

PM

**BERGMEKANISK ANALYS FÖR GRUNDLÄGGNING  
AV KV. 37, 38N, 38S OCH 39 OVAN CITYBANAN**



Slutrapport

2024-09-03

**Uppdrag:** 334141 Berganalys kv 37, 38N, 38S och 39  
**Titel på rapport:** Bergmekanisk analys för grundläggning av kv. 37, 38N, 38S och 39 ovan citybanan  
**Status:** Slutrapport  
**Datum:** 2024-09-03

### Medverkande

**Beställare:** Vectura, Humlegården och Seniorgården  
**Kontaktperson:** Jenny Sjöblom, Nils Resvik, Jessica Sageryd, Anna-Kari Malm

**Konsult:** Tyréns Sverige AB  
**Uppdragsansvarig:** Mohsen Bazargan

### Revideringar

**Revideringsdatum:** 2024-09-03  
**Version:** 2  
**Initialer** MB

---

**Datum:** 2024-01-26  
**Handling (version 1) granskad av:** Sylvia Berg och Johan Pilbacka

**Datum:** 2024-02-28  
**Handling (version 2\*) granskad av:** Rikard Gothäll (Firma Terra)

**Datum:** 2024-09-03  
**Handling (version 3\*\*) granskad av:** Jennifer Wänseth och Sylvia Berg

---

\* I version 2 har granskningskommentarerna beaktats och lastningssituationen har förfinats, vilket resulterat i minskat jordtryck efter jordschaktningen för byggnaderna.

\*\* I version 3 har granskningskommentarerna beaktats och materialegenskaperna för bult och sprutbetong har förfinats, nya resultat presenteras och ytterligare detaljer förklaras.

## Sammanfattning

På uppdrag av Vectura, Humlegården och Seniorgården utreder Tyréns de bergmekaniska förutsättningarna för planerad byggnationen av kv 37, 38N, 38S och 39, med avseende på bergmassans bärighet i relation till befintliga undermarksanläggningar. Utredningen baseras på bergmekanisk modellering av den projekterade lastsituationen i området kring Citybanan. Numeriska beräkningar har utförts i programvaran COMSOL Multiphysics.

Utifrån planerad lastpåkänning på berg syftar detta PM till att utreda påverkan på underliggande anläggning i berget. Bergtekniska grundläggningsaspekter som exempelvis sprickor och bergmassans tryckhållfasthet kring fundament behandlas inte, utan kräver vidare utredning när fler detaljer finns tillgängliga.

Analys påvisar att de påförda lasterna från byggnaderna har en mycket liten inverkan på bergmassan kring tunnlarna i ett område med liten bergtäckning och ingen inverkan i övrigt. De deformationer som beräkningarna prognostiserar kommer att vara så små att de i praktiken är omätbara. Påförda axiella spänningar på befintliga bultar, samt deformation på fiberarmerad betong i tunnel är dessutom inom dess kapacitet. Beräkningarna har utgått från ogynnsammast möjliga grundläggning, varför vidare projektering kommer att kunna minska inverkan ytterligare.

## Innehållsförteckning

1.1 Introduktion och syfte .....	6
1.2 Beskrivning av området och lastsituation .....	6
1.3 Underlag .....	9
2.1 Allmänt.....	10
2.2 Initialspänningsförhållanden.....	10
2.3 Geologiska förutsättningar .....	11
2.4 Bergtäckning.....	12
3.1 Allmänt.....	14
3.2 Modellgeometri .....	15
3.3 Rand- och startvillkor .....	16
3.4 Mesh element .....	17
3.5 Materialegenskaper .....	17
3.6 Yttre laster .....	18
4.1 Deformationer .....	21
4.2 Huvudspänningar kring Citybanan .....	24
4.3 Spänningstillskott.....	25
4.4 Laständringar och deformationer i förstärkning (bultarna och sprutbetong) .....	27
6.1 Diskussion .....	30
6.2 Slutsats.....	35

## Förkortningar

FEA	Finita Element Analysis
kv	Kvarter
PM	ProMemoria
SGU	Sveriges Geologiska Undersökning

## Symboler

$\sigma_1$	Första huvudspänning
$\sigma_2$	Andra huvudspänning
$\sigma_3$	Tredje huvudspänning
$\sigma_H$	Största horisontalspänningen i bergmassan (Initialspänning)
$\sigma_h$	Minsta horisontalspänningen i bergmassan (Initialspänning)
$\sigma_v$	Vertikalspänning i bergmassan (Initialspänning)
$\theta_{\sigma H}$	Vinkel som anger bäringen på $\sigma_H$ , definierade medurs från norr
$\sigma_{cm}$	Enaxiell tryckhållfasthet för bergmassa
$E_i$	Elasticitetsmodul för intakt berg
$E_m$	Elasticitetsmodul för bergmassan
$\nu$	Bergmassans tvärkontraktionstal (Poissons tal)
$\rho$	Bergmassans densitet

## Definitioner

Det globala koordinatsystemet i programvaran COMSOL Multiphysics är kartesiskt, högerorienterat med z-riktningen vertikal och med positiv riktning definierad uppåt. Positiv riktning på y-axeln är mot norr. COMSOL Multiphysics definierar tryckspänningar som negativa, vilket innebär att den största tryckspänningen är den tredje huvudspänningen  $\sigma_3$  i programmet. Solidmekanik modul i COMSOL kan hjälpa till med att analysera tunnlar, utgrävningar, sluttningsstabilitet och kvarhållande strukturer som kräver icke linjära materialmodeller skräddarsydda för geotekniska applikationer.

# 1 Inledning

## 1.1 Introduktion och syfte

På uppdrag av Vectura, Humlegård och Seniorgården utreder Tyréns de bergmekaniska förutsättningarna för byggnation av nya kvarter 37, 38N, 38S och 39 med avseende på bergmassans bärighet, samt huruvida Citybanans anläggningen påverkas vid belastning av byggnaderna.

Last från byggnaderna kommer föras ner till berg via grundläggningen på plintar eller pålar, vilka är placerade ovanför Citybanans anläggningar i berg eller i dess närhet. Med utgångspunkt från lastplacering och laststorlek för samtliga byggnadskvarter syftar detta PM till att utreda lasternas eventuella inverkan på Citybanans anläggning. Bergmekanisk analys avser utgöra grund för fortsatt projektering av kv 37, 38N, 38S och 39, i synnerhet vad gäller utformning av grundläggning, samt fördelningen och placeringen av laster, med ambitionen att uppnå optimala lastförhållanden. Notera att detta inte utgör konstruktionshandling, utan snarare är en genomförbarhetsanalys avsedd för innevarande skede i projektet.

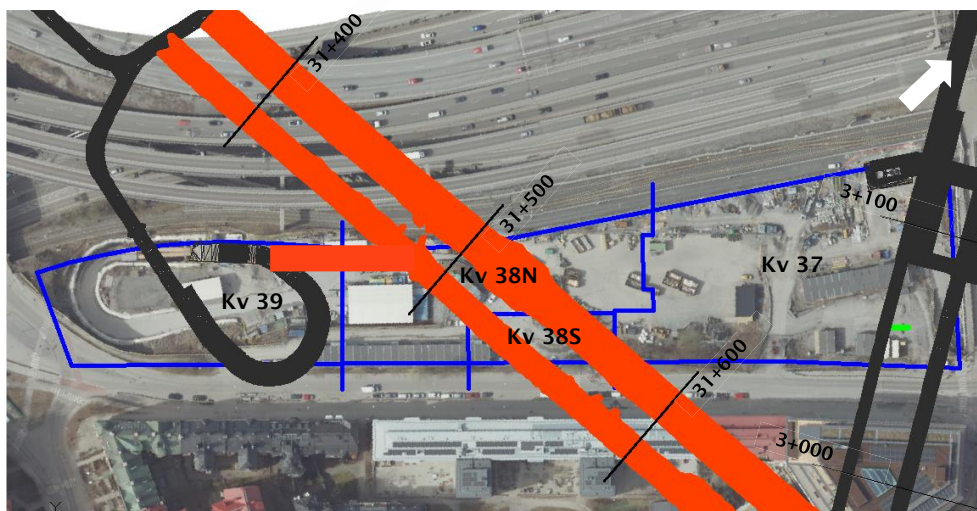
Tyréns utgångspunkt i den bergmekaniska analysen är att lasterna inte ska påverka konstruktionsförutsättningarna för Citybanans anläggning negativt. Utredningen behandlar deformationer och spänningsförändringar i bergmassan omkring Citybanan för att analysera effekten av lasterna, medan de bergmekaniska förutsättningarna vid grundläggningsnivå inte behandlas eller undersöks. Bergmekanisk modellering av planerad lastsituation i området bygger på numeriska strukturanalyser i programvaran COMSOL Multiphysics.

## 1.2 Beskrivning av området och lastsituation

### **Citybanans anläggning**

Citybanans anläggning i berg inom projektområdet består av spår- och servicetunnlar, tvärtunnlar och en arbetstunnel. Servicetunneln är ca 8 m bred. Spårtunneln är generellt ca 13 m bred, men breddas upp till 20 m vid ventilationsnisch mellan längdmätning 31+510 till 31+540, se även Bilaga 3.

Tunnelgeometrier för spår- och servicetunnel har hämtats från erhållen 3D-modell, medan de två tvärtunnlarna och arbetstunneln har modellerats utifrån förvaltningsdata från Citybanan. Meshmodellen för Citybanan motsvarar bergytan. För en smidigare hantering i COMSOL har meshmodellen förenklats något, men redovisar fortfarande en korrekt bild av tunneltaket, se Figur 8. Arbetstunneln har inkluderats i den numeriska modellen, men endast den öppna delen har utvärderats, eftersom den är stängd vid ca LM 0+200 med en betongvägg. Arbetstunneln används för närvarande av FUT och kommer att behöva analyseras separat för grundläggningen av kv 39, se Figur 1.



Figur 1: Illustration över kvarter 37, 38N, 38S och 39. Citybanan visas i rött och FUT i grått. Redovisad längdmätning är för Citybanans spår U2.

## Tunnelbanan till Arenastaden

Tunnelbaneanläggningen har en komplex geometri med stationstunnlar, perronger, spår- och servicetunnlar, arbetstunnel, tryckutjämningsschakt, rulltrappsschakt och flertalet tvärtunnlar. Samtliga dessa undermarksutrymmen ligger utanför influensområdet för de laster som tas ned på Citybanan, varför de har uteslutits ur denna modell.

### Laster från kvarter 37, 38N, 38S och 39

Yttre laster i denna analys utgörs av preliminära laster från de största lastfallen (dvs. brottgränstillstånd i byggnaderna) från de planerade byggnaderna vid kvarter 37, 38N, 38S och 39, vilka är belägna ovanför eller i närheten av Citybanans anläggning i berg. Lastsituationen redovisas vidare i Bilaga 2.

Minsta bergtäckning mellan teoretisk tak i Citybanan och grundläggning ovan mark är cirka 5,7 m ovanför spårtunneln och 5,0 m ovanför servicetunneln, se Figur 9.

I modellen har en konservativ förenkling gjorts så att lasterna verkar direkt på bergöverytan i form av linjer eller punkter. En redogörelse för hur lasterna har hanterats i den numeriska modellen presenteras i avsnitt 3.6 . Tabell 1 redovisar tillkommande laster i området.

Tabell 1: Preliminära maximala laster från de största lastfallen för samtliga kvarter (kv).

<b>kv 37</b>	
Last	3-10 MN
Linjelast	300-800 kN/m
<b>kv 38N</b>	
Last	0,1-6,8 MN
Linjelast	80-1960 kN/m
<b>kv 38S</b>	
Last	0,745-1,235 MN
Linjelast	130-620 kN/m
<b>kv 39</b>	
Last	0,2-6,2 MN
Ytlast	15 kN/m <sup>2</sup>



## 1.3 Underlag

Underlag för den bergmekaniska analysen är följande:

- Huslaster från kv 37, se Bilaga 2.
- Huslaster från kv 38N.
- Huslaster från kv 38S.
- Huslaster från kv 39.
- Bergmassans egenskaper inom det aktuella området, tillhandahållet av FUT Tunnelbana till Arenastaden, se Bilaga 1.
- Förvaltningsdata på tunnelgeometrier och befintlig förstärkning för det aktuella området i Citybanan, enligt:
  - Förvaltningsdata, Tomtebodan – Stockholm Södra, Citybanan, km 31+400 – 31+600, plan, bergschakt ritningsnummer: 1 154 366, blad: 158.
  - Förvaltningsdata, Tomtebodan – Stockholm Södra, Citybanan, km 31+525 – 31+540, sektion A-512, förstärkning, ritningsnummer: 1 154 366, blad: 612.
  - Förvaltningsdata, Tomtebodan – Stockholm Södra, Citybanan, km 31+540 – 31+555, sektion A-513, förstärkning, ritningsnummer: 1 154 366, blad: 613.
  - Relationsritning, Stockholm, Arbetstunnel Norra stationsgatan, Tomtebodan – Stockholm Södra, km 31+400 – 31+600, sammanställning, ritningsnummer: 1 154 374, blad: 191.
- Bergmodell enligt modellfil: Trafikverkets förvaltningsdata.
- Citybanans geometri enligt modellfil: Trafikverkets förvaltningsdata.
- Sektioneringar för varje meter i pdf-format
- Initialspänningar och initialspänningsriktningar enligt: *Vattenfall Power Consultant, "Initiala bergspänningar i Stockholmsområdet - Underlag för projektering av Citybanan", 2007-04-10.*
- Projektering av bergkonstruktioner, TDOK 2019:062.

## 2 Bergtekniska förutsättningar

### 2.1 Allmänt

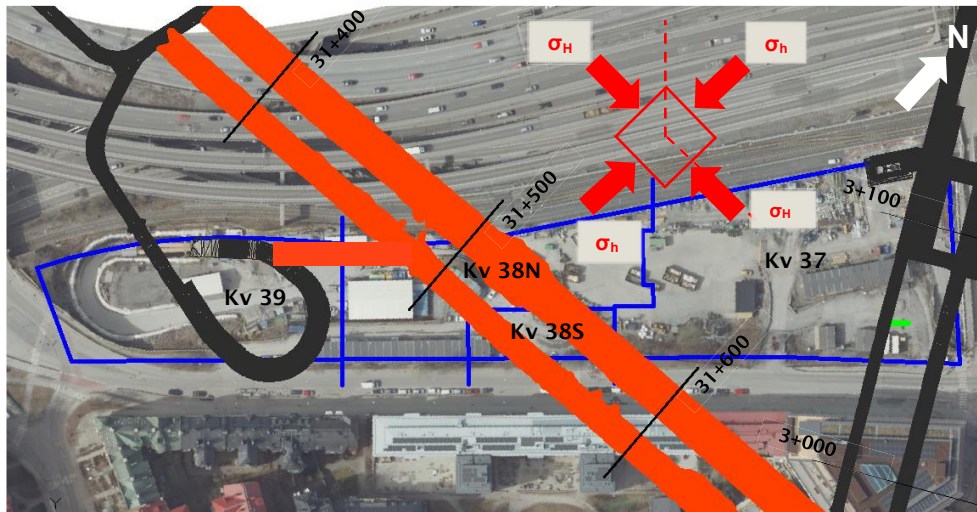
I detta kapitel beskrivs de bergtekniska förutsättningar som utgör underlag för den bergmekaniska analysen. För utvärderingen av bergmassans initialspänningar i området har Tyréns utgått från projekteringsunderlag från Citybanan, enligt Perman & Sjöberg (2007).

Tyréns har modellerat Citybanans anläggning med underlag av tillhandahållen 3D-modell enligt avsnitt 1.3. Av modelltekniska skäl är modellgeometrin i Comsol förenklad i jämförelse med 3D-modellen, men utan påverkan på bergtäckning, spännvidd och tunnelform vid kritiska sektioner. Noggrannheten bedöms vara fullt tillräcklig för denna typ av analys.

### 2.2 Initialspänningsförhållanden

De bergspänningsförhållanden som antas råda i bergmassan i området presenteras i Figur 2. Nyttjade spänningsmagnituder och riktningar är typvärden hämtade från projekteringen av Citybanan, vilka bedöms ge en realistisk bild av spänningssituationen utifrån erfarenheter av rådande förhållanden under byggtiden. Magnituder på största och minsta horisontalspänning,  $\sigma_H$  och  $\sigma_h$ , redovisas i Tabell 2. Den vertikala spänningen,  $\sigma_v$ , antas vara rent gravitativ, notera att denna spänningskomponent ej visas i Figur 2.

Närmaste mätning på initialspänningar har utförts 500 m bort i ett borrhål på Odenplan, Karlbergsvägen vid Gustav Vasa kyrka. Dessa mätningar påvisar högre spänningar än typiska värden, vilket indikerar att berget är väl inspant. För inspända förhållanden är inverkan från grundläggningslasterna oberoende av inspänningsnivåerna, varför de exakta inspänningsförhållandena egentligen inte behöver vara kända för denna analys. Använda spänningsförhållanden i analysen, dvs. min, max och variationer för riktningen på sigma 1, har kontrollerats mot utfärda mätningar i området, vid byggnation av Citybanan, se Tabell 2.



Figur 2: Redovisning av initialspänningar i bergmassan runt kvarter 37, 38N, 38S och 39. Citybanan visas i rött och FUT i grått.

Tabell 2: Nyttjade initialspänningar i analys.

Beteckning	Initialspänning
Vertikalspänning i bergmassan, $\sigma_v$ [MPa]	$\rho \cdot g \cdot z$
Största tryckspänning i bergmassan, $\sigma_H$ [MPa]	4,7
Minsta tryckspänning i bergmassan, $\sigma_h$ [MPa]	2,3
Orientering på $\sigma_H$ , $\theta_{\sigma_H}$ [°]	143

## 2.3 Geologiska förutsättningar

Enligt SGU:s (Sveriges Geologiska Undersökning) berggrundskarta består bergmassan i området huvudsakligen av sedimentådergnejs med inslag av granitiska och pegmatitiska ådror och partier.

Geologiska undersökningar har inte utförts specifikt för detta uppdrag, men områdets geologi kan ändå anses vara väl känd med underlag från både Citybanan och FUT. Underlag från Citybanan redovisar en förväntad svaghetszon i området, vilket överensstämmer med FUT:s prognos, där områden med berg med av sämre kvalitet kan förekomma. Utifrån befintliga underlag bedöms bergmassan i området klassificeras som Bergtyp B eller C enligt FUT:s systematik, se underlag om bergmassans egenskaper i Bilaga 1.

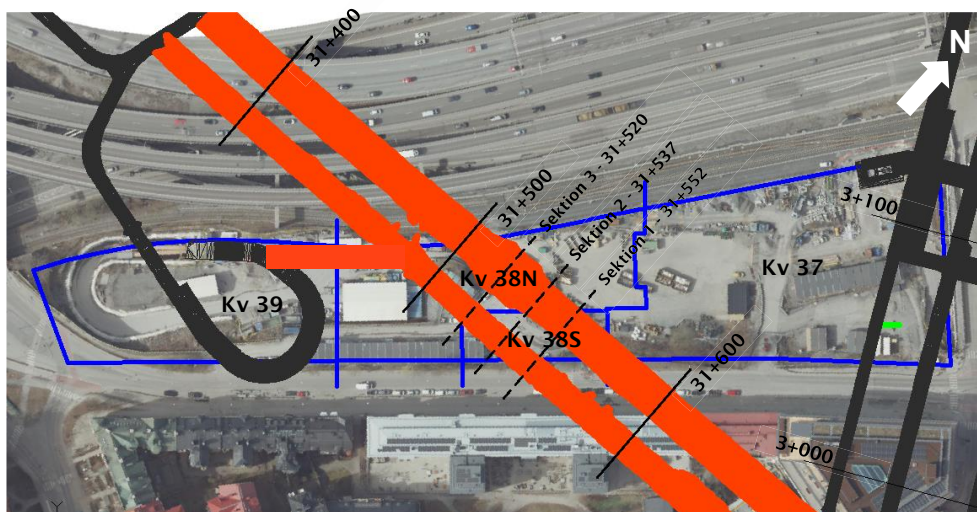
I den bergmekaniska modelleringen har E-modul för bergmassan antagits till 20 GPa (motsvarande bergmassa med  $GSI=55$ ,  $m_i=8$ ,  $D=0$  och  $E_i=55$  GPa), vilket motsvarar bergtyp B och C som förekommer i området, vilket är konservativt lågt. Användande av låg E-modul ger

större deformationer i bergmassan, vilket innebär att beräkningarna kommer att överskatta de faktiska deformationerna i bergmassan. Detta konservativa antagande anses vara en god förutsättning för en genomförbarhetsanalys i detta skede.

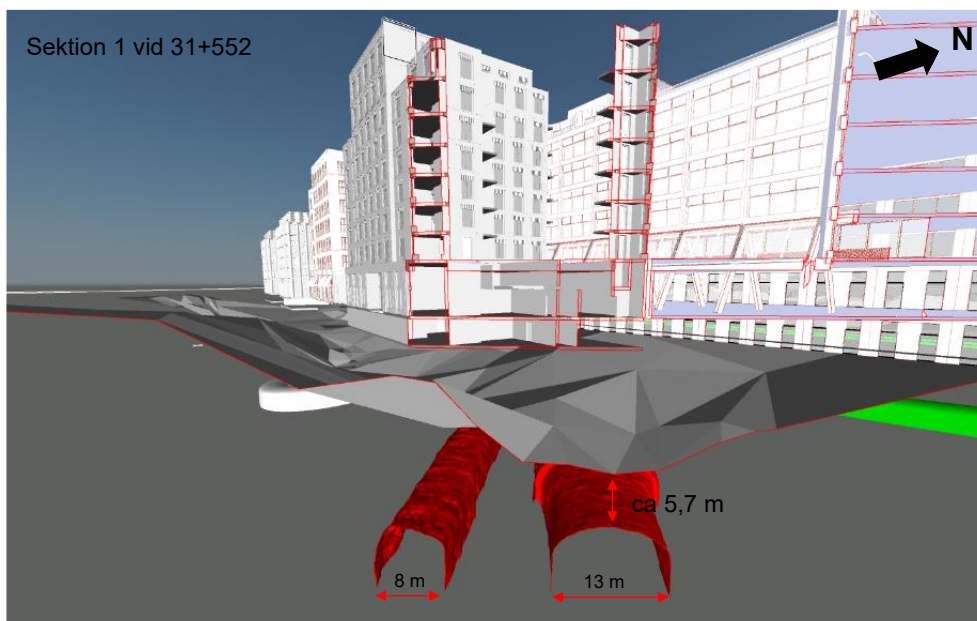
## 2.4 Bergtäckning

Enligt förvaltningsdata från Citybanan är den teoretiska bergtäckningen vid LM 31+552 mellan tunneltak i Citybanans spårtunnel och bergöverytan ca 5,7 m. Vid tunneltak i servicetunneln uppskattas bergtäckning vara som minst 5,0 m vid LM 31+520 och är ca 6,4 m vid LM 31+537, se Figur 3, Figur 4 och Figur 5. Den begränsade bergtäckningen i kombination med byggnadernas belastning på berg har föranlett behov av en numerisk lastnedräkning för att undersöka effekten på bergmassan.

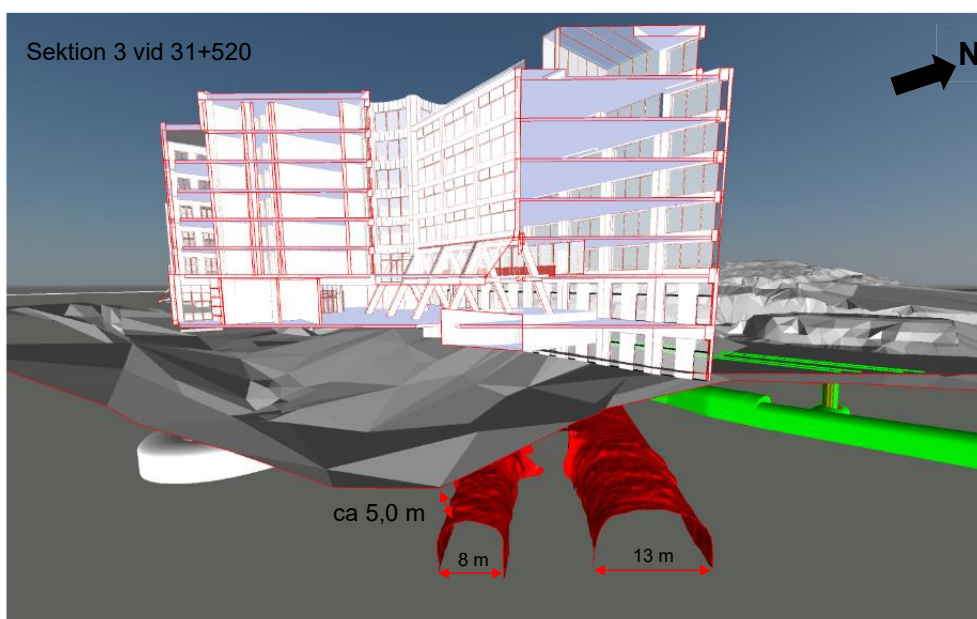
Den faktiska bergtäckningen är relevant för denna typ av analys, av den anledning har bergtäckning kontrollerats med underlag av inskannad tunnelkontur i Citybanan, se vidare i Bilaga 3 och 4.



Figur 3: Plan-vy över sektionerna 1-3, där Citybanan visas i rött och FUT i grått.



Figur 4: Illustration över 3D-modell i projektområdet, där laster från kvarter appliceras. Detta snitt motsvarar sektion 1 med låg bergtäckning ovanför spårtunneln. Notera att tunnelmodellen som använts motsvarar tunnelinklädnaden, verklig tunnelkontur i taket förväntas således ligga högre upp.



Figur 5: Illustration över 3D-modell i projektområdet, där laster från kvarter appliceras. Detta snitt motsvarar sektion 3 med låg bergtäckning ovanför servicetunneln. Notera att tunnelmodellen som använts motsvarar tunnelinklädnaden, verklig tunnelkontur i taket förväntas således ligga högre upp.



## 3 Metodik

### 3.1 Allmänt

Comsol Multiphysics v. 6.2 har använts för 3D Finit Element Analys (FEA) () av området för kvarter 37, 38N, 38S och 39, inklusive byggnadernas grundläggning och omkringliggande bergmassa. COMSOL Multiphysics är en modern ändlig elementmetodapplikation som består av en modul som kan hantera en mängd olika strukturella analyser för geotekniska och geomekaniska applikationer.

Analysen i Comsol har utförts i flera steg för att dokumentera inverkan från grundläggningslaster på Citybanans anläggning, där både bergmassan och befintlig förstärkning i Citybanan betraktas. Bultarna simuleras som endimensionella (1D) balkelement och sprutbetongen modelleras som ett skal. Underlag på utförd bergförstärkning i anläggningen har hämtats från förvaltningsdata för Citybanan. Bergmassan har modellerats som ett elastiskt, isotropt och homogent material i enlighet med *Trafikverkets projekteringshandbok, Bilaga 11 (Trafikverket 2019)*.

Den numeriska analysen baseras på en linjärelastisk materialmodell. Val av denna materialmodell beror dels på att syftet med beräkningarna är att bedöma inverkan på bergmassan intill tunneln, med fokus på bergmassans beteende närmast tunnelkonturen, dels faktum att tunneln är förstärkt med bergbult och sprutbetong. Även om berget kan ha plasticerats i samband med tunnelbygget är hållfastheten i den förstärkta zonen kring tunneln avsevärt högre än för oförstärkt berg. Berget i denna zon kan inte plasticeras om inte förstärkningen överbelastas, vilket kommer att vara möjligt att avgöra från en rent linjärelastisk modell. Utförda beräkningssteg i analysen presenteras i Tabell 3.

Vald metodik för den tekniska beräkningen syftar endast till att utreda hur byggnadernas planerade grundläggningslasterna inverkar på bergmassan. Modellen redovisar inte förväntad belastning i förstärkningselementen orsakad av byggnationen av Citybanan, utan endast de förändringar som orsakas av planerade byggnader i området.

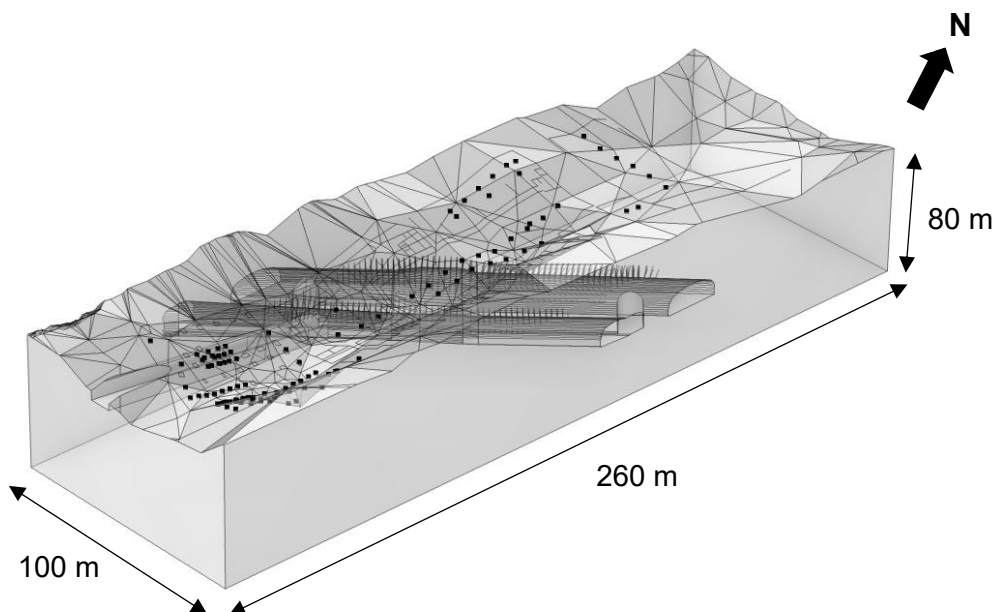
Tabell 3: Beskrivning av beräkningssteg.

Beräkningssteg	Beskrivning
1.	Ingående parametrar: <ul style="list-style-type: none"> <li>• bergmassa</li> <li>• befintlig undermarksanläggning med förstärkning</li> <li>• horisontalspänningar</li> <li>• jordtryck</li> </ul> (dvs. motsvarande nuvarande spänningssituation.)
2.	Ingående parametrar: <ul style="list-style-type: none"> <li>• bergmassa</li> <li>• befintlig undermarksanläggning med förstärkning</li> <li>• horisontalspänningar</li> <li>• jordtryck</li> <li>• projekterade laster på berg från kv 37, 38N, 38S och 39.</li> </ul>

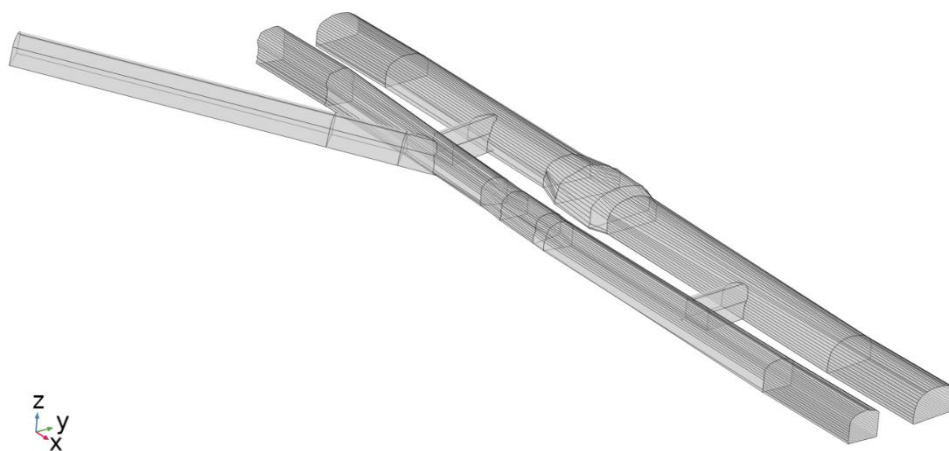
## 3.2 Modellgeometri

Den globala analysmodellen har dimensionerna 260x100x60 m. Bergöverytan har klippts så att den endast täcker projektområdet. Dessa avgränsningar och förenklingar bedöms inte påverka resultatens riktighet och har gjorts av modelltekniska skäl för att reducera beräkningstiden.

Den numeriska analysmodellen av projektområdet innefattar befintliga tunnlar i omgivande bergmassa och projekterade laster från byggnationer ovan mark, se Figur 6 och Figur 8. Bergöverytan i modell baseras på bergmodellen.



Figur 6: Illustration av modellgeometri. Svarta punkter och linjer redovisar laster från kvarter 37–39. Modeller i COMSOL Multiphysics har flyttats till origo. De raka linjer som redovisas på bergöverytan orsakas av triangulering vid inläsning av bergmodellen.



Figur 7: Illustration av tunnelgeometri, innefattande huvudtunnel och arbetstunnel.

### 3.3 Rand- och startvillkor

Modellens fyra yttre sidor har modellerats som väggar fria att röra sig vertikalt (i global z-riktning), men fixerade i x- och y-riktning. Botten i modell är fixerad i x-, y- och z-riktning och är låst för rotationer. Det har verifierats att deformationerna avklingat innan de nått modellens ränder, vilket innebär att randeffekter inte påverkar analysresultatet.

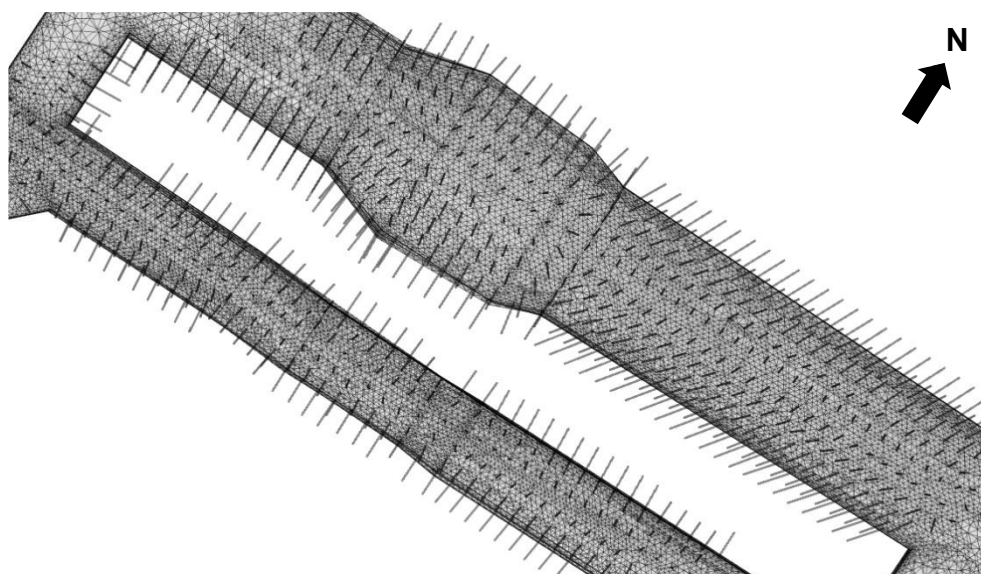


Bergmassans in situ-spänningar har applicerats som ett horisontellt initialspänningsvillkor i hela bergvolymen och med en vertikal volymkraft motsvarande gravitationen.

### 3.4 Mesh element

I modellen har bergmassan diskretiserats i så kallade *finita element* kopplade till noder. Den diskretiserade bergmassan bildar ett finita elementnät, en så kallad mesh.

Den numeriska modellen utgörs i huvudsak av tetraederelement och består av cirka 550 000 element. Elementtypen medger en hög meshdensitet i kritiska områden, medan elementstorleken har justerats upp i områden med låga spänningsgradienter för att reducera beräkningstiden. Varje bult i geometrin representeras av 5 element. Exempel på meshdensitet kring befintlig tunnel redovisas i Figur 8.



Figur 8: Meshdensitet kring Citybanans anläggning, där bultförstärkning i anläggningen redovisas som balkelement.

### 3.5 Materialegenskaper

I de numeriska analyserna har bergmassan betraktats som ett kontinuum, det vill säga att berg och sprickor samverkar som ett isotropt material. Kontinuumapproximation är giltig för små spänningsförändringar i bergmassa med hög inspänning, ett villkor som är väl uppfyllt i detta projekt. Sammanställning av nyttjade

mekaniska egenskaper för bergmassan och förstärkning (bergbultar och fiberarmerad sprutbetong) redovisas i

Tabell 4.

Tabell 4: Sammanställning av nyttjade materialparametrar.

Berg	Värde
Elasticitetsmodul, $E_m$ [GPa]	20
Poissons tal, $\nu$ [-]	0,25
Densitet, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2700
Bergbultar	Värde
Elasticitetsmodul, $E$ [GPa]	200
Poissons tal, $\nu$ [-]	0,30
Densitet, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	7850
Fiberarmerad sprutbetong	Värde
Elasticitetsmodul, $E$ [GPa]	25
Poissons tal, $\nu$ [-]	0,15
Densitet, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2000

### 3.6 Yttre laster

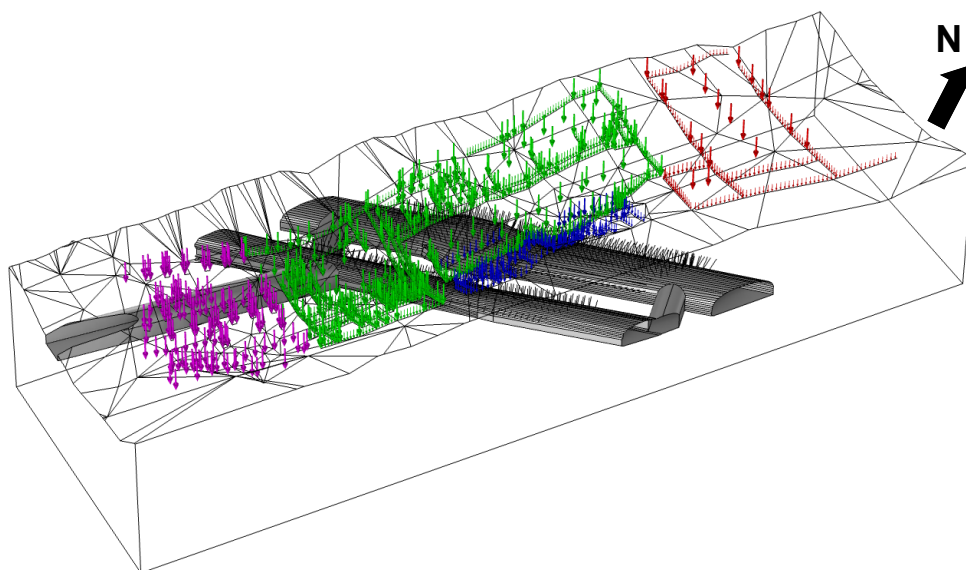
I den numeriska modellen har preliminära lastnedräkningar från kvarter 37, 38N, 38S och 39 använts (enligt Tabell 1). Notera att dessa kan förändras i vidare projektering.

Yttre laster består i detta fall av last från de planerade byggnaderna, såväl maximal grundläggningspåkänning som jordtryck. En konservativ förenkling av att lasterna verkar direkt på bergöverytan har antagits. Vidare har det i modell antagits att grundläggningens utformning är av smalast möjliga typ, som till exempel linjer eller punkter. Detta antagande om lastfördelningen på bergytan är konservativ, eftersom linjelaster eller punktlaster vanligtvis står på ett lastfördelande fundament eller motsvarande. Jord- och lerlagret inkluderades i modellen i beräkningssteg 1 som ett yttryck på 16 kPa per meter fyllning. I beräkningssteg 2 reducerades fyllningsnivån upp till garagenivån för byggnad 38N.

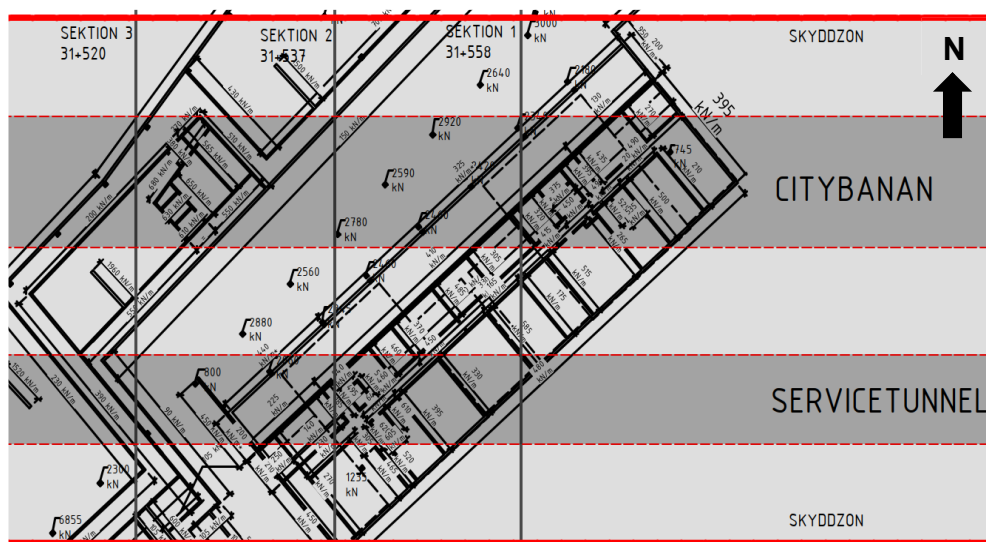
Lasternas positioner och storlek framgår av lastplan enligt Bilaga 2, vilken har implementerats i den numeriska modellen som förenklad lastsituation. Den förenklade lastsituationen består av samtliga laster för kvarter 38N och 38S. Lasterna från kvarter 37 och 39 har delats

upp baserat på avstånden till Citybanan, där ett avstånd på 100 m från anläggningen valt som gräns. På så sätt har lasterna för kvarter 37 och 39, som ligger inom 100 m från Citybanans anläggning, inkluderats i modellen, se Figur 9. Medan övriga laster mer än 100 m från Citybanan ej inkluderats då de inte anses påverka Citybanan. Detta urval av relevanta laster reducerar även modellens storlek.

Husprojekteringen är fortfarande i ett tidigt skede och därför är antagna laster preliminära. De preliminära lasterna från kvarter 38N och 38S som hamnar ovanför Citybanan redovisas i Figur 10.



Figur 9: 3D-vy över förenklad lastsituation, såsom implementerad i den numeriska modellen. Röda laster är från kv. 37, gröna från kv. 38N, blå från kv. 38S och lila från kv. 39.



Figur 10: Geografisk redovisning av lasterna från kv 38N och 38S ovanför Citybanan. Redovisad längdmätning är för Citybanans spår U2. Tunnelarna visas i mörkgrått och skyddszonen i ljusgrått bilaga 4.

## 4 Resultat

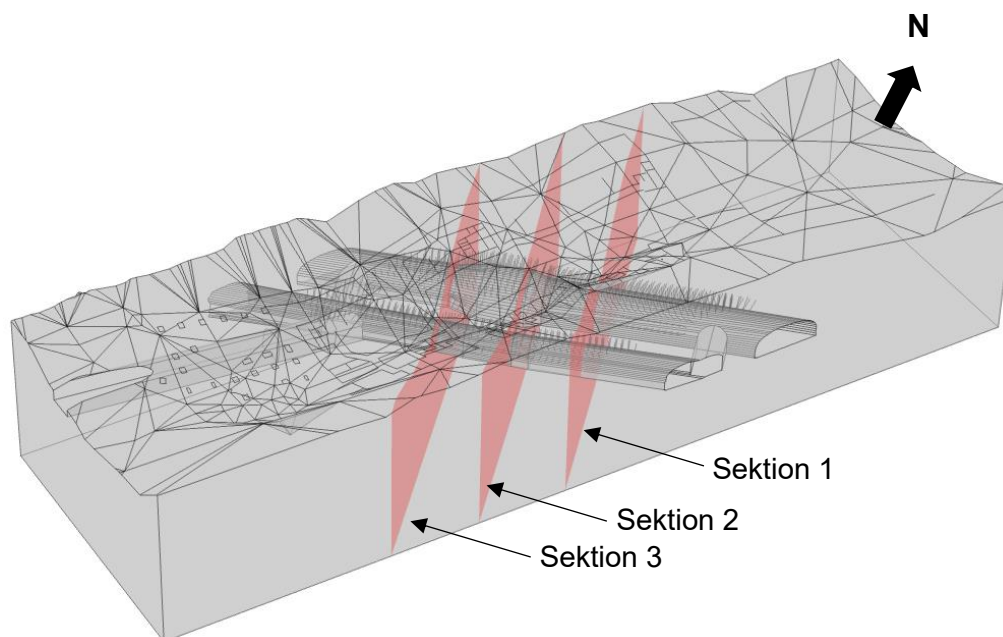
De deformationer och spänningar som uppstår i berg vid applicerade konstruktionslaster beskrivs i kommande avsnitt. Placering av laster för respektive kvarter illustreras i Figur 10, vilka även färgkategoriserats. Nedan presenterade resultat nyttjar färgkategorisering av laster enligt Figur 10, där nyttjade pilar i blått, grönt, rött och lila motsvarar last från olika kvarter.

Eftersom den numeriska modellen består av ett material med kontinuumegenskaper visar den inte på instabilitet hos enskilda block längs tunnelkonturernas ränder.

För att öka rapportens läsbarhet presenteras endast de resultat som bedöms relevanta för projektet. En mer omfattande modell som även inkluderar FUT-anläggningar i närområdet finns även framtagna. Analysresultat presenteras i termer av deformationer och spänningstillskott runt Citybanans anläggning. Med spänningstillskott avses här den förändring av spänningsmagnituder som sker då lasterna appliceras på bergytan ovanför Citybanan.

Vid analys av totala deformationer och spänningstillskott kring anläggningen har tre kritiska sektioner identifierats, vilka har namngivits sektion 1-3 enligt Figur 11. I dessa tre sektioner är bergtäckningen över Citybanan som lägst, och lastpåverkan samtidigt som störst.

- Sektion 1: Bergtäckning ca 5,7 m vid Citybanans spårtunnel (längdmätning 31+552).
- Sektion 2: Bergtäckningen ca 8,5 m vid nischer för ventilation och ca 6,4 m över servicetunnel (längdmätning 31+537).
- Sektion 3: Bergtäckning ca 5,0 m vid Citybanans servicetunnel (längdmätning 31+520).

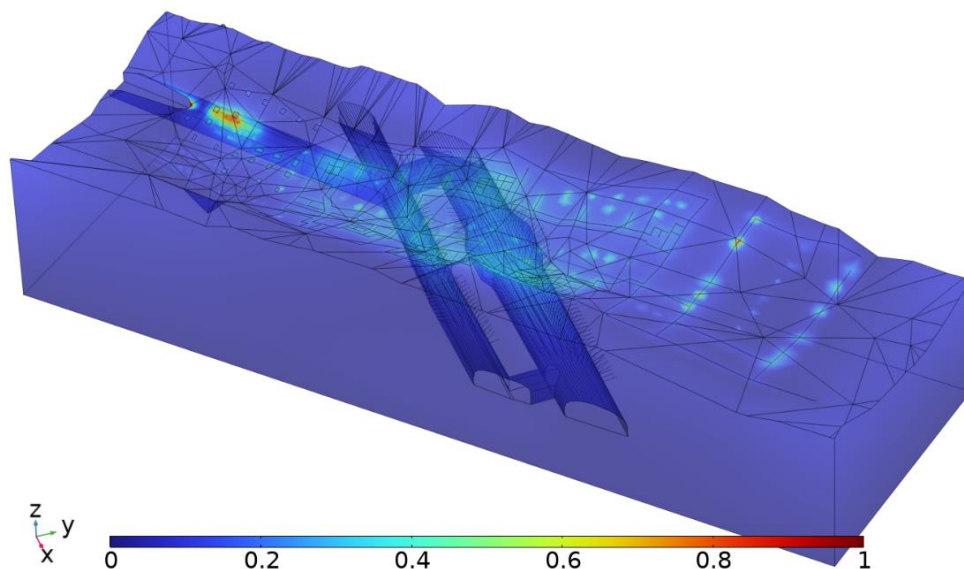


Figur 11: Sektion 1-3, de mest kritiska snitten vid pålastning.

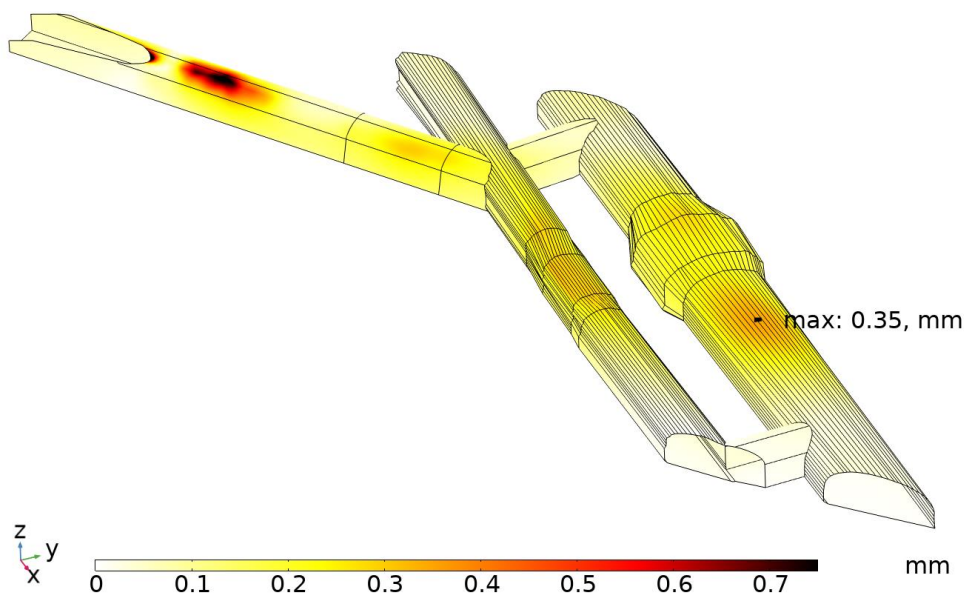
## 4.1 Deformationer

Deformationer i Citybanans anläggning efter pålastning visas i 12 och Figur 13, där enbart tillkommande rörelser/deformationer i den förstärkta anläggningen redovisas. Rörelser uppstår där bergtäckning är som minst, de är mindre än 0,5 millimeter och nedåtriktade. Resultatet är rimligt sett till den begränsade bergtäckningen i kombination med belastning från de projekterade byggnaderna. Last från byggnaderna sprids koniskt ner i bergmassan mot ökat djup, och därav syns inte punktförskjutningar i figuren.





Figur 12: Illustration av total förskjutning av bergöverytan ovan Citybanans anläggning efter påförande av grundläggningslast, [mm].

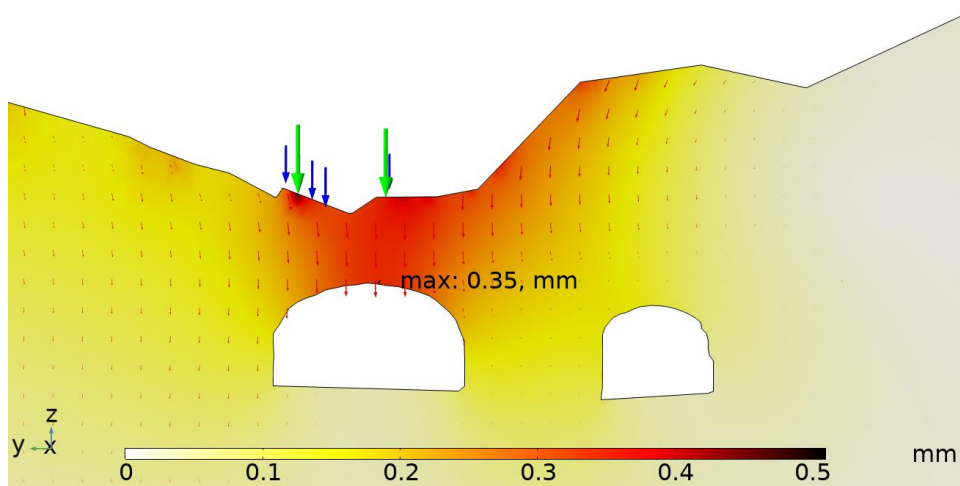


Figur 13: Illustration av total förskjutning kring Citybanan efter påförande av grundläggningslast, [mm].

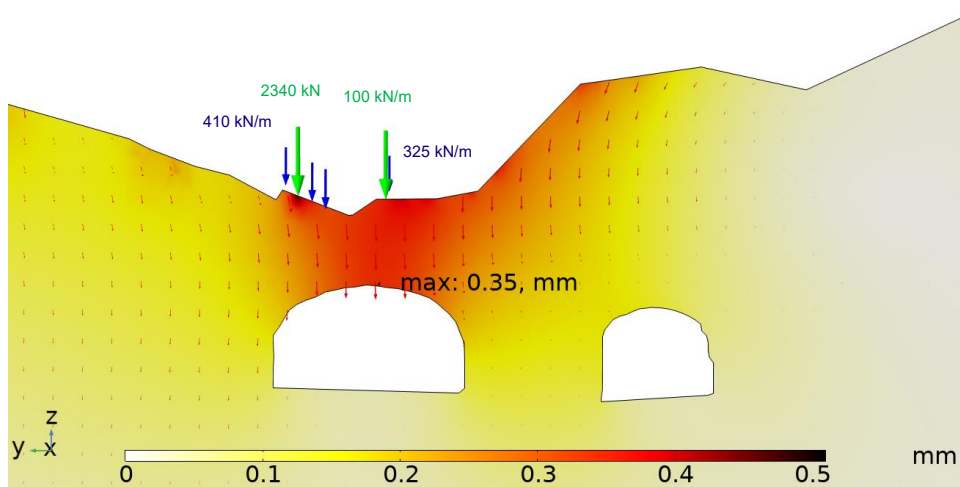
Tillkommande totaldeformationer efter belastning i sektion 1-3 (enligt Figur 11) visas i Figur 14, Figur 15 och Figur 16. Resultatet visar på tillkommande totaldeformation på 0,35 millimeter i anläggningens tak, deformationerna är huvudsakligen vertikala. Förväntade deformationer är små eftersom de applicerade lasterna är förhållandevis små i jämförelse med bergmassans styvhet.

## Sektion 1

Den totala förskjutningen i sektion 1 visas i



Figur 14. Resultat visar en rörelse på 0,35 millimeter, där förskjutningarna är som störst över tunnelns centrumlinje. Deformationsmoden är i princip samma som för en plattnedböjning, vilket ger störst deformation i mitten på tunnelvalvet.



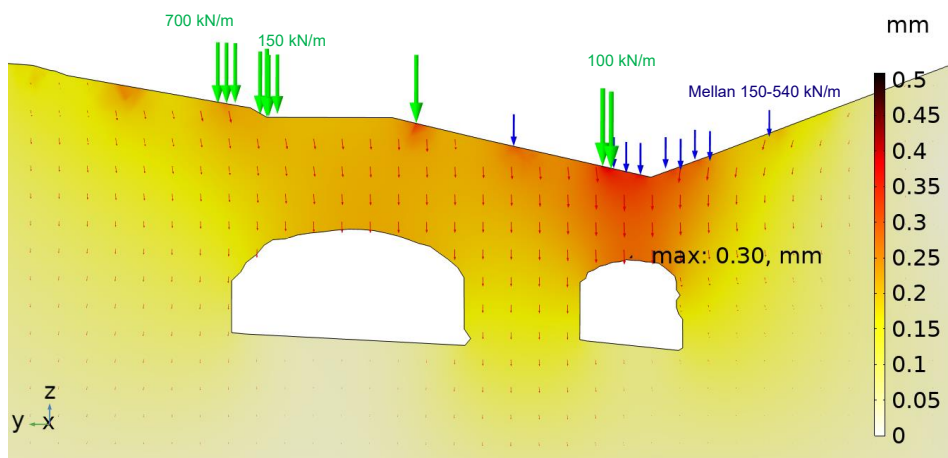
Figur 14: Deformationer i sektion 1 efter påförande av grundläggningslast.

## Sektion 2

De totala förskjutningarna i sektion 2 visas i Figur 15. Resultat ger en rörelse på 0,30 millimeter. Den relativt goda bergtäckningen (8,5 m över spårtunneln och ca 6,4 m över servicetunneln) bidrar till att de förväntade förskjutningarna kring Citybanan är mindre än i sektion 1.

2780 kN

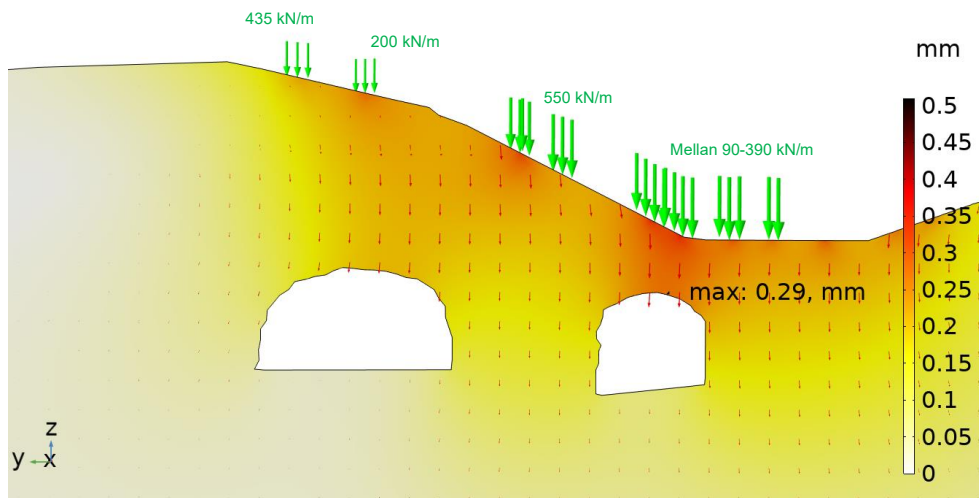
325 kN/m



Figur 15: Deformationer i sektion 2 efter påförande av grundläggningslast.

### Sektion 3

De totala förskjutningarna i sektion 3 visas i Figur 16. Resultatet ger en rörelse på 0,29 millimeter. Även med låg bergtäckningen över servicetunneln (ca 5 m) är de förväntade förskjutningarna kring Citybanan små.

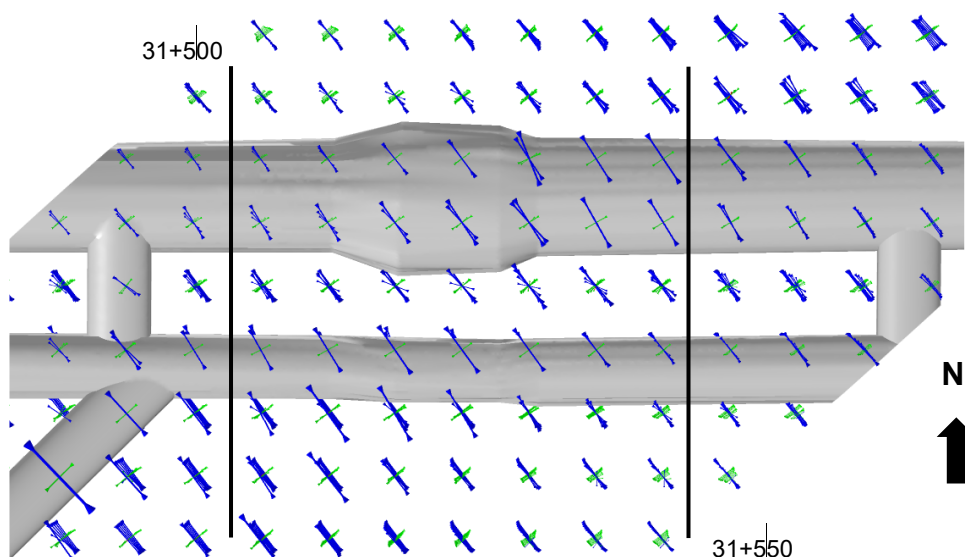


Figur 16: Deformationer i sektion 3 efter påförande av grundläggningslast.

## 4.2 Huvudspänningar kring Citybanan

I Figur 17 visas valvspänningar över Citybanans anläggning som en vektorplott. Valvspänningar sammanfaller i stort med riktningen hos den största horisontalspänningen i området, vilket är gynnsamt för valvbildningen ovanför Citybanan.





Figur 17: Plan-vy över huvudspänningar. Pilarna anger riktningen på huvudspänningarna. Blå pilar visar den första huvudspänningen och gröna pilar motsvarar den andra huvudspänningen. Den tredje huvudspänningen är vertikal, och så liten att den inte åskådliggörs i detta snitt.

### 4.3 Spänningstillskott

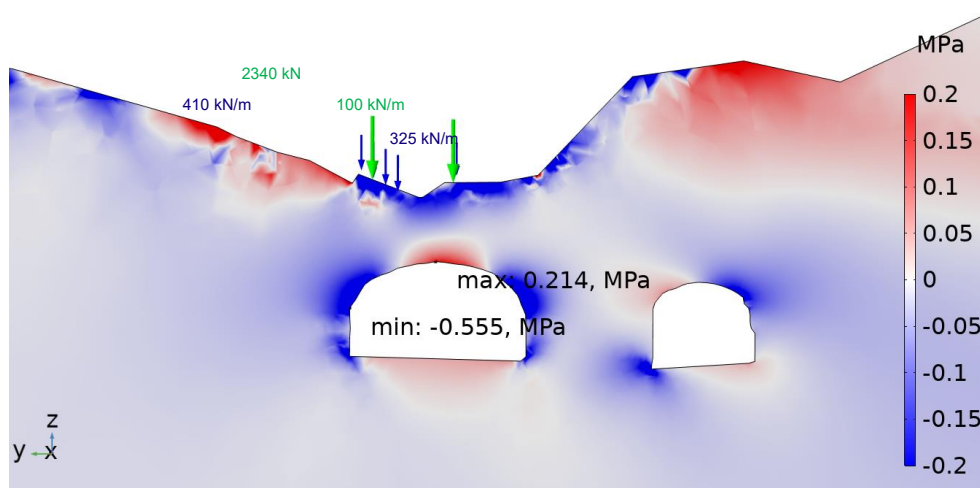
För att vidare undersöka pålastningens inverkan på bergmassan har spänningstillskottet för de första huvudspänningarna plottats för sektion 1-3 enligt Figur 11. Resultat för spänningstillskott motsvarar den förändring av spänningsnivåer som sker då lasterna appliceras. Det är den största tryckspänningen som redovisas, vilket utgör ett viktigt bidrag till valvverkan kring en undermarksanläggning.

Analys påvisar att det sker en minskning av tryckspänningar i tak och sula runt Citybanans konturer, samtidigt som tryckspänningarna ökar i anfanget. Det ska förtydligas att även om det sker en minskning av tryckspänningar vid pålastning är bergmassan fortfarande inspänd, med tryckspänningar i storleksordning 10 MPa. På bergöverytan där lasterna appliceras ovanför anläggningen ökar tryckspänningarna i horisontalled. Figur 18, Figur 19 och Figur 20 innebär att tryckspänningar i bergmassan ökar efter att pelarlaster installeras, röd färg innebär att tryckspänningar i bergmassan minskar.

### Sektion 1

Enligt analysresultat för sektion 1 skapas en avlastad zon mitt på taket på spårtunneln, se Figur 18. Denna avlastning är som störst i tunnelkonturen och avtar uppåt mot bergöverytan, ungefär 2,5 m

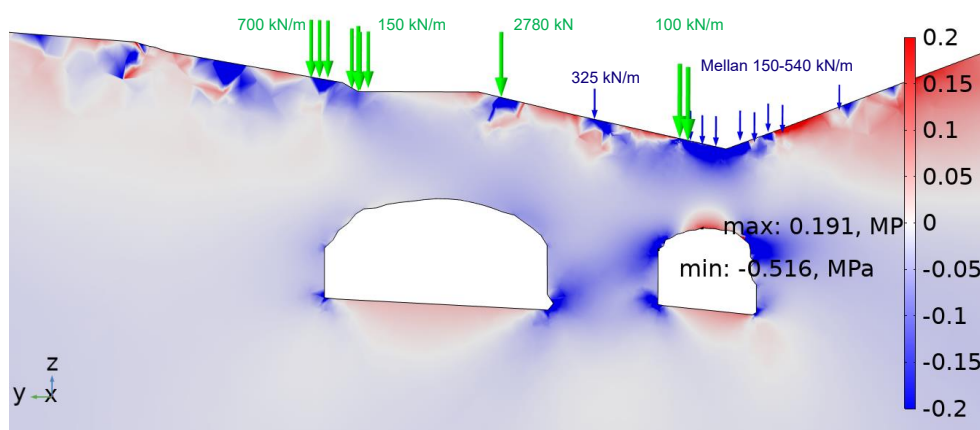
ovanför tunneltaket är spänningstillskottet positivt och bidrar till valvbildningen. Avlastningen i taket är i storleksordning 0,21 MPa och de tilltagande spänningarna i anfang är ca 0,56 MPa.



Figur 18: Tillskottet för första huvudspänningen  $\sigma_1$  i sektion 1 efter påförande av grundläggningslaster.

## Sektion 2

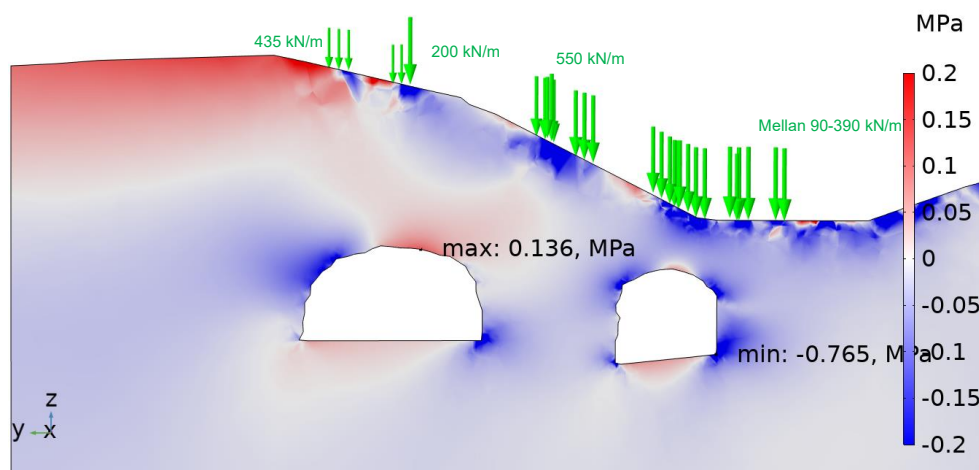
I sektion 2 är Bergtäckningen något större i sektion 1 jämfört med sektion 1, och lasterna något annorlunda placerade, vilket återspeglas i resultaten. Likt sektion 1 sker avlastning i tunneltak och sula, men är av lägre magnitud, se Figur 19. Störst påverkan sker i servicetunneln, där avlastning i taket är ca 0,19 MPa och de tilltagande spänningarna i anfangen är ungefär 0,52 MPa.



Figur 19: Tillskottet för första huvudspänningen  $\sigma_1$  i sektion 2 efter påförande av grundläggningslaster.

### Sektion 3

Analysresultat för sektion 3 indikerar att viss avlastning i taket på servicetunneln sker, där bergtäckningen även är låg, se Figur 20. Avlastning är som störst i spårtunnelns tak i storleksordning 0,14 MPa, medan tilltagande spänningar är som störst i servicetunnelns sula på ca 0,77 MPa.



Figur 20: Tillskottet för första huvudspänningen  $\sigma_1$  i sektion 3 efter påförande av grundläggningslaster.

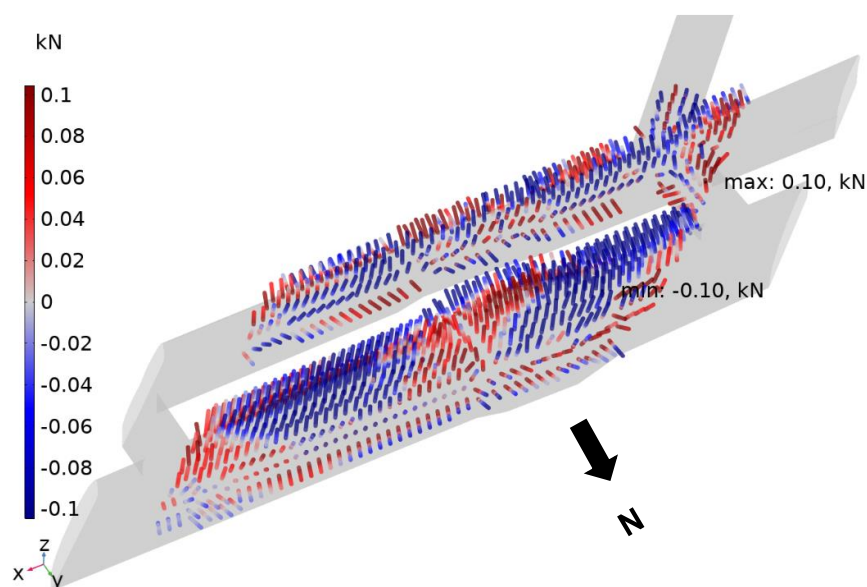
## 4.4 Laständringar och deformationer i förstärkning

Jämviktsvillkoren mellan de helingjutna bultarna och omgivande bergmassa ger att töjning i bulten är identisk med den i omgivande bergmassa, varför spänningen i bulten låter sig beräknas. Vid elastiska förhållanden är lastspridning och deformationer enbart beroende av tvärkontraktionstalet i materialet. Lastfördelningen mellan berg och bult beror däremot på förhållandet mellan bergets och bultarnas respektive elasticitetsmoduler och mellan bergets och sprutbetongs respektive elasticitetsmoduler.

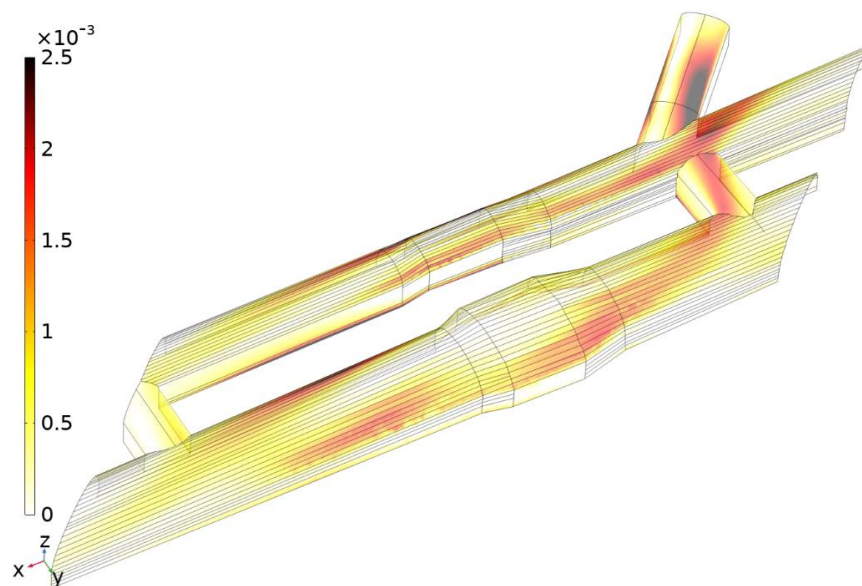
I utförda ar har betraktas bultarna som 1D-balkelement och sprutbetongen har modellerats som ett skal längs tunnelkonturen, se Figur 21 och 22. Bultarna är 5 m långa med bultavstånd 1,4 m i spårtunnel, respektive 3 m långa med bultavstånd 1,7 m i servicetunnel, enligt förvaltningsdata för Citybanan. Bultarna är orienterade vinkelrätt mot tunneltakets ytor. Bultdiameter är 25 mm och det totalt finns det cirka 1400 bultar utspridda över Citybanans anläggning. I Figur 21 redovisas hur kraften längs bultarna ändras på grund av tillkommande laster från ovanförliggande byggnadskvarter.

Majoriteten av bultarna dragpåverkas i änden närmast plintarna på bergöverytan och komprimeras i änden närmst tunnelväggen, där valvet motverkar överlasten. Några av bultarna direkt under påförda laster tryckpåverkas. Maximal kraftändring i bultarna är cirka 0,1 kN, vilket är försumbart i jämförelse med draghållfasthet på 246 kN för en standardbergbult på 25 mm diameter, se Figur 21.

Fiberarmerad sprutbetong med tjockleken 125 mm tillämpas för tunneltak och tunnelvägg. De deformationer som uppstår i sprutbetongen är i storleksordningen mikrometer, vilket är försumbart, se Figur 22.



Figur 21: Förändring av belastning i bultarna kring Citybanans anläggning [kN]. Positiva värden motsvarar ökad dragbelastning, negativa värden motsvarar minskad dragbelastning.



Figur 22: Deformationer som induceras på sprutbetongen efter påförande av grundläggningslaster.

## 5 Analys

Beräkningarna har utformats på sådant sätt att resultaten ska kunna påvisa deformationer och spänningstillskott i bergmassan, samt lastförändringar i befintliga bultar och sprutbetong. Den numeriska modellen visar inte på några kritiska spänningsomlagringar i bergmassan kring Citybanan. Det sker en viss spänningsförändring runt tunnelkonturen, men dess lokala omfattning i direkt anslutning till konturen indikerar att förändringarna är små. I fall av betydande och omfattande spänningsförändringar skulle större bergvolymen kring tunneln varit påverkade, vilket inte är fallet.

Bergmassan är ett komplext diskontinuummaterial som inte kan modelleras till fullo. Det faktum att Citybanan är byggd med konventionella metoder och utan anpassade lösningar är den bästa indikationen på att bergmassan i området har god lastbärande förmåga och egenskaper som ligger väl i linje med erfarenheter från andra liknande projekt.

De numeriska beräkningarna visar att grundläggningen, generellt sett, kommer att ha liten inverkan på spänningstillståndet i bergmassan. Det är generellt i områden med låg bergtäckning, där grundläggningen kommer närmast tunneln (sektion 1-3), som grundläggningslasten har störst inverkan på tunneln. De största

spänningsförändringarna uppkommer vid sektion 1, där bergtäckningen är som allra lägst ovanför spårtunneln. Detta resulterar i en förväntad deformation på mindre än 0,5 mm i sektion 1, vilket är förhållandevis litet och nära försumbart.

## 6 Diskussion och slutsats

### 6.1 Diskussion

Tyréns har studerat påverkan av laster från grundläggning av kvarter 37, 38N, 38S och 39 på Citybanan. Analys visar att spänningstillskottet på tunnelnivå är mycket liten. Därtill är beräknade deformationer i konturen kring Citybanan vid pålastning av samtliga kvarter små. Lastförändringarna som påvisas i analysen sker på förväntat sätt, de är som störst i områden med låg bergtäckning där avståndet till planerade grundläggningspunkter är som minst. Förändringarna i bergmassan kring Citybanans tunnelkontur är genomgående så små att de bedöms sakna betydelse för den befintliga förstärkningen i anläggningen.

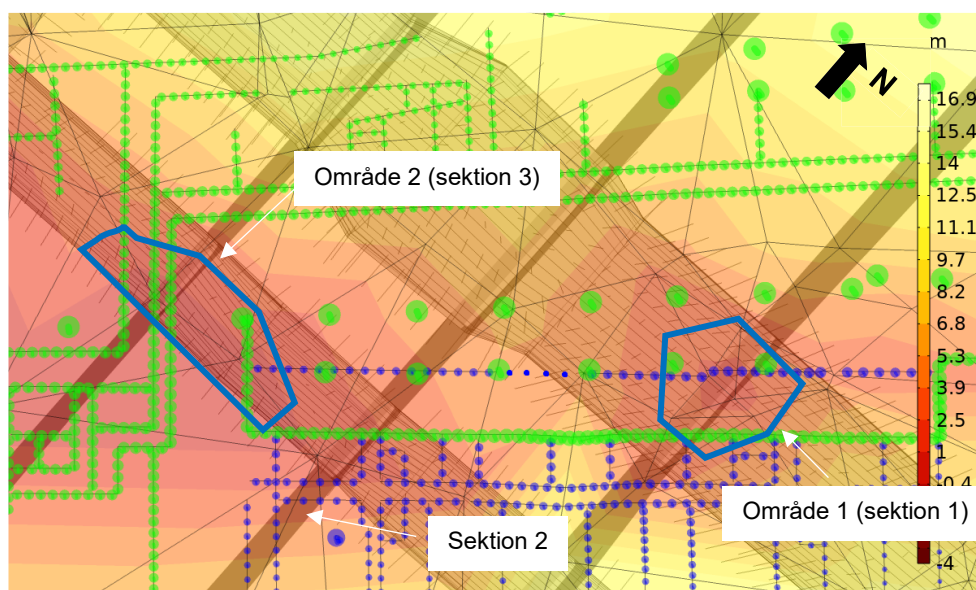
Enligt analys är lastpåkänningen störst i sektion 1. Detta är förväntat eftersom bergtäckningen i sektion 1 är liten och lasterna i modellen appliceras direkt ovanför Citybanans bergtunnlar. Det beräknade spänningstillskottet som orsakas av lasterna bedöms inte ha någon inverkan på Citybanans stabilitet, och ej heller medföra ytterligare förstärkningsbehov.

Även om lastpåverkan på bergmassan är ringa är bergtäckningen i det mest kritiska snittet sådan att Citybanans bergförstärkning kan vara belägen mycket nära bergytan. Projektering av grundläggning på berg behöver ta hänsyn till befintlig förstärkning i bergmassan så att dessa inte påverkas. Områden med bergtäckning motsvarande bultarnas



längd åskådliggörs i Figur 23. I område 1 är de största lasterna mellan 2,5 till 3 MN och i område 2 mellan 800 kN och 450 kN/m.

Bergmassans bärförmåga för anläggningar i berg bygger på att bergmassan är självbärande och att bärförmågan, som skapas av inspanningarna i bergmassan, har hög kapacitet. Modelleringsresultatet visar att bergmassans bärförmåga är avsevärt större än den belastning som samtliga byggnadskvarter orsakar. Vid modellering ska dock alltid osäkerheter i modellresultatet beaktas. Det finns avvikelser i tunnelgeometrin gentemot den verkliga tunnelkonturen på grund av förenklingar vid modellering i COMSOL Multiphysics. Bergöverytans läge är mer komplex än bergmodellen, men den genomsnittliga bergnivån är realistisk. Materialegenskaper kan dessutom variera lokalt i bergmassan. En avvikelse skulle emellertid behöva vara mycket påtaglig för att kunna påverka analysens giltighet.

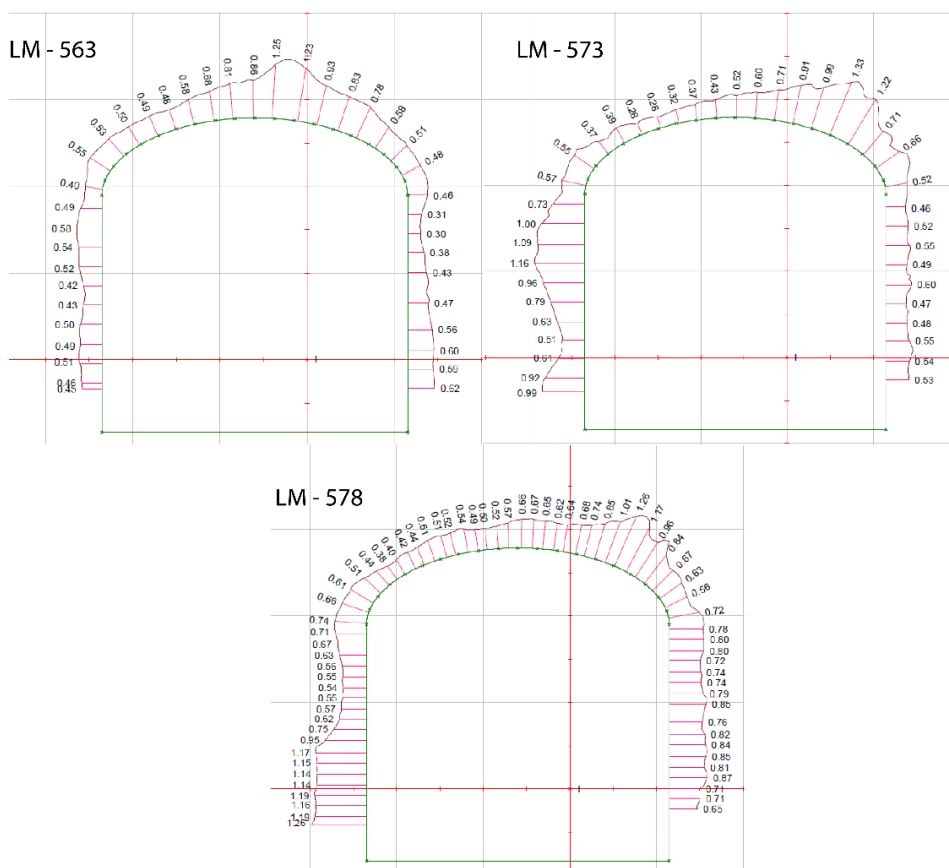


Figur 23: Planvy över ungefärlig lokalisering av grundläggning ovanpå Citybanan. Områden med bergtäckning mindre än 6 m är indikerade som område 1 och 2. Laster för kv 38N visas i grönt och laster för kv 38S i blått.

En känslighetsstudie utförts med hänsyn till bergtäckningen mellan Citybanan och bergöverytan. Det har gjorts genom att bergytan i modellen sänkts 1 meter, vilket innebär att bergtäckningen minskar med samma avstånd. Denna minskade bergtäckning visade sig däremot inte ge signifikant inverkan på resultaten. För alla angivna profiler från Citybanan är det endast tre sektioner för servicetunneln som visar på en något mindre bergtäckning (0,17 till 0,33m) än den känslighetsstudie som utförts i detta projekt Figur 24.

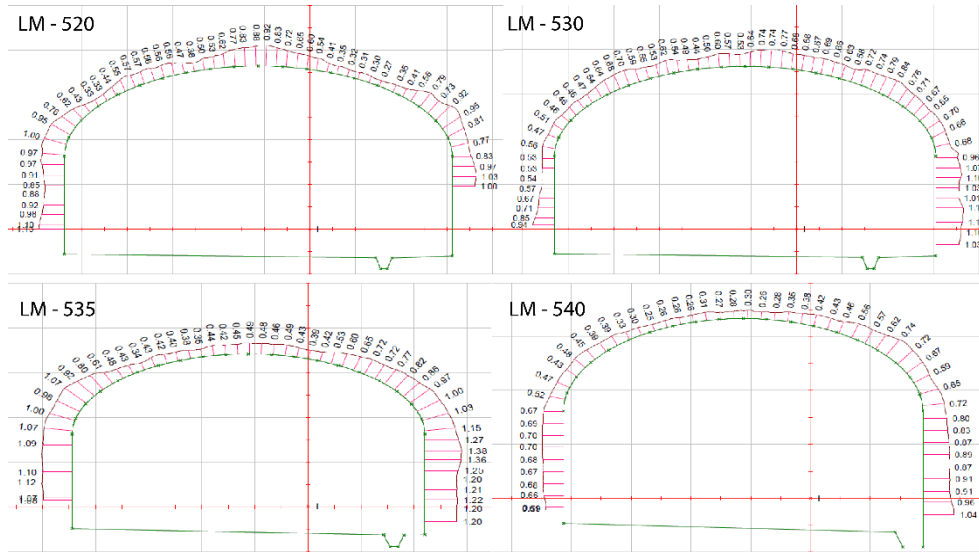
Modellerad tunnelgeometri i COMSOL motsvarar tunnelinklädnaden. Jämförelse med senare erhåller underlag på inskannad bergkontur i tunnel påvisar väsentliga skillnader mellan modellerad tunnel och verkliga förhållanden. I servicetunneln, vid LM 31+563, 31+573 och 31+578, är faktisk bergtäckning lägre än den känslighetsanalys som genomförts, se Figur 24. Vad gäller spårtunneln är skillnaden under 1 m och således inom känslighetsanalysen.

Skillnader i tunnelbredd mellan modell och verklig tunnelkontur förekommer vid LM 31+520, 31+530, 31+535 och 31+540 i spårtunneln, där tunnelbredden överstiger 13 m, se Figur 25. Skillnader i tunnelbredd i servicetunneln förekommer vid LM 31+538, 31+548, 31+553, 31+558, 31+573 och 31+578 där tunnelbredden överstiger 8 m, se Figur 26.

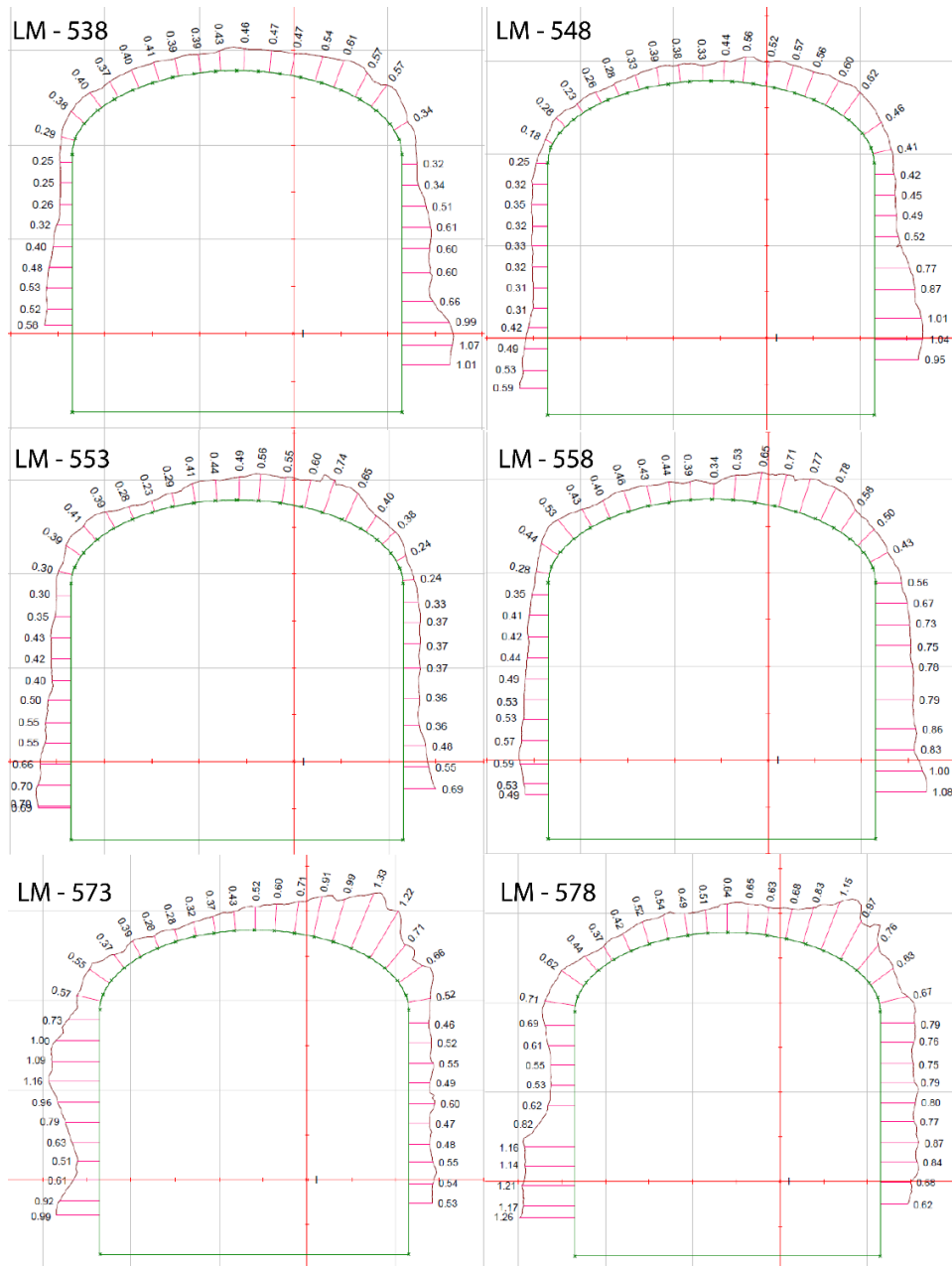


Figur 24: Sektion av servicetunneln vid LM 31+563, 31+573 och 31+578. Grön linje är modellerade tunnlar och röd linje är verkliga tunnelkontur.





Figur 25: Sektion av spårtunnel vid LM - 31+520, 31+530, 31+535 och 31+540 som redovisar skillnader i tunnelbredd. bredden av sektioner för språktunneln. Grön linje är modellerade tunnlar och röd linje är verkliga tunnelkontur.



Figur 26: Sektion av servicetunnel vid LM 31+538, 31+548, 31+553, 31+558, 31+573 och 31+578 som åskådliggör skillnader i bredd sektioner för servicetunneln. Grön linje är modellerade tunnlar och röd linje är verkliga tunnelkontur.

Detta PM behandlar endast Citybanans anläggning. För övriga tunnlar i området hänvisas till respektive tunnelägare. Bergtekniska grundläggningsaspekter, såsom sprickor och bergmassans tryckhållfasthet kring fundament, behandlas inte utan kräver vidare utredning när fler detaljer finns tillgängliga.

För framtagande av en mer detaljerad modell som inkluderar uppgifter om befintlig geologi och tunnelanläggningen krävs tillgång till Trafikverkets geologiska- och bergtekniska förvaltningshandlingar från Citybanan, innehållande utförda geologiska tunnelkarteringar i området och faktiskt installerad tunnelförstärkning. Tillhandahålls denna information kan en än mer detaljerad modell över bergmekaniska förhållandena redovisas i nästa skede.

## 6.2 Slutsats

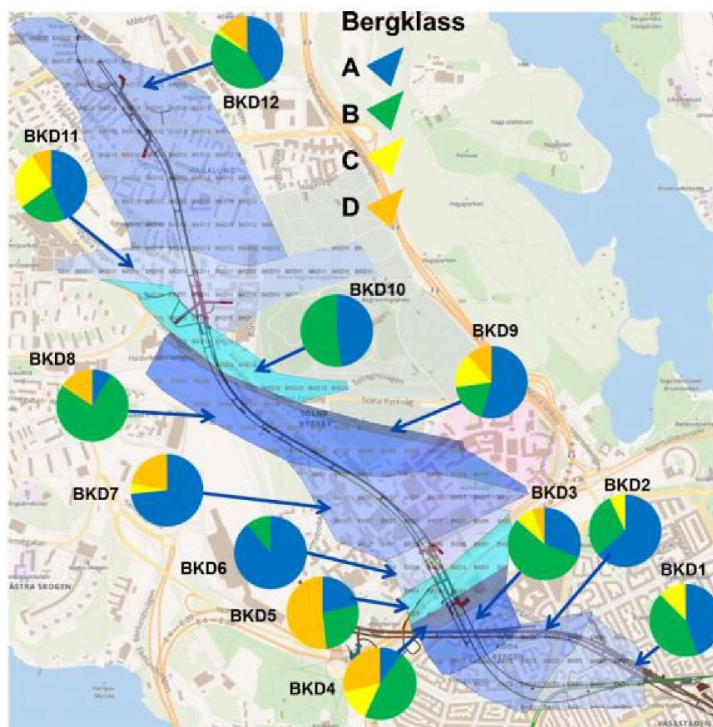
Byggnation av kvarter 37, 38N, 38S och 39 ger en viss lastpåkänning i Citybanans anläggning. Den numeriska modellen av lastsituationen påvisar att uppkomna förändringar i bergmassans spänningstillstånd är små och tillskottsdeformationen är mindre än en halv millimeter (0,35 millimeter). Modellen indikerar även att belastningsförändringar och deformationer i befintlig förstärkning är mycket små. Med underlag av utförd bergmekanisk analys av bergmassans bärighet under samtliga kvarter, anses bärigheten vara oförändrad efter belastning och genomförbarheten för de planerade byggnaderna anses därför vara god. Det är Tyréns bedömning att lastförändringarna i bergbultar och deformation i sprutbetongen är så liten att försvarsåtgärder i tunneln inte är nödvändigt.

Modelleringen har utgått från konservativa antaganden vad gäller lasternas storlek, modellparametrar och grundläggningens utformning. Nästa steg i projektet bör vidare fokusera på verkliga tunnelgeometrier, samt bergtekniska- och geologiska förutsättningar. Därtill bör lasternas placering optimeras så att pålastning direkt ovan områden med låg bergtäckning till Citybannan undviks.

## Bilaga 1 - Bergmassans egenskaper från FUT Tunnelbana till Arenastaden

### Bergmassans egenskaper

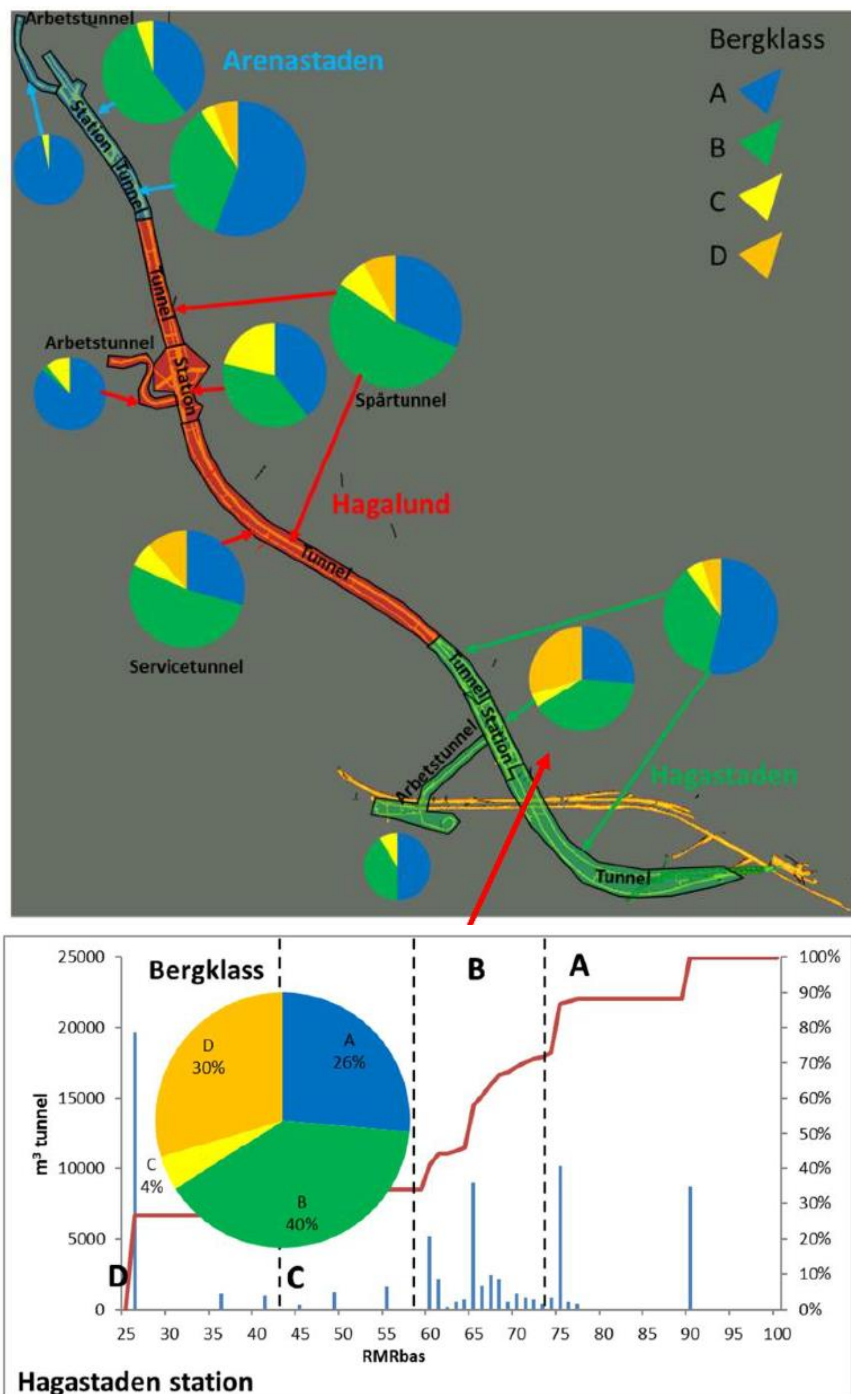
För det aktuella området som ska ingå i stabilitetsanalysen är det BKD5 som råder.



Figur S1: Plan-vy som visar bergkvalitetsdomänerna BKD1-BKD12 i olika transparenta nyanser av blått. Bergklassfördelningen i varje domän redovisas som cirkeldiagram.

Tabell S1: Materialparametrar för aktuell bergklass i undersökningsområdet.

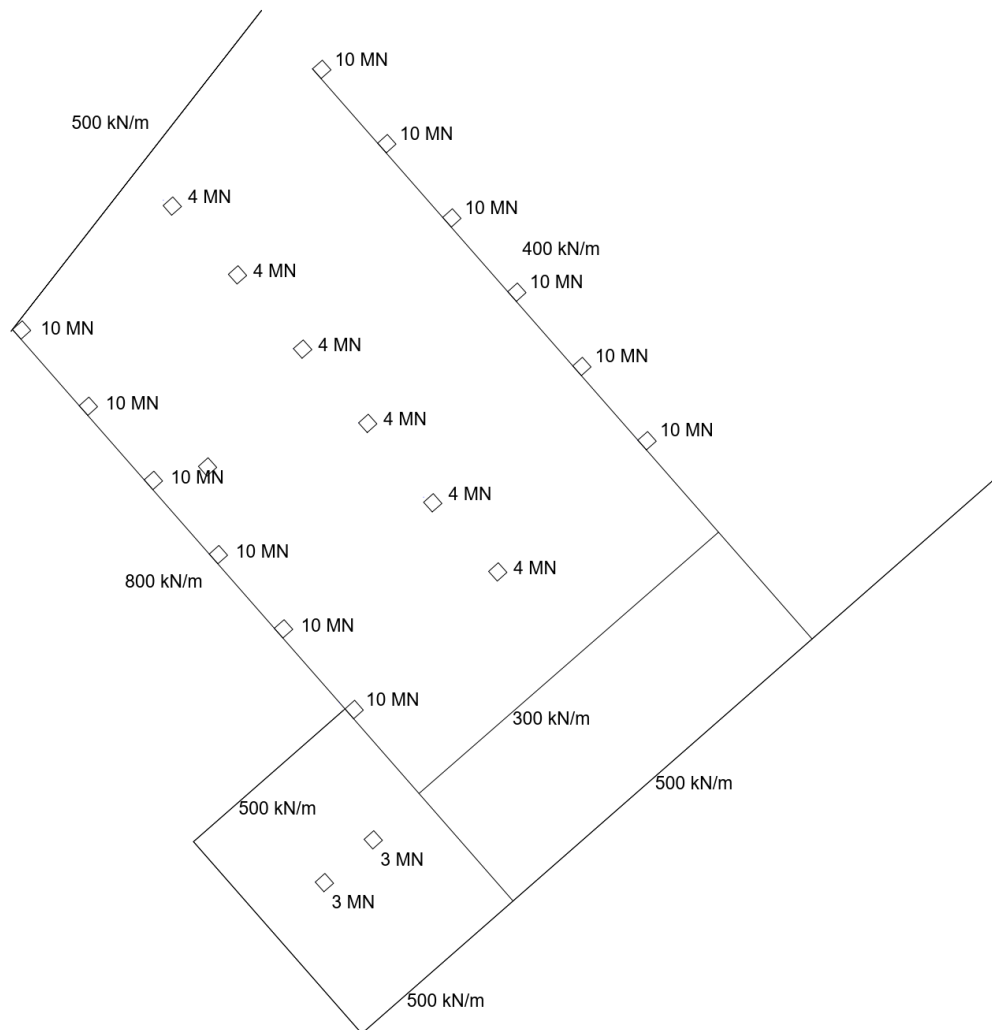
BKD5					
Parameter	Bergklass	A	B	C	D
$m_b$	min	9,59	4,81	2,23	0,86
	max	23,42	9,25	4,64	2,15
$s$	min	0,0357	0,0067	0,0013	0,0001
	max	0,5738	0,0319	0,0060	0,0011
$a$	min	0,50	0,50	0,51	0,54
	max	0,50	0,50	0,50	0,51
$c_m$ [MPa]	min	4,48	2,65	1,69	0,93
	max	18,03	4,57	2,58	1,65
$\Phi_m$ [°]	min	65	59	52	40
	max	65	63	59	52
$\sigma_{tm}$ [MPa]	min	0,83	0,26	0,09	0,02
	max	5,46	0,77	0,25	0,08
$\sigma_c$ [MPa]	min	41,9	15,2	5,1	1,0
	max	168,9	39,6	14,4	4,8
$\sigma_{em}$ [MPa]	min	97	56	30	12
	max	191	95	55	29
$E_m$ [GPa]	min	48	27	10	3
	max	64	46	25	10



Figur S2: Anläggnings- och entreprenadspecifika bergklassfördelningar för den planerade tunnelbanan mellan Odenplan och Arenastaden.

## Bilaga 2 - Huslaster från kvarter 37

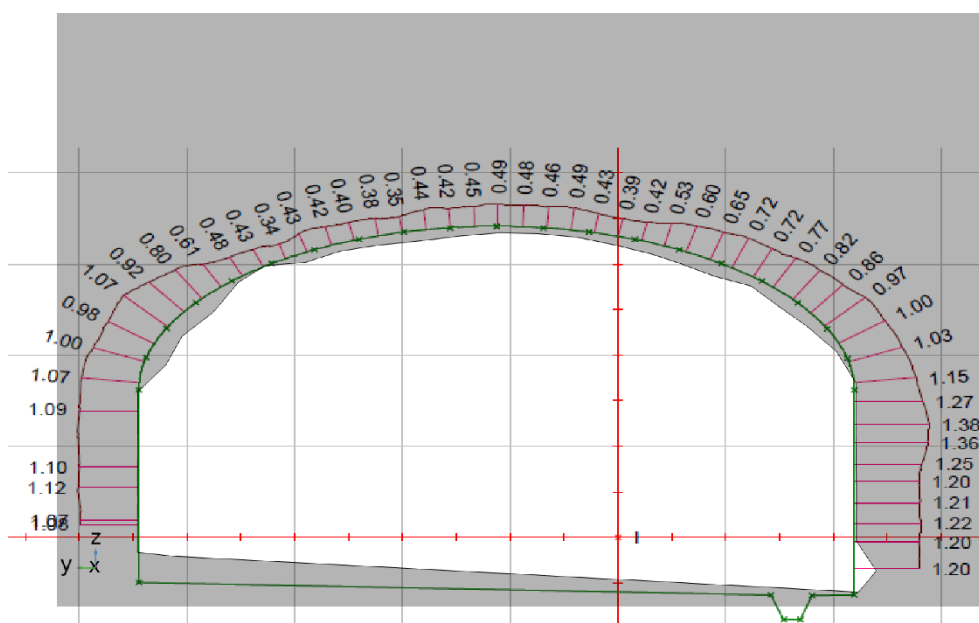
PRELIMINÄR HANDLING  
KV 37



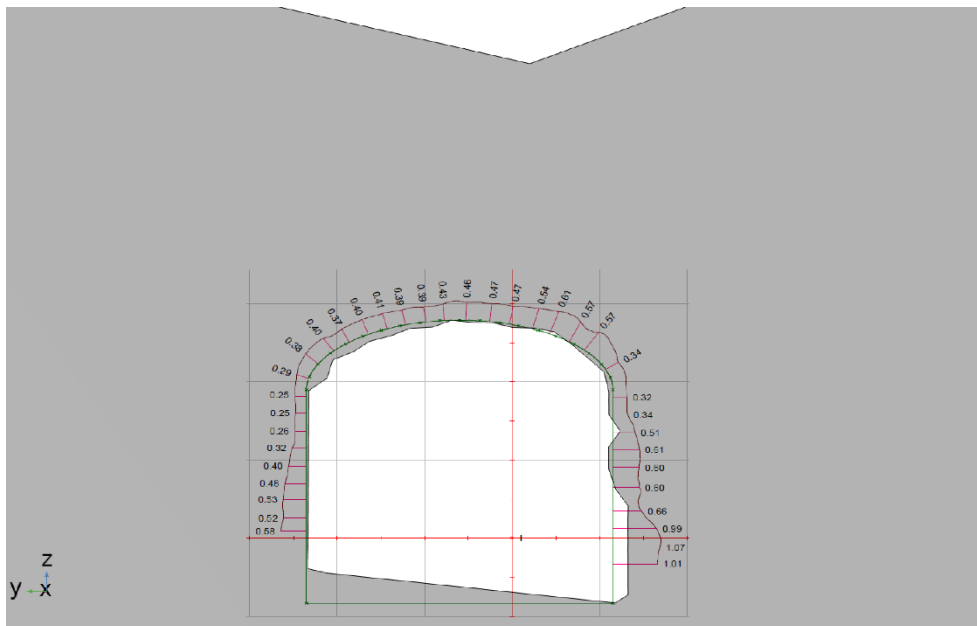
Figur S3: Plan-vy över preliminära grundläggningslaster tillhörande kv37.

## Bilaga 3 – Tunnelgeometrier i förhållande till modellgeometri i COMSOL

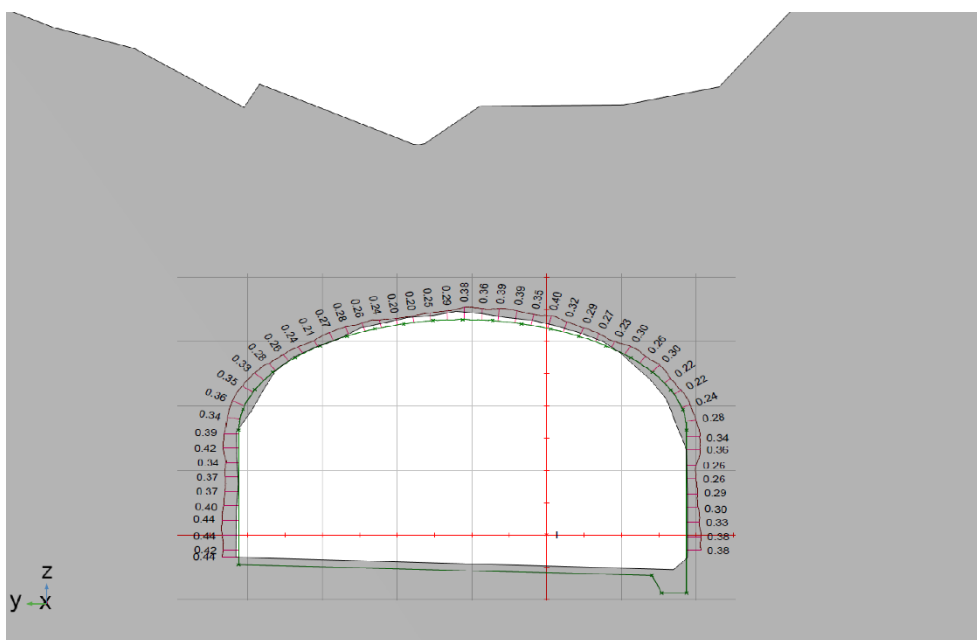
Vid jämförelse i tre sektionen avseende modellerad tunnelgeometri i COMSOL med senare erhåller underlag på inskannad bergkontur i tunnel förekommer väsentliga skillnader i både tunnelbredd och höjd, se Figur S4-S9. I enstaka fall är avvikelserna större än den känslighetsanalys som genomförts.



Figur S4: Spårtunnel bredd från COMSOL jämförelse med tunnelritning för LM-31+537, Grön linje är modellerade tunnlar och röd linje är verklig tunnelkontur.

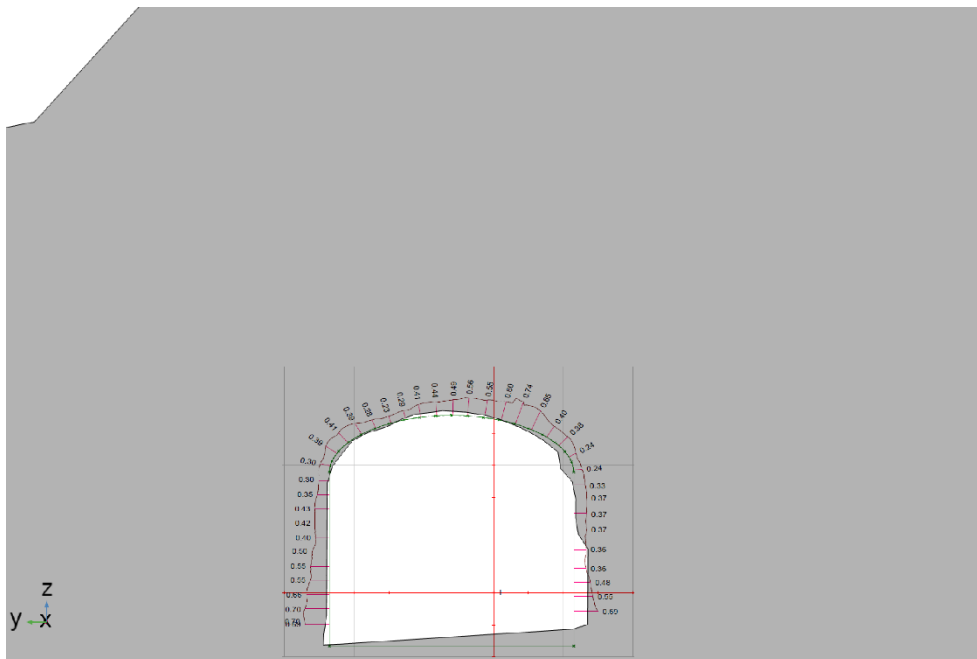


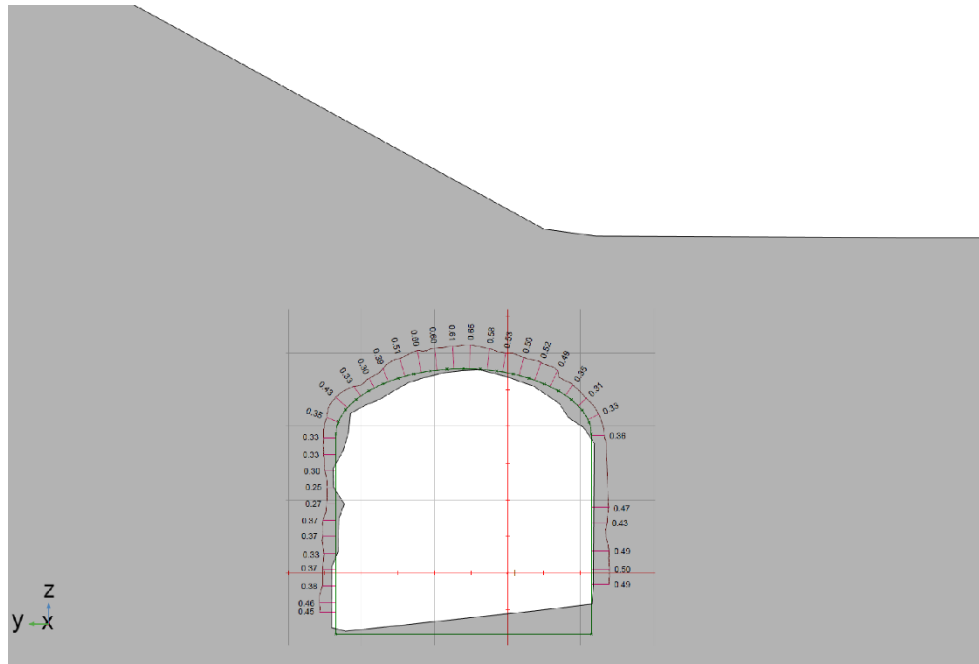
Figur S5: Service tunnel bredd från COMSOL jämförelse med tunnelritning för LM-31+537, Grön linje är modellerade tunnlar och röd linje är verklig tunnelkontur.



Figur S6: Service tunnel bredd från COMSOL jämförelse med tunnelritning för LM-31+520, Grön linje är modellerade tunnlar och röd linje är verklig tunnelkontur.



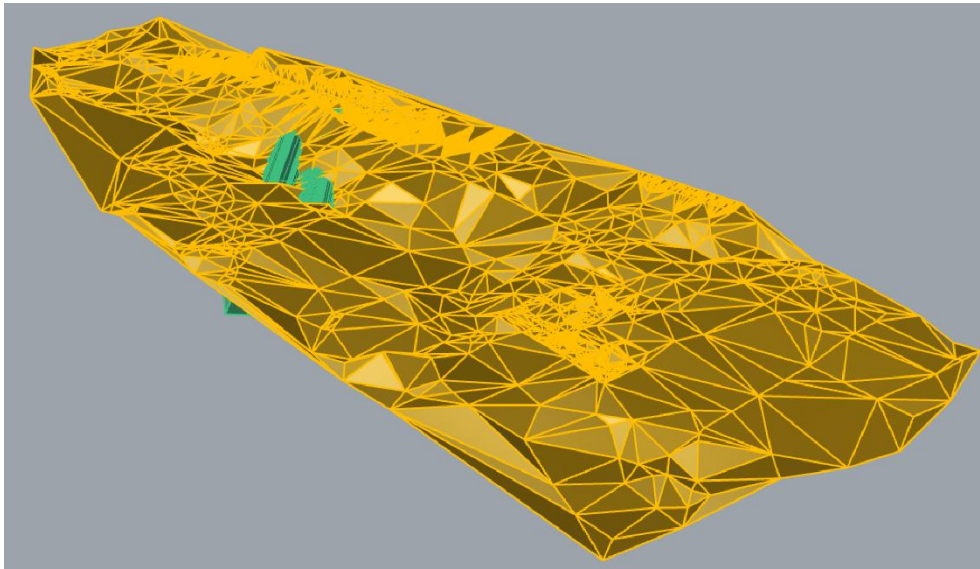




Figur S9: Service tunnel bredd från COMSOL jämförelse med tunnelritning för LM-31+552, Grön linje är modellerade tunnlar och röd linje är verklig tunnelkontur.

## Bilaga 4 – Spår – och servicetunnel skyddszoner och berg modellen

Redovisning av förhållandet mellan bergyta och skyddszon för tunnlarna. I vissa områden är bergtäckningen så låg att skyddszonen överstiger bergytan.



Figur S6: Skyddszon för tunnel utgår till 10 m från tunnelns ytterkontur, i vissa områden penetrerar skyddszonen bergytan, se grönt i figur.