



**TEKNISK BESKRIVNING  
AV BERGPLINT MELLAN VÄSTRA OCH ÖSTRA BROTTET**

**HEIDELBERG MATERIALS CEMENT SVERIGE AB**



2023-11-24

<b>Uppdrag</b>	MKB för tillståndsansökan för kalkbrytning i Slite
<b>Uppdragsnummer</b>	30031436
<b>Kund</b>	Heidelberg Materials Cement Sverige AB
<b>Datum</b>	2023-11-24
<b>Upprättad av</b>	Per Öhrner (Sweco) och Einar Valtersson (WSP)

# Innehållsförteckning

1	Administrativa uppgifter.....	4
2	Inledning.....	5
3	Beskrivning av Östra och Västra brottet .....	7
3.1	Beskrivning av nuvarande förhållanden.....	7
3.2	Beskrivning av befintliga tunnlar .....	7
3.3	Bergegenskaper i bergplint .....	12
4	Planerade förändringar .....	13
4.1	Höjning av vattennivån i Västra brottet .....	13
4.2	Grundvattennivåer.....	13
4.3	Tätning av befintliga tunnlar mellan Västra och Östra brottet.....	14
4.4	Tätning av bergvägg mellan Västra och Östra brottet .....	17
4.5	Ny transportbandstunnel till Östra brottet .....	20
4.6	Bergplintens stabilitet .....	21
4.7	Stabilitet i östra bergväggen.....	23
5	Vattenhantering.....	24
5.1	Injektering.....	24
6	Närliggande anläggningar .....	28
6.1	Transporter.....	28
6.2	Ledningar längs bergplinten.....	29
7	Mätning/kontroll.....	29
8	Säkerhet och risker .....	30
9	Referenser.....	31

## Bilageförteckning

Bilaga 1 - M2023 Simulering av grundvattenförhållande mellan ÖB och VB, Ver 3A, JH1

Bilaga 2 - Dimensionering av pluggar enligt EPRI

Bilaga 3 - Dimensionering av bergbult

Bilaga 4 - Deformation vid bergyta

# 1 Administrativa uppgifter

## Sökande

Heidelberg Materials Cement Sverige AB

Organisationsnr: 556013–5864

Skolgatan 1

624 22 Slite

## Kontaktperson

Jon Hallgren

E-post: [jon.hallgren@heidelbergmaterials.com](mailto:jon.hallgren@heidelbergmaterials.com)

## 2 Inledning

Heidelberg Materials Cement Sverige AB (vidare benämnt Heidelberg Materials) ansöker om tillstånd till fortsatt och utökad täkt- och vattenverksamhet vid de två befintliga kalkstenstäckerna Västra brottet och File hajdar-täkten på fastigheten Othem Österby 1:229 i Slite på Gotland. Ansökan omfattar även vattenbortledning från Östra brottet, som är en sedan länge färdigutbruten täkt som numera används för bland annat lagring av krossad kalksten. Både Västra och Östra brottet är idag länshållna.

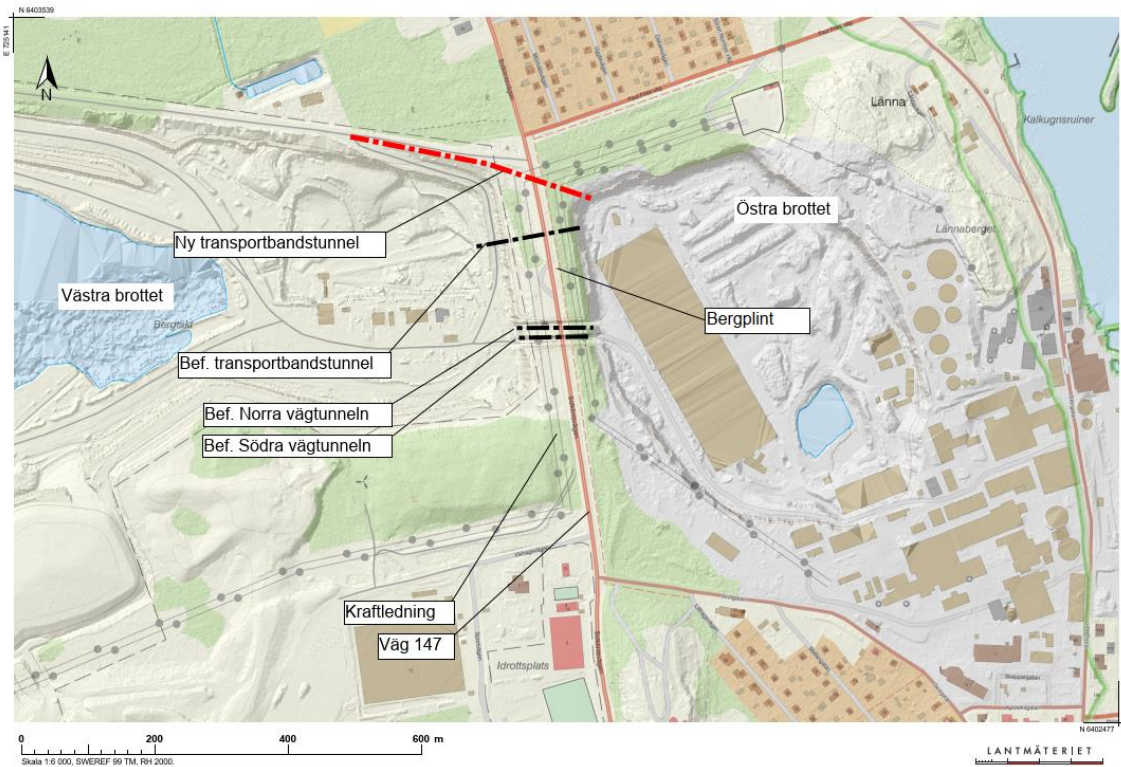
Denna rapport beskriver vilka åtgärder som kommer att vidtas avseende bergplinten mellan Västra och Östra brottet för att kunna höja vattennivån i Västra brottet från nuvarande nivå ca -30 till +1,5.

I nuläget finns det två tunnlar för lastbiltransporter mellan Västra och Östra brottet. Det finns även en mindre tunnel för transportbandet som levererar krossat material från krossanläggningen i Västra brottet till fabriken stenlager i Östra brottet. Tunnlarna löper under Solklintsvägen, väg 147, se Figur 1 och Figur 2. I framtiden, och i enlighet med ansökan, kommer Västra brottet att vattenfyllas medan Östra brottet förblir dränerat. De befintliga tunnarna kommer därför att behöva pluggas och tätas. En ny tunnel för transportband mellan File hajdar-täkten och Östra brottet kommer att anläggas på en högre nivå än de befintliga tunnarna. Bergplinten mellan Västra och Östra brottet kommer att ridåinjekteras, för att minska inläckage av vatten till Östra brottet.

I denna beskrivning används koordinatsystem SWEREF 99 TM och höjdsystem RH2000 om inget annat anges.



Figur 1 - Översiktsskarta Västra och Östra brottet. (Kartunderlag: <https://minkarta.lantmateriet.se/>)



Figur 2 - Detaljkarta bergplint med läge för tunnlar. (Kartunderlag: <https://minkarta.lantmateriet.se/>)

## 3 Beskrivning av Östra och Västra brottet

### 3.1 Beskrivning av nuvarande förhållanden

Västra brottet är brutet i två pallar där pall 2 är brutet till ett största djup om -48. Både pall 1 i Västra brottet och Östra Brottet har en bottenivå på ca -26. Det är på den nivån som de båda brotten är förbundna med tunnlar. Ingen brytning sker i pall 2 eller i Östra brottet, varför vattenfyllning av pall 2 har tillåtits ske till en nivå om ca -30. Inom pall 2 finns en mindre djupare del i anslutning till krossen (med nivån ca -40) vilken hålls dränerad.

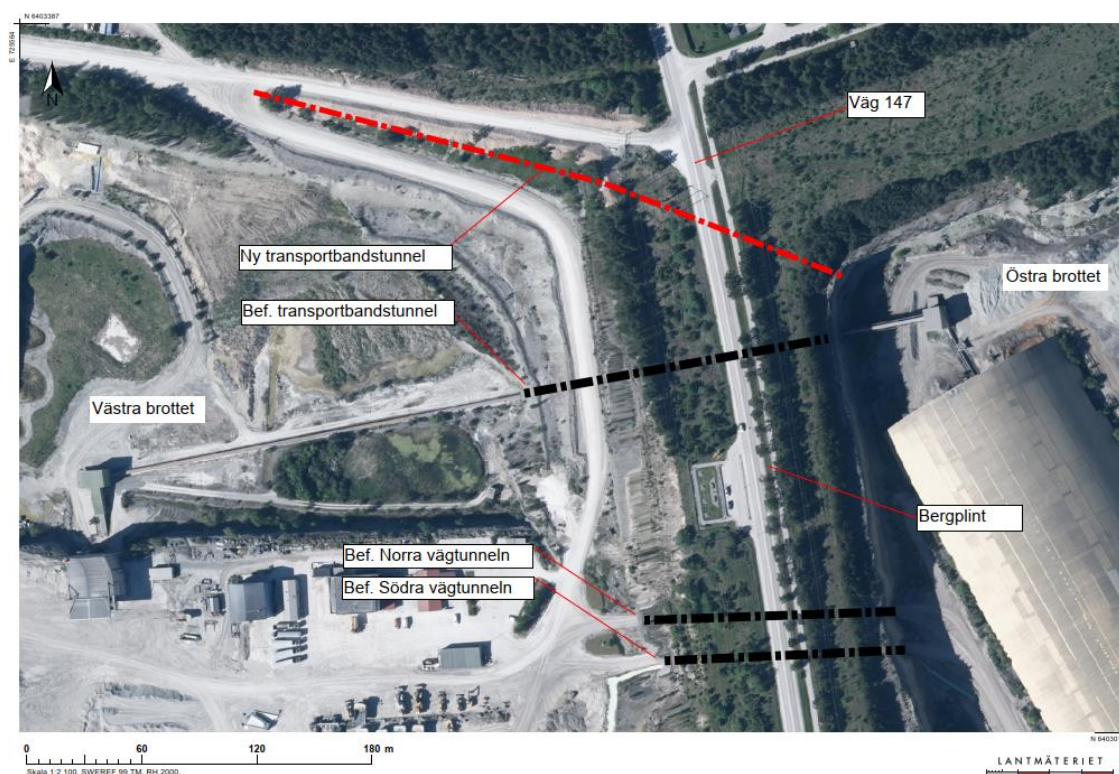
Länshållningen av de bägge täkterna har skapat en betydande avsänkningstratt för grundvattennivåerna i omgivningen. Grundvattenströmningen från omgivningen är därmed riktad mot täkterna. Den västra sidan av Västra brottet har under år 2022–2023 tätats genom ridåinjektering för att minska grundvattenpåverkan i denna riktning.

Omgivande marknivå är generellt belägen på ca +4. Väg 147 som löper i nordsydlig riktning på vägplinten mellan täkterna har en överyta på ca +9.

Inga vattendrag rinner till vare sig Västra eller Östra brottet. Avrinningsområdet för Västra brottet begränsas av skärmdiken.

### 3.2 Beskrivning av befintliga tunnlar

Det finns tre befintliga tunnlar igenom bergplinten; två större vägtunnlar mellan brotten samt en mindre transportbandstunnel. Tunnlarnas läge visas i Figur 3.



Figur 3 – Detaljkarta som visar de befintliga tunnlar och ungefärligt läge för den nya transportbandstunneln. (Kartunderlag: <https://minkarta.lantmateriet.se/>)

### 3.2.1 Transportbandstunnel

Den befintliga transportbandstunneln har ett rektangulärt tvärsnitt, är 4 m bred, 3 m hög, 170 m lång och går igenom bergplinten. Förutom transportbandet innehåller tunneln även ett skärmtak monterat över bandet som döljer befintlig bergförstärkning i taket. Väggarna är oförstärkta.

### 3.2.2 Norra vägtunneln

Den norra vägtunneln har ett rektangulärt tvärsnitt, är 7,5 m bred, 4,6 m hög, 125 m lång och går igenom bergplinten. Tunneln innehåller en vägbana och ljusinstallationer. Tunneltaket är klätt med ett bergnät och förstärkt med bultar (se Figur 4). Väggarna är oförstärkta. Vid påslagen är påslagsväggen över tunneltaket förstärkt med dubbla horisontella bultrader (se Figur 5).





Figur 4 - Norra vägtunneln i riktning mot Västra brottet.



Figur 5 - Norra vägtunnelns påslag vid Östra brottet.

### 3.2.3 Södra vägtunneln

Den södra vägtunneln har ett rektangulärt tvärsnitt, är 8 m bred, 11,8 m hög, 125 m lång och går igenom bergplinten. Tunneln innehåller en vägbana och ljusinstallationer. Tunneltaket är systematiskt förstärkt med bultar (se Figur 6). Väggarna är oförstärkta, förutom vid tunnelns mynningar där tunna lager av sprutbetong förekommer på väggarna. Vid påslagen är påslagsväggen över tunneltaket förstärkt med bultar samt ett tunt lager sprutbetong. De tunna lagren av sprutbetong har släppt över stora ytor och fyller inte längre någon funktion.



Figur 6 - Södra vägtunnelns östra mynning.

### 3.3 Bergegenskaper i bergplint

Bergplinten består av lagrad kalksten och kalkrik märgelsten med horisontella bäddningsplan. Märgelstenen är växellagrad med mer eller mindre leriga skikt. Vertikalt stående sprickor förekommer slumpmässigt och glest i bergplinten. Storskaligt stupar bäddningsplanen svagt mot sydost (0,15–0,3 grader) men lokalt uppträder planen horisontellt. Inga signifikanta vertikala sprickor i bergplinten har identifierats.

En fältundersökning ska utföras för att närmare undersöka och verifiera bergplintens geologiska, hydrogeologiska och mekaniska egenskaper. Tills vidare har bergmassans mekaniska egenskaper uppskattats och bedömts baserat på bergplintens övergripande geologiska egenskaper (märgel med i huvudsak horisontella lagringsplan med ett avstånd ca 1,5 meter och ett fåtal vertikala sprickor) kopplat till Hoek & Browns brottvillkor för bergmassor (Hoek-Brown, 2002).

Tabell 1 - Bergmekaniska parametrar

Parameter	Betäckning	Värde	Enhet
Enaxiell tryckhållfasthet	$\sigma_{ci}$	25	MPa
Global hållfasthet	$\sigma_{cm}$	6,76	MPa
E-modul	E	18,3	GPa
Friktionsvinkel	$\theta$	35,34	grader
Kohesion	C	1,74	MPa

Bergets vattenförande förmåga är markant högre i de horisontella sprickplanens riktning än vertikalt. Sprickplanens förekomst är generellt kontinuerlig inom Östra och Västra brotten, dock förekommer viss heterogenitet med avseende på konduktivitet. De mest vattenförande sprickplanen är lokaliserade på nivåerna ca -10, -22, -32 och -38 men lokal variation och mindre vattenförande lager förekommer mellan huvudnivåerna.

Den mest relevanta underlagsdatan för att beskriva bergets hydrauliska konduktivitet är ridåinjekteringen längs Västra brottets västra och sydvästra kant. Totalt borrades och testades >150 borrhål, borrade till ca 60 m djup. Skattade värden för hydraulisk konduktivitet, Q/dh/L, var i storleksordningen 3E-7 m/s, se avsnitt 5.1. Värdet avser medianvärdet.

## 4 Planerade förändringar

### 4.1 Höjning av vattennivån i Västra brottet

När Heidelberg Materials infrastruktur (exempelvis krossen) har flyttats, verksamheten i Västra brottet har upphört, befintliga tunnlar har tätats och en ny tunnel har anlagts kommer vattennivån att tillåtas börja stiga. Hastigheten med vilken nivån stiger är beroende av övrig vattenhantering. Från påbörjad påfyllning tills en slutlig stationär nivå har infunnit sig beräknas ta 30-40 år.

När vattennivån i Västra brottet är mellan +1 och +2 sker avrinning från täktsjön med självfall till Östra brottet via antingen en ledning i den nya tunneln eller via en ny kulvert som anläggs mellan Västra och Östra brottet. Det vatten som rinner till Östra brottet från täktsjön kommer tillsammans med inläckande vatten i Östra brottet att pumpas till Östersjön via hamnområdet.

Då avrinningsområdet för Västra brottet är ungefär 140 ha, vilket endast är 43 % större än den blivande vattenytans area på 98 ha i Västra brottet, kommer vattennivån bli relativt okänslig för extremnederbörd.

SMHI har för perioden 2071–2100 beräknat havsvattenståndet för 100 års återkomsttid till ca +1,40 i RH00 för ett högt scenario. Nivån är beräknad för nordvästra Gotland som får de mest extrema nivåerna på Gotland. (SMHI, 2008). Havsvattenståndet +1,40 i höjdsystemet RH00 motsvarar +1,56 i RH2000.

Dagens medelhavsvattennivå i Östersjön kring Gotland är -0,13 i RH00, vilket motsvarar +0,03 i RH2000.

### 4.2 Grundvattennivåer

Runt Västra brottet kommer grundvattennivåerna stiga till nära den vattennivå Västra brottet kommer ha efter att ha vattenfylts. Området runt Östra brottet kommer även i framtiden att vara dränerat till en nivå på -26. Vid Västra brottets östligaste del kommer det bli en tydlig grundvattengradient med riktning mot Östra brottet.

Bergplinten är i dagsläget i det närmaste helt dränerad. Grundvattennivåerna i bergplinten kommer att stiga när vattennivån i Västra brottet stiger till ca +1,5 vilket medför ensidigt vattentryck mot bergplinten. Grundvattennivåerna i bergplinten har simulerats för hög- respektive lågvattensituation.

Beräkningarna är utförda med den tidigare etablerade och kalibrerade grundvattenmodellen över området kring Slite och File hajdar. Modellen är upprättad med programvaran Geoan och presenteras i detalj i en underbilaga till bilaga B3 i ansökan. Det ursprungliga syftet med den upprättade modellen var att simulera grundvattenförhållandena i ett mycket stort regionalt område kring Slite och File hajdar, det gör att modellens detaljeringsnivå i det mycket lokala området mellan Västra och Östra brotten är begränsad. En fördel med att använda den regionala modellen är att den är kalibrerad. Det betyder att de resultat som produceras av modellen har jämförts med uppmätta värden. Modellen förmår därför att med god noggrannhet reproducera t.ex. grundvatteninflödet till Västra och Östra brotten.

I modellen är den horisontella upplösningen (cellstorleken) i det studerade området 33 x 33 m. Det betyder att den beräknade variationen i grundvattennivå kommer horisontellt att vara linjär inom beräkningscellerna som är (horisontellt) 33 m. Vertikalt är upplösningen mycket högre, från markytan och ned till ett djup av ca 40 m inkluderar modellen ca 10 lager med beräkningsceller där lagren har varierande tjocklek.

De två vägtunnlarna och transportbandstunneln har inkluderats i modellen, se Figur 11. Den nya transportbandstunneln har inte inkluderats i modellen, utan modellen har utgått ifrån att

denna tunnel kommer att byggas med ett lågpermeabelt betongfoder. Ett sådant betongfoder kommer att minimera tunnelns påverkan på det omgivande grundvattensystemet. Vägtunneln och transportbandstunneln är för närvarande öppna mot omgivande berg.

Bergplintens hydrogeologiska egenskaper är inte kända i detalj. Inga undersökningsborrhål finns i bergplinten. Bergplintens hydrogeologiska egenskaper i modellen baseras på de egenskaper som har observerats i Västra brottet (vattenförande lager), omgivande borrhål och modellens kalibrering.

Ridåinjekteringen och tunnelpluggarna begränsar tydligt flödet genom bergplinten. De beräknade trycknivåerna visar att ett stort tryckfall sker i de västra delarna av bergplinten, genom ridåinjekteringen och tunnelpluggarna. De östra delarna av plinten är dränerade under hela året. Mättade förhållanden förekommer främst i, och över, det översta vattenförande lagret under vintern (högvattensituationen). I bergplintens södra och norra del, söder och norr om tunnarna, kan mättade förhållanden förekomma i delar av det översta vattenförande lagret även under sommaren. Inflödet till tunnarna beror i hög grad på tunnelpluggarnas hydrauliska resistans (hydraulisk resistans är en kombination av genomsläpplighet och längd). För att begränsa inflödet är det nödvändigt att pluggarna utförs med bästa tillgängliga teknik.

Beräkningarna och modellens resultat redovisas mer ingående i Bilaga 1.

### 4.3 Tätning av befintliga tunnlar mellan Västra och Östra brottet

De befintliga tunnarna planeras att pluggas med platsgjutna betongkonstruktioner. Pluggarna kommer placeras i samma läge som den tänkta ridåinjekteringen. De återstående delarna av tunnarna, nedströms pluggarna, ska säkras för att möjliggöra verksamhet i de torrlagda delarna av tunneln. Behovet av kompletterande åtgärder (t.ex. bergbultning eller injektering) beror främst på vilken typ av verksamhet som placeras i tunnarna. Pluggarna ska konstrueras med en teknisk livslängd på 100 år.

Pluggarnas längd, som presenteras i Tabell 2 har dimensionerats utifrån riktlinjer från Electric Power Research Institute (EPRI) avsedda för pluggning av tunnlar i vattenkraftsanläggningar (EPRI, 1987).

Tabell 2 - Dimensionerande plugglängder

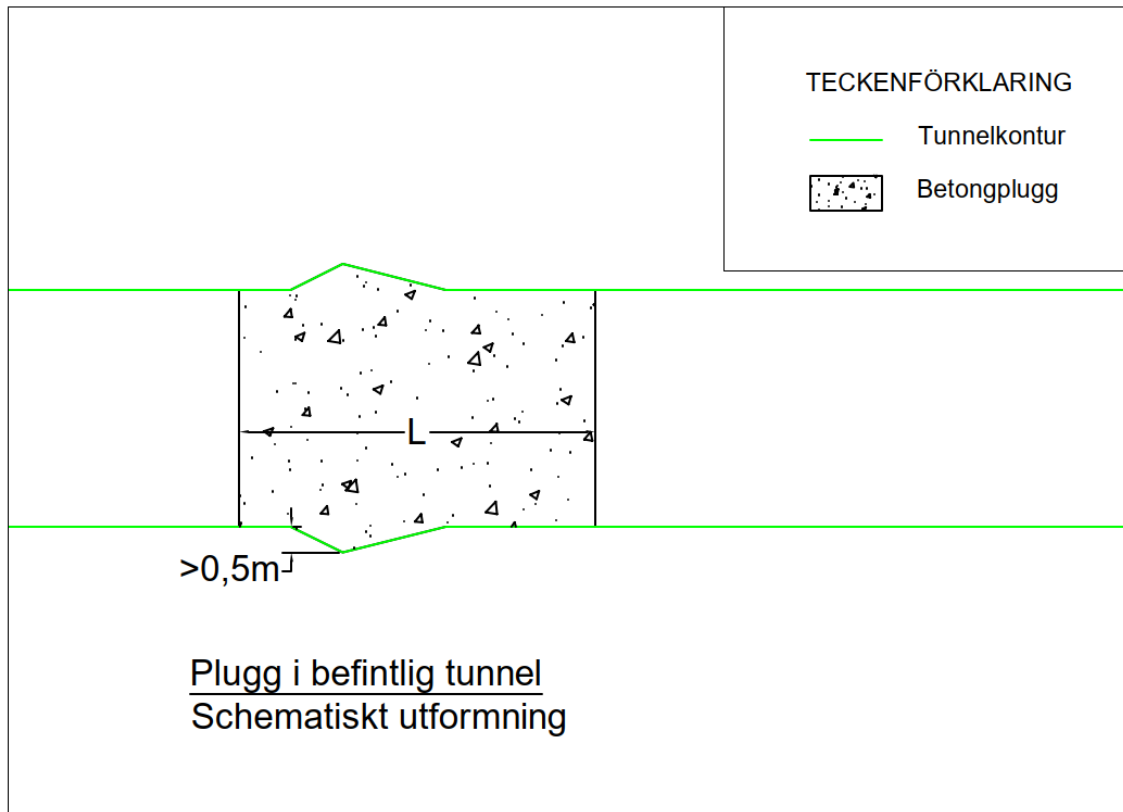
Tunnel	Minsta längd [m]	Dimensionerande kriterier
<b>Befintlig transportbandstunnel</b>	4,6	Minsta längd
<b>Norra vägtunneln</b>	6,9	1,5 - 2 ggr tunneldiameter
<b>Södra vägtunneln</b>	12	1,5 - 2 ggr tunneldiameter

Pluggarna dimensioneras för att minst uppfylla kriterier enligt EPRI. För fullständiga beräkningar se Bilaga 2.

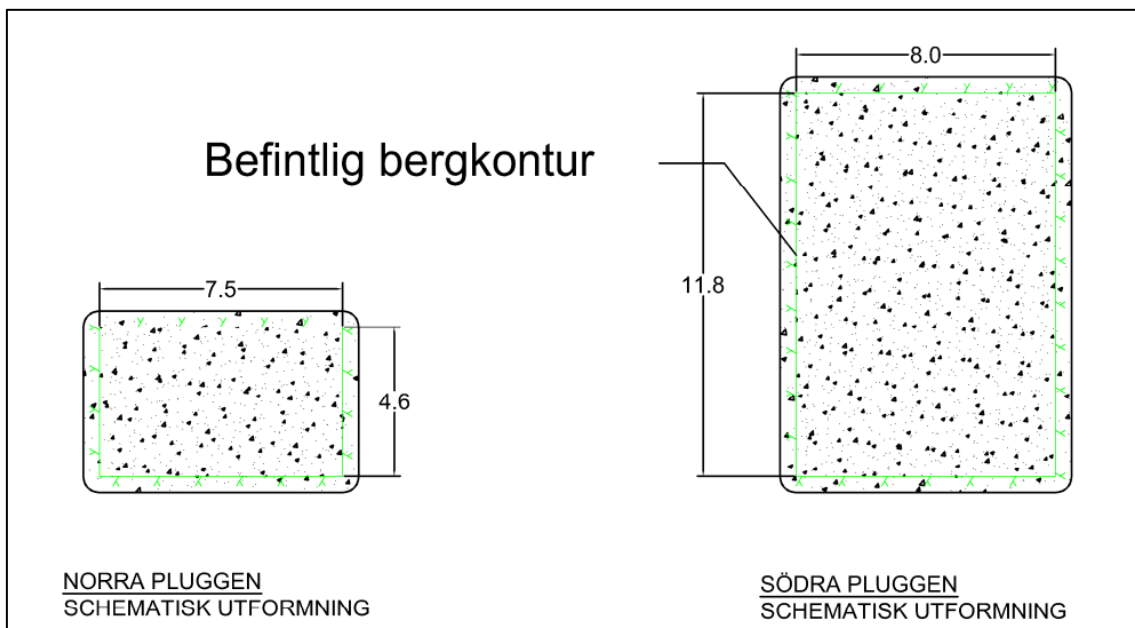
- Minsta längd på 1,5 till 2 gånger pluggdiameter
- Minsta längd på 4,6 m
- Högsta randskjuvspänning mellan betong och berg på 0,4–1,7 MPa

För att säkerställa tätheten kommer också kontakt- och ridåinjektering runt pluggarna att utföras. Schematisk utformning av pluggarna beskrivs i Figur 7. Förutom en erforderlig längd ska pluggarna utformas med en förtagning som strossas in minst 0,5 m i omgivande berg för att motverka glidning. För vägtunnarna, som dimensioneras utifrån det första kriteriet, har den kortaste längden i intervallet valts eftersom det vattentryck som pluggarna förväntas utsättas för

är lågt. Den beräknade randspänningen för samtliga pluggarna är ca 0,06 MPa. För fullständiga beräkningar se Bilaga 2.



Figur 7 - Schematisk längdsektion igenom plugg. Längden L motsvarar längderna i Tabell 2.

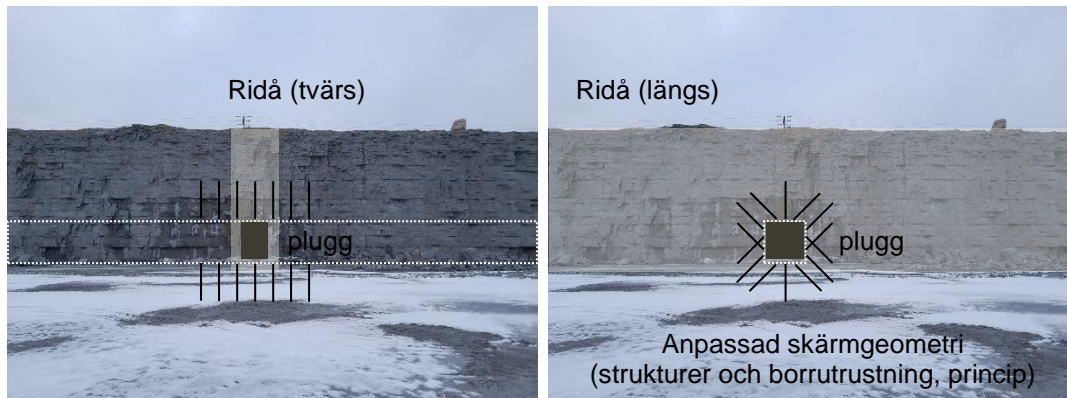


Figur 8 - Schematisk tvärsnitt igenom pluggar för befintliga vägtunnlar. Snittet inkluderar förtagningen.

Bergförstärkning i de befintliga tunnlar ska uppdateras och kompletteras vid behov för att säkerställa långsiktig stabilitet över hela den tekniska livslängden.

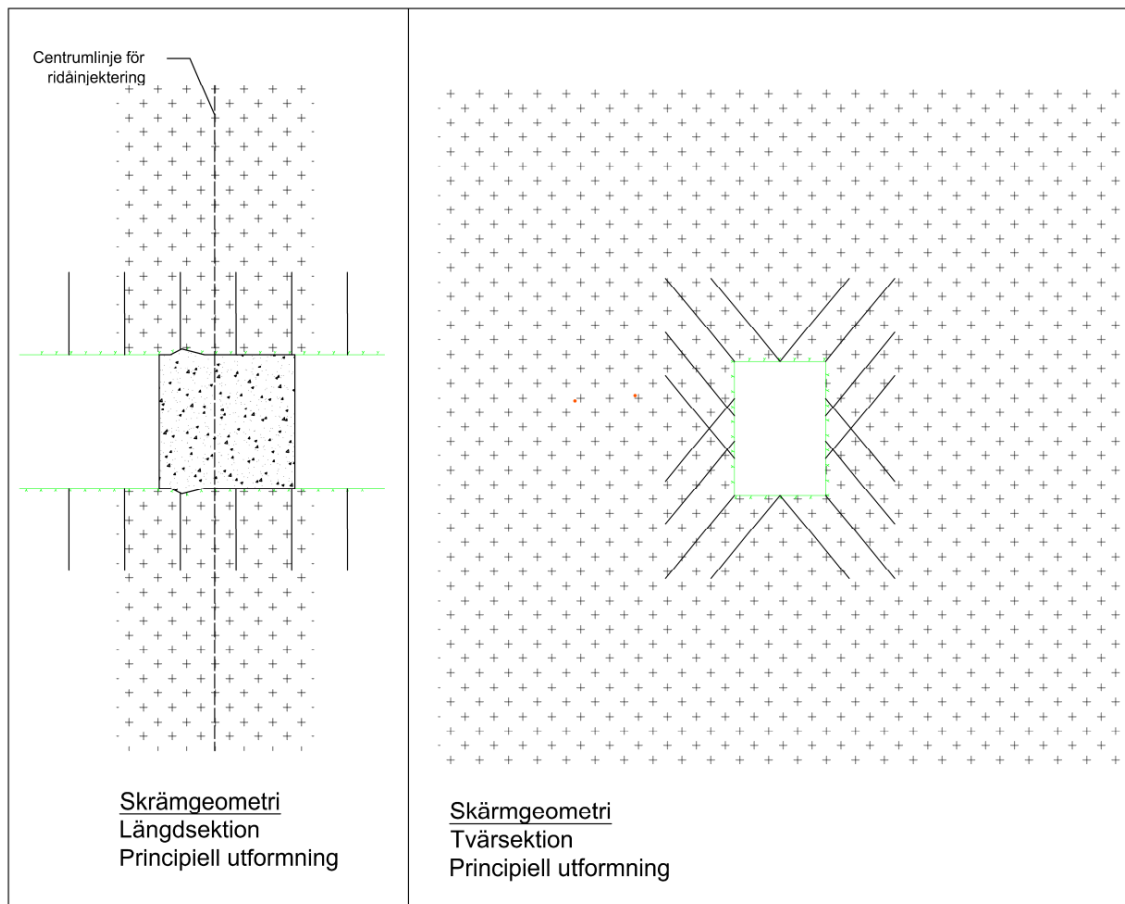
En principskiss för skärmgeometri för injektering i anslutning till ridå och plugg visas i Figur 9. Anpassning görs för att träffa huvudsakligt vattenförande strukturer med hänsyn till tunnelgeometri och borrarutrustning så att borrhningen praktiskt kan utföras.

Ridåinjektering och injektering av berg i anslutning till pluggar utförs enligt samma principer som för tidigare utförd ridåinjektering vid Västra brottet, vilket beskrivs i kapitel 5.1.



Figur 9 - En principskiss för skärmgeometri för injektering vid anslutning mellan ridå (grå) och plugg (svart). Vänstra bilden - tvärs ridå och längs tunnel. Högra bilden – längs ridå och tvärs tunnel. Anpassad skärmgeometri med hänsyn till vattenförande strukturer, tunnelgeometri och borrarutrustning.





Figur 10 - Principiell utformning av injekterings-skärmar, där schematiska injekteringshål är markerade i svart. Tunnelkonturen är markerad i grönt och ridåinjekteringens uppskattade utbredning är skrafferad med kryss. Betongpluggen är skrafferad enligt Figur 7, och dess läge är illustrativt.

#### 4.4 Tätning av bergvägg mellan Västra och Östra brottet

Ridåinjektering innebär att man tätar sprickor i berget genom att via en rad med borrhål injektera ett tätande medel. Tätningsmedlet är tänkt att utgöras av cement. Arbetet utförs genom borrhning, vattenförlustmätning och injektering. Effekten när det fungerar väl blir att genomsläppligheten och vattenflödet tvärs ridån minskar.

Teknikvalet för planerat arbete överensstämmer med det som tidigare utförts vid Västra brottet, se avsnitt 5.1. Detta kan kort sammanfattas med borrhning av ca 50 m djupa borrhål, med en diameter på ca 115 mm, med foderrör, och som injekteras med ett cementbaserat injekteringsmaterial. Borrdjupet ovan inkluderar ca 8 m jordborrning för att nå bergytan från markövertytan.

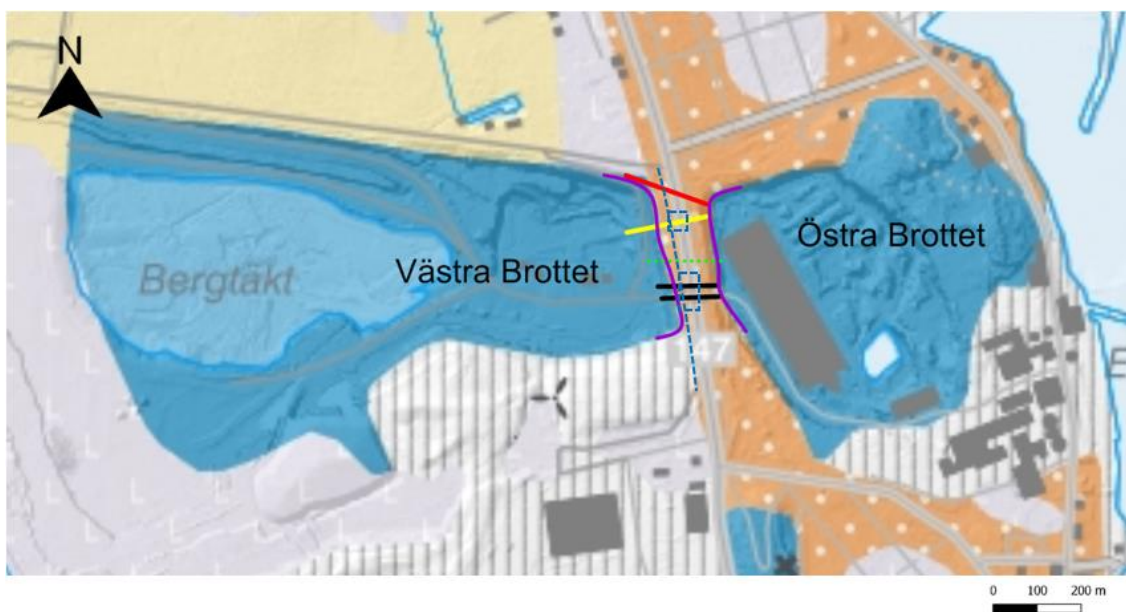
Borrhåls längden för ridån har anpassats till bergytans nivå längs bergplintens bergyta (nivå +2) och bottenivån för Östra brottet, -26 samt en marginal under nivån i Östra brottet motsvarande 10–20 m.

Borrhning utförs med så kallad "split-spacing" där man inleder med ett större inbördes hålavstånd för att sedan successivt reducera detta avstånd med mellanliggande borrhål. Borrhålen vattenförlustmäts (3 bars tryck vid markytan) och injekteras på en eller flera olika nivåer (med

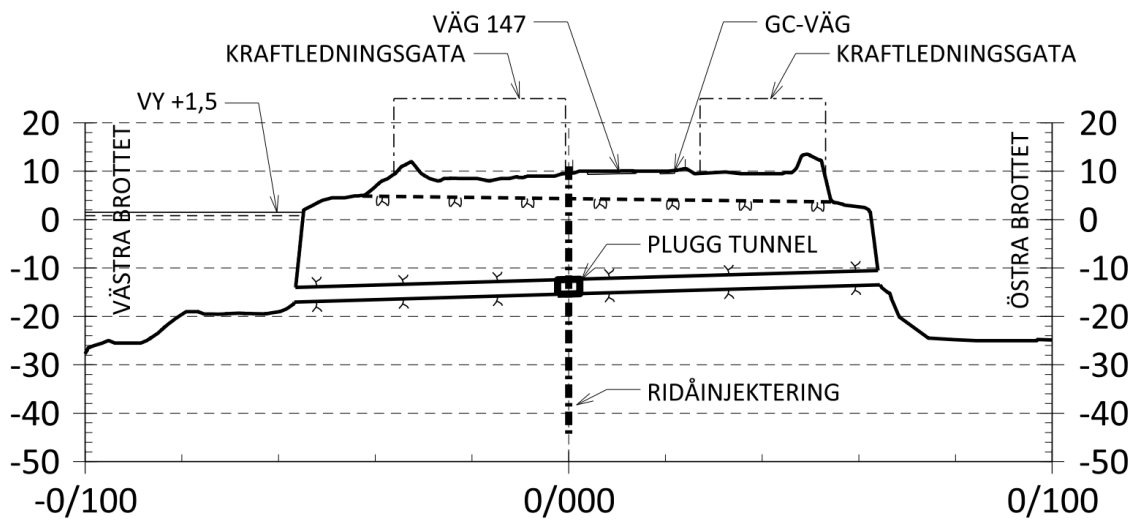
ungefär 3 till 10 bar). Injekteringstrycket hålls lågt för att begränsa spridning och minska risken för deformation.

Ridån planeras preliminärt placeras väster om väg 147. Ridåns bredd tvärs bergplinten antas vara ungefär 20 m. Ridån ansluter till (korsar) läge för pluggarna i de tre befintliga tunnlarna, se Figur 11. Tätning av tunnel utförs med anpassad skärm, se exempel i Figur 9. Tunneln injekteras i huvudsak i anslutning till ridå och plugg.

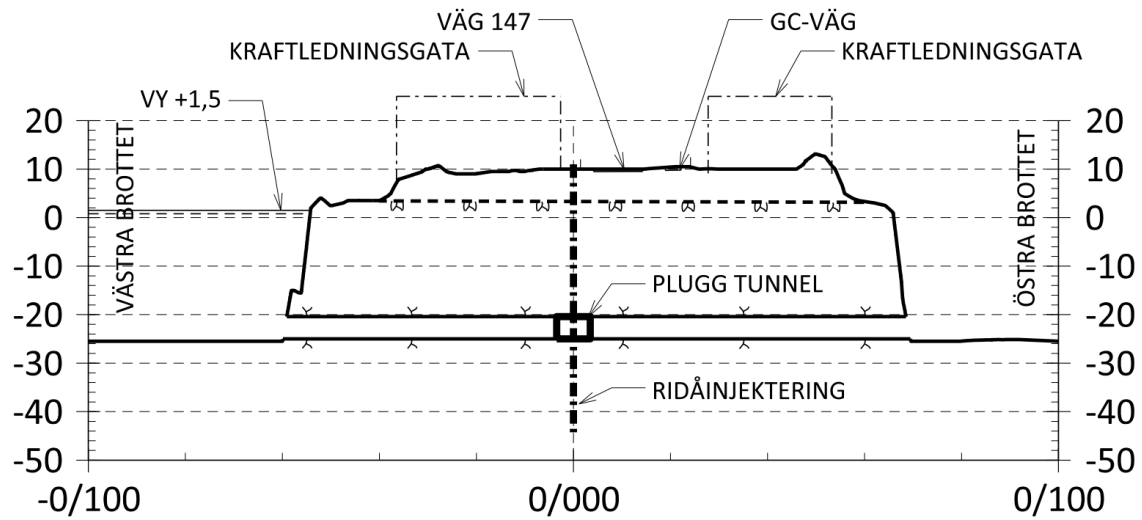
I samband med ridåinjekteringen görs dokumentation av bergöverytan längs med bergplinten. Om bergöverytan är lägre än +2 kan kompletterande tätning behöva göras upp till ca +2.5 genom att t.ex. gräva en slitsmur i en slurryblandning av cement bentonit och vatten vilken stelnar och kommer därefter att utgöra en tätande konstruktion mot bergöverytan.



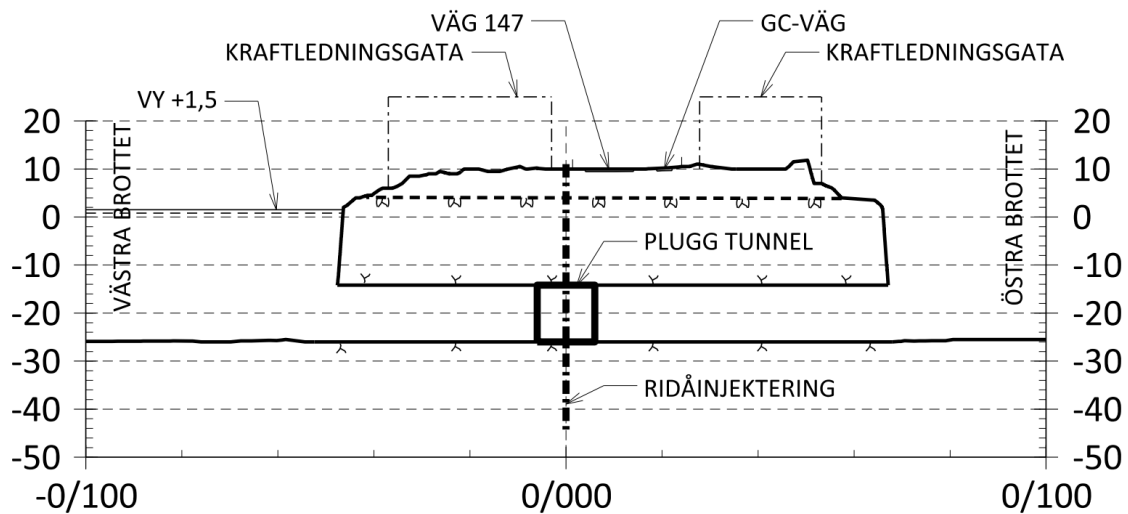
Figur 11 - De olika tunnlarna som skär genom bergplinten framgår av figuren: De två svarta linjerna visar läget för de två vägtunnlarna genom plinten på nivån ca -26. Den gula linjen visar läget för befintlig transportbandstunnel från krossen i Västra brottet till Östra brottet. Nivån för transportbandstunneln varierar från ca -32 i Västra brottet till ca -16 i Östra brottet. Den röda linjen markerar planerat läge för en ny transportbandstunnel, nivå ca +1 (väster) till -13 (öster). Den gröna punktstreckade linjen visar läget för en teoretisk sektion genom bergplinten. Bergplintens storlek framgår av de två lila linjerna. Bergplintens bredd i väst-öst riktning varierar mellan ungefär 100 m till 130 m. I figuren har SGU:s jordartskarta använts som bakgrund. Blå, streckad linje, ungefärlig placering ridå. Blå fyrkanter, pluggar för befintliga tunnlarna.



Figur 12 - Typsektion tätning befintlig transportbandstunnel



Figur 13 - Typsektion tätning befintlig norra vägtunneln



Figur 14 - Typsektion tätning befintlig södra vägtunneln

## 4.5 Ny transportbandstunnel till Östra brottet

Bolaget avser anlägga en ny tunnel under Solklintsvägen med en ungefärlig placering enligt röd linje i Figur 11. Den nya tunneln anläggs för att möjliggöra transporter mellan File haidar-täkten och fabriksområdet. Den nya tunneln kommer att sluta nedåt från väst till öst.

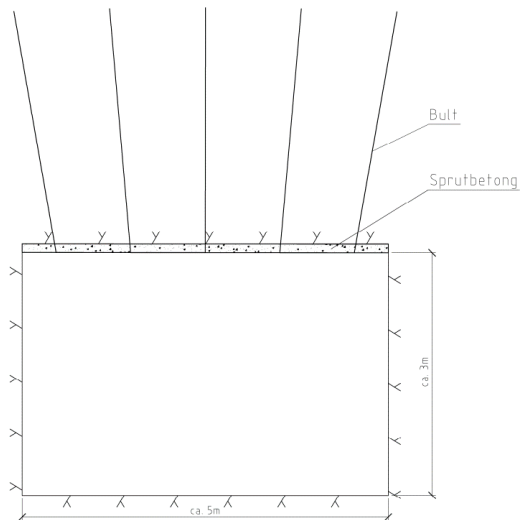
Den nya tunnelns tvärsnitt kommer att vara rektangulärt, ca 3 m högt och 5 m brett. Botten på tunnelns mynning anläggs över nivån +2. Detta innebär att mynningens botten kommer att ligga på en högre nivå än högsta vattennivån i Västra brottet (ca +1,5), när Västra brottet har vattenfyllts. Den nya tunneln kommer bestå av två delar; en bergtunnel, och en tät betongtunnel med tillhörande betongtråg som anläggs från markytan ned till 7,5 m under befintlig bergövertya där den ansluter till bergtunneln med ett inslagsvalv. Inslagsvalvet bör korsa ridåinjekteringen.

Bergtunnelns tak planeras förstärkas med bult och sprutbetong enligt princip i Figur 15. Väggarna planeras förbli oförstärkta för majoriteten av tunnelsträckningen. Vid tunnelns mynningar förstärks tunneln med inslagsvalv. Den bergförlagda tunneln kommer att tätas genom injektering, alternativt en tät betonglining. I Bilaga 3 redovisas en analytisk dimensionering av bergbult med avseende på en upphängd löskärna. Det bärande huvudsystemet (bult och sprutbetong) ska uppnå en teknisk livslängd på 120 år genom fullständig ingjutning av bultar och god vidhäftning mellan sprutbetong och berg.

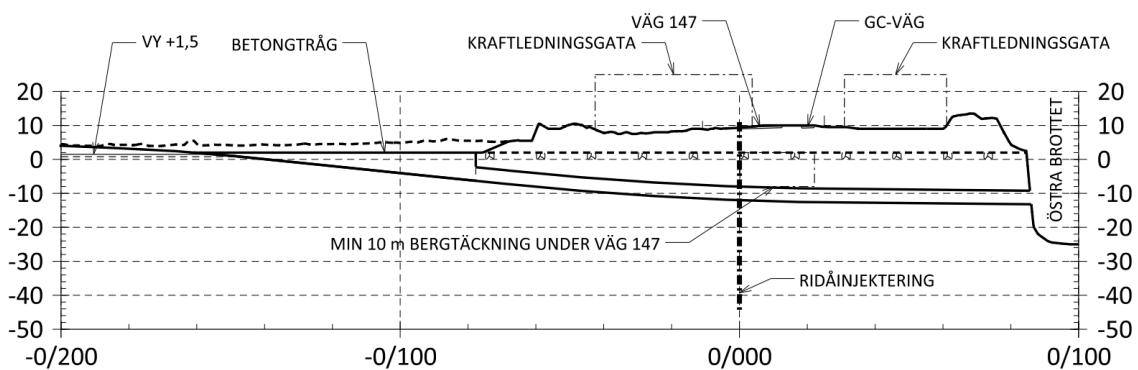
Avståndet mellan bergövertya och tunnelkonturen ska, under väg 147, vara minst 10 m för att minimera risken för eventuell påverkan på den statliga vägens grundläggning vid tunneldrivning, se kapitel 6.1.

Inläckage i tunneln kommer ledas med självfall till Östra brottet där det leds till sedimentationsdammen i Östra brottet.

Eventuell injektering av tunnel utförs med anpassad skärmgeometri, se exempel i Figur 9.



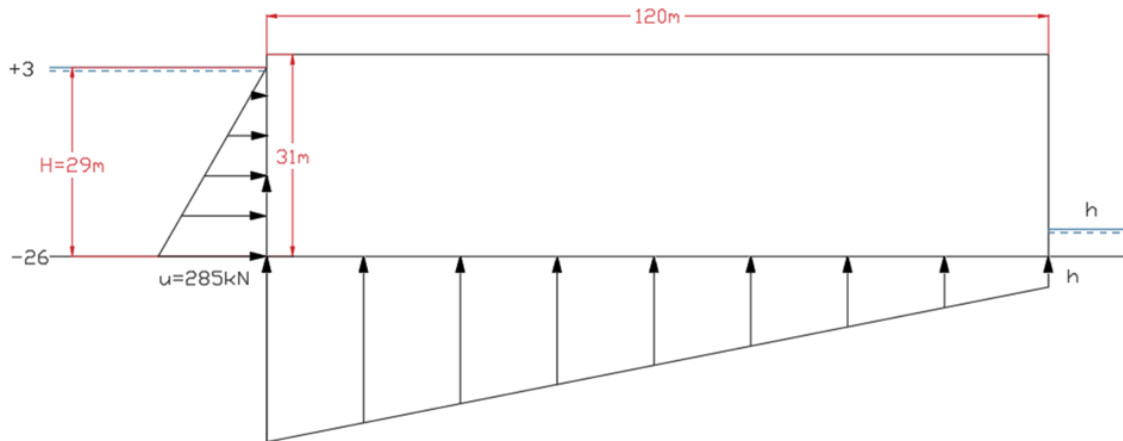
Figur 15 - Principiell utformning av bergförstärkning i ny tunnel med bult och sprutbetong i taket.



Figur 16 - Typsektion ny transportbandstunnel

## 4.6 Bergplintens stabilitet

När det Västra brottet börjar vattenfyllas kommer bergplintens attstabilitet kontrolleras. I det här fallet betraktas bergplinten som en helt tät massiv konstruktion med vattentryck. Den brottsform som kontrollerar bergplintens storstabilitet är glidning längs ett horisontellt sprick-/lagerplan. Den största påtryckande lasten uppstår när vattennivån i Västra brottet har nått sin högsta nivå, som i detta konservativa fall är satt till +3, se Figur 17.



Figur 17 - Tvärsnitt av bergplint som visar analyserat lastfall.

Kontroll av glidning längs planet utförs genom beräkning av förhållandet mellan krafter parallellt ( $R_H$ ) och vinkelrätt ( $R_V$ ) glidplanet. Förhållandet mellan  $R_H/R_V$  ger aktuell friktionsförhållande ( $\mu$ ).

$$\mu = R_H/R_V$$

Där  $R_H$  = resultanten av krafterna parallellt glidplanet, vilket utgörs av det samlade vattentrycket i form triangellasten  $\frac{\rho_{vatten} * g * H * H}{2} = \frac{1 * 9,82 * 29 * 29}{2} = 4\,124\,kN$  och

$R_V$  = resultanten av krafterna vinkelrätt glidplanet som utgörs av differensen mellan lasten från ovanliggande berg ( $q_b$ ) och vattentrycket i glidplanet ( $q_v$ ), om  $h$  i Figur 17 är lika med noll, dvs. det står inget vatten nedströms dammen.

$$q_b = \rho_{berg} * g * z * b = 2,5 * 9,82 * 31 * 120 = 91\,200\,kN$$

$$q_v = \frac{\rho_{vatten} * g * H * b}{2} = \frac{1 * 9,82 * 29 * 120}{2} = 17\,086\,kN$$

$$R_v = q_b - q_v = 91200 - 17086 = 74\,114\,kN$$

Brott anses ske då glidningsvillkoret uppfylls, då friktionsförhållandet mellan de horisontella och vertikala krafterna överstiger ett tillåtet gränsvärde, som i detta fall ansätts till den karaktäristiska friktionskoefficienten ( $\mu_{kar}$ ).

$$R_H / R_V = \mu \leq \mu_{kar}$$

Friktionsförhållandet, för det aktuella lastfallet, beräknas till  $\mu = 4124 / 74114 = 5,6 * 10^{-2}$

Den karaktäristiska friktionskoefficienten vid brott beräknas utifrån med planets motstånd mot glidning bestäms enligt Mohr-Coulombs brottvillkor:

$$\tau = cL + N \tan(\emptyset)$$

$c$  = planets kohesion

$L$  = sprickplanets längd

$\emptyset$  = planets friktionsvinkel

$N$  = normalspänningen över sprickplanet, i detta fallet, lika med  $R_v$ .

Bedömning av karaktäristiska värden på kohesion och friktionsvinkel baseras här på sprickors egenskaper beskrivna enligt Q-klassificering (NGI, 2022). För tillfället, innan de planerade undersökningarna utförts, bedöms egenskaperna konservativt. De verkliga karaktäristiska värdena är troligen betydligt mer gynnsamma ur ett stabilitetsperspektiv än de valda. Storleken på kohesionen över ett sprickplan är ofta anledning till diskussion, varför den i det här fallet valts mycket konservativt,  $c=0$ . Friktionsvinkeln bedöms utifrån ett uthålligt plant sprickplan ( $J_r=1,5$ ), där kontakten utgörs av silt eller sandig lera ( $J_a=3$ ), vilket ger en friktionsvinkel ( $\varnothing = 20-25^\circ$ ).

Eftersom planets kohesion är ansatt till noll, och normalspänningen över sprickplanet är lika med  $R_v$  är den karaktäristiska friktionskoefficienten lika med  $\tan(\varnothing_{kar})$ .

Det karaktäristiska och högsta tillåtna friktionsförhållandet blir då:

$$\mu_{kar} = \tan(20^\circ) = 0,36$$

Vilket innebär att planet, baserat på de bedömda förutsättningarna, stabilt mot glidning med god marginal. Friktionsförhållandet motsvarar en säkerhetsfaktor på 6,54, enligt:

$$\mu_{kar} / \mu = 0,36 / (5.6 \times 10^{-2}) = 6,42$$

## 4.7 Stabilitet i östra bergväggen

Den vertikala bergväggen mot Östra brottet har stått oförstärkt under mycket lång tid utan några stabilitetsproblem. Möjligen kan mindre stenar ha fallit ner i samband med exempelvis nederbörd och avrinning från överytan och frostcykler under vinterhalvåret. Bergartens egenskaper och bergmassans strukturer är sådan att strukturella brott inte kan förväntas. Eventuellt identifierade block i ett byggskede säkras med bult.

Bergarten eller bergmassan bedöms inte vara speciellt känslig för erosion. Efter att den planerade ridåinjekteringen har utförts för att minska läckageflödet och tryck förväntas branten vara stabil utan kompletterande förstärkning.

Eventuellt kan mindre stenar fortsättningsvis falla ner, varför ett säkerhetsavstånd till branten bör markeras. Ovan tunnelymningar i Östra brottet kan även nät anbringas för att minimera nedfall av sten. Att ytterligare studera och verifiera bergplintens och den östra brantens geologiska/ geotekniska förutsättningar är en del av den planerade fältundersökningen.

## 5 Vattenhantering

Inläckande vatten i Östra brottet genom bergplinten eller till tunnarna bakom ridåinjektering och den tätade pluggen kommer pumpas tillbaka till Västra brottet.

Det totala grundvatteninflödet till Östra brottet, då Västra brottet har vattennivån +1,0 har beräknats till ca 350 000 m<sup>3</sup>/år. I det totala grundvatteninflödet inkluderas även inflödet till Östra brottet genom den tätade bergplinten med ca 80 000 m<sup>3</sup>/år. Det vatten som flödar in i Östra brottet kommer att pumpas tillbaka till Västra brottet.

### 5.1 Injektering

Ridåinjektering vid västra sidan av Västra brottet hade fokus på teknisk genomförbarhet och injekteringsens tätande effekt. Inledningsvis utfördes ett injekteringsförsök för en 50 meter lång sträcka vid södra kanten på Västra brottet och sedan även för en längre sträcka (ca 1 340 m) längs brottets västra kant. Geometri för injekteringsförsök redovisas i Figur 18 och den långa ridåns sträckning redovisas i Figur 19. Placering för injekteringsförsök visas med svart rektangel i Figur 19.

Angående geometri för injekteringsförsök, Figur 18, visar gröna borrhål första omgångens borrhål, dessa hade ett inbördes hålavstånd av 10 m, gula visar andra omgången och blå visar kontrollhål. På samma sätt visar gröna borrhål i Figur 19 ett inbördes hålavstånd på 10 m och gula borrhål visar uppföljning efter injekteringsomgång 1.

Huvudfokus för både försök och den långa sträckan var de större strukturerna som också förväntades ge den största reduktionen i såväl genomsläplighet som flöde.

Borrhålen var som tidigare nämnts vertikala, generellt 60 m djupa och injekteringen utfördes i två omgångar och för två nivåer. Arbetet gjordes stegvis genom borrhning, vattenförlustmätning och injektering. För vattenförlustmätningen mättes den volym som pumpades ner i borrhålet under 2 minuter vid 3 bars övertryck vid markytan.

Resultat för långa sträckan och för vattenförlustmätningar innan och efter injektering redovisas i Figur 20. Reduktionen i vattenförlust var från ca 60 liter till ca 40 liter under 2 min, dvs ungefär 30 %. Detta överensstämmer med resultatet för injekteringsförsöket.

En enkel skattning av hydraulisk konduktivitet,  $K \approx Q/dh/L$ , för en vattenförlust på 60 liter under 2 min skulle ge värdet 3E-7 m/s. Det baseras på en skillnad i tryck,  $dh$ , på 30 m vid markytan plus en nedmätning till grundvattenytan på 25 m samt en sektionlängd,  $L$  på ca 30 m. För 40 liter under 2 min skulle motsvarande värde för hydraulisk konduktivitet bli 2E-7 m/s.

Illustrationen i Figur 18 visar vid sidan av hålgeometri även skattad inträngningslängd för relevanta injekteringstryck, injekteringstider och egenskaper för använt injekteringsmaterial, Injektering 30.

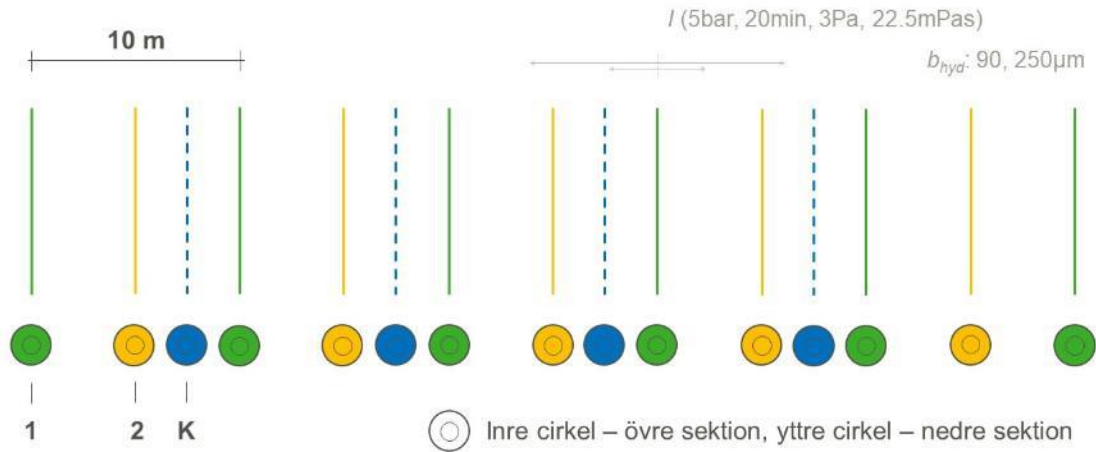
För sprickor med större vidd, här representerade med vidden 250 µm, når man ca 6 m vilket är längre än halvvägs från grönt borrhål till grönt borrhål, vilket teoretiskt skulle täta strukturen. En hydraulisk vidd på 250 µm skulle för en mätsektion på 30 m motsvara en hydraulisk konduktivitet på ungefär 3E-7 m/s.

En hydraulisk vidd på 210 µm skulle för en enskild spricka och en mätsektion på 30 m motsvara en hydraulisk konduktivitet på ungefär 2E-7 m/s och en inträngning på ca 5 m. En spricka med en vidd mindre än 90 µm förväntas inte vara injekterbar med det cementbaserade injekteringsmedlet.

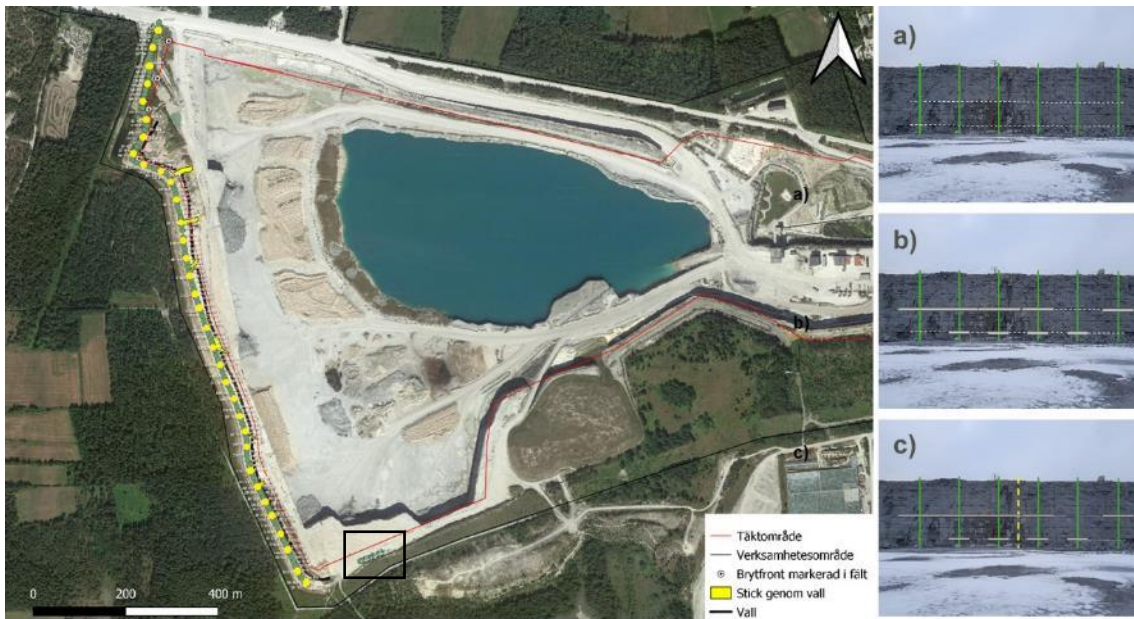
Storleksordning för hydraulisk konduktivitet, 2E-7 till 3E-7 m/s, skattad vidd och skattad inträngning (5–6 m) är rimliga i relation till valt hålavstånd (10 m). Sprickor med större vidd

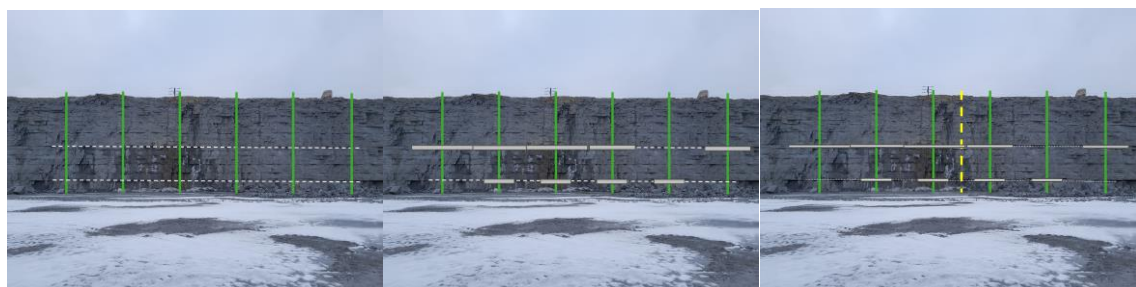


förväntas ha en större inträngning. Ridån bedöms vara ungefär 20 m bred, med inträngning generellt mindre än 10 m, ofta mer än 5 m och med någon enstaka observation på 50 m.

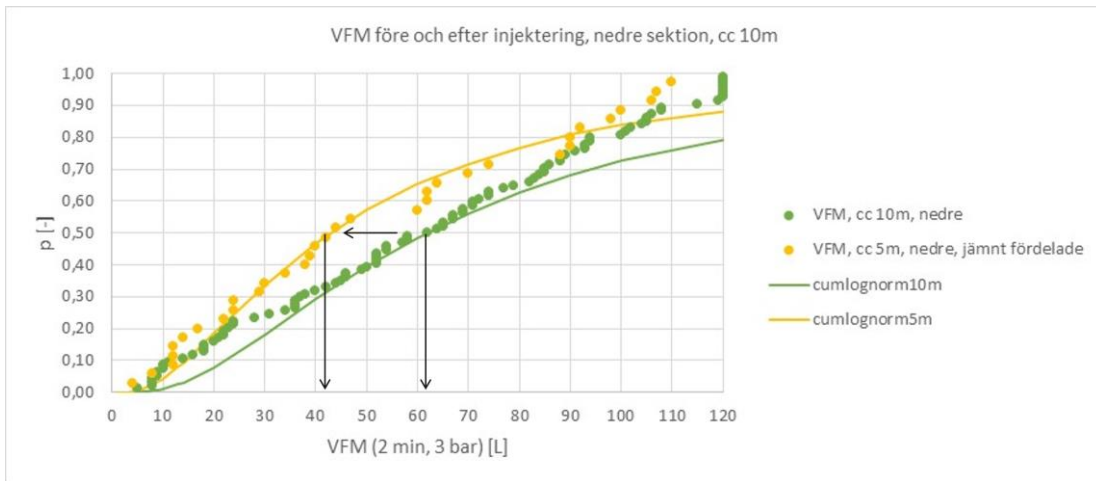


Figur 18 – Principiell geometri injekteringsförsök, Västra brottet. Omgång 1 (grön, 1), Omgång 2 (gul, 2) och borrhål för kontroll (blå, K). Inre cirkel – övre sektion, yttre cirkel – nedre sektion. Grå linjer visar skattad inträngningslängd för en enskild spricka med vidden 250 µm respektive 90 µm. Den förra skulle motsvara en hydraulisk konduktivitet på ca 3E-7 m/s (30 m sektion), den senare 1 till 2E-8 m/s. Placering visas med svart rektangel i Figur 19.





Figur 19 – Ridåinjektering 1340 m, Västra brottet. Svart rektangel visar placering för injekteringsförsök. Foton under karta t.v. Borring av hål (gröna) med inbördes avstånd 10 m (cc 10 m) samt vattenförlustmätning, m. Injektering och t.h. Uppföljning av resultat med hjälp av jämnt utspridda borrhål på avståndet 5 m från tidigare injekterade borrhål. Placering för borrhål i ridån i karta till vänster. Resultat för gröna punkter, Omgång 1, och uppföljning, gula punkter, visas i Figur 20.

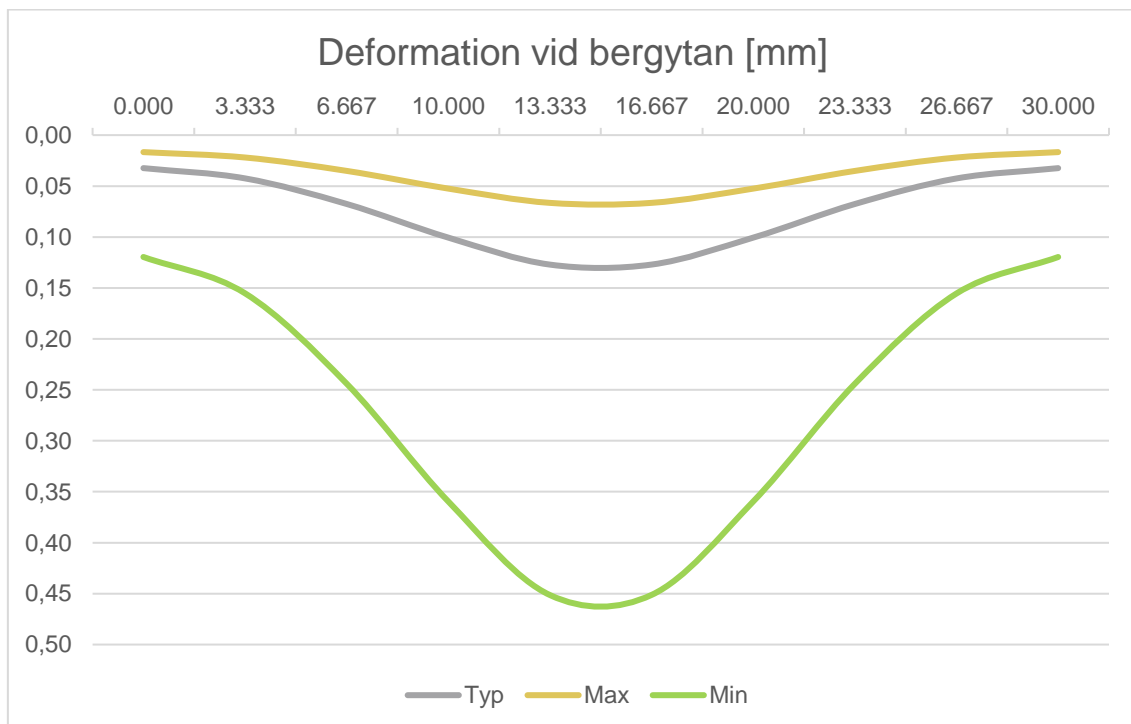


Figur 20 – Ridåinjektering 1340 m. Sammanställning av vattenförlustmätningar (VFM) för nedre sektion (för 2 minuter och 3 bars tryck vid markytan). Gröna, cirklar visar vattenförlust innan injektering (hålavstånd 10 m). Gula, cirklar visar vattenförlust för jämnt utspridda borrhål på avståndet 5 m från tidigare injekterat borrhål. Grön linje (cumlognorm10m) och gul linje (cumlognorm5m) visar visuellt anpassade lognormalfördelningar med fokus på värden innanför svart, streckad ruta (låga och höga värden svårare att mäta korrekt pga mätgränser). Reduktionen i vattenförlust innebär en minskning från ca 60 liter till ca 40 liter under 2 min, dvs med ca 30 %.

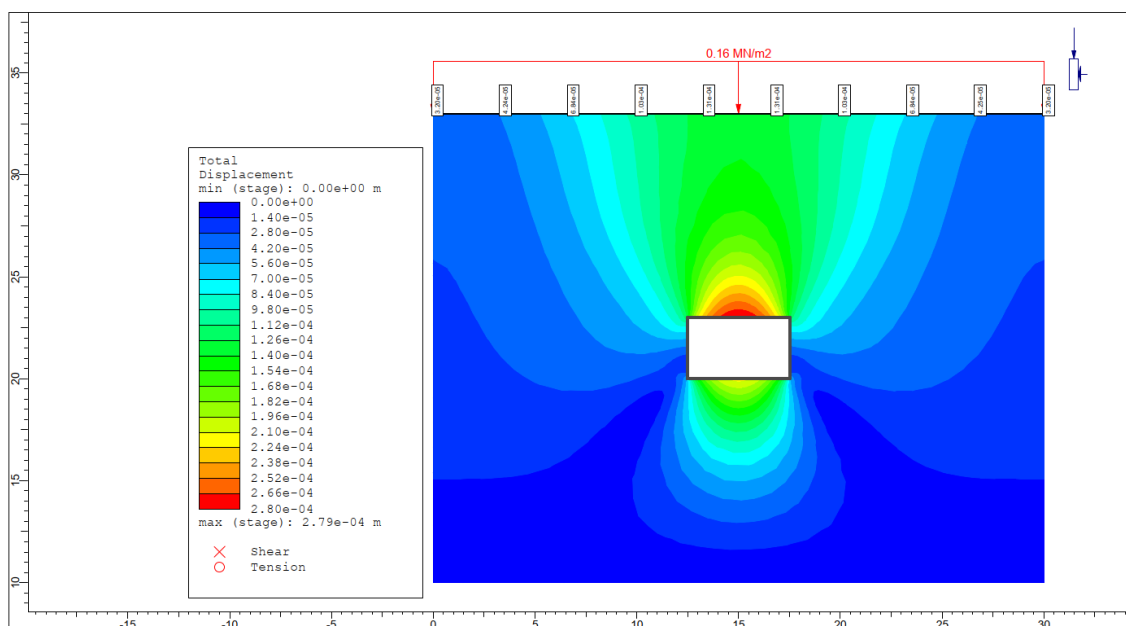
## 6 Närliggande anläggningar

### 6.1 Transporter

Väg 147, Solklintsvägen, är en allmän väg som går längs bergplinten. Förutom vägbanan med två körfält finns även en rastplats/utkiksplats. Vägen tillhör vägunderhållsklass 4 och bärighetsklass BK 4 med särskilda villkor. Utifrån en numerisk analys av de deformationer som beräknas uppstå vid drivningen av den nya transportbandstunneln (se Figur 21 och Figur 22) anses påverkan på den statliga vägen försumbar, <0,5 mm deformation vid bergytan.



Figur 21 – Beräknad deformation vid bergytan längs Väg 147 på grund av tvärgående drivning av ny transportbandstunnel vid 10 meters djup. De, för typvärdet, använda bergmekaniska parametrarna presenteras i Tabell 1. Se Bilaga 4 för modelluppställning.



Figur 22 – Beräknad deformation i bergmassan under vägbanan vid bergguttag för ny transportbandstunnel 10 m under bergytan.

## 6.2 Ledningar längs bergplinten

Gotlands Energi AB (GEAB) äger kraftledningar som går längs bergplinten, väster om Väg 147. I samband med utförande av ridåinjektering av bergplinten, samt vid anläggning av ny transportbandstunnel behöver gällande föreskrifter för arbeten i närhet till kraftledningar följas. Heidelberg Materials kommer att tillse att det finns utrymme för åtkomst till ledningarna så att underhållsåtgärder på ledningarna kan utföras.

Övriga ledningar kommer att identifieras och beaktas i samband med de kompletterande undersökningarna.

## 7 Mätning/kontroll

Inspektion och underhåll ska utföras i driftskedet för att möjliggöra kompletterande bergförstärkning och tätningåtgärder. Inspektionen bör minst omfatta dokumentation av observerade dropp och flöden (vatten) i slänt och tunnlar. Detta för att motverka grundvattenrelaterad erosion och andra stabilitetsbegränsningar.

Innan detaljprojektering av de planerade förändringarna, enligt kapitel 4, planeras fältundersökningar för att verifiera de antaganden, med avseende på bergplintens egenskaper, som använts i detta skede. De planerade undersökningarna omfattas primärt av vattenförlustmätningar och kärnbörning. Med hjälp av vattenförlustmätningar längs det planerade läget för ridåinjekteringen kan de hydrogeologiska förhållandena verifieras. Genom kartering av borrkärnor fås både information om berggrundens karaktär och relativt ostört provmaterial som kan analyseras avseende mekaniska egenskaper. Ridåinjekterings slutliga utformning och längd kommer att anpassas utifrån resultaten från fältundersökningarna.

## 8 Säkerhet och risker

I samband med att Västra brottet vattenfylls med en slutlig vattennivå på ca +1,5 kommer grundvattennivån i bergplinten stiga och läckageflödet till Östra brottet kommer att öka.

Stabiliteten i bergplinten bedöms som mycket hög och det finns inget som pekar på att det kan bli ett brott i bergplinten med plötsligt utströmmande vatten som dränker Östra brottet.

Risk för stora deformationer eller ras för Väg 147 i samband med anläggandet eller under drifttiden för ny transportbandstunnel bedöms som minimal då bergtäckningen (dvs. den vertikala mäktigheten på berget ovanför tunnelns tak) kommer att vara minst 10 m och att deformationer vid bergytan under vägen beräknats till under 0,5 mm.

Med tiden kan mindre lokala stenar och block lossna i bergplintens bergvägg mot Östra brottet. En säkerhetszon i omedelbar närhet till bergväggen behöver upprättas för att skydda personal mot fallande sten och mindre block. Kring tunnelmyningarna anordnas lokalt skydd mot nedrasande stenar, erosion uppifrån bergplinten eller om nederbörd orsakar vattentransport av lösa material. Längs vissa delar av bergväggen kan det finnas behov av andra kompletterande skydd, t.ex kompletterande nätning.

Bergplintens hydrogeologiska egenskaper är inte kända i detalj. Undersökningsborrningar planeras därför att utföras längs bergplinten som underlag till detaljprojekteringen. Utifrån tillgänglig information om geologiska egenskaper antas att det främst finns horisontellt riktade vattenförande sprickor på olika nivåer. Genom tätningssåtgärder bedöms att vid vattennivån ca +1,0 i Västra brottet kommer det totala grundvatteninflödet genom bergplinten att bli ca 350 000 m<sup>3</sup>/år vilket motsvarar ca 11 l/s. Detta bedöms som ett flöde som utan svårigheter kan pumpas tillbaka till Västra brottet. Även vid pumpbortfall under någon dag bedöms inga allvarliga konsekvenser uppstå. Det blir i så fall enbart en påverkan på den egna verksamheten i Östra brottet.

Läckageflödet genom sprickor i bergplinten kan öka med tiden. Genom mätning och analys av läckagets storlek samt uppföljning av porttrycksmätning av grundvattennivån i bergplinten kan kompletterande tätningssåtgärder vidtas vid behov. Främst kommer i så fall kompletterande injektering att göras som ridåinjektering från markytan och skärminjektering kring pluggar inne i tunnlar.

Vatteninträngning i tunnlar ska minimeras och tätningen kommer att anpassas i detaljprojekteringen utifrån den verksamhet som ska bedrivas i de pluggade tunnlar. Ny transportbandstunnel kommer att byggas med ett antaget lågpermeabelt betongfoder så att påverkan på grundvattennivån kring tunneln minimeras.

Antagen linje för ridåinjektering är i huvudsak väster om Väg 147 och begränsas av kraftledningsgatan. I norra delen av bergplinten kommer dock en kraftledningsgata att korsas. Riktlinjer för arbeten i närhet av och under kraftledningar kommer att beaktas. Placeringen av ridåinjekteringen kommer även att optimeras inför eventuell framtida komplettering.

Betongpluggar i befintliga tunnlar kommer att dimensioneras på liknande sätt som pluggar i vattenkrafttunnlar med en livslängd på 100 år. Vattentrycket är måttligt och som mest ca 28 m.

Bultar för förstärkning av betongplugg samt det övriga bergrummet i transporttunnlarna kommer av säkerhetsskäl att genomgå återkommande bultsyn samt besiktning vid drift.

Med framtaget kontrollprogram kommer det utföras t.ex. inspektioner och utvärdering av mätningar. Resultaten från dessa aktiviteter kommer att dokumenteras. Genom att följa kontrollprogrammet kommer det finnas förutsättningar till att utföra kompletterande tätningssåtgärder eller förstärkningsåtgärder om behov uppkommer under konstruktionens livstid.

## 9 Referenser

- EPRI. (1987). *Design Guidelines for Pressure Tunnels and Shafts*.
- Hoek-Brown. (2002). *Hoek-Brown Failure Critereon, NARMS-TAC Conference, Toronto* .
- NGI. (2022). *Using the Q-System - Rock mass classification and support design*. Oslo.
- SMHI. (2008). *Havsvattenstånd runt Gotland - nu och i framtiden, Rapport Nr. 2008-71*.

# **HEIDELBERG MATERIALS - SLITE GRUNDVATTENMODELL**

## **M2023 SIMULERING AV GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDEN I BERGET MELLAN ÖSTRA OCH VÄSTRA BROTTEN**

**VER 3A**

Johan Holmén  
September 2023



# INNEHÅLL

---

<b>1. SYFTE .....</b>	<b>3</b>
<b>2. MODELL .....</b>	<b>4</b>
2.1 STUDERAT OMRÅDE, STUDERADE TUNNLAR OCH SEKTIONER .....	4
2.2 FLÖDESBARRIÄRER - K-VÄRDEN FÖRE OCH EFTER INJEKTERING .....	6
2.3 VATTENNIVÅ I VÄSTRA BROTTET OCH DRÄNERADE STRUKTURER .....	10
2.4 TIDSBEROENDE.....	10
2.5 BERÄKNADE TRYCKNIVÅER .....	10
2.6 BERÄKNADE INFLÖDEN TILL ÖSTRA BROTTET OCH TUNNLARNA.....	10
<b>3. SLUTSATSER.....</b>	<b>12</b>
<b>4. APPENDIX – RITNING ÖVER VÄGTUNNLAR.....</b>	<b>21</b>

---

# 1. Syfte

Syftet med det utförda arbetet är att simulera grundvattenförhållandena i bergplinten mellan Västra och Östra brotten, att beräkna grundvattnets trycknivåer för ett antal vertikala profiler (väst-öst) genom bergplinten och att beräkna grundvatteninflödet för ett antal tunnlar som genomskär plinten.

## 2. Modell

Beräkningarna är utförda med den tidigare etablerade och kalibrerade grundvattenmodellen över området kring Slite och File hajdar. Modellen är upprättad med programvaran Geoan (Holmén, 2023). Modellen kommer inte att presenteras i detalj i denna bilaga. Det ursprungliga syftet med den upprättade modellen var att simulera grundvattenförhållandena i ett mycket stort regionalt område kring Slite och File hajdar, det gör att modellens detaljeringsnivå i det mycket lokala området mellan Västra och Östra brotten är begränsad. En fördel med att använda den regionala modellen är att den är kalibrerad. Det betyder att de resultat som produceras av modellen har jämförts med uppmätta värden. Modellen förmår därför att med god noggrannhet reproducera t.ex. grundvatteninflödet till Västra och Östra brotten.

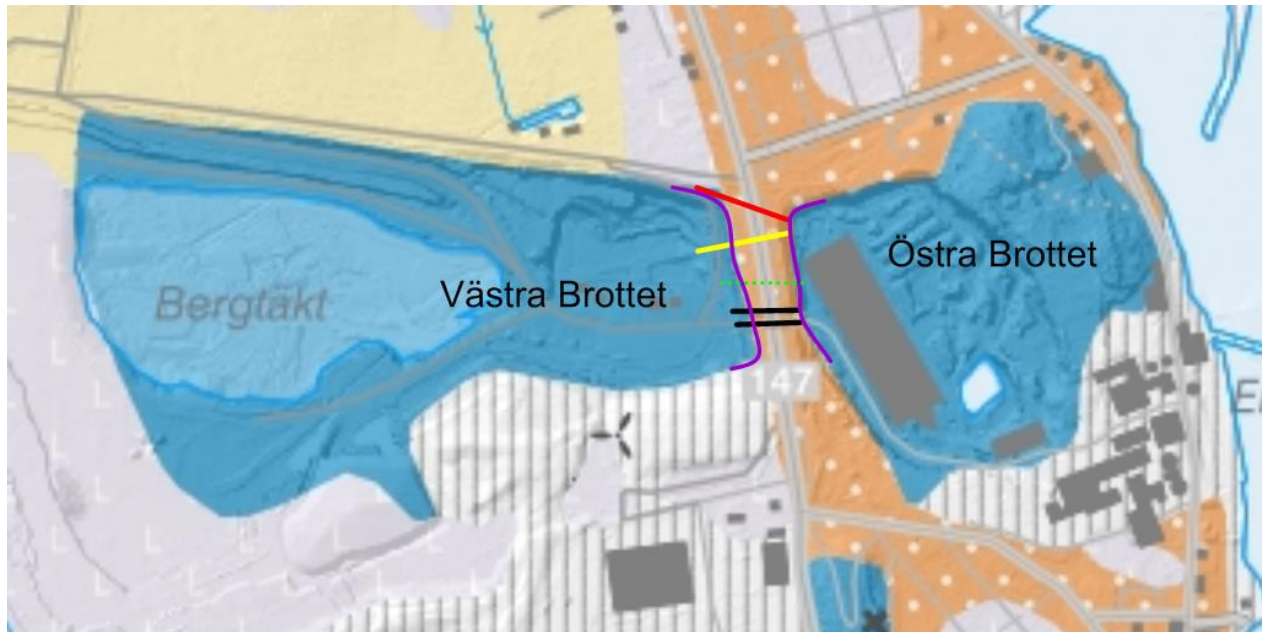
I modellen är den horisontala upplösningen (cellstorleken) i det studerade området 33m x 33m. Det betyder att den beräknade variationen i grundvattennivå horisontellt kommer att vara linjär inom beräkningscellerna, som (horisontellt) är 33 m. Vertikalt är upplösningen mycket högre, från markytan och ned till ett djup om ca 40 m inkluderar modellen ungefär 10 lager med beräkningsceller. Lagren har varierande tjocklek. Modellens randvillkor, nettonederbörd, uttag ur kommunens brunnar och modellens alla andra egenskaper kommer inte att diskuteras i denna bilaga. Modellen definieras mer i detalj i en underbilaga till bilaga B3 i ansökan.

Bergplintens hydrogeologiska egenskaper är inte väl kända. Inga undersökningsborrhål finns i bergplinten. Bergplintens hydrogeologiska egenskaper i modellen baseras på de egenskaper som har observerats i Västra brottet (vattenförande lager), omgivande borrhål och modellens kalibrering.

### 2.1 Studerat område, studerade tunnlar och sektioner

Modellen beräknar grundvattennivåer och flöden för ett mycket stort regionalt område, men i denna studie presenteras endast resultat från utvalda vertikala sektioner i bergplinten mellan Västra och Östra brotten. Fyra sektioner har studerats. Tre av dessa sektioner är placerade där tre olika tunnlar skär genom bergplinten. Den fjärde sektionen är placerad ungefär i mitten av bergplinten.

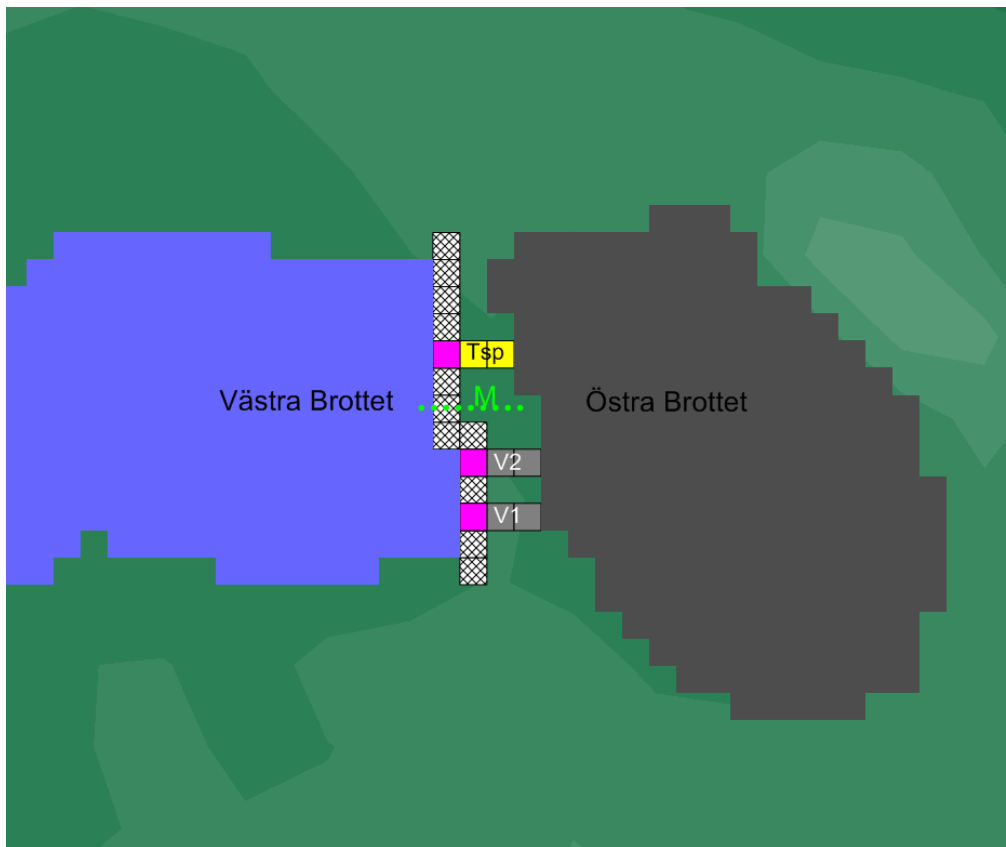
Figur 2-1 visar hur de olika tunnlar skär genom bergplinten. De två svarta linjerna visar läget för två vägtunnlar genom plinten på nivån -26. Den gula linjen visar läget för en transporttunnel från bergkrossen i Västra brottet till Östra brottet. Nivån för transporttunneln varierar från -32 i Västra brottet till -16 i Östra brottet. Den röda linjen markerar planerat läge för en ny vägtunnel, nivå +1 (väster) till -13 (öster). Den gröna punktstreckade linjen visar läget för en teoretisk sektion genom bergplinten. Bergplintens storlek framgår av de två lila linjerna. Bergplintens längd i väst-öst riktning varierar mellan ungefär 100 m till 130 m. I figuren har SGU:s jordartskarta använts som bakgrund.



Figur 2-1 De olika tunnarna som skär genom bergplinten framgår av figuren: De två svarta linjerna visar läget för två vägtunnlar genom plinten på nivån -26. Den gula linjen visar läget för en transporttunnel från krossen i Västra brottet till Östra brottet. Nivån för transporttunneln varierar från -32 i Västra brottet till c:a -16 i Östra brottet. Den röda linjen markerar planerat läge för en ny transportbandstunnel, nivå c:a +1 (väster) till -13 (öster). Den gröna punktstreckade linjen visar läget för en teoretisk sektion genom bergplinten. Bergplintens storlek framgår av de två lila linjerna. Bergplintens längd i väst-öst riktning varierar mellan ungefär 100 m till 130 m. I figuren har SGU:s jordartskarta använd som bakgrund.

De två vägtunnlarna och transporttunneln har inkluderats i modellen. Den nya vägtunneln (röd) har inte inkluderats i modellen, eftersom denna tunnel kommer att byggas med ett lågpermeabelt betongfoder. Betongfodret kommer att minimera tunnelns påverkan på det omgivande grundvattensystemet. Vägtunneln och transporttunneln är för närvarande öppna mot omgivande berg.

Figur 2-2 visar diskretiseringen av bergplint och tunnlar i den upprättade modellen. Mörkgrå rektanglar markerar de två vägtunnlarna. Gul rektangel markerar transporttunneln. De lila rutorna markerar lågpermeabla pluggar som skall placeras i tunnarna. Det rasterade området markerar var ridåinjektering skall utföras. Östra brottets utformning i modellen baseras på Östra brottets framtida utformning, i vilket brottet är något större än idag, och en bottennivå som delvis når ned till nivån -27 .



Figur 2-2 Diskretisering av bergplint och tunnlar i den upprättade modellen. Mörkgrå rektanglar markerar de två vägtunnlarna. Gul rektangel markerar transporttunneln. De ljuslila rutorna markerar lågpermeabla pluggar som skall placeras i tunnlar. Det rasterade området markerar var ridåinjektering skall utföras. V1= Södra vägtunneln. V2= Norra vägtunneln. TSp= Transporttunnel. M= Mittsektion.

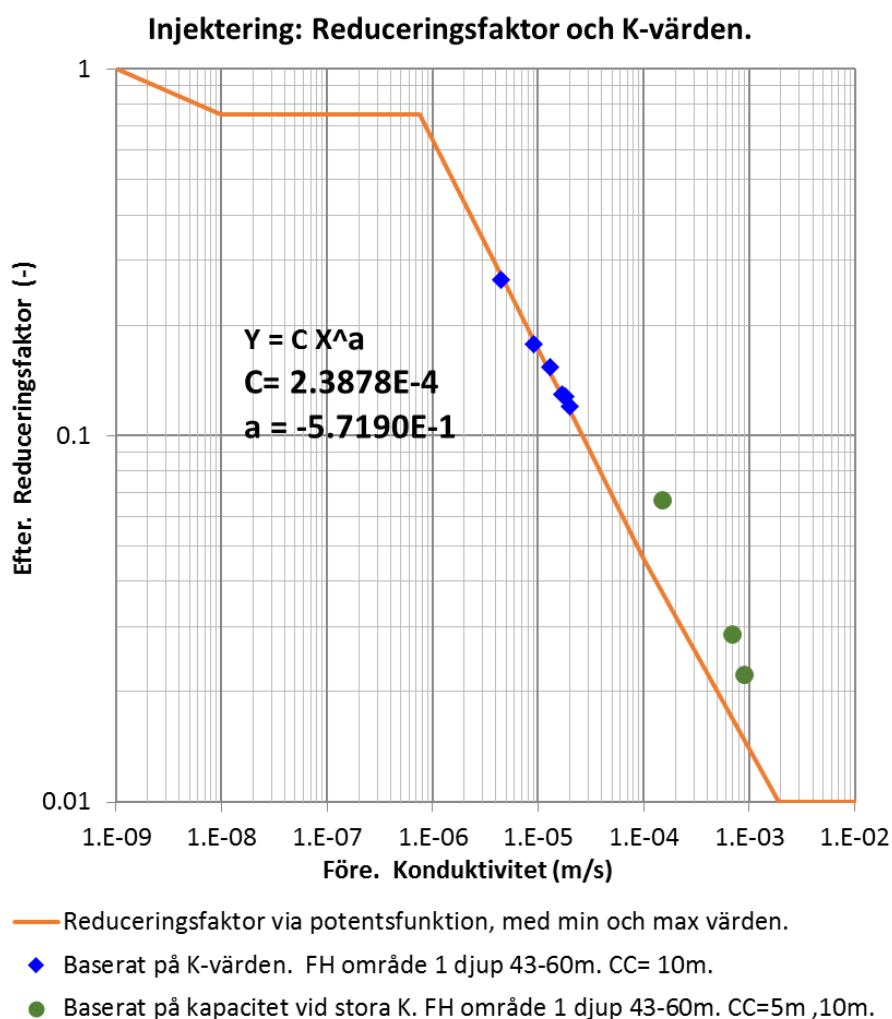
## 2.2 Flödesbarriärer - K-värden före och efter injektering

I modellen är beräkningscellernas K-värden i plinten mellan Västra och Östra brotten definierade som heterogena. I plinten finns tre vattenförande lager som har stor genomsläpplighet. I dessa lager kan det förkomma enskilda celler med mycket stor genomsläpplighet, men också celler med lägre genomsläpplighet. Mellan de vattenförande lagren finns lågpermeabelt berg med enskilda celler som har stor genomsläpplighet, dessa celler representerar vertikala sprickor. Alla K-värden i de olika lagren definieras av log-normal fördelningar.

I de utförda beräkningarna har ett antal olika flödesbarriärer inkluderas i bergplinten och tunnlar. Längs med bergplintens västra sida kommer en ridåinjektering att utföras. I modellen har injekteringen definierats ned till -65 . Injekterings effektivitet baseras i modellen på de hydraultester som utförts i samband med den utförda ridåinjekteringen vid Västra brottets västra sida och testsektionerna på File hajdar. Den applicerade teoretiska formuleringen av en reduceringsfaktor, som i modellen används för att reducera K-värdena, baseras på verkliga

testresultat och en potensfunktion som har anpassats till den uppmätta redueringen av K-värdena. Olika K-värden reduceras olika mycket. Reduceringsfunktionen visas i Figur 2-3.

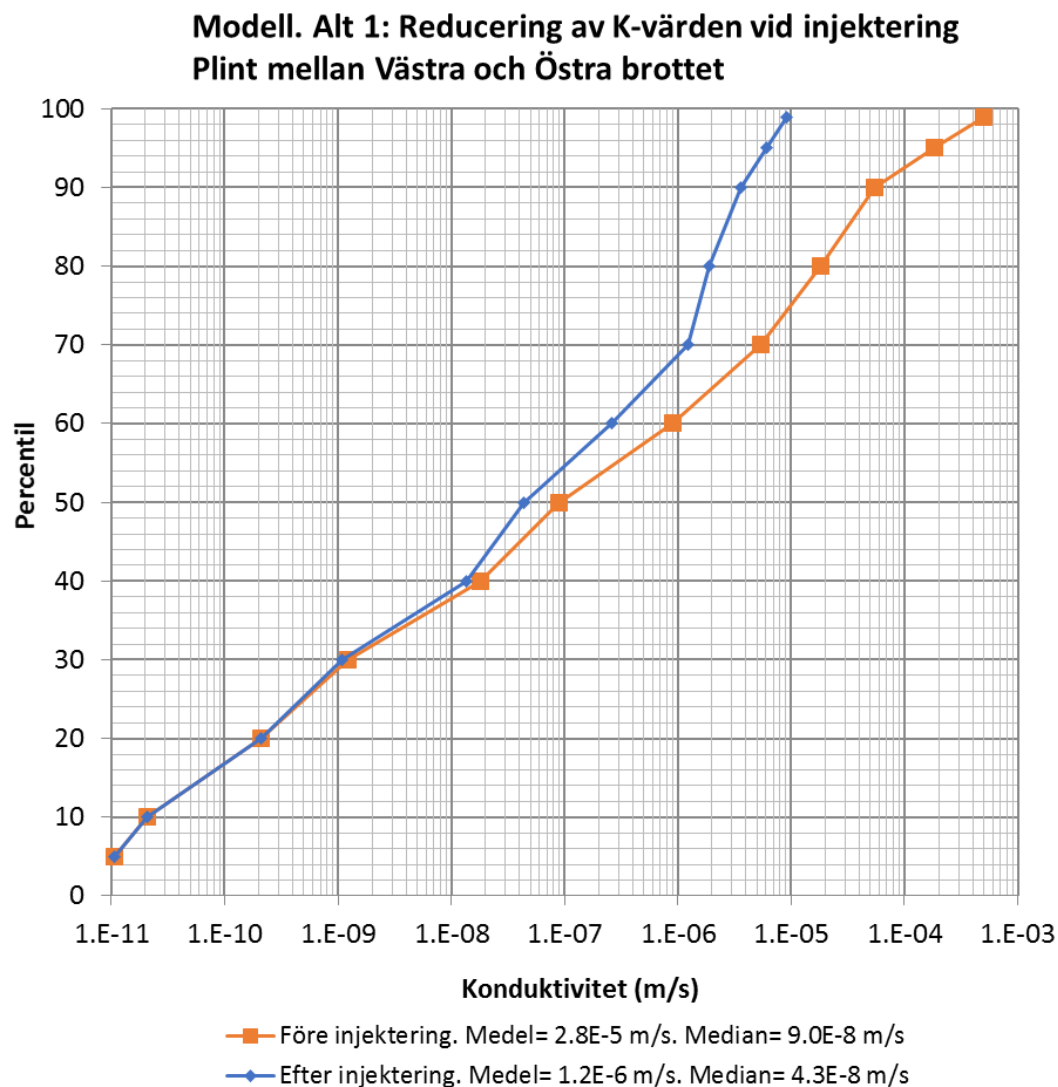
Lågpermeabla betongpluggar kommer också att installeras i tunnlarna, nära Västra brottet (se Appendix). I modellen har pluggarna definierats med en hydraulisk resistans som motsvarar en längd av 33 m och ett K-värde lika med 1E-9 m/s, vilket också motsvarar en längd på 3,3 m och ett K-värde lika med 1E-10 m/s (hydraulisk resistans är en kombination av genomsläpplighet och längd). Inom en radie på några meter kring tunnelpluggarna har i modellen en särskild injektering av berget applicerats. Denna injektering antas minska alla K-värden inom en radie på några meter kring tunnelpluggarna så att de största K-värdena är lika med 1E-8 m/s.



Figur 2-3 Injekteringens effektivitet baseras i modellen på de hydraultester som utförts i samband med dem utförda riddinjekteringarna vid Västra brottets västra sida och testsektionerna på File hajdar. Den applicerade teoretiska formuleringen av en reduceringsfaktor som i modellen används för att reducera K-värdena baseras testresultaten och en potensfunktion som anpassas till den uppmätta redueringen av K-värdena. Olika K-värden reduceras olika mycket. Reduceringsfunktionen visas i figuren ovan.

Figur 2-4 (nedan) visar K-värden i modellen före och efter injektering. Kurvorna gäller för de injekterade cellerna närmast Västra brottet, både vattenförande lager och berget mellan

vattenförande lager. Det är därför variansen är stor mellan minsta och största K-värden. Notera att figuren baseras endast på de celler som blivit injekterade i modellen. Injekteringen inkluderar den särskilda mindre ”skärm”-injektering kring tunnelpluggarna med ett  $K_{max} = 1E-8$  m/s.



*Figur 2-4 K-värden före och efter injektering. Kurvorna gäller för cellerna närmast Västra brottet både vattenförande lager och berget mellan de vattenförande lagren. Det är därför variansen så stor mellan minsta och största K-värden. Figuren baseras endast på de celler som blivit injekterade i modellen. Injekteringen inkluderar den särskilda mindre ”skärm”-injektering kring tunnelpluggarna med ett  $K_{max} = 1E-8$  m/s. Notera den lilla förändringen av medelvärden och medianer (framgår i figurens legend).*

Om kurvorna i Figur 2-4 endast hade avsett de vattenförande lagren hade medianen för K-värdena varit högre. Kurvorna i figuren avser både K-värdena i de vattenförande lagren (celler med huvudsakligen stora K-värden) och K-värdena i berget mellan de vattenförande lagren (celler med huvudsakligen låga K-värden). Eftersom det är många celler mellan de vattenförande lagren med huvudsakligen låga K-värden blir medianen för K-värdena ganska litet ( $9.0E-8$  m/s)

före injektering). Medelvärdet för K-värdena är 315 gånger större ( $2.8E-5$  m/s före injektering), eftersom medelvärdet påverkas mycket av de stora K-värdena i de vattenförande lagren. Tillsammans demonstrerar medianen och medelvärdet den typiska icke-symmetriska fördelningen av K-värden i ett heterogent flödesmedium, som i modellen baseras på log-normal fördelningar (som är icke-symmetriska).

Ett flödesmedium med heterogena K-värden uppvisar ofta ett skalberoende med avseende på K-värden och den skala i vilken K-värdena betraktas. Med skalberoende menas t.ex. att de statistiska egenskaperna för fördelningen av K-värdena förändras avseende den skala i vilken K-värdena betraktas. Teoretiskt förekommer ett skalberoende då det studerade flödesmediet är en-dimensionellt eller tre-dimensionellt, skalberoende förekommer inte då det studerade flödesmediet är två-dimensionellt. De vattenförande lagren är huvudsakligen två-dimensionella, alltså skall K-värdena i de vattenförande lagren teoretiskt sett inte uppvisa något tydligt skalberoende.

Följande tabell visar K-värden i modellen före och efter injektering.

Tabell 2-1 K-värden för de celler som har injekterats i modellen, före och efter injektering.

K-värden före och efter injektering (m/s)			
	Före	Efter	Kvot
<b>Median</b>	<b>9.02E-08</b>	<b>4.36E-08</b>	0,48
<b>Medel</b>	<b>2.84E-05</b>	<b>1.18E-06</b>	0,04
kvot	0.0032	0.0368	
kvot	315.3	27.1	

Följande framgår av Tabell 2-1:

- Medianen minskar med en faktor 0,48. En ganska liten minskning eftersom de många små K-värdena inte påverkas så mycket.
- Medelvärdet minskar med en faktor 0,04. Medelvärdet minskar mycket eftersom de stora K-värdena påverkas tydligt av injekteringen, och medelvärdet beror mycket av de stora K-värdena.



## 2.3 Vattennivå i Västra brottet och dränerade strukturer

Västra brottet kommer att vattenfyllas upp till en nivå nära +1. Östra brottet kommer att hållas dränerat till dess att Heidelberg Materials verksamhet i Slite har avslutats. I de utförda beräkningarna har Västra brottet definierats med en vattennivå lika med +1. Östra brottet har definierats som dränerat. Tunnlarna har definierats som dränerade öster om tunnelpluggarna.

## 2.4 Tidsberoende

Beräkningarna har utförts som tidsberoende beräkningar avseende ett normalår. I beräkningarna har nettonederbörden under året varierats för varje månad. Därmed kommer grundvattennivåerna att variera under året i modellen. Detta diskuteras i underbilagan till bilaga B3 i ansökan.

## 2.5 Beräknade trycknivåer

Grundvattennivåerna och grundvattenflödena genom plinten är tre-dimensionella och tidsberoende. Grundvattennivåerna varierar tydligt under året beroende på säsong. Högre grundvattennivåer under vintern (högvattensituationen) och lägre grundvattennivåer under sommaren (lågvattningsituationen).

Resultat presenteras nedan för de studerade sektionerna, sektionernas placering framgår av Figur 2-2. V1= Vägtunnel 1. V2= Vägtunnel 2. Mitt= Mittsektion. Tsp = Transporttunnel

Grundvattnets trycknivåer presenteras för de tre vattenförande lagren som antas förekomma i bergplinten. Dessa lager hittas på ungefär följande nivåer:

- Översta vattenförande lager, på nivån -9.
- Mellersta vattenförande lager, på nivån -18.
- Nedre vattenförande lager, på nivån -26.

För lågvattensituationen visas resultat i Figur 3-1 till Figur 3-4

För högvattensituationen visas resultat i Figur 3-5 till Figur 3-8

## 2.6 Beräknade inflöden till Östra brottet och tunnlarna

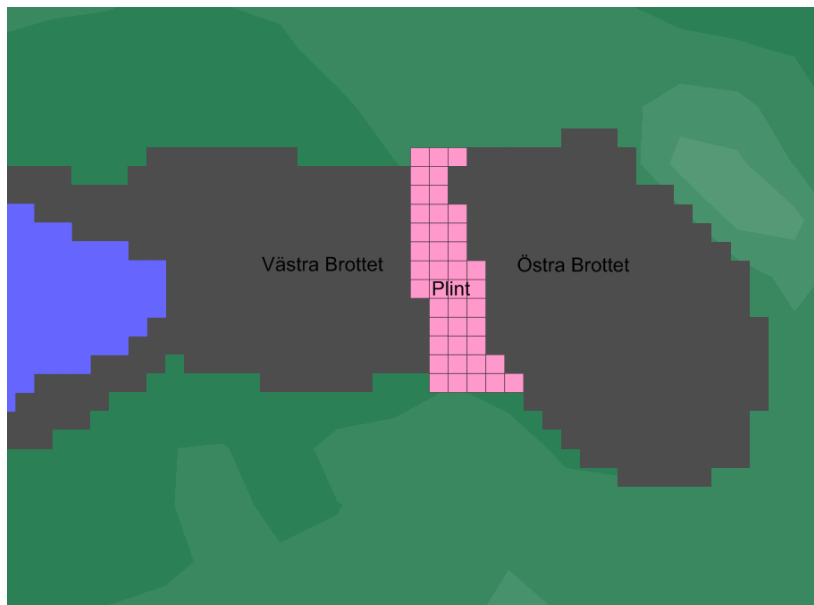
Grundvattennivåerna och grundvattenflödena genom plinten och i plintens omgivning är tre-dimensionella och tidsberoende. Grundvattenflödena varierar tydligt under året beroende på säsong. Större flöden under vintern (högvattensituationen) och lägre flöden under sommaren (lågvattningsituationen).

Följande resultat har erhållits.

- För de båda vägtunnlarna tillsammans (V1 och V2): Totalt för hela året är nära 40 000 m<sup>3</sup>/år.
- För transporttunneln (Tsp): Totalt för hela året är nära 3 800 m<sup>3</sup>/år.

För att kunna beräkna grundvattenflödet genom plinten måste en särskild bergvolym definieras som plint. Den bergvolym som har använts vid beräkningar av flödet genom plinten framgår av Figur 2-5 nedan. Plinten definieras från markytan och ned till bottennivån på Östra brottet. Om storleken på denna volym förändras, förändras också det beräknade flödet genom plinten.

Grundvattenflödena genom plinten är tre-dimensionella och när flödet genom plinten beräknas inkluderas också grundvattenbildningen till plinten (från ovan). Även grundvatteninflöden till plinten via plintens södra och norra delar inkluderas.



Figur 2-5 För att kunna beräkna grundvattenflödet genom plinten måste en särskild bergvolym definieras som plint. Den bergvolym som har använts vid beräkningar av flödet genom plinten framgår i figuren ovan som det skära området.

Grundvattenflödet genom plinten, inkluderande grundvattenbildningen i plinten, blir:

- Genom plinten, inkluderande inflödet till tunnlarna, nära 78 000 m<sup>3</sup>/år
- Genom plinten, exkluderande inflödet till tunnlarna, nära 33 000 m<sup>3</sup>/år

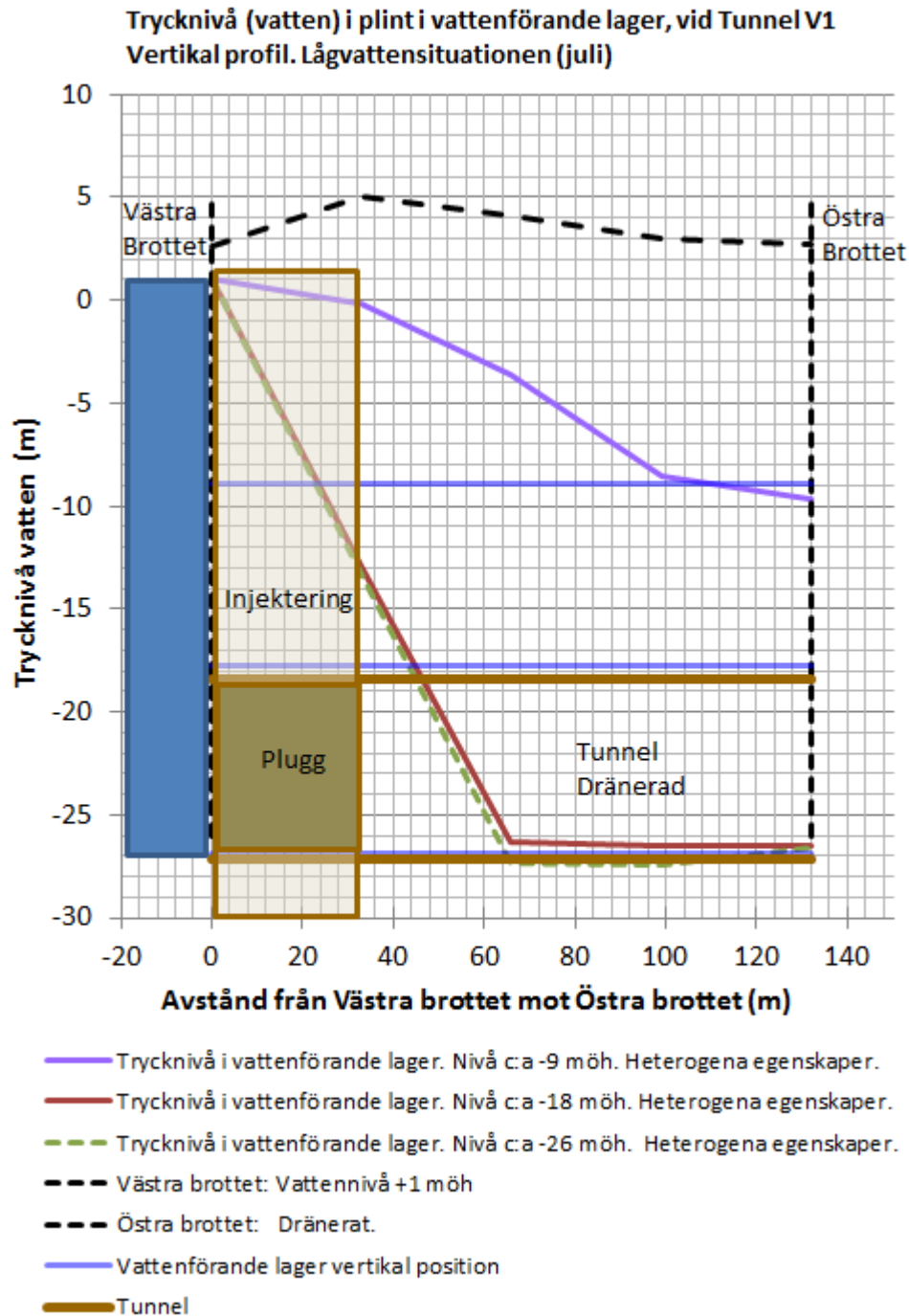
Grundvatteninflödet till Östra brottet, då Västra brottet har vattennivån +1 blir nära 350 000 m<sup>3</sup>/år..

- Ej inkluderande nettonederbörden över Östra brottet.
- Inkluderande grundvatteninflödet till tunnlarna i plinten.

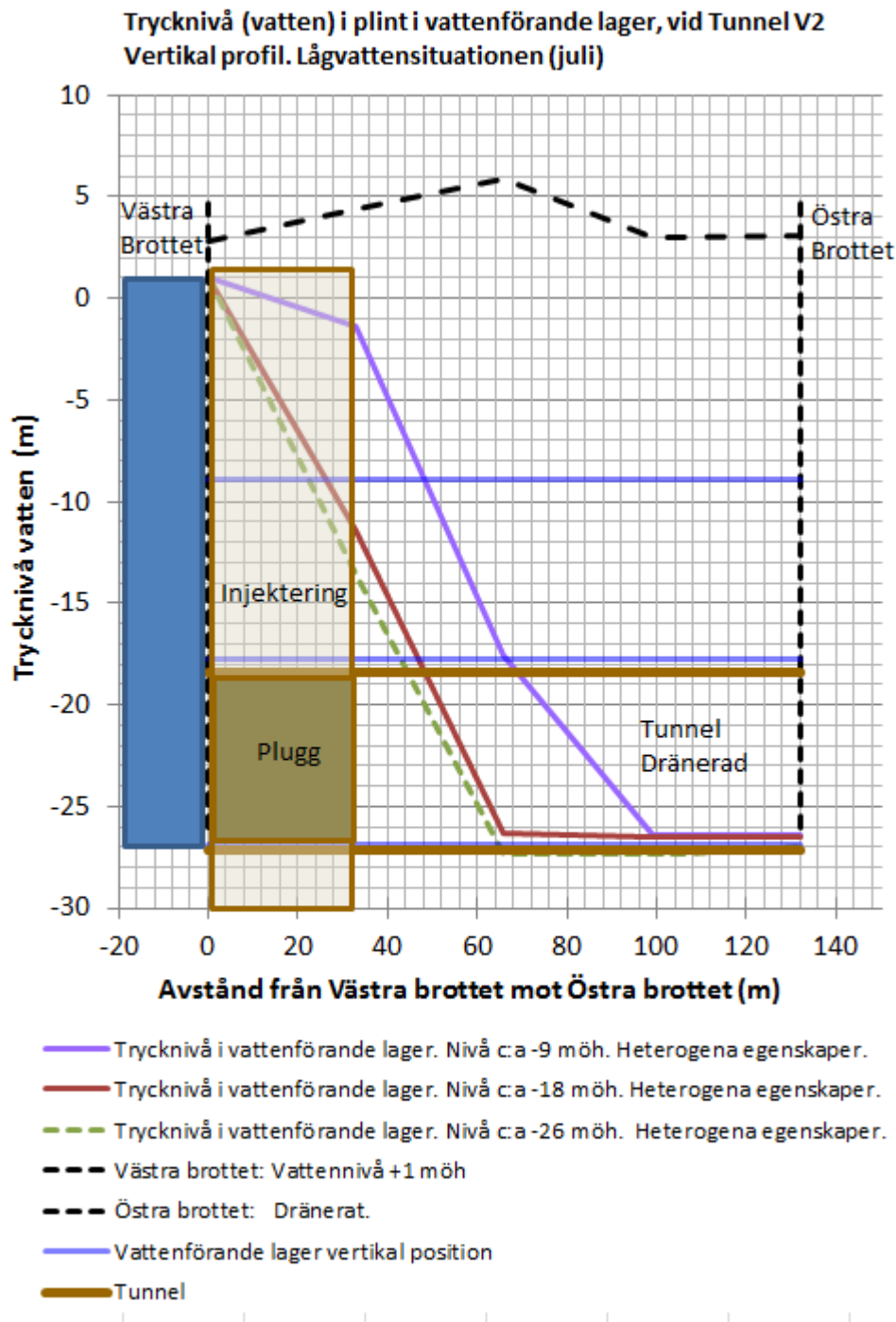
De beräknade flödena är behäftade med osäkerheter, eftersom bergplintens hydrogeologiska egenskaper inte är väl kända.

### 3. Slutsatser

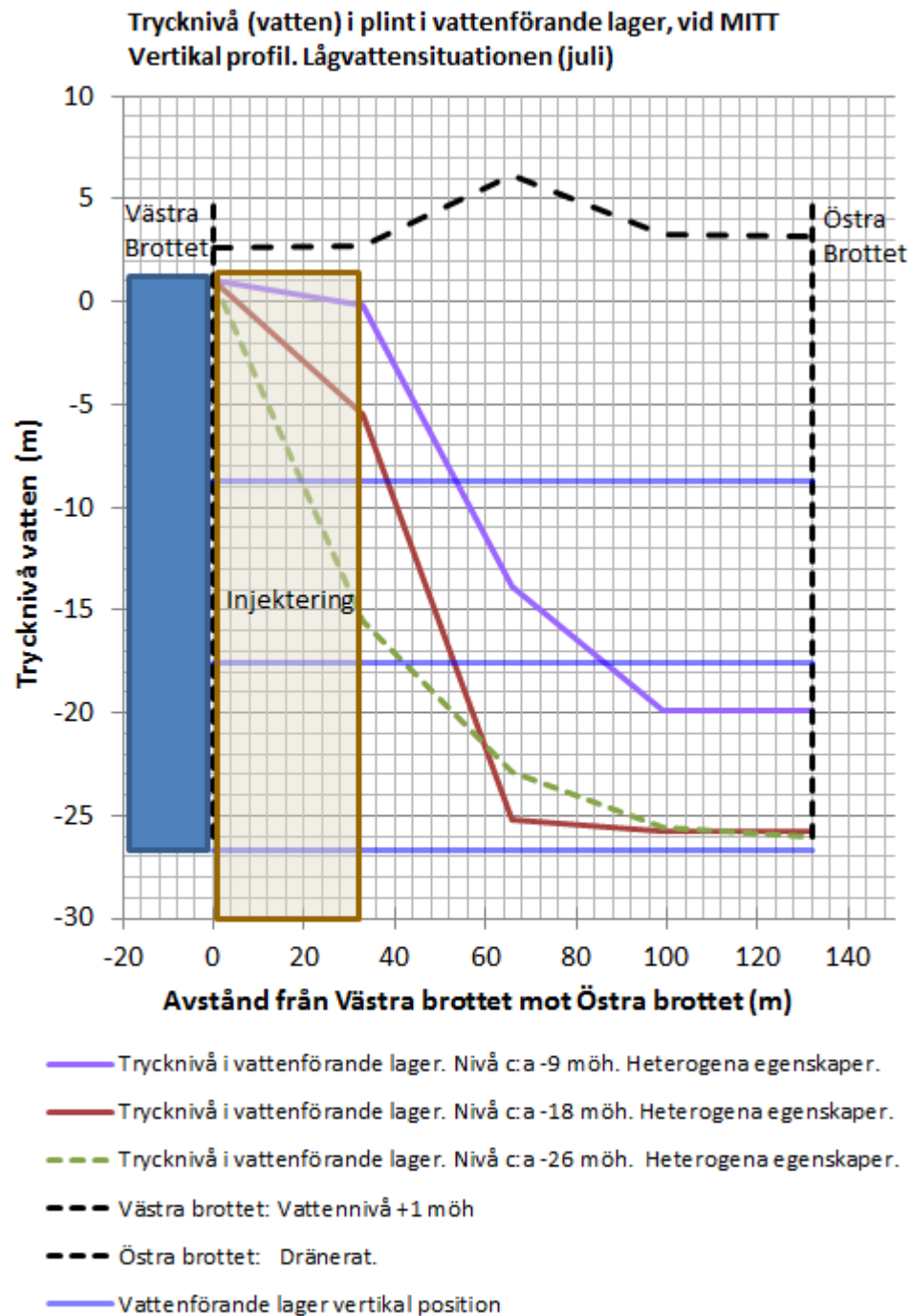
Ridåinjekteringen och tunnelpluggarna begränsar tydligt flödet genom bergplinten. De beräknade trycknivåerna visar att ett stort tryckfall sker i de västra delarna av bergplinten, genom ridåinjekteringen och tunnelpluggarna. De östra delarna av plinten är dränerade under hela året. Mättade förhållanden med tydliga grundvattennivåer förekommer endast i det översta vattenförande lagret under vintern (högvattensituationen). I bergplintens södra och norra del, söder och norr om tunnlarna, kan dock mättade förhållanden förekomma i delar av det översta vattenförande lagret även under sommaren. Inflödet till tunnlarna beror mycket på tunnelpluggarnas hydrauliska resistans (hydraulisk resistans är en kombination av genomsläpplighet och längd). För att begränsa inflödet är det nödvändigt att pluggarna utförs med bästa tillgängliga teknik.



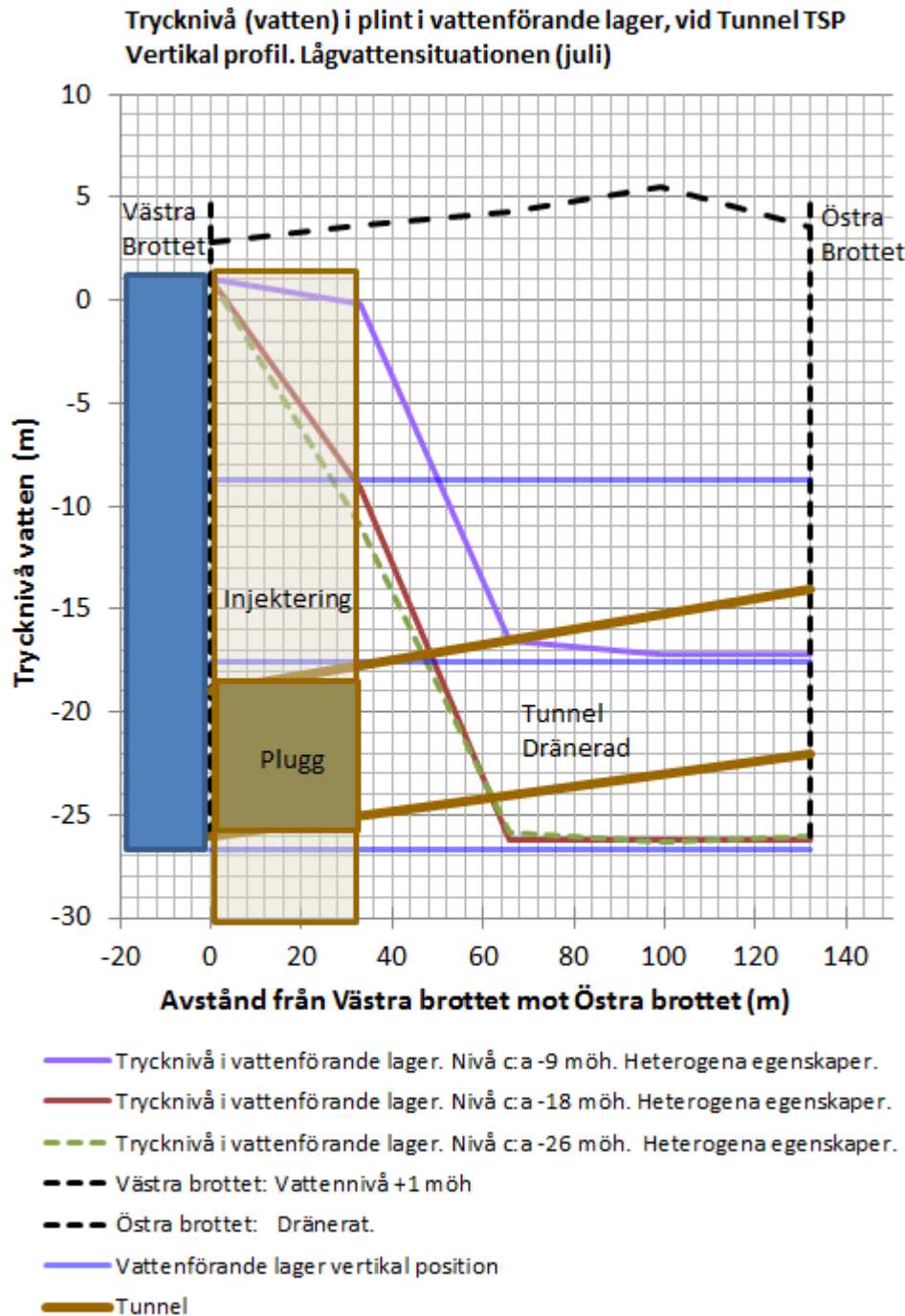
Figur 3-1 Resultat för sektion V1



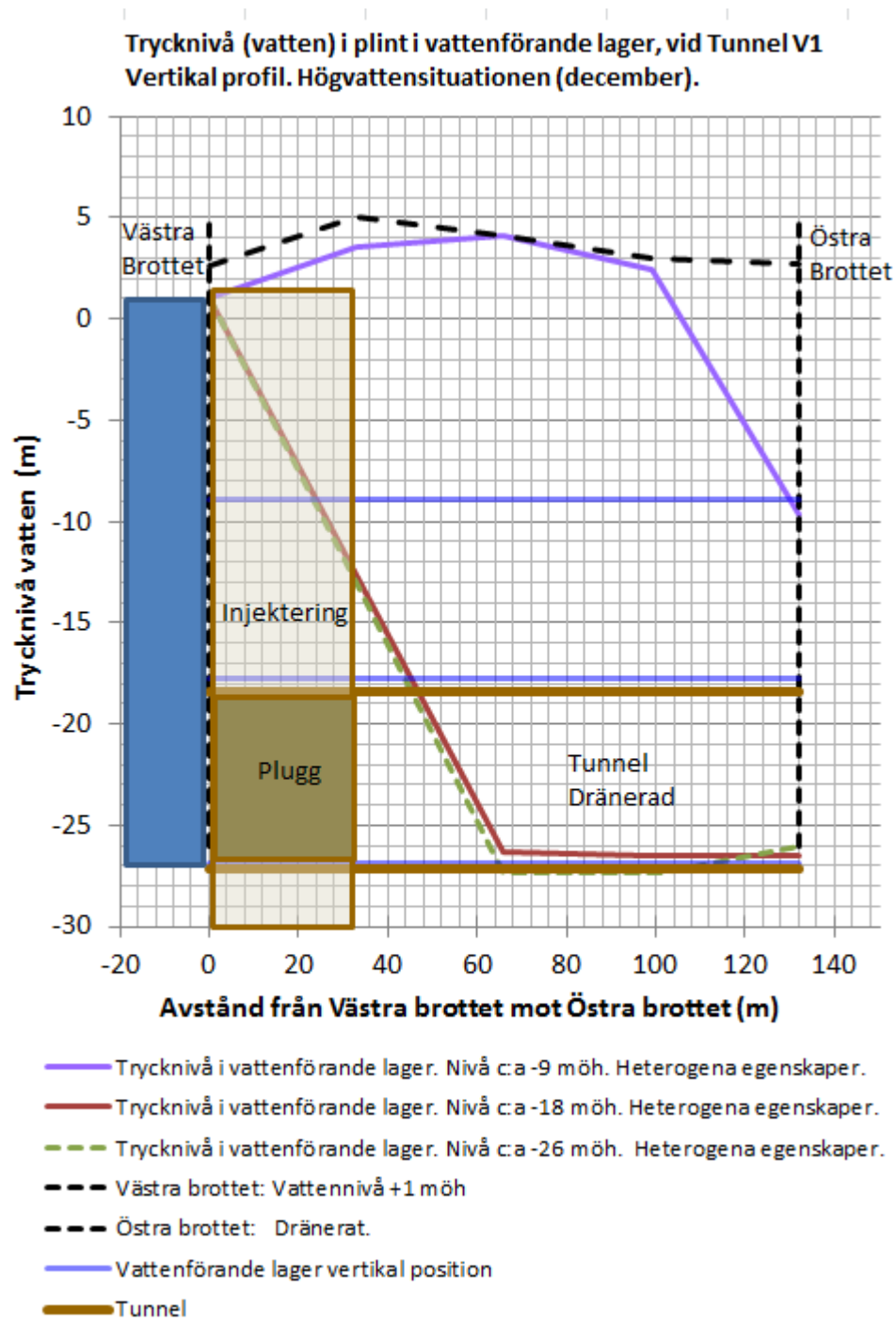
Figur 3-2 Resultat för sektion V2



Figur 3-3 Resultat för sektion Mitt



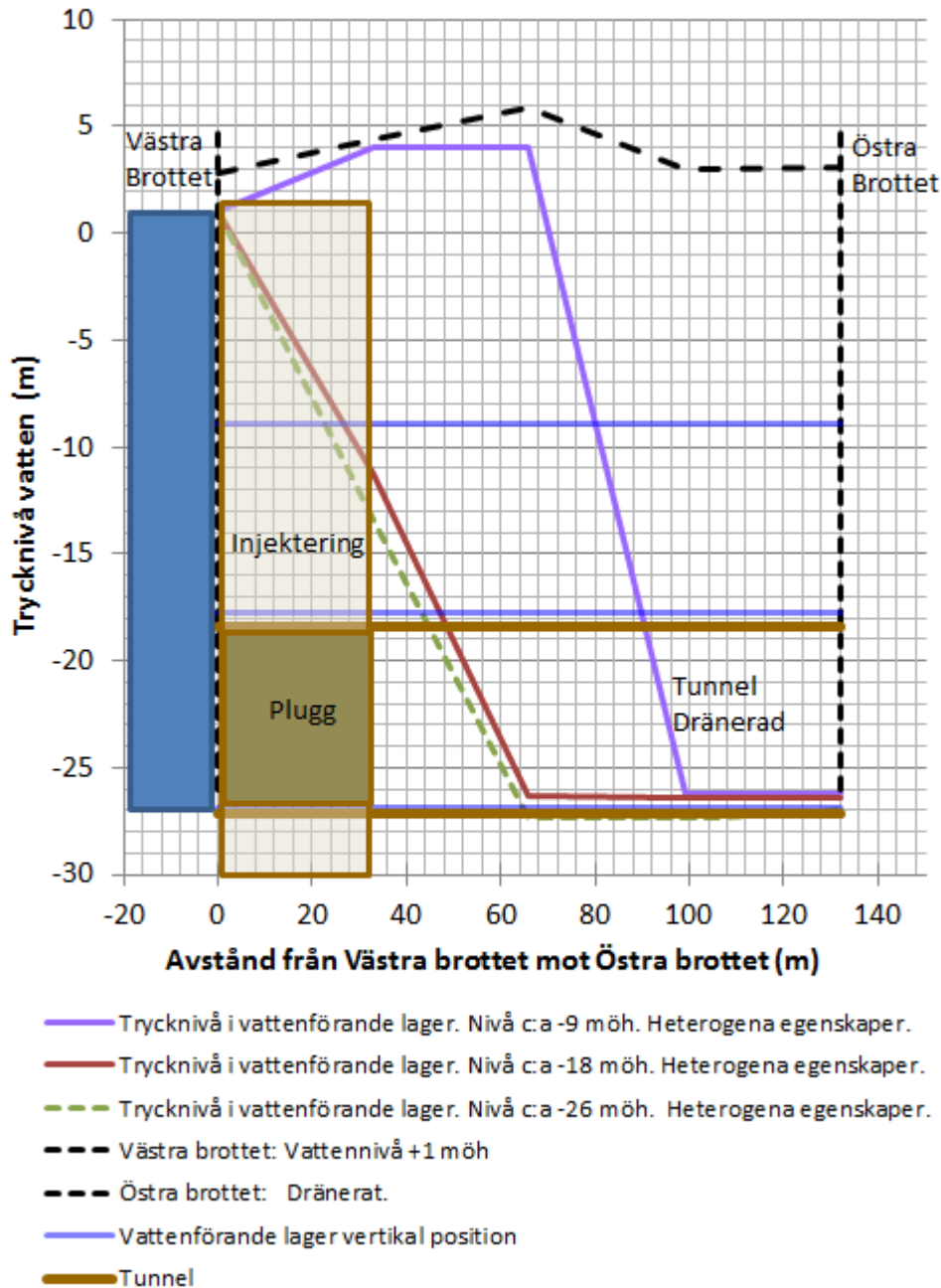
Figur 3-4 Resultat för sektion TSP



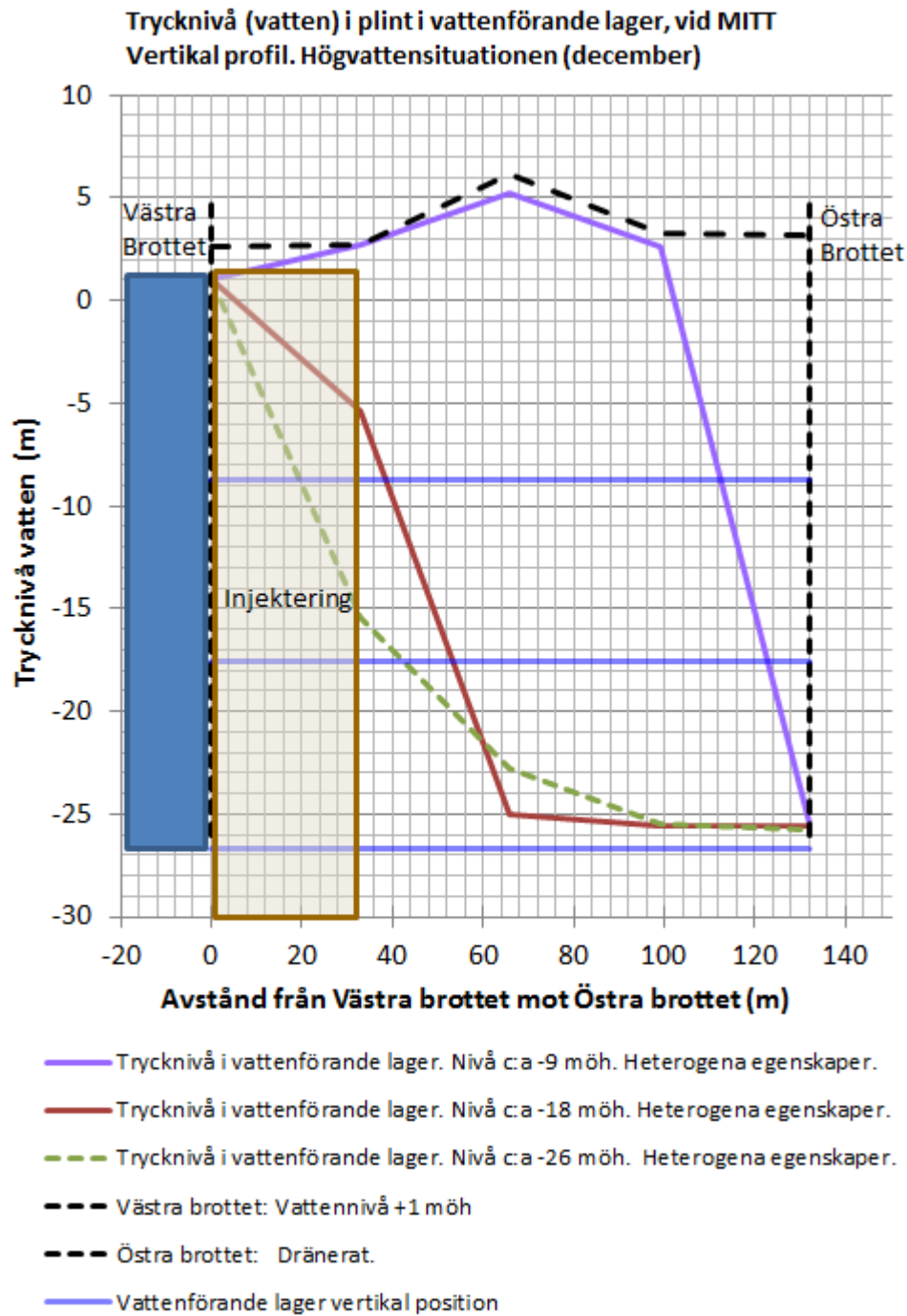
Figur 3-5 Resultat för sektion V1



Trycknivå (vatten) i plint i vattenförande lager, vid Tunnel V2  
Vertikal profil. Högvattensituationen (december).

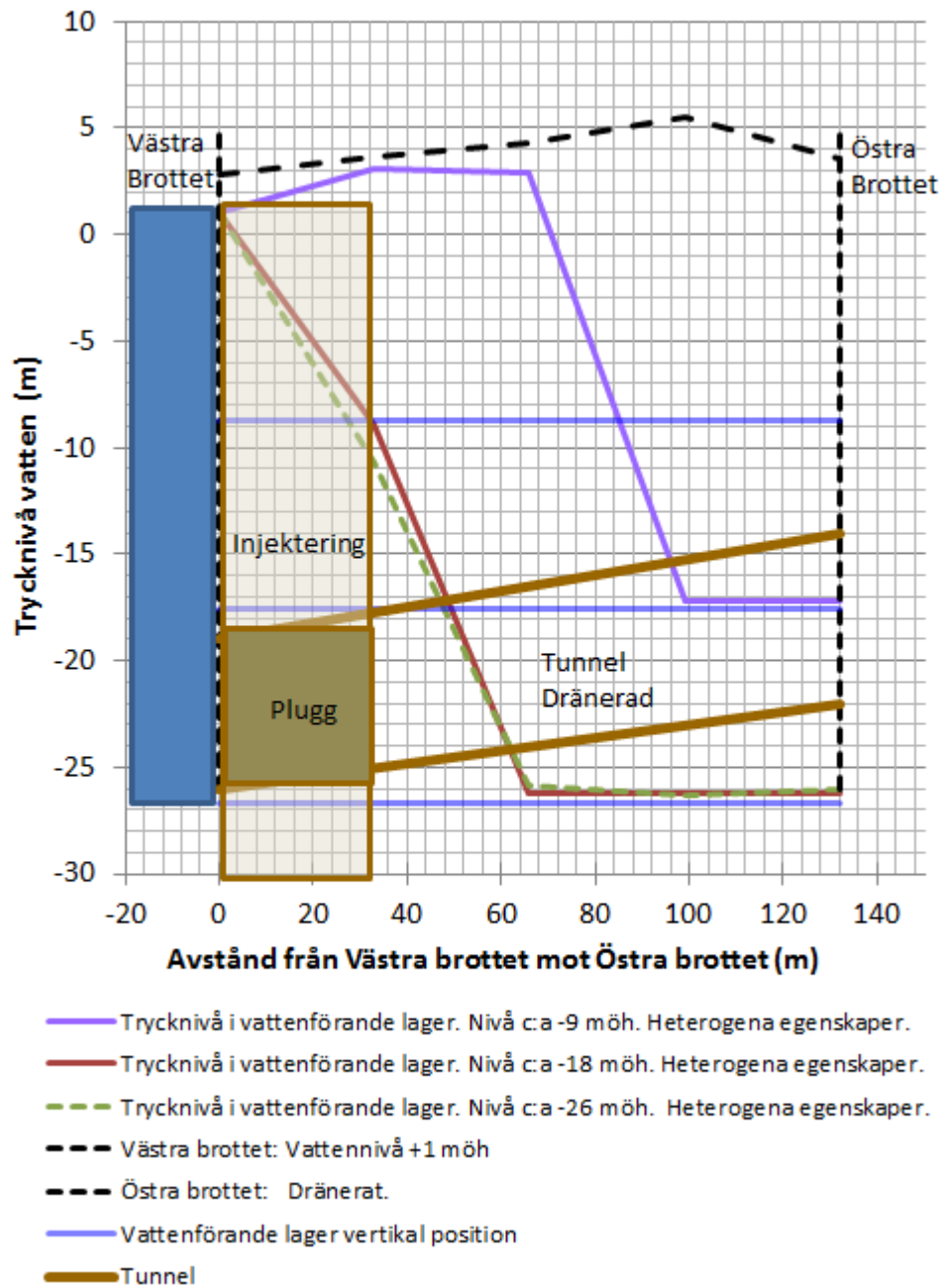


Figur 3-6 Resultat för sektion V2



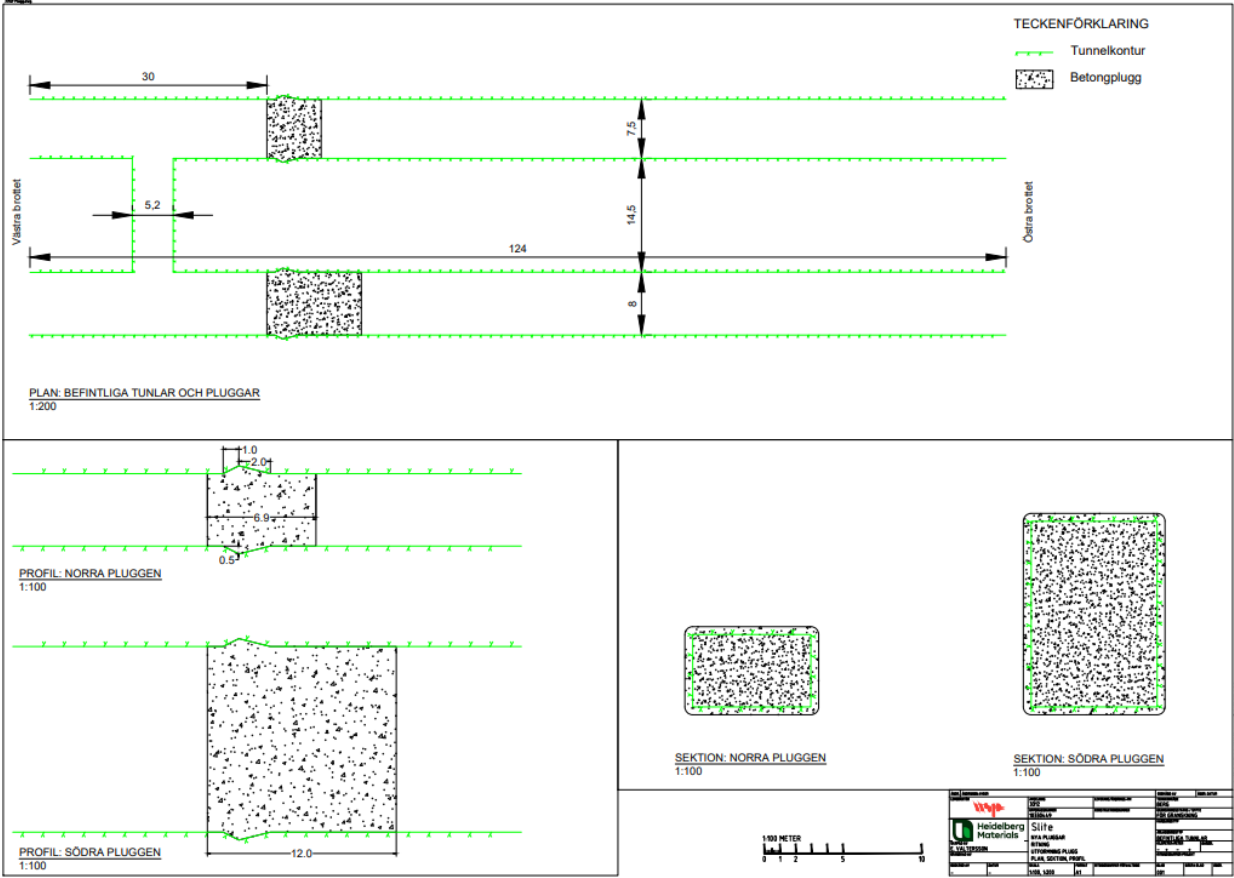
Figur 3-7 Resultat för sektion Mitt

Trycknivå (vatten) i plint i vattenförande lager, vid Tunnel TSP  
Vertikal profil. Lågvattensituationen (juli)



Figur 3-8 Resultat för sektion Tsp

# 4. Appendix – Ritning över vägtunnlar



## PLUGS

Plugs are typically located in atmospheric tunnels, such as construction access tunnels, at their intersection with unlined and concrete lined pressurized waterways, in order to control leakage. They are typically constructed with mass concrete and often contain a gallery to provide access for grouting and inspection. Criteria for determining the length of a plug include the following:

- minimum length of 1.5 - 2 times the plug diameter;
- minimum length of 4.6 m (15 ft);
- maximum perimeter shear stress between concrete and rock = 0.4 - 1.7 MPa (60 - 250 psi).

Leakage around plugs is usually handled by pumping from sumps. For ease of future inspection and maintenance work, it is advisable to maintain working construction utilities (air, water, electricity) at the plug.

Urklipp ur EPRI - Design guidelines for Pressure Tunnels and Shafts

$$\rho_W := 1000 \frac{kg}{m^3} \quad g := 9.806 \frac{m}{s^2}$$

## Dimensionering av den plugg i norra vägtunneln

Tunnelns geometri:

$$B_T := 7.5 \text{ m}, H_T := 4.6 \text{ m}, A_t := B_T \cdot H_T = 34.5 \text{ m}^2$$

Vattendjupet i västra brottet:

$$H_W := 30 \text{ m}$$

Längd enligt första kriteriet:

$$L_1 := 1.5 \cdot \min(B_T, H_T) = 6.9 \text{ m}$$

Längd enligt andra kriteriet:

$$L_2 := 4.6 \text{ m}$$

Längd enligt tredje kriteriet:

$$P := \rho_W \cdot g \cdot H_W = 0.294 \text{ MPa}$$

$$F := P \cdot A_t = 10.149 \text{ MN}$$

$$L_3 := \frac{F}{2 (B_T + H_T) \cdot 0.4 \text{ MPa}} = 1.048 \text{ m}$$

Utifrån EPRI:s design kriterier bör pluggen vara det längsta av måtten ovan

$$L_{dim} := \max(L_1, L_2, L_3) = 6.9 \text{ m}$$

I verifierande syfte beräknas den förväntade skjuvningen,  $\tau$ , i pluggens randyta.  
Utifrån den största längden från kriterier 1, 2 och 3

$$\tau := \frac{F}{2 (B_T + H_T) \cdot L_{dim}} = 0.061 \text{ MPa}$$

## Dimensionering av den plugg i södra vägtunneln

Tunnelns geometri:

$$B_T := 8 \text{ m}, H_T := 12 \text{ m}, A_t := B_T \cdot H_T = 96 \text{ m}^2$$

Vattendjupet i västra brottet:

$$H_W := 30 \text{ m}$$

Längd enligt första kriteriet:

$$L_1 := 1.5 \cdot \min(B_T, H_T) = 12 \text{ m}$$

Längd enligt andra kriteriet:

$$L_2 := 4.6 \text{ m}$$

Längd enligt tredje kriteriet:

$$P := \rho_W \cdot g \cdot H_W = 294.18 \text{ kPa}$$

$$F := P \cdot A_t = (2.824 \cdot 10^4) \text{ kN}$$

$$L_3 := \frac{F}{2 (B_T + H_T) \cdot 0.4 \text{ MPa}} = 1.765 \text{ m}$$

Utifrån EPRIs design kriterier bör pluggen vara det längsta av måtten ovan

$$L_{dim} := \max(L_1, L_2, L_3) = 12 \text{ m}$$

I verifierande syfte beräknas den förväntade skjuvningen,  $\tau$ , i pluggens randyta, utifrån den största längden från kriterier 1, 2 och 3

$$\tau := \frac{F}{2 (B_T + H_T) \cdot L_{dim}} = 0.059 \text{ MPa}$$

## Dimensionering av plugg i befintlig transportbandstunnel

Tunnelns geometri:

$$B_T := 4 \text{ m}, H_T := 3 \text{ m}, A_t := B_T \cdot H_T = 12 \text{ m}^2$$

Vattendjupet i västra brottet:

$$H_W := 36 \text{ m}$$

Längd enligt första kriteriet:

$$L_1 := 1.5 \cdot \min(B_T, H_T) = 4.5 \text{ m}$$

Längd enligt andra kriteriet:

$$L_2 := 4.6 \text{ m}$$

Längd enligt tredje kriteriet:

$$P := \rho_W \cdot g \cdot H_W = 353.016 \text{ kPa}$$

$$F := P \cdot A_t = (4.236 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$L_3 := \frac{F}{2 (B_T + H_T) \cdot 0.4 \text{ MPa}} = 0.756 \text{ m}$$

Utifrån EPRIs design kriterier bör pluggen vara det längsta av måtten ovan

$$L_{dim} := \max(L_1, L_2, L_3) = 4.6 \text{ m}$$

I verifierande syfte beräknas den förväntade skjuvningen,  $\tau$ , i pluggens randyta, utifrån den största längden från kriterier 1, 2 och 3.

$$\tau := \frac{F}{2 (B_T + H_T) \cdot L_{dim}} = 0.066 \text{ MPa}$$



## Bilaga 3

### Upphängning av löskärna - Slite - Gravitativt spänningsfält

Anläggningsdel: Ny transportbandstunnel

25 mm bults tvärsnittsarea ( $A_s$ )

$$A_s := 491 \text{ mm}^2$$

Karaktäristiskt flytgränsvärde för stål ( $f_{yk}$ )

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

Partialkoefficient dimensioneringssituation för stål, exceptionella ( $\gamma_s$ )

$$\gamma_s := 1.15$$

Partialkoefficient för permanent och ogynnsam last vid varaktig dimensioneringssituation ( $\gamma_{G,dst}$ )

$$\gamma_{G,dst} := 1.1$$

Partialkoefficient last för säkerhetsklass 3 ( $\gamma_d$ )

$$\gamma_d := 1$$

Bergets densitet ( $\rho_b$ )

$$\rho_b := 2555 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Bergmassans inre friktionsvinkel ( $\phi$ )

$$\phi := 35 \text{ deg}$$

Tyngdkraften (g)

$$g := 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Tunnelbredd, teoretisk ( $B_o$ ) & tunnelbredd, med tillägg för stick och lokala bergutfall (B)

$$B_o := 5 \text{ m}$$

$$B := B_o + 0.6 \text{ m} = 5.6 \text{ m}$$

Pilhöjd, anfang till tak (h) & Pilhöjd med tillägg för stick och lokala utfall ( $h_t$ )

$$h := 0 \text{ m}$$

$$h_t := h = 0 \text{ m}$$

Tunnelläge, djup (z) i meter

$$z := 10 \text{ m}$$

Följande spänningsförhållande antas:

$$\nu := 0.25$$

$$\sigma_v := \rho_b \cdot g \cdot z = 0.256 \text{ MPa} \quad \sigma_H := \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right) \cdot \rho_b \cdot g \cdot z = 0.085 \text{ MPa} \quad \sigma_h := \sigma_H = 0.085 \text{ MPa}$$

## Beräkningar

Pilhöjden för trycklinjen ( $f$ ) beräknas utifrån bergets egna bärande förmåga samt och spänningsfältet. Utav  $f_1$  och  $f_2$  så används den högsta pilhöjden.

$$f_1 := \frac{B}{2} \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) = 1.458 \text{ m}$$

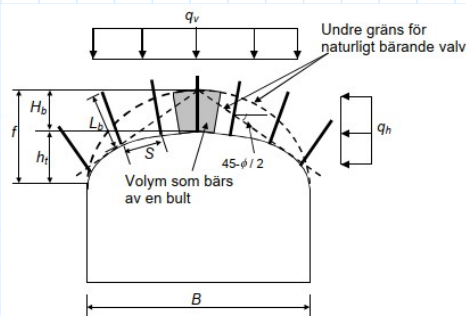
För att beräkna  $f_2$  så uppskattas den minsta horisontella spänningen vinkelrätt på tunneln ( $q_H$ ). Den vertikala spänningen ( $q_v$ ) sätts lika med ( $\sigma_v$ ).

$$q_v := \sigma_v \quad q_H := \sigma_h$$

$$f_2 := B \cdot \sqrt{\frac{q_v}{8 \cdot q_H}} = 3.429 \text{ m}$$

$$f := \max(f_1, f_2) = 3.429 \text{ m}$$

Höjden för den lösa bergmassan ( $H_b$ ) tas fram genom att subtrahera pilhöjden från anfang till tak ( $h_t$ ) på pilhöjden för lösa bergmassan ( $f$ ). En figur kan ses nedan som illustrerar de olika pilhöjderna. Eftersom taket antas vara platt, utan valv är  $h_t = 0$



$$H_b := f - h_t = 3.429 \text{ m}$$

Den karakteristiska lasten ( $W_k$ ) blir:

$$W_k := \rho_b \cdot g \cdot H_b = 0.088 \text{ MPa}$$

Den dimensionerande lasten ( $W_d$ ) bestäms med hjälp av partialkoefficienter:

$$W_d := W_k \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{G;dst} = 0.096 \text{ MPa}$$

Bultarnas dimensionerande bärförmåga ( $f_{yd}$ ) bestäms med hjälp av från partialkoefficienten ( $\gamma_s$ ):

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \text{ MPa}$$

## Bilaga 3

Lämpligt bultavstånd ( $S_1$ ) beräknas nedan:

$$S_1 := \sqrt{\frac{f_{yd} \cdot A_s}{W_d}} = 1.488 \text{ m}$$

Förhållandet mellan bultavstånd ( $S$ ) och bultlängd ( $L_b$ ) skall tas även till hänsyn, där bultavståndet skall vara mindre än följande uttryck:  $S < 0.5$  till  $0.7 \cdot L_b$ .

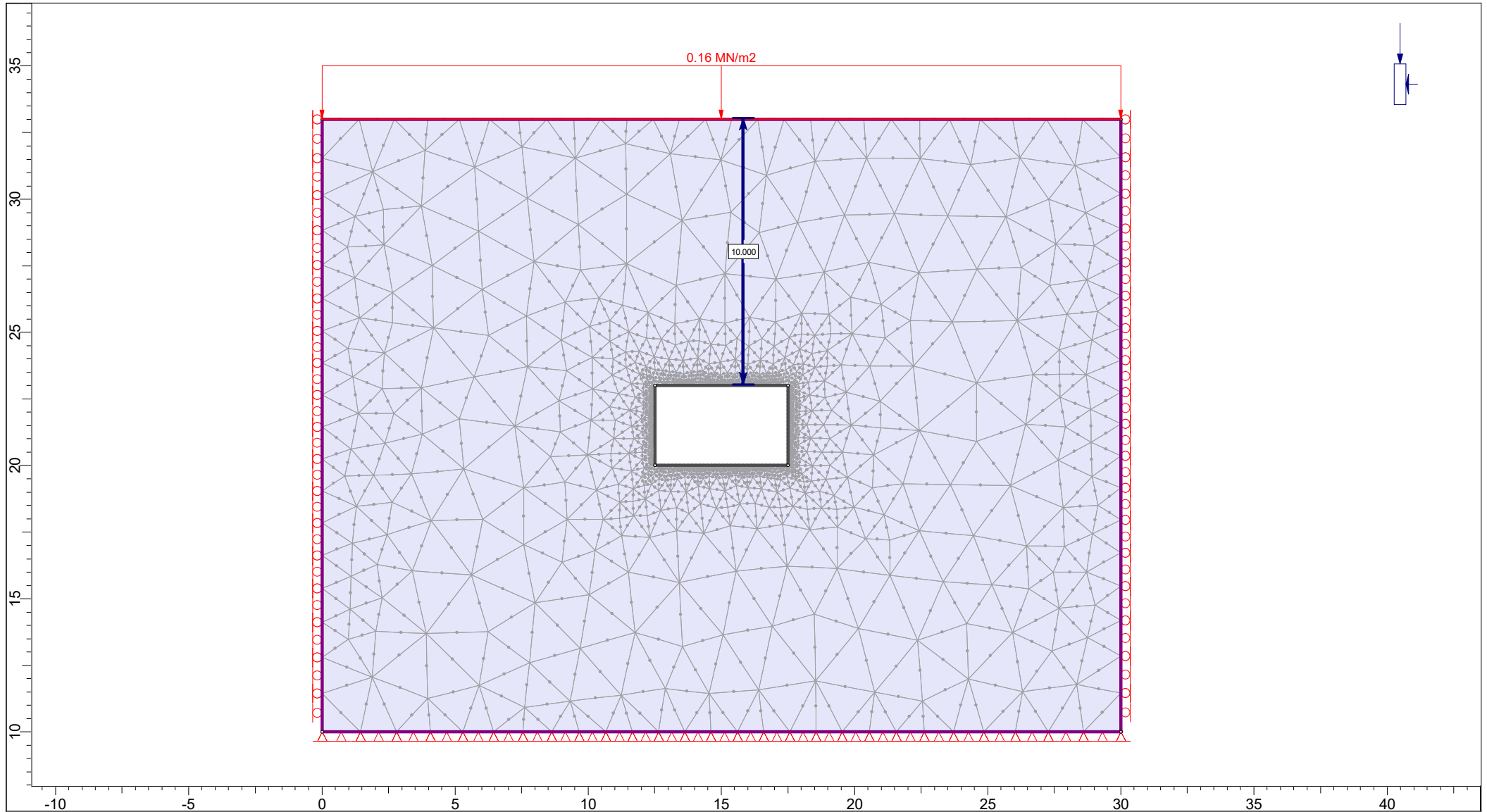
Bultlängden antas enligt:  $L_b := H_b + 1 \text{ m} = 4.429 \text{ m}$


$$S_2 := 0.7 \cdot L_b = 3.1 \text{ m}$$

Det minsta värdet av  $S_1$  och  $S_2$  används som erforderligt bultavstånd  $S$

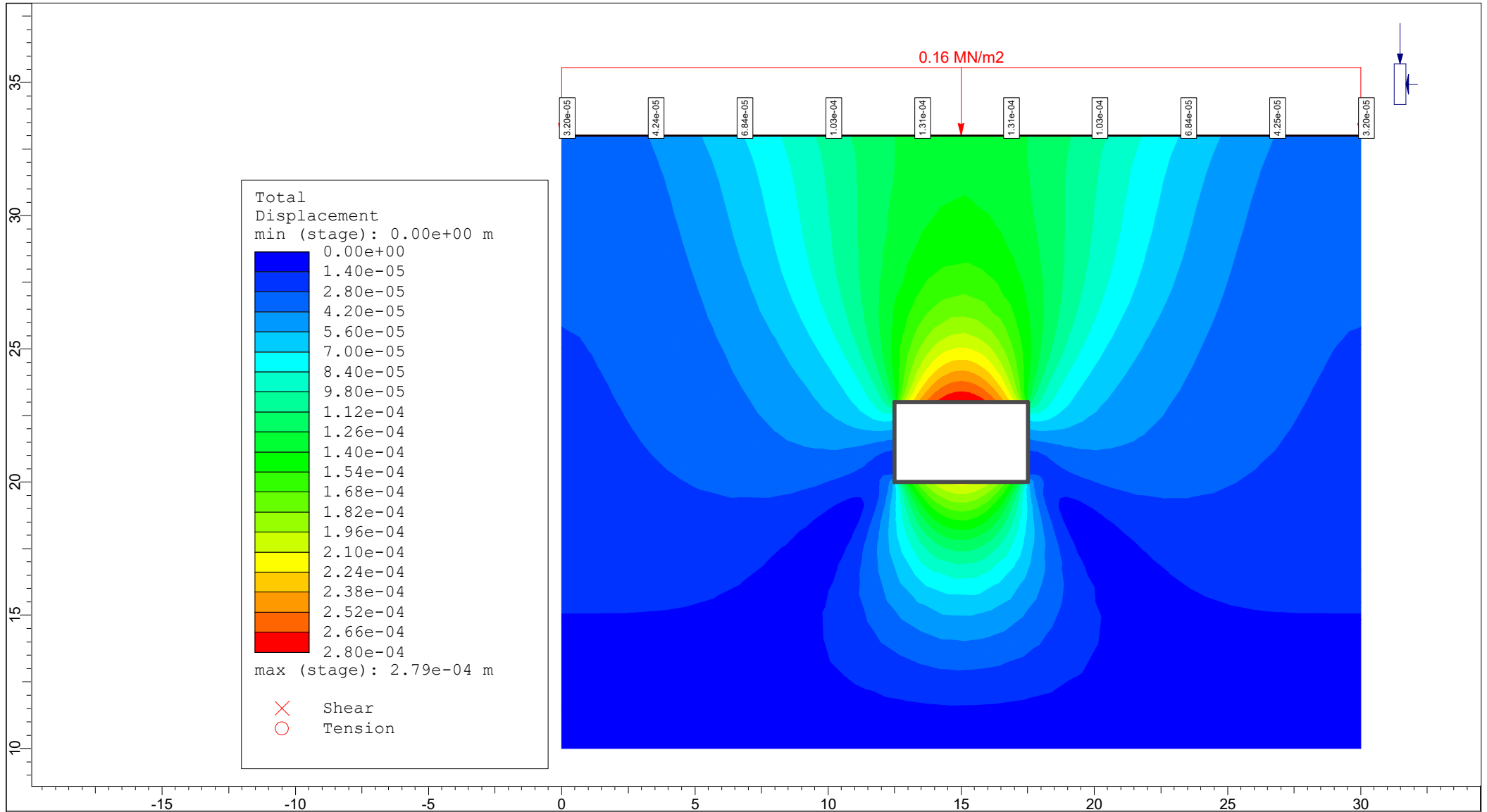
$$S := \min(S_1, S_2) = 1.488 \text{ m}$$

# Bilaga 4



	Project			Slite		
	Analysis Description			Deformation vid bergyta		
	Drawn By	Einar Valtersson	Scale	1:200	Company	WSP Sweden AB
	Date	2023-08-25, 13:24:54			File Name	UnderVäg-Oförstärkt - 1.fe3

# Bilaga 4



	Project			Slite		
	Analysis Description			Deformation vid bergyta - Typvärde		
	Drawn By	Einar Valtersson	Scale	1:200	Company	WSP Sweden AB
	Date	2023-08-25, 13:24:54			File Name	UnderVäg-Oförstärkt - 1.fez