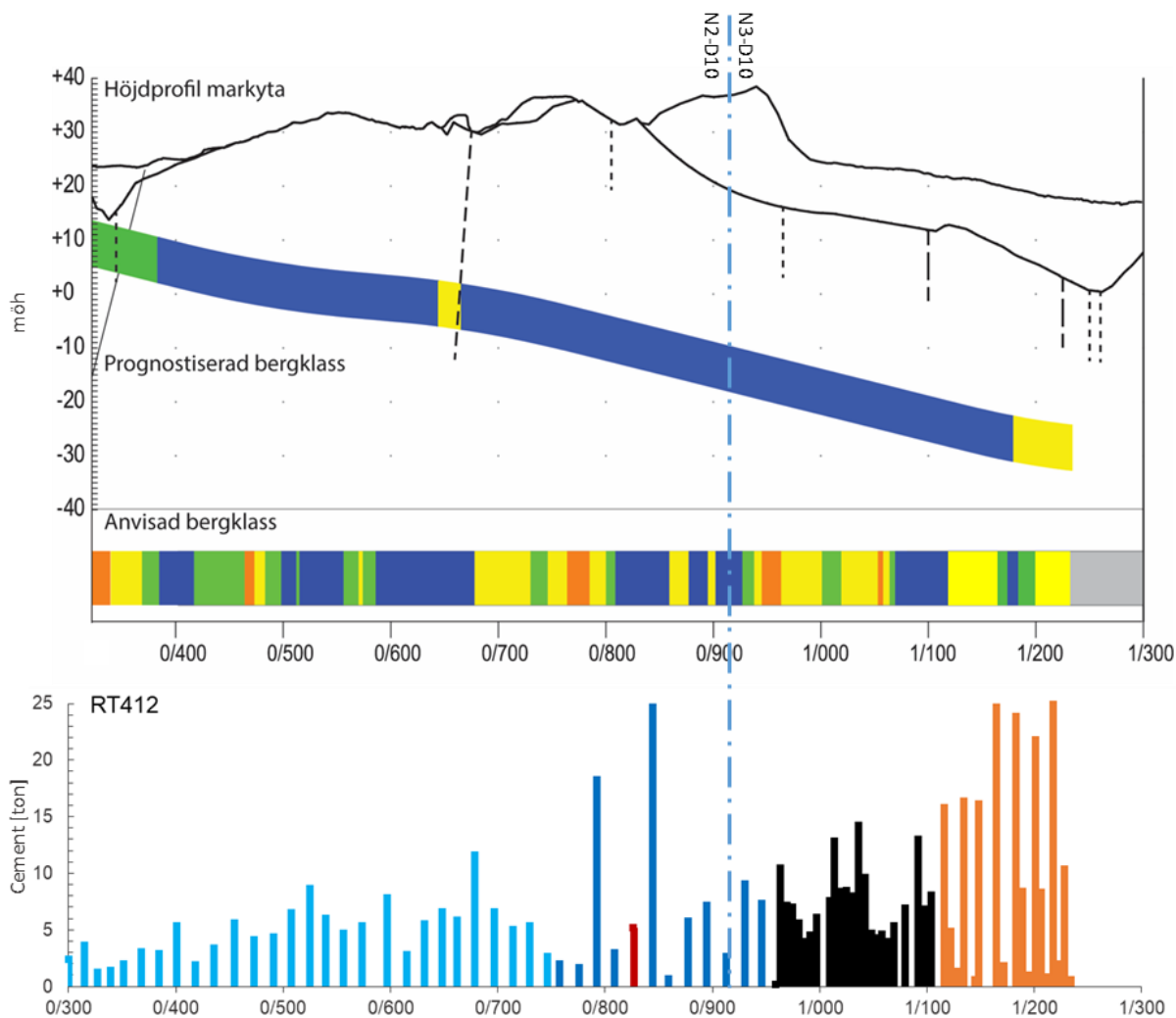
Figur 7-1 redovisar teckenförklaringen och färgkodningen i Figur 7-2 till Figur 7-11. I figurerna redovisas bara de prognosticerade svaghetszonerna. Verkliga karterade svaghetszoner har inte redovisats.



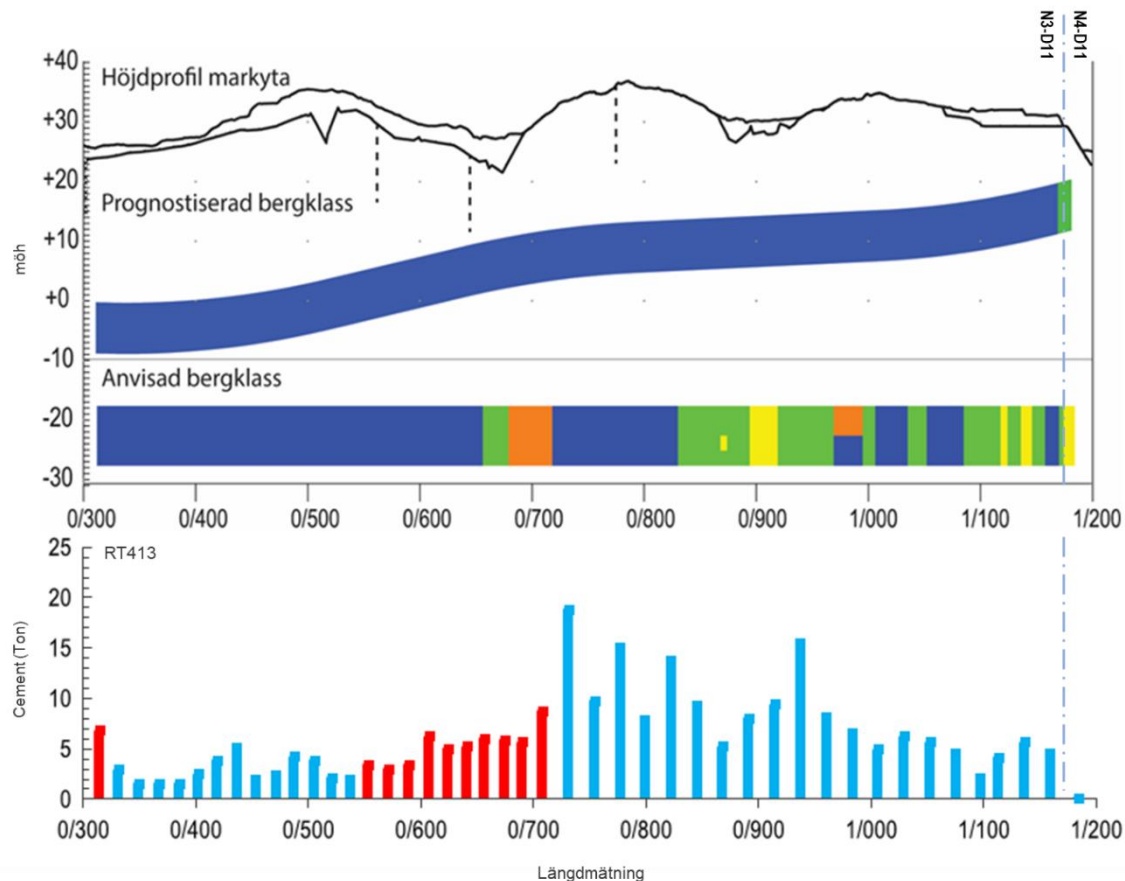
Figur 7-2: Ramptunnel 411, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning 0/360 – 1/360 och injekterad bruksmängd för RT411 mellan längdmätning 0/390 och 1/330. Grå områden visar ej uttagen tunnel.



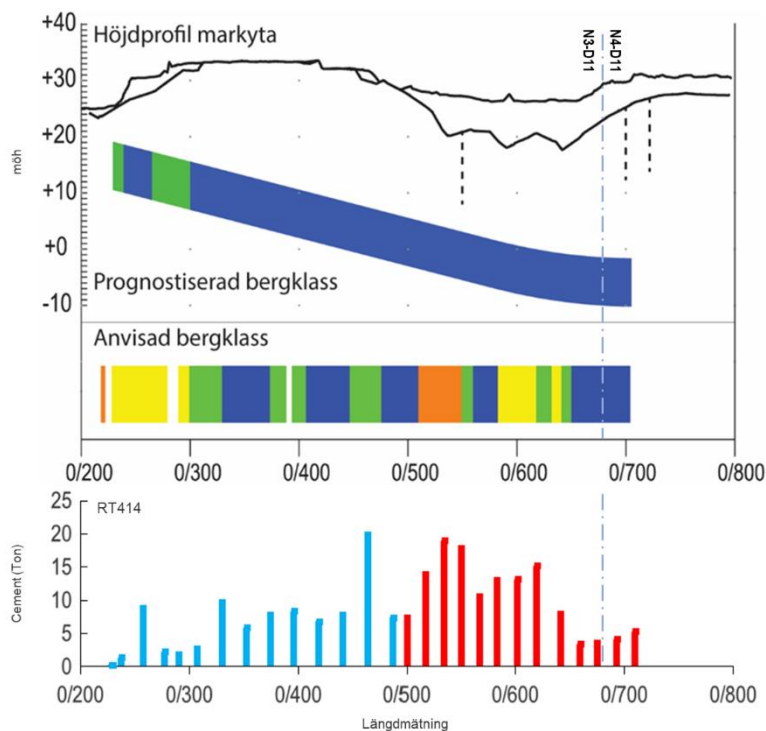
Figur 7-3: Ramptunnel 412 redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning ca 0/140 – 1/100 och injekterad bruksmängd mellan längdmätning 0/150 och 1/100. Grå områden visar ej uttagen tunnel.



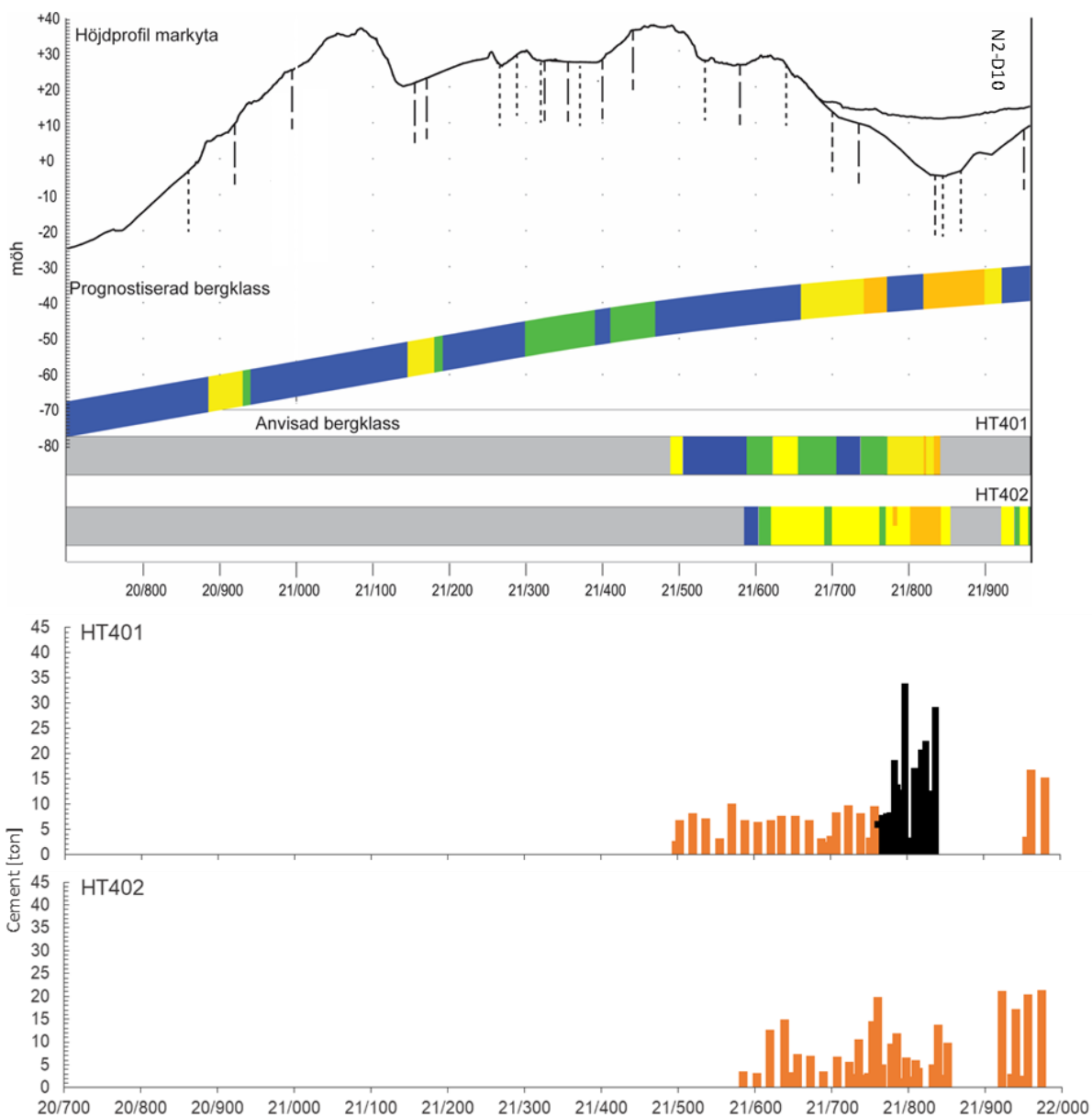
Figur 7-4: Ramptunnel 412, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning ca 0/300 – 1/240 och injekterad bruksmängd mellan längdmätning 0/300 och 1/230. Grå områden visar ej uttagen tunnel.



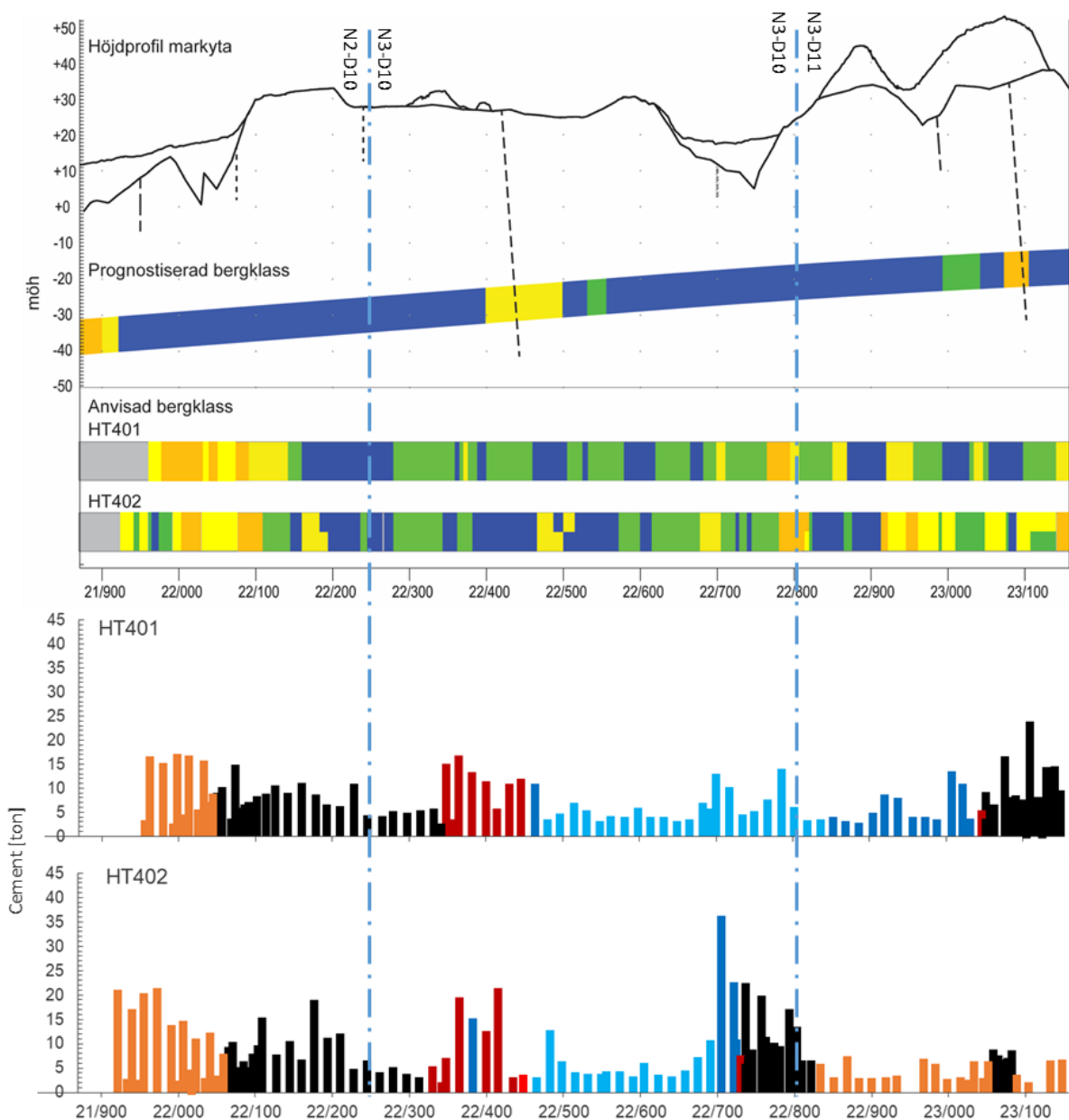
Figur 7-5: Ramptunnel 413, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass samt injikerad bruksmängd längs tunnelsträckningen från längdmätning ca 0/310 – 1/180.



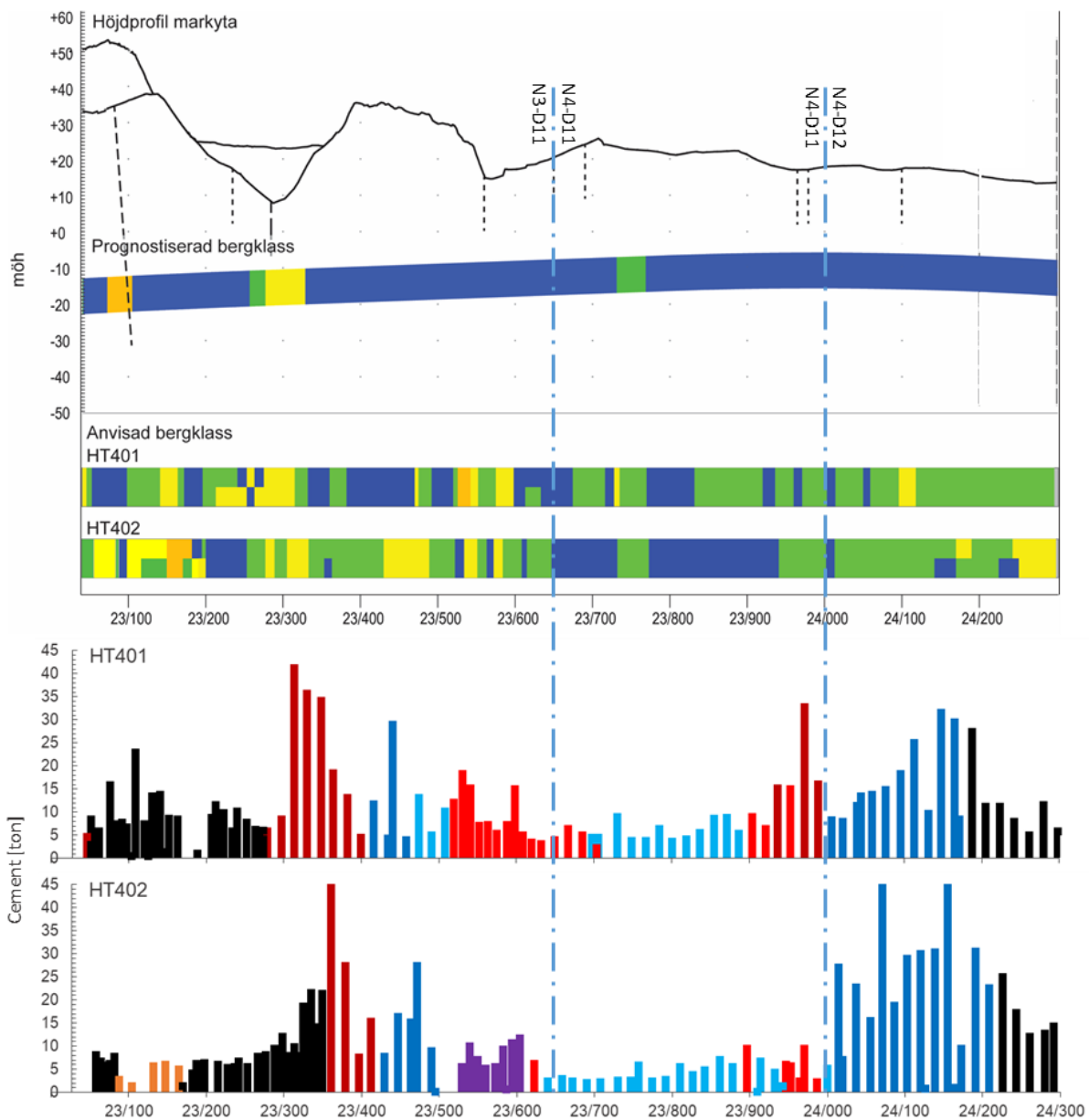
Figur 7-6: Ramptunnel 414, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning ca 0/220 – 0/700 och injekterad bruksmängd mellan 0/220 och 0/710.



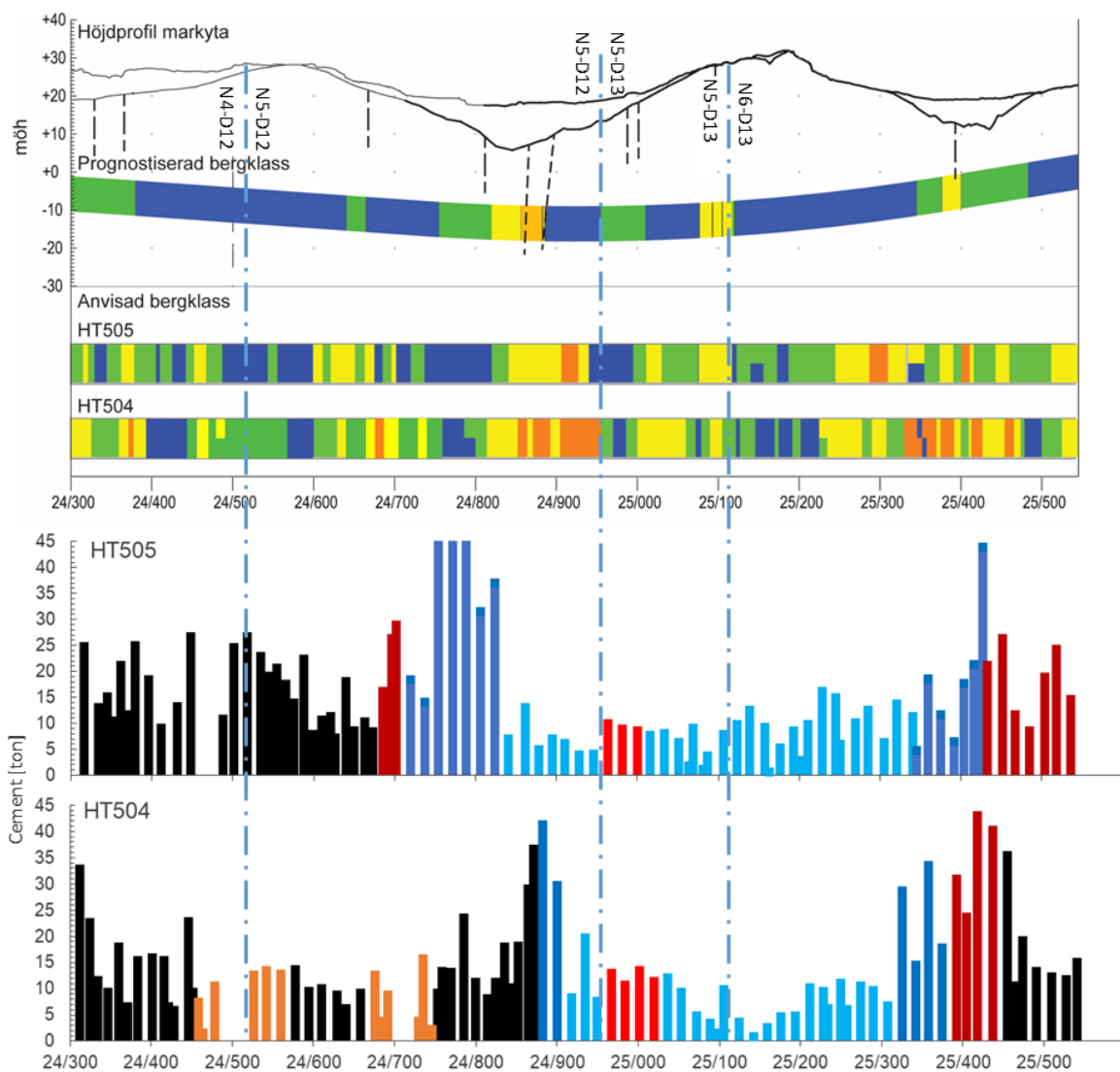
Figur 7-7: Huvudtunnlar 401 och 402, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning 21/490 – 21/840 (HT402: 21/580–21/960) och injekterad bruksmängd mellan 21/490 och 21/970. Grå områden visar ej uttagen tunnel.



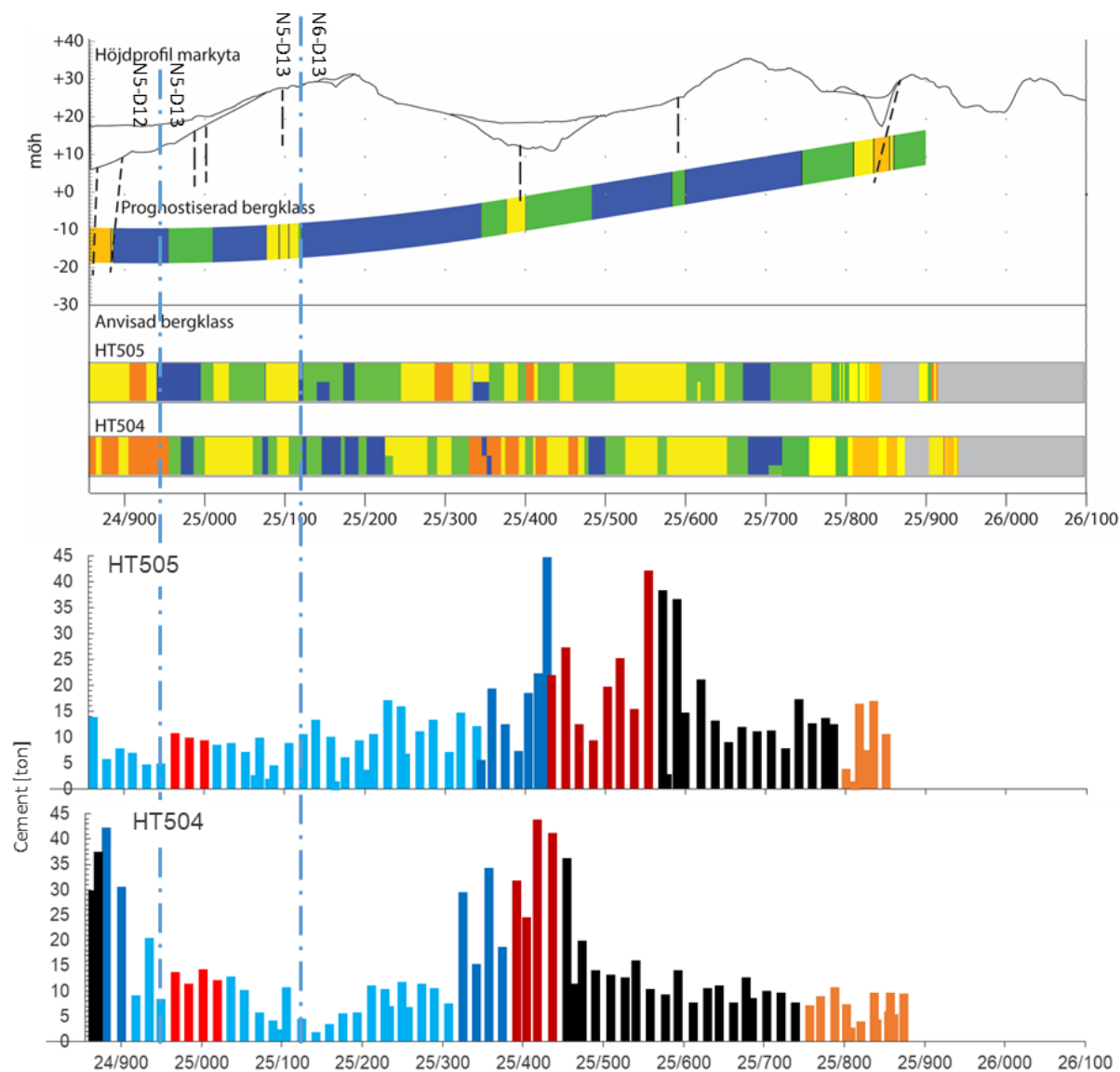
Figur 7-8: Huvudtunnlar 401 och 402, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning 21/930 – 23/150 och injikerad bruksmängd mellan 21/930 – 23/150. Grå områden visar ej uttagen tunnel.



Figur 7-9: Huvudtunnlar 401 och 402, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass samt injekterad bruksmängd längs tunnelsträckningen från längdmätning ca 23/000 – 24/300.



Figur 7-10: Huvudtunnel 505 och 504, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass och injekterad bruksmängd längs tunnelsträckningen från längdmätning 24/300 – 25/500.



Figur 7-11: Huvudtunnel 505 och 504, redovisning av prognostiserad bergklass och verklig anvisad bergklass längs tunnelsträckningen från längdmätning 24/870 – 25/900 och injekterad bruksmängd mellan 24/870 - 25/880. De små områden som visas vid längdmätning ca 25/900 är utförda från ovanjordsentreprenaden. Grå områden visar ej uttagen tunnel.