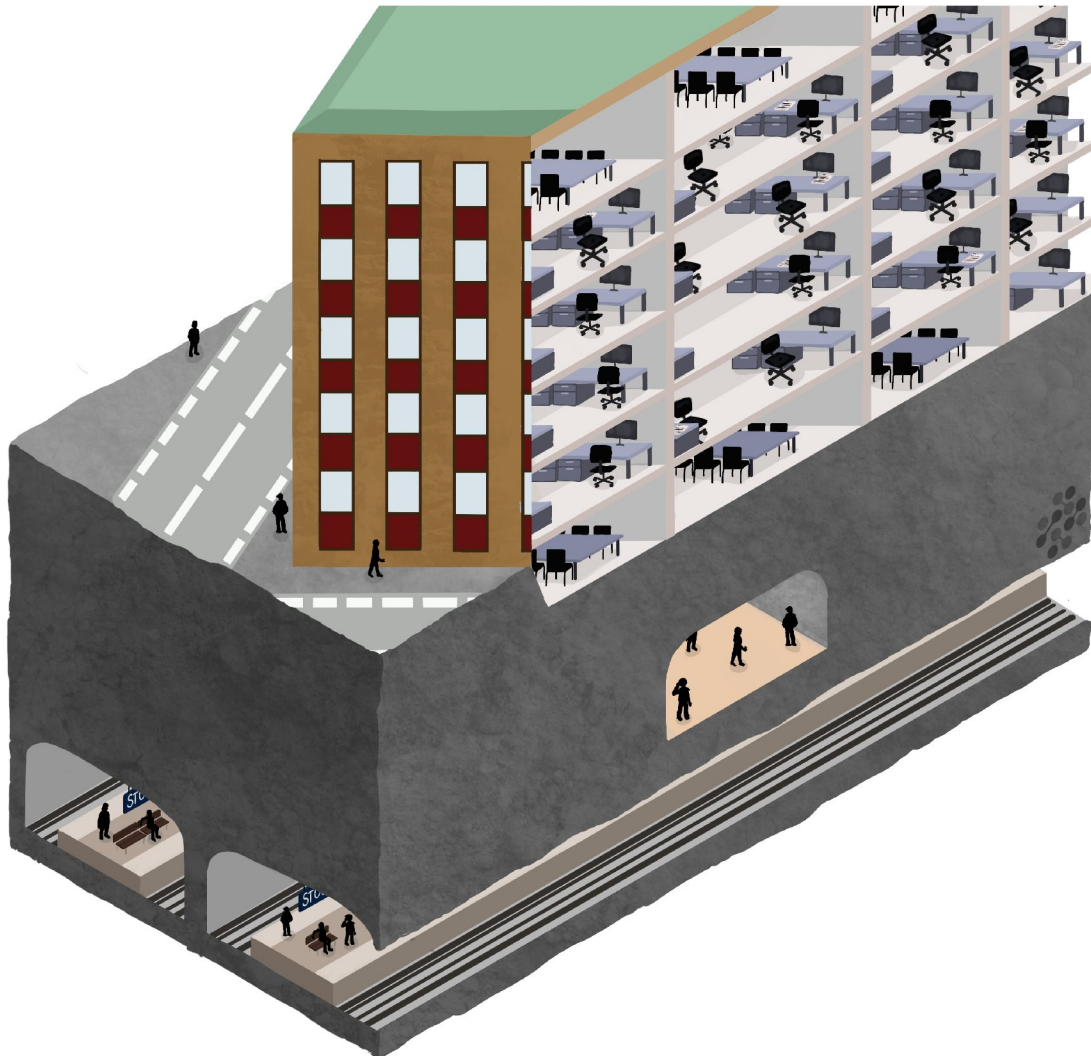


PM Berg
ORGELPIPAN 7 - PÅBYGGNAD



UTREDNING
2021-04-16

Uppdrag: 298444, Orgelpipan 7 - Påbyggnad
Titel på rapport: Orgelpipan 7 - Påbyggnad
Status: Utredning
Datum: 2021-04-16
Medverkande:
Beställare: Hufvudstaden AB
Kontaktperson: Karl Palm

Konsult: Tyréns AB
Uppdragsansvarig: Niklas Karlsson
Handläggare: Chunling Shan
Kvalitetsgranskare: Rikard Gothäll

Revideringar:
Revideringsdatum: 2021-04-15
Version: 1.1
Initialer: RG, Tyréns
Författare:

Datum: ÅR-MÅN-DAG
Handlingen granskad av:

Datum: ÅR-MÅN-DAG
Tyréns AB
Tel: 010 452 20 00
www.tyrens.se
Säte: Stockholm
Org.Nr: 556194-7986

SAMMANFATTNING

Inledning

Hufvudstaden AB planerar att bygga på och utveckla fastigheten Orgelpipan 7. Detta PM beskriver förutsättningarna för denna påbyggnad med avseende på underliggande berganläggningar till pendeltågstation Stockholm City. PM syftar enbart till att utgöra underlag för detaljplaneprocessen för Orgelpipan 7, och är således ingen konstruktionshandling.

Bergtekniska förutsättningar

Orgelpipan 7 är grundlagd med plintar på berg, och fastigheten är lokaliserad direkt ovanför det centrala mellanplanet i Citybanan, där minsta bergtäckningen dem emellan är ca 7,5 m. Aktuellt påbyggnadsförslag innebär ökade grundläggningslaster om ca 10–70 % på plintar och väggar gentemot befintliga. Den begränsade bergtäckningen i kombination med komplex tunnelgeometri har föranlett behov av en numerisk beräkning för att undersöka effekten av en ökad pålastning på bergmassan, samt eventuella konsekvenser i Citybanan.

Metodik

En numerisk beräkning har gjorts genom en 3D finita elementanalys i programvaran Comsol Multiphysics, vilket syftar till att utreda inverkan av ökade grundläggningslaster på befintliga bergrum samt inverkan på befintlig förstärkning i det centrala mellanplanet.

Resultat

Påbyggnad av Orgelpipan 7 ger störst lastpåkänning i fastighetens norra del mot Mäster Samuelsgatan, vilket ovanför ligger Citybanans spårtunnlar och tillhörande rulltrappsschakt. Uppkomna förändringar i bergmassans spänningstillstånd är små och tillskottsdeformationen är som mest omkring 0,1 mm. Modellen visar även att belastningsförändringarna i befintlig förstärkning till det centrala mellanplanet är mycket små.

Diskussion

Den totala tilltagande deformationen i konturen kring centrala mellanplanet efter pålastning är genomgående så liten att det bedöms sakna betydelse för befintlig förstärknings dimensionering. Bergets bärförmåga är avsevärt större än den pålastning som tre tillkommande våningsplan orsakar, men bergmassans bärighet kan däremot influeras av den rörelsezonen som är dokumenterad i området kring rulltrappsschaktet. I rörelsezonen skapas tilltagande skjuvspänningar, men vilket inte bedöms som kritiskt för bergmassans bärighet.

Den numeriska beräkningen grundas på de projekteringsförutsättningar som nyttjats vid projekt Citybanan, och skulle det verkliga spänningstillståndet vara sådant att modellen inte håller borde detta ha visat sig i form av stora rörelser i Orgelpipans grundläggning i samband med bygget av Citybanan. I det fall att mätresultat från övervakningsprogram för Orgelpipan 7 tillgängliggörs i senare skede bör dessa utvärderas.

Sammanfattning

Bergmassans bärighet anses oförändrad efter pålastning och genomförbarheten för den planerade påbyggnaden är god. Gällande eventuella försvars- och förstärkningsåtgärder, såväl som kontrollprogram för Citybanan bör tidigare upprättade avtal återopas. Det är Tyréns bedömning att lastförändringarna är så små att försvarsåtgärder inte är nödvändiga, men det behöver verifieras i byggskedet med ett kontrollprogram som måste utformas i samråd med anläggningsägarens driftsavdelning.

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
1.1	Syfte	6
1.2	Tidigare utredningar	6
1.3	Områdesbeskrivning och lastsituation	6
1.4	Underlag	8
2	Bergtekniska förutsättningar	10
2.1	Allmänt	10
2.2	Bergspänningsförhållanden	10
2.3	Geologisk kartering schaktbotten Orgelpipan	11
2.4	Geologisk kartering Centrala mellanplanet	11
2.5	Observationer av rörelser och tidigare bedömningar	11
2.6	Bergtäckning	12
3	Metodik	14
3.1	Allmänt	14
3.2	Modellgeometri	14
3.3	Randvillkor	15
3.4	Mesh	15
3.5	Materialegenskaper	16
3.6	Initialspänningsförhållanden	17
3.7	Yttre laster	17
4	Resultat	21
4.1	Allmänt	21
4.2	Utvärdering av stabilitet kring det centrala mellanplanet	21
4.2.1	Huvudspänningar kring det centrala mellanplanet	21
4.2.2	Deformationer i centrala mellanplanet	22
4.2.3	Tryckspänningsförändringar kring det centrala mellanplanet	26
4.3	Utvärdering av rörelsezon RZ2	27
4.3.1	Tryckspänningsförändringar kring RZ2	28
4.3.2	Tillkommande deformation i rörelsezon RZ2	29
4.3.3	Laständringar i bultarna	30
4.3.4	Laständringar i sprutbetongen	30
5	Diskussion	32
6	Sammanfattning	33

Förkortningar

FEA	Finite Element Analysis
PM	ProMemoria
RZ2	Rörelsezon 2
OP7	Orgelpipan 7

Symboler

σ_1	Första huvudspänning
σ_2	Andra huvudspänning
σ_3	Tredje huvudspänning
σ_H	Största horisontalspänningen i bergmassan (Initialspänning)
σ_h	Minsta horisontalspänningen i bergmassan (Initialspänning)
σ_v	Vertikalspänning i bergmassan (Initialspänning)
θ_{σ_H}	Vinkel som anger bäringen på σ_H , definierad medurs från norr
σ_{cm}	Enaxiell tryckhållfasthet för bergmassa
E	Bergmassans elasticitetsmodul
ν	Bergmassans tvärkontraktionstal (Poissons tal)
ρ	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 σ_3 .

1 Inledning

1.1 Syfte

Hufvudstaden AB planerar att utveckla fastigheten Orgelpipan 7 i centrala Stockholm med en påbyggnad av nya våningsplan. Det påbyggnadsalternativ som är aktuellt för Orgelpipan 7 i dagsläget innefattar tre nya våningsplan, och som utförs med indragen fasad över hela fastigheten. Det befintliga husets indrag mot Mäster Samuelsgatan avses byggas igen med våningsbjälklag. På uppdrag av Hufvudstaden AB utreder Tyréns konstruktionsavdelning förutsättningar för planerad påbyggnad med hänsyn till befintlig stomme och grundläggning, och har tillhandahållit preliminära lastnedräkningar som underlag till en bergmekanisk utredning av bergmassans bärighet och eventuell påverkan på närliggande berganläggning.

Orgelpipan 7 är grundlagd med plintar på berg, och fastigheten är lokaliserad direkt ovanför det centrala mellanplanet tillhörande pendeltågstation Stockholm City. Det aktuella påbyggnadsförslaget innebär sammanlagt en tillkommande lastökning om ca 10–70 % på plintar och väggar gentemot dagens befintliga laster. På uppdrag av Hufvudstaden AB utreder Tyréns de bergtekniska förutsättningarna för denna påbyggnad med avseende på underliggande berganläggningar, med syfte att utgöra underlag till detaljplaneprocessen.

Syftet med beräkningarna som redovisas i detta PM är att på ett översiktligt sätt avgöra i vilken omfattning en pålastning på befintlig grundläggning påverkar underliggande berganläggningar. Detta för att säkerställa att detaljplaneprocessen kan fortskrida. Mer detaljerade beräkningar för kontrollprogram et.c. kan utföras i senare skeden.

1.2 Tidigare utredningar

2018 utförde Tyréns en bergteknisk utredning åt Hufvudstaden AB av då gällande, och mer omfattande, påbyggnadsalternativ innefattande 3 respektive 9 våningar i olika sektioner av fastigheten Orgelpipan 7 (alternativ +55), daterat 2018-03-29. Summariskt resulterade tidigare utredning i att den totala tilltagande deformationen efter pålastning enligt alternativ +55 (9 våningar) orsakar mycket små deformationer i konturen kring det centrala mellanplanet. Där den största risken bedömdes bestå i att ytorna kring förekommande rörelsezon RZ2 snedbelastas och orsakar en skjuvrörelse mellan sprickytorna. Detta skulle kunna orsaka hävning och/eller rotation av block i bergmassan, och därmed påverka bergmassans bärighet ovan centrala mellanplanet.

Analysresultatet påvisade tilltagande skjuvspänningar i rörelsezonerna efter pålastning, men det ansågs inte kritiskt för bergmassans bärighet. Sammanlagt bedömdes bergmassan under Orgelpipan 7 som fortsatt stabil efter pålastning enligt alternativ +55. Föreliggande utredning i detta PM utgår från den tidigare framtagna analysmodellen, men med uppdaterade plintlaster samt komplettering av befintlig bergförstärkning i det centrala mellanplanet. Information har hämtats från de relationshandlingar som tillhandahållits av Trafikverket i tidigare utredningsskede, se redovisade underlag i kapitel 1.4.

1.3 Områdesbeskrivning och lastsituation

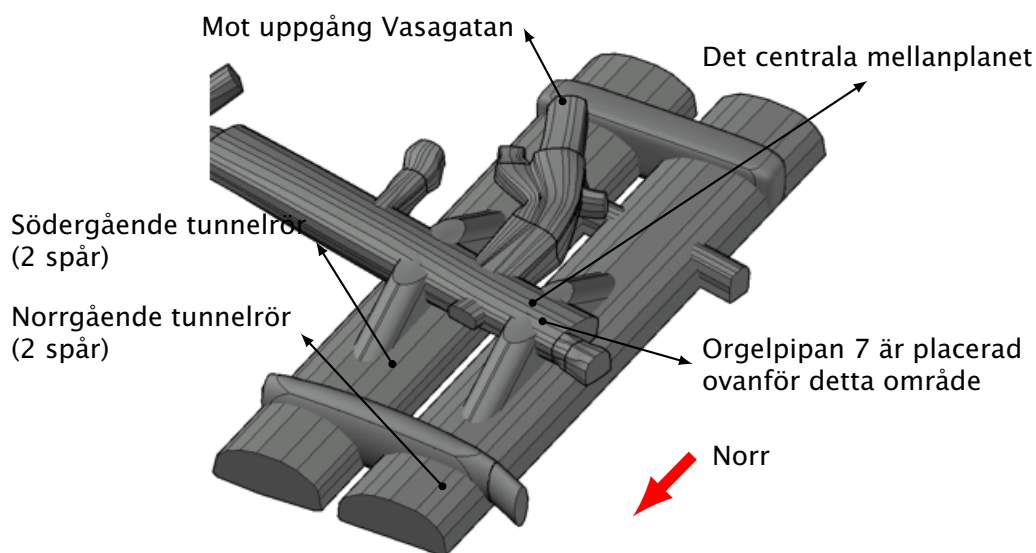
Station Stockholm City är en pendeltågsstation som ligger under T-centralen. Stationen togs i drift 2017 och består av två stationstunnlar, två perronger och fyra spår.

Det centrala mellanplanet sammanbinder Citybanans två pendeltågsperronger via rulltrappsschakt, se beskrivning i Figur 1.

Minsta bergtäckningen mellan teoretiskt tak i det centrala mellanplanet och källarplan i Orgelpipan 7 uppskattas till cirka 7,5 m i fastighetens västra del närmast Vasagatan, vilket tidigare även sammanföll med de högst belastade plintarna i planerad 9-vånings påbyggnad. I nuvarande 3-våningspåbyggnad hamnar de största lastförändringarna däremot på plintar som ovanförligger rulltrappsschakten till det centrala mellanplanet. Det centrala mellanplanet har en spännvidd på cirka 16 m och en höjd på ungefär 6,5 m. Den begränsade bergtäckningen i kombination med en komplex tunnelgeometri i Citybanan (dvs. relativt stora spännvidder, fleraxliga korsningspunkter och rulltrappsschakt) föranledde, i tidigare skede, behov av en numerisk lastnedräkning för att undersöka effekten av en ökad pålastning på bergmassan.

Innevarande påbyggnadsalternativ om 3 våningar medför störst lastpåökning i fastighetens norra del mot Mäster Samuelsgatan, där lasten ökar med 30–70 %, och således överstiger de laster som utretts i tidigare skede för aktuella plintar. De grundläggningsfundament som berörs av detta har däremot en mindre kritisk placering i förhållande till det centrala mellanplanet i Citybanan. Lasten ovanförligger där spårtunnlarna som ligger på en betydligt djupare nivå i berget och bergtäckningen därmed är större, men den betydligt djupare grundläggningsnivån i fastighetens nordöstra hörn behöver beaktas. Det bör även noteras att området angränsar mot tillhörande rulltrappsschakt, som av geometriska skäl inte bör försummas.

I detta dokument utreds de bergmekaniska förutsättningarna för påbyggnaden med hjälp av strukturanalys genom FEA (Finite Element Analysis) av undermarksanläggningen. Arbetet i detta PM grundas bland annat på Tyréns tidigare bergutredning och konstruktions-PM, se Ref. 6 och 7 i Kapitel 1.4.



Figur 1: Illustration över delar av Station Stockholm City och det centrala mellanplanet.

1.4 Underlag

Följande dokument utgör underlag för arbetet:

1. Information om befintliga plintar under Orgelpipan 7 har hämtats från detta dokument: Tyréns, "Pendeltågstunnel Tomtebodavägen - Stockholms Södra, Station City, Orgelpipan 7, Grundläggning Befintlig Byggnad", ritningsnummer: 0228-30-820
2. Följande dokument har använts som källa för initialspänningar och initialspänningsriktningar: Vattenfall Power Consultant, "Initiala bergspänningar i Stockholmsområdet - Underlag för projektering av Citybanan", 2007-04-10
3. Förvaltningsdata gällande centrala mellanplanet och Norrströmstunneln har hämtats från följande dokument: Trafikverket, Citybanan i Stockholm, 9523 - Norrströmstunneln. Dimensioneringsunderlag Station city, Förvaltningsdata, 9523-13-025-023, inkl. bilagor.
4. Grundläggningslaster som använts i analyserna har hämtats från följande dokument: Tyréns, "Orgelpipan 7 - Linjelaster och laster från viadukt.pdf", email "SV: Orgelpipan 7: Lastnedräkning" 2018-02-01
5. Lasermoln som använts vid modelletablering: Relationshandling med laserskannat punktmoln för Norrströmstunneln, Citybanan, har tillhandahållits av Trafikverket, 2017-10-27
6. En av Tyréns tidigare bergutredningar som bland annat använts för information gällande rörelsezon RZ2: Tyréns, "Orgelpipan 7 - Bergutredning", 2017-11-07
7. De konstruktionsmässiga detaljerna för en påbyggnad diskuteras i följande PM: Tyréns, Tyréns, Orgelpipan 7 - Utredning detaljplan, 2020-01-20.
8. Trafikverket, Citybanan i Stockholm, 9523 - Norrströmstunneln. Utredning, Rörelsezon OP7-konsekvenser för högstaden. Bygghandling, 9523-13-026-004, 2008-09-01.
9. Trafikverket, Citybanan i Stockholm, 9523 - Norrströmstunneln. Geologisk kartering CMP, ritning 9523-13-860_450, ritn.nr förvaltning 1154404.
10. Trafikverket, Citybanan i Stockholm, 9523 - Norrströmstunneln. Geologisk kartering, Rulltrappsschakt från PRÖ, ritning 9523-13-860_458, ritn.nr förvaltning 1154 385.
11. Trafikverket, Citybanan i Stockholm, 9523 - Norrströmstunneln. Geologisk kartering, Rulltrappsschakt från PRV, ritning 9523-13-860_459, ritn.nr förvaltning 1154 387.
12. Trafikverket, Citybanan i Stockholm, 9523 - Norrströmstunneln. Bergförstärkning, drän- och injektering, Centrala mellanplanet, ritning 9523-13-861_450, ritn.nr förvaltning 1154 404.
13. Trafikverket, Citybanan i Stockholm, 9523 - Norrströmstunneln. Bergförstärkning, drän- och injektering, Rulltrappsschakt från PRÖ, ritning 9523-13-861_459, ritn.nr förvaltning 1154 385.

14. Trafikverket, Citybanan i Stockholm, 9523 – Norrströmstunneln. Bergförstärkning, drän- och injektering, Rulltrappsschakt från PRV, ritning 9523-13-861_458, ritn.nr förvaltning 1154 387.
15. Trafikverket, Citybanan i Stockholm, 9523 – Norrströmstunneln. Gemensamt mätprogram för defomationsförändringar i befintliga byggnader och byggnadsverk ovan Citybanan. Bygghandling, 9523-13-500-102.

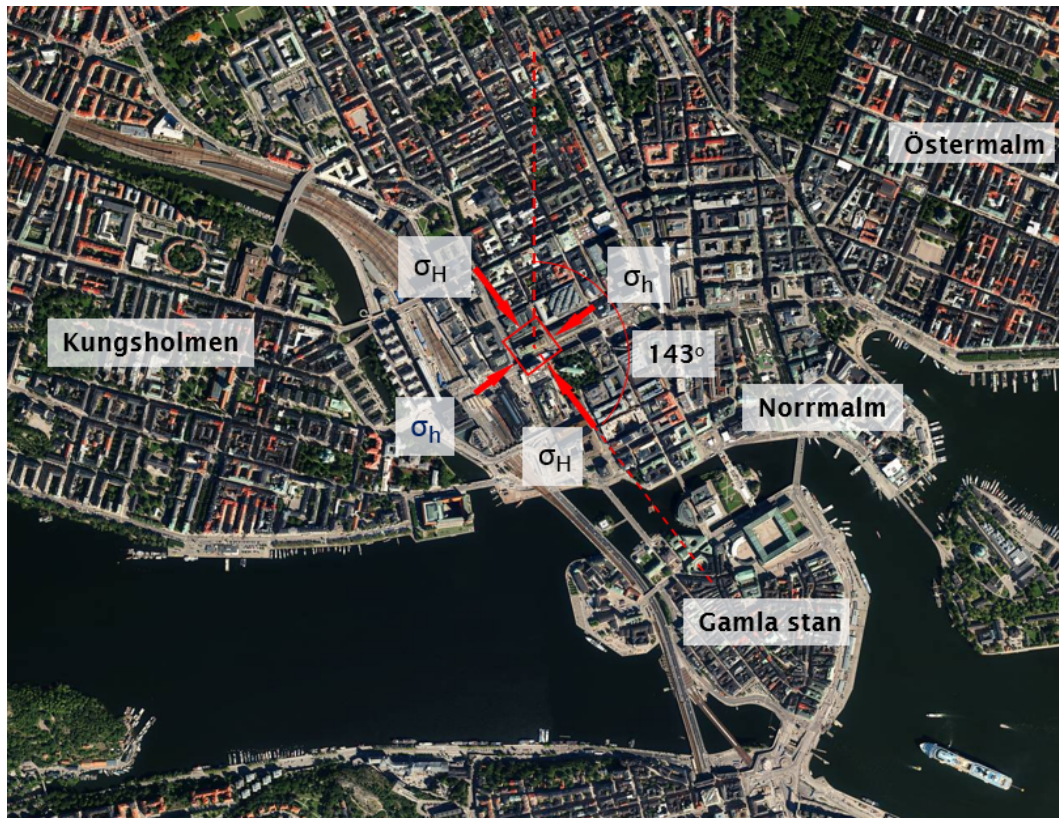
2 Bergtekniska förutsättningar

2.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs de bergtekniska förutsättningarna för analysarbetet. Tyréns har utgått från projekteringsunderlaget för Citybanan i utvärderingen av bergmassans initialspänningar, Ref. 2.

2.2 Bergspänningsförhållanden

De bergspänningsförhållanden som antas råda i bergmassan i området presenteras i Figur 2. Spänningsmagnituderna och riktningarna är typvärden hämtade från projekteringen av Citybanan och bedöms ge en realistisk bild av spänningssituationen. Detta grundar sig på antagandet att om initialspänningarna varit betydligt lägre (typiskt lägre än 1 MPa) kunde exempelvis blockutfall ha varit ett svårhanterligt problem vid byggandet av Citybanan. Våldigt stora spänningar skulle i sin tur kunna ha orsakat påtagliga rörelser i befintliga undermarksanläggningar. Vid bygget av Citybanan har inga observationer som skulle kunna tyda på avvikande spänningsmagnituder rapporterats. Magnituder på σ_h och σ_H redovisas i Kapitel 3.6.



Figur 2: Illustration av initialspänningar i bergmassan runt kvartetet Orgelpipan.

2.3 Geologisk kartering schaktbotten Orgelpipan

Geologisk kartering av ytberget utfördes av Hagkonsult på 1960-talet, och nu senare även av WSP, där fastighetens schaktbotten sågades upp i vissa sektioner (1x5 meter). Resultat av karteringen sammanfattas översiktligt här, se ref. 3 och 8 i kapitel 1.4.

För tillgängliga bergskärningar noterades två huvudsakliga sprickorienteringsgrupper, där den ena (i) är nord-östligt orienterade sprickor som stupar brant mot NV (7°0), och den andra gruppen (ii) är nord-sydligt strykande och subhorisontellt lutande sprickplan (20° mot O). I Q-systemet tilldelades ett Jn-värde på 6, vilket definieras som två sprickgrupper med slumpmässigt förekommande sprickor. Berget påvisade låg grad av omvandling och bergkvaliteten bedömdes som huvudsakligen bra, RMR_{bas} ≥ 70, Q_{bas} ≥ 10.

Vid geologisk kartering av schaktbotten för Orgelpipan 7 i samband med byggnation identifierades två rörelsezoner, en av dessa benämns RZ2. Vid systemhandlingsprojektering av Citybanan observerades denna zon även i två kärnborrhål. Eftersom zonen bedömdes kunna påverka byggnation av Citybanan vidtogs ytterligare undersökningar för att verifiera dess läge, varvid bottenplattan i fastigheten OP7 lokalt sågades upp. Zonen RZ2 kunde bekräftas i denna undersökning och beskrivs enligt nedan, vilket överensstämmer med den beskrivning som finns dokumenterad från Hagkonsult.

I garagegolvet påträffades en svaghetszon/rörelsezon med strykning och stupning 30°/90°, och med en mäktighet på 200 mm till 300 mm. Detta område består huvudsakligen av en rödomvandlad, breccierad/uppsprucken granit, som huvudsakligen innefattar kloritmineraliserade sprickplan (1–5 mm), där lokala lerslag (1 mm till 5 mm tjocka), och även till viss del kalcitmineraliseringar, förekommer. Vid bergkaraktisering noterades fyra olika partier av något varierande karaktär, där tre av dessa har RMR_{bas} = 60–75 och den fjärde har RMR_{bas} = 35. Det sistnämnda bergpartiet har en lokalt nedsatt bergkvalité, och innefattar den zon med kloritmineralisering och lerslag som tidigare nämnts.

2.4 Geologisk kartering Centrala mellanplanet

Vid färdigställandet av Station City utförde WSP en geologisk kartering av tunnlarna till det Centrala mellanplanet, vilken sammanfattas översiktligt här, se ref. 3 och 9.

Bergmassan består av nästan lika delar gnejs som granit. Bedömd bergklass varierar mellan B1 och B2, vilka skiljer sig åt med hänsyn till antal sprickgrupper i området. Bergklass B1 har huvudsakligen en sprickgrupp med oregelbundet förekommande sprickor, medan B2 har två sprickgrupper med oregelbundet förekommande sprickor som kan ge upphov till avgränsning av enstaka block. Två områden med lermineraliserade sprickor ≤ 10 cm noterades. Bergkvalitetsmässigt kan området delas in i två typer. Överlag varierar slutgiltigt RMR mellan 65 och 82, och Q-värde mellan 14 och 90. Bergområdet vid anslutningen till det Södra mellanplanet har däremot en något nedsatt kvalité (RMR=56, Q=3.1), vilket främst beror på de lerslag och den mindre svaghetszon som noterats i området (MSZ 2), se ref 3.

2.5 Observationer av rörelser och tidigare bedömningar

Ett gemensamt mätprogram för deformationsförändringar i befintliga byggnader och byggnadsverk ovan Citybanan upprättades för att kontrollera omgivningspåverkan un-

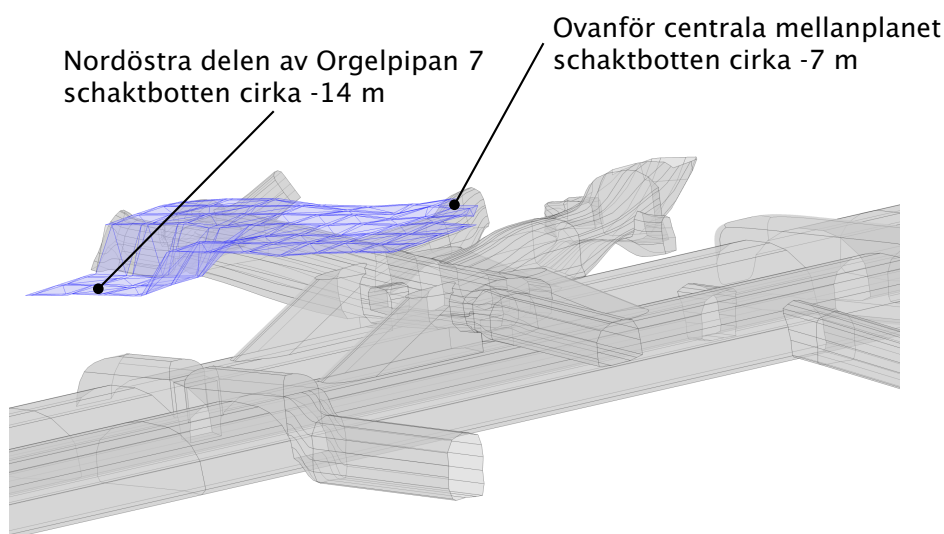
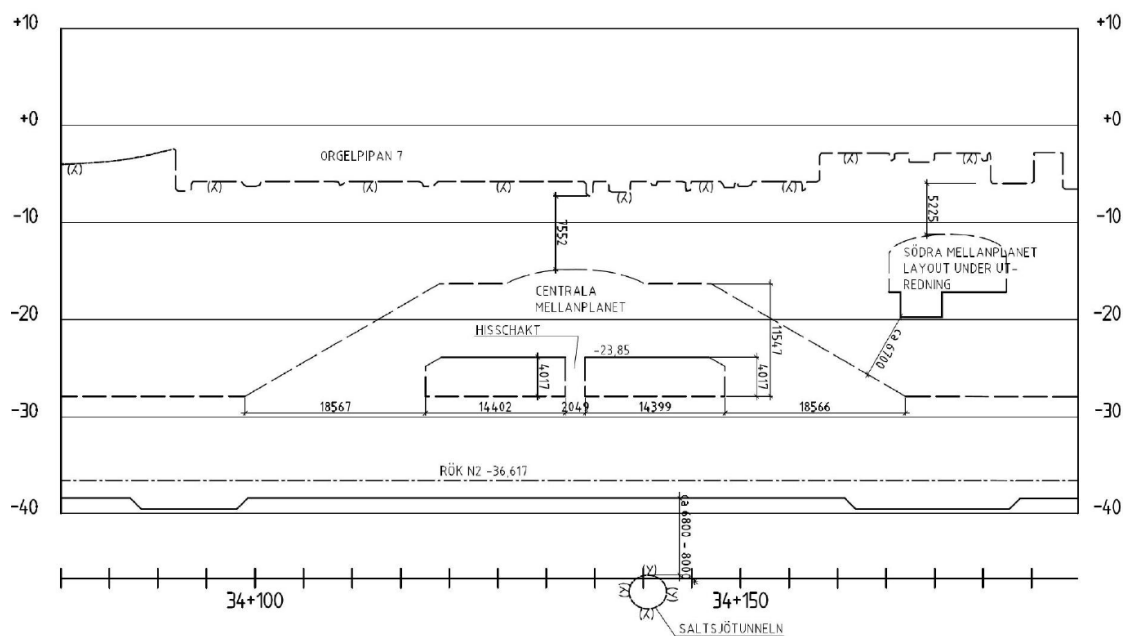
der byggskedet, se ref 14. I Orgelpipan 7 installerades 30 mätpunkter för mätning av vertikala deformationer, där nollmätning utfördes innan berggutttag för pilottunnel i Centrala mellanplanet. Mätfrekvens, gränsvärden och åtgärder för de enskilda mätpunkterna definierades i förhållande till befintliga förutsättningar och föremålens känslighet. Resultat från mätprogrammet är inte tillgängligt i dagsläget.

Enligt utlåtande från WSP bedömdes tåligheten för differensdeformation i Orgelpipan 7 till 3–5 mm, se ref 9. I samma utredning beskrivs att en påbyggnad kan innebära 1–2 mm ökade deformationer på bergytan, huvudsakligen jämt fördelade. Vidare bedömdes att vid framtida lastökning med 30–50 %, kan pelare i rörelsezonerna utsättas för differensdeformationer, vilket dock kan minskas med lastöverbryggande och lastutbredande konstruktioner, samt eventuellt bergförstärkning. WSPs tidigare bedömning menar att Citybanan ger marginell påverkan på fastighetens grundläggning i form av ökande deformationer och ser inget hinder för påbyggnad.

2.6 Bergtäckning

Den teoretiska bergtäckningen mellan det centrala mellanplanet och Orgelpipan 7 uppskattas till cirka 7,5 m, se ritning över centrala mellanplanet i Figur 3. Den begränsade bergtäckningen i kombination med en komplex tunnelgeometri har föranlett behov av en numerisk lastnedräkning för att undersöka effekten av en ökad pålastning på bergmassan. En 3D-modell över schaktbotten under Orgelpipan 7 visas i Figur 4. Den del av byggnaden som ligger över det centrala mellanplanet har en något grundare grundläggning.

Den faktiska bergtäckningen är relevant, men från det underlag som levererats från Trafikverket har den faktiska bergkonturen inte kunnat utläsas i detalj. Däremot är schaktbotten för grundläggningen av Orgelpipan 7 välkänd från inmätningar av rensad schaktbotten. Det finns därför en viss osäkerhet i var bergkonturen ligger för Citybanan. I modellen är det kortaste avståndet mellan schaktbotten och centrala mellanplanet satt till 7,4 m.



3 Metodik

3.1 Allmänt

Comsol Multiphysics v. 5.5 har använts för 3D FEA (Finite Element Analysis) av centrala mellanplanet och Orgelpipan 7:s grundläggning med omkringliggande bergmassa. Analyserna har utförts i flera steg för att dokumentera inverkan av ökade grundläggningslaster på befintliga bergrum. Befintlig förstärkning i det centrala mellanplanet betraktas också i analyserna, där bultar och sprutbetong har inkluderats i modellen i ett andra beräkningssteg. Bultarna simuleras som endimensionella (1D) balkelement om vardera 5 m i längd (se Figur 6) och sprutbetongen modelleras som ett skal med tjocklek 75 mm på insidan av tunnelkonturen. Underlag på utförd bergförstärkning i anläggningen härrör från Citybanans relationshandlingar (se ref. 3 och 12-14). Själva bergmassan har modelleras som ett elastiskt isotropt homogent material i enlighet med Trafikverkets projekteringshandbok, bilaga 11.

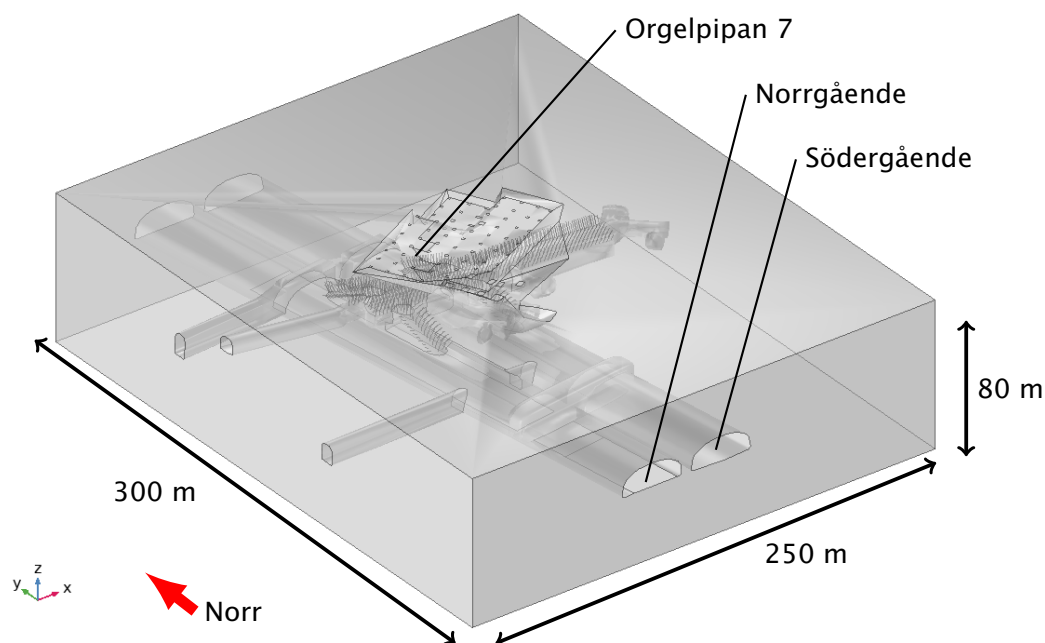
Den valda metodiken är lämplig då lasthistoriken för det centrala mellanplanet är mycket komplex. Den tekniska beräkningen syftar endast till att visa hur ökade grundläggningslaster inverkar på bergmassan under Orgelpipan 7. Modellen visar därför inte förväntad belastning i förstärkningselementen utan bara förändringarna i densamma vid förändrad ovanlast. Hur bygget av Citybanan och det centrala mellanplanet har påverkat Orgelpipan 7 innefattas inte i detta dokument. Beräkningsstegen presenteras i Tabell 1.

Tabell 1: Beskrivning av beräkningssteg

Beräkningssteg	Beskrivning
1.	Beräkningssteget inkluderar bergmassa, sprutbetong och befintlig undermarksanläggning inklusive laster från befintliga plintar, väggar och horisontalspänningar, det vill säga spänningssituationen <i>in-situ</i> .
2.	Beräkningssteget inkluderar bergmassa, befintlig undermarksanläggning med uppdaterade grundläggningslaster från OP 7, samt förstärkning i det centrala mellanplanet med bultar och sprutbetong .

3.2 Modellgeometri

Den globala analysmodellen har dimensionerna 300·250·80 m. Bergöverytan har förenklat som plan utanför grundläggningsområdet i modellen. Denna metodik bedöms inte påverka riktigheten i resultaten och är gjord av modelleringstekniska skäl. I Figur 5 visas den numeriska modellen av bergmassa och intresseområdet. De raka linjer som visas i figuren mellan grundläggning och modellens ytterkanter orsakas av triangulering vid inläsning av geometrin. Modellgeometrin för centrala mellanplanet och rulltrappschakten är baserad på den laserskanning som tillhandahållits av Trafikverket.



Figur 5: Illustration av modellgeometri.

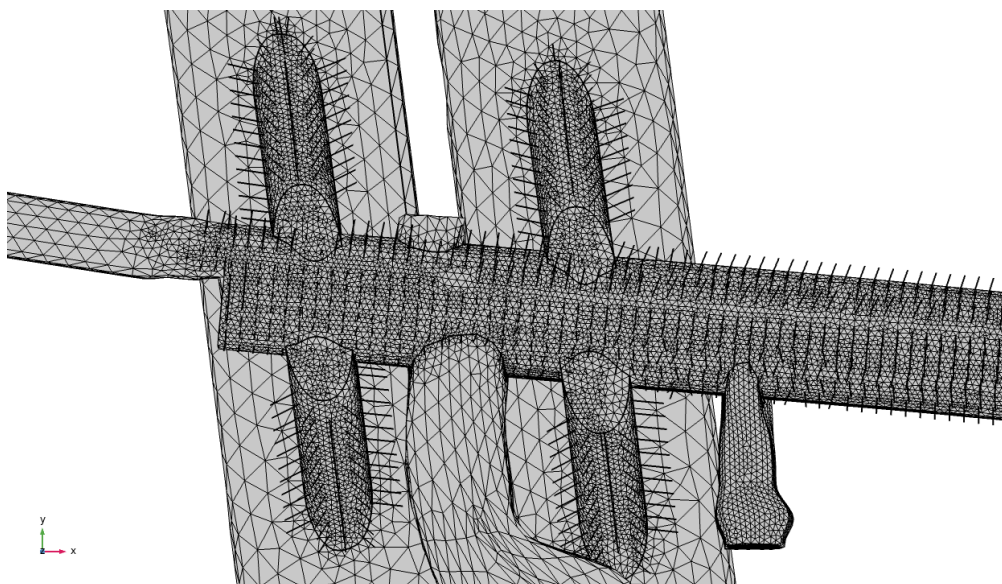
3.3 Randvillkor

Modellens fyra sidor har modellerats med väggar som är fria att röra sig vertikalt (i global z-riktning) medan de är fixerade i x- och y-riktning. Modellens botten är fixerad i x-, y- och z-riktning och är låst för rotationer. Det har verifierats att deformationerna avklingat innan de nått ränderna så att inte resultatet påverkas av randeffekter i modellen.

3.4 Mesh

I beräkningsmodellen har bergmassan diskretiserats i så kallade *finita element* kopplade till noder. Den diskretiserade bergmassan bildar ett *finita elementnät* - mesh.

Den numeriska modellen utgörs i huvudsak av tetraederelement och består av cirka 850 000 element. Elementtypen medger en hög meshdensitet i kritiska områden av centrala mellanplanet och elementstorleken har justerats upp i områden med låga spänningsgradients för att reducera beräkningstiden. Varje bult i geometrin representeras av 10 element. Ett exempel på meshdensiteten kring intresseområdet visas i Figur 6.



Figur 6: Meshdensitet kring centrala mellanplanet, där bultförstärkning i anläggningen redovisas som balkelement om vardera 5 m.

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. Kontinuumapproximationen är giltig för små spänningsförändringar i bergmassa med hög inspanning. Det villkoret är väl uppfyllt i detta projekt. Mekaniska egenskaper för bergmassan, bultar och sprutbetong visas i Tabell 2.

Tabell 2: Materialparametrar.

Berg	Värde
Elasticitetsmodul, E [GPa]	30
Poissons tal, ν [-]	0,25
Densitet, ρ [kg/m ³]	2700
Bultar	Värde
Elasticitetsmodul, E [GPa]	200
Poissons tal, ν [-]	0,30
Densitet, ρ [kg/m ³]	7850
Sprutbetong	Värde
Elasticitetsmodul, E [GPa]	25
Poissons tal, ν [-]	0,20
Densitet, ρ [kg/m ³]	2300

3.6 Initialspänningsförhållanden

De initialspänningar som använts för bergmassan i analyserna redovisas i Tabell 3. Den vertikala spänningen antas vara rent gravitativ. Initialspänningarna har stor inverkan på analyserna inför uttaget av Citybanan, men då bergmassan förväntas bete sig elastiskt för små förändringar i last så har initialspänningarna ingen inverkan på lastspridningen under grundläggningsfundamenten. Då analysen fokuserar på den översta delen av bergmassan så har inte inspänningsförhållandets djupberoende medtagits i modellen.

Tabell 3: Initialspänningar.

Beteckning	Initialspänning
Vertikalspänning i bergmassan, σ_v [MPa]	$\rho \cdot g \cdot z$
Största tryckspänning i bergmassan, σ_H [MPa]	4,7
Minsta tryckspänning i bergmassan, σ_h [MPa]	2,3
Orientering på σ_H , θ_{σ_H} [°]	143

3.7 Yttre laster

Påbyggnadsalternativet som behandlas i detta PM innebär att Orgelpipan 7 byggs på med 3 våningar över hela fastigheten. Eventuella influenser från Orgelpipan 6 på det centrala mellanplanet bedöms vara försumbara i denna studie. En skiss över byggnader angränsande till Orgelpipan 7 visas i Figur 7.

Enligt preliminära lastnedräkningar för påbyggnadsförslaget fås en tillkommande lastökning om ca 10–70 % på plintar och väggar gentemot dagens befintliga laster. Där inbyggnad av den tidigare öppna delen längs Mäster Samuelsgatan mot norr står för de procentuellt högsta förändringarna i belastning (30–70%) gentemot befintliga laster. Medan övriga delar av fastigheten, där 3 våningar byggs på, får en procentuell ökning om endast 10–14 %. Det är den västra delen av fastigheten, närmast Vasagatan, som är placerad direkt över det centrala mellanplanet, se Figur 8. Medan den norra delen mot Mäster Samuelsgatan ovanför ligger rulltrappsschakten och de djupare belägna spår-tunnlarna, och det är således i detta område som de största tillkommande lasterna påförs.

Grundläggningslasterna från Orgelpipan 7 utgörs av plint- och vägglaster, dessa redovisas i Tabell 4. Lasterna är hämtade från Ref. 4.

Tabell 4: Grundläggning, befintliga samt projekterade laster för 3-våningspåbyggnad.

Plint	Befintlig last [kN]	Projekterad last [kN]	Plint	Befintlig last [kN]	Projekterad last [kN]
P ₁	-8856	-10082	P ₄₃	-13203	-14741
P ₂	-9249	-10512	P ₄₄	-13203	-14741
P ₃	-8089	-10789	P ₄₅	-11538	-12819
P ₄	-6399	-10949	P ₄₆	-11130	-12412

Fortsätter på nästa sida.

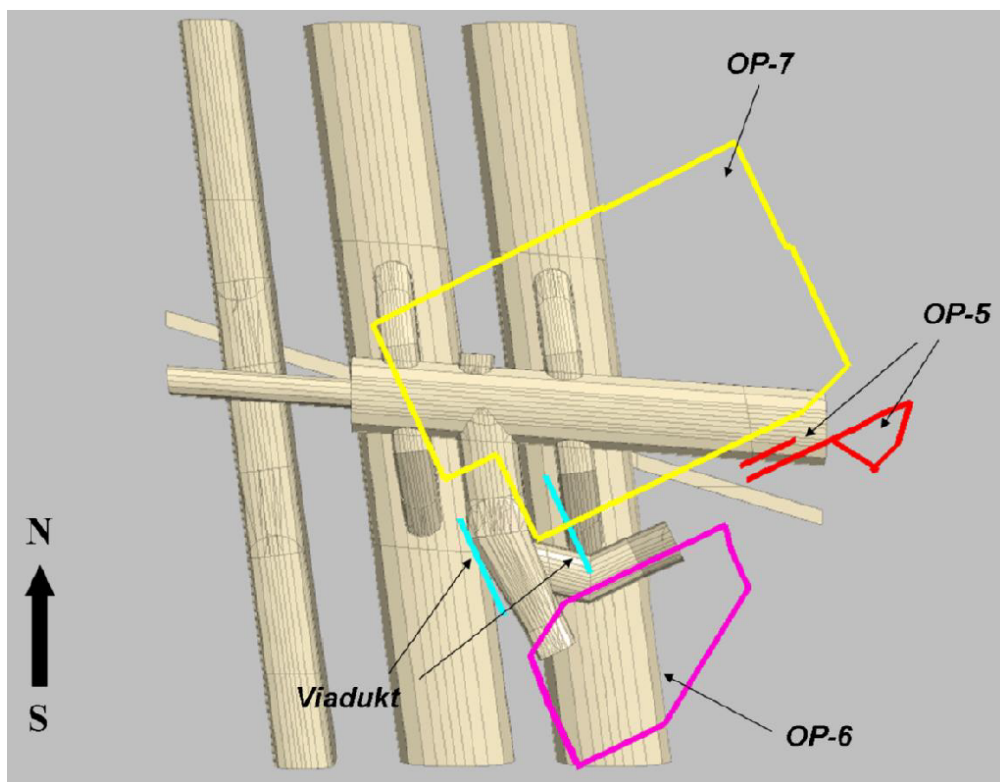
Tabell 4: Fortsättning från förra sidan.

Plint	Befintlig last [kN]	Projekterad last [kN]	Plint	Befintlig last [kN]	Projekterad last [kN]
P ₅	-6487	-11037	P ₄₇	-10776	-12057
P ₆	-6576	-11126	P ₄₈	-10776	-12057
P ₇	-6426	-10976	P ₄₉	-11017	-12298
P ₈	-9317	-13867	P ₅₀	-11017	-12298
P ₉	-12113	-14813	P ₅₁	-10776	-12057
P ₁₀	-13748	-15132	P ₅₂	-11465	-12746
P ₁₁	-13926	-15325	P ₅₃	-11465	-12746
P ₁₂	-12807	-14276	P ₅₄	-11465	-12746
P ₁₃	-14247	-16202	P ₅₅	-10700	-10700
P ₁₄	-14385	-17495	P ₅₆	-9479	-9479
P ₁₅	-11440	-16122	P ₅₇	-11848	-11848
P ₁₆	-11523	-16205	P ₅₈	-12847	-12847
P ₁₇	-11088	-15405	P ₅₉	-12847	-12847
P ₁₈	-11466	-16098	P ₆₀	-12847	-12847
P ₁₉	-14798	-19430	P ₆₁	-12847	-12847
P ₂₀	-18986	-22096	P ₆₂	-11455	-11455
P ₂₁	-19162	-21239	P ₆₃	-9334	-9334
P ₂₂	-19339	-21431	P ₆₄	-11558	-11558
P ₂₃	-13207	-14719	P ₆₅	-12531	-12531
P ₂₄	-14419	-16393	P ₆₆	-12531	-12531
P ₂₅	-14419	-16393	P ₆₇	-12531	-12531
P ₂₆	-13444	-14982	P ₆₈	-12531	-12531
P ₂₇	-13444	-14982	P ₆₉	-9499	-9499
P ₂₈	-14419	-16393	P ₇₀	-8300	-8300
P ₂₉	-14419	-16393	Q ₁	-10700	-10700
P ₃₀	-16173	-18147	Q ₂	-17300	-17300
P ₃₁	-17179	-19154	Q ₃	-17300	-17300
P ₃₂	-17179	-19154	Q ₄	-10700	-10700
P ₃₃	-17179	-19154	Q ₅	-8300	-8300
P ₃₄	-13304	-14826	Q ₆	-10700	-10700
P ₃₅	-13444	-14982	V ₁	-930 [kN/m]	-1080 [kN/m]

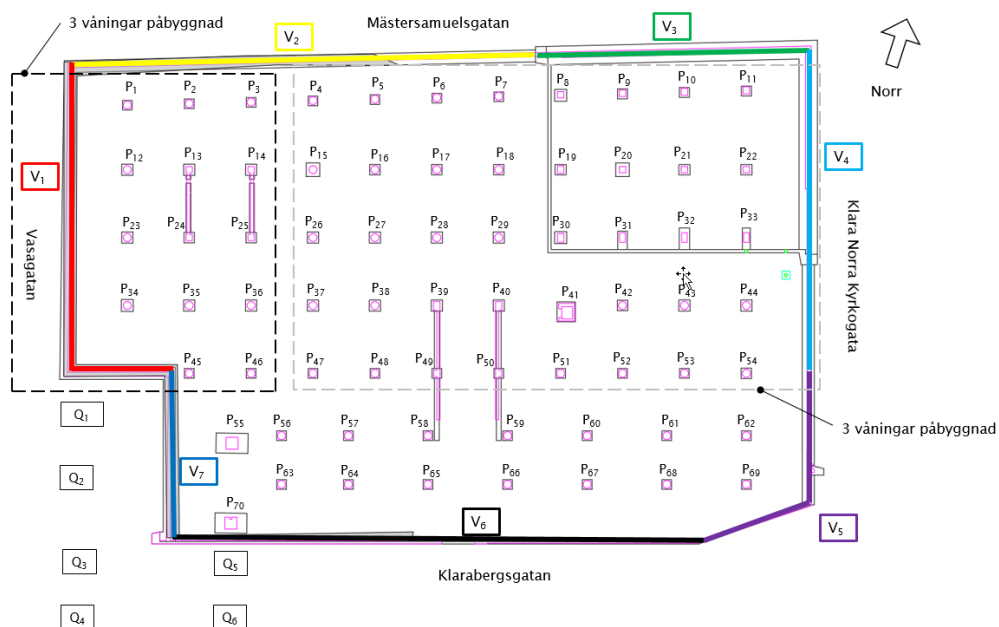
Fortsätter på nästa sida.

Tabell 4: *Fortsättning från förra sidan.*

Plint	Befintlig last [kN]	Projekterad last [kN]	Plint	Befintlig last [kN]	Projekterad last [kN]
P ₃₆	-13444	-14982	V ₂	-460 [kN/m]	-460 [kN/m]
P ₃₇	-13444	-14982	V ₃	-620 [kN/m]	-620 [kN/m]
P ₃₈	-13444	-14982	V ₄	-1130 [kN/m]	-1280 [kN/m]
P ₃₉	-13685	-15223	V ₅	-780 [kN/m]	-780 [kN/m]
P ₄₀	-13685	-15223	V ₆	-940 [kN/m]	-940 [kN/m]
P ₄₁	-14049	-15715	V ₇	-350 [kN/m]	-350 [kN/m]
P ₄₂	-13203	-14741			



Figur 7: Principskiss, befintliga byggnader ovanför Citybanan, Ref. 3.



Figur 8: Principskiss, Tyréns förteckning över grundläggningsplintar i FEA.

4 Resultat

4.1 Allmänt

I detta kapitel redovisas resultat från analyserna. Då den numeriska modellen har ett material med kontinuumegenskaper visar den inte på instabilitet hos enskilda block längs tunnelkonturernas ränder. Förekomsten av stora dragavlastade partier längs tunnelränder kan dock ge indikationer om risk för blockutfall.

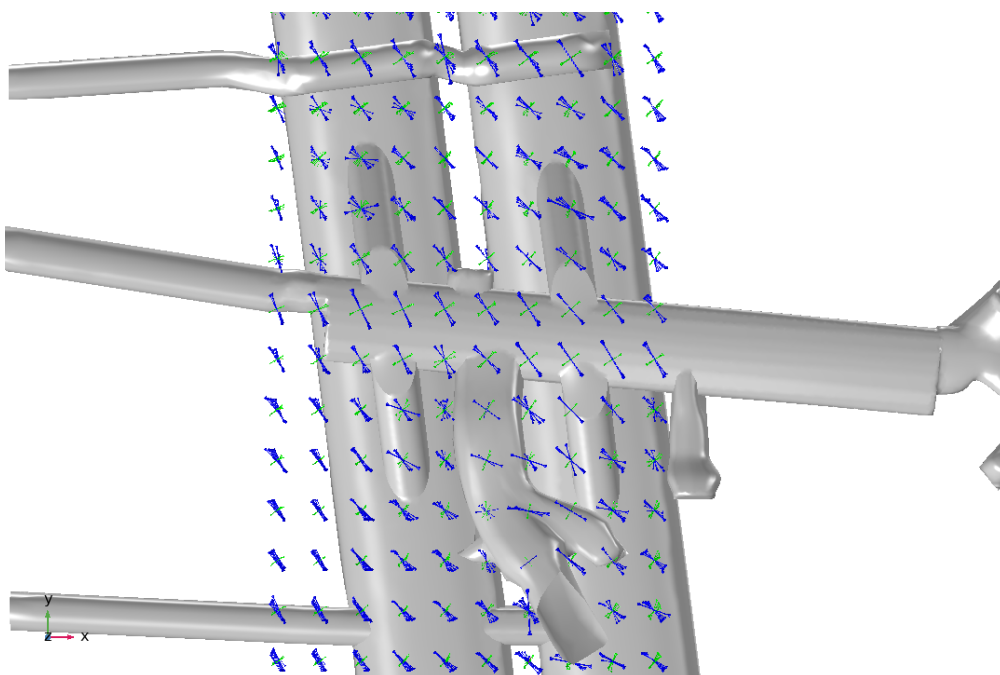
Mellan hjässan på det centrala mellanplanet och grundläggningen för Orgelpipan 7 finns en svaghetszon som benämns rörelsezon 2 (RZ2, se kapitel 2.3). Denna zon integrerades i Tyréns tidigare utredning (2018), där den approximerades som ett vertikalt stupande plan orienterat enligt Figur 15. Resultaten från analyserna har utvärderats utifrån pålastningens inverkan på berganläggningarnas valvspänningar, samt deformationerna kring det centrala mellanplanet.

4.2 Utvärdering av stabilitet kring det centrala mellanplanet

I detta kapitel har bergmassans stabilitet kring det centrala mellanplanet utvärderats vid ökad pålastning från Orgelpipan 7.

4.2.1 Huvudspänningar kring det centrala mellanplanet

I Figur 9 visas valvspänningarna över det centrala mellanplanet som en vektorplott och de sammanfaller i stort med riktningen hos den största horisontalspänningen. Spänningsbilden har en gynnsam inverkan på valvbildningen ovanför det centrala mellanplanet.



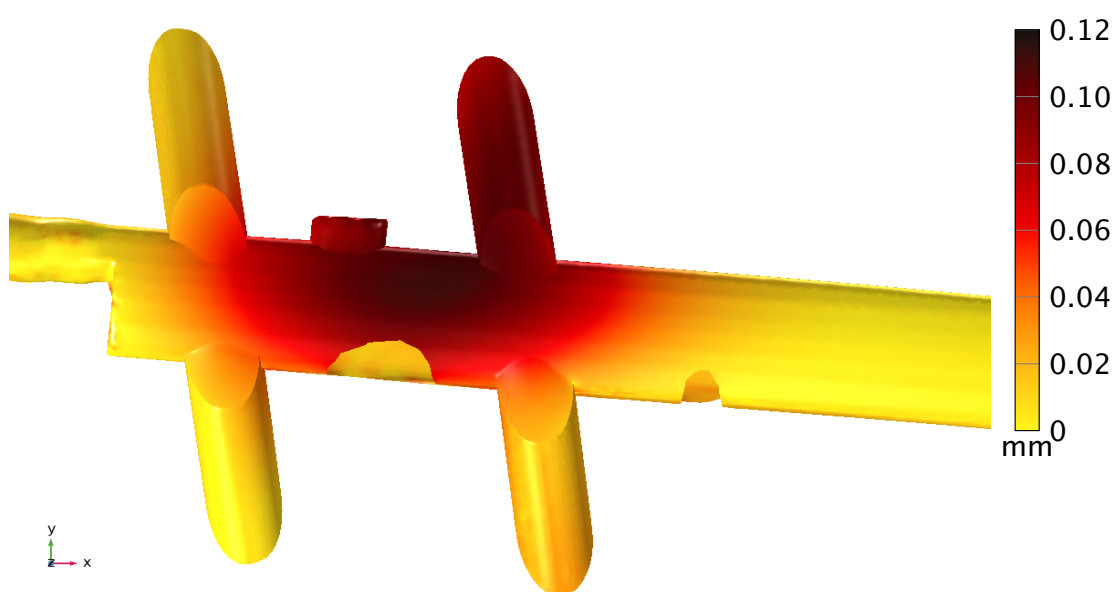
Figur 9: Vy från ovan. Pilarna anger riktningen på huvudspänningarna. Blå pilar visar den tredje huvudspänningen, gröna pila andra huvudspänningen. Den första huvudspänningen är vertikal-lasten, som är så låg att den inte går att se i denna figur.

4.2.2 Deformationer i centrala mellanplanet

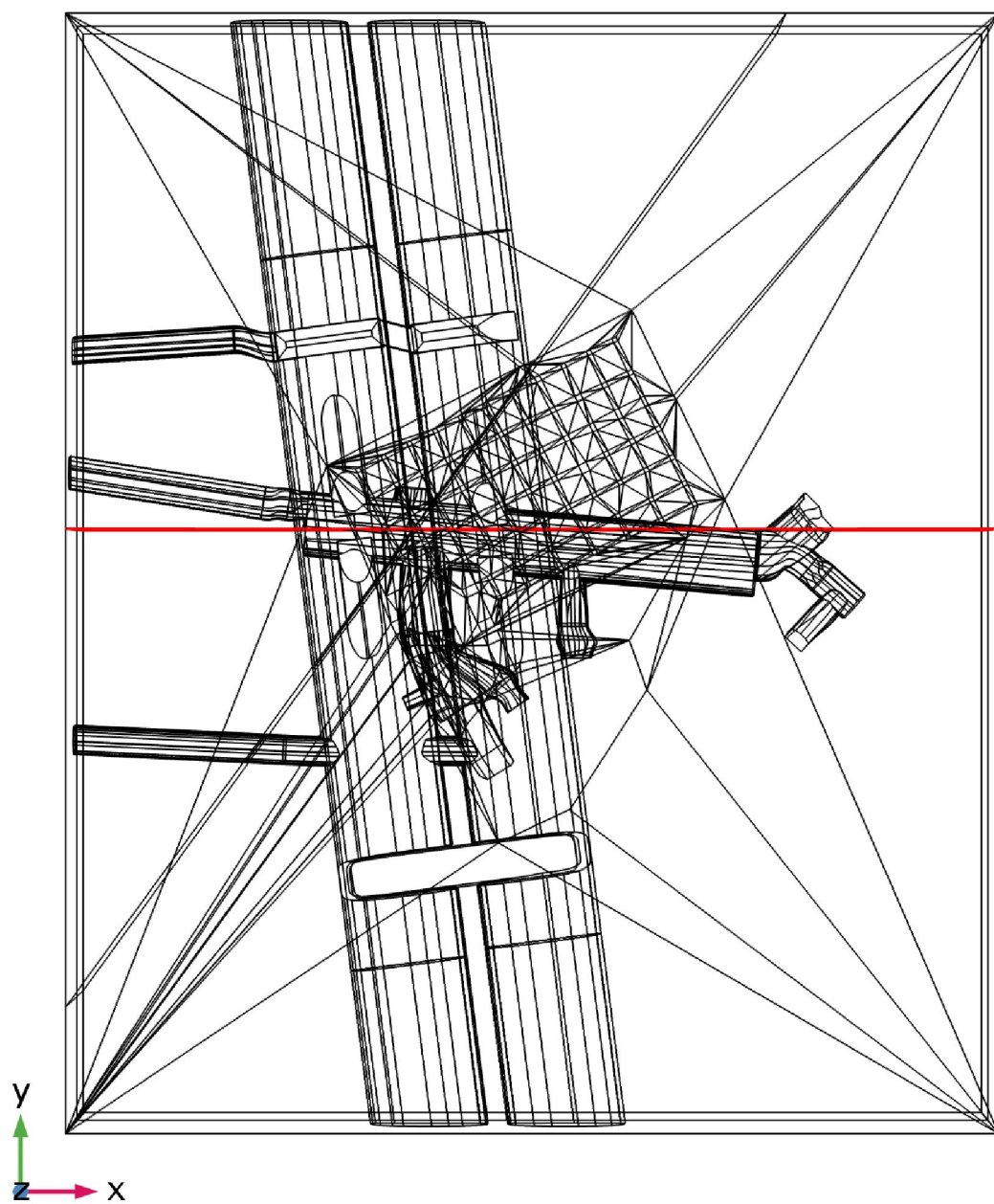
Deformationen efter lastökning visas i Figur 10. Figuren visar tillkommande rörelse i konturen för det centrala mellanplanet och tillhörande rulltrappsschakt med förstärkning. Rörelsen uppgår som mest till en tiondels millimeter och är nedåtriktad.

Resultatet är rimligt sett till den begränsade bergtäckningen i kombination med lastökningen från det projekterade trevåningskomplexet. Lasten från varje plint sprids "koniskt" ner i bergmassan med ökat djup och det är därför det inte syns några punktförskjutningar i plotten. Resultatet visar på mycket små förskjutningar.

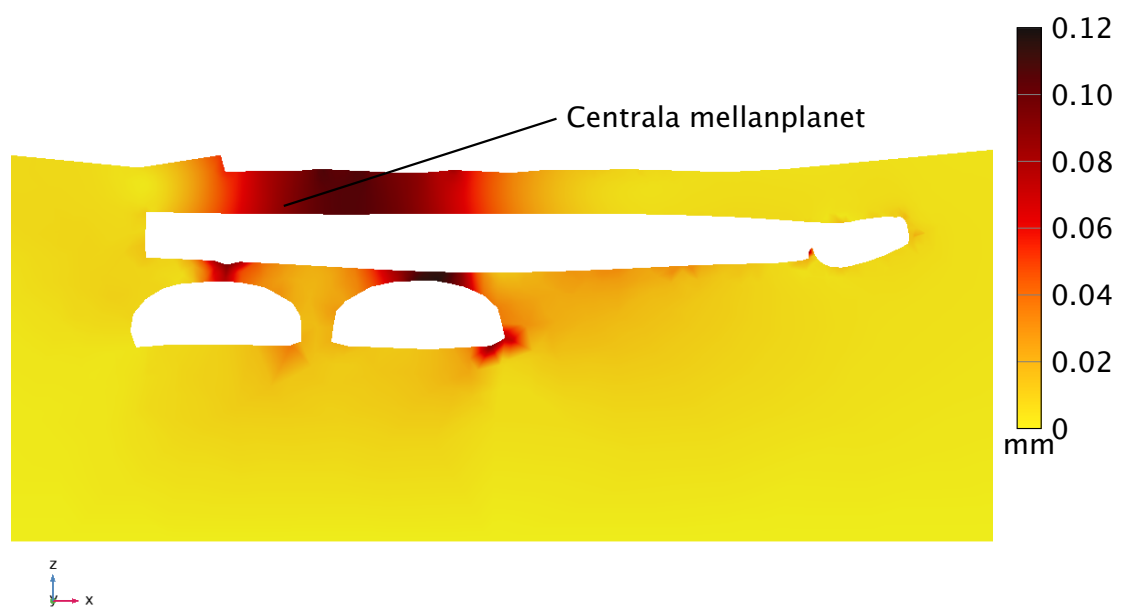
För att ytterligare åskådliggöra deformationerna i hjässan av det centrala mellanplanet har ett snitt parallellt med den globala x-axeln analyserats, se Figur 11. Det är de tillkommande totaldeformationerna efter pålastning som visas i Figur 12. Resultatet visar på en tillkommande totaldeformation på mindre än 1 mm i centrala mellanplanets hjässa och deformationerna är huvudsakligen vertikala.



Figur 10: Tillkommande deformationer kring centrala mellanplanets hjässa efter påbyggnad [mm]. Vy från ovan.



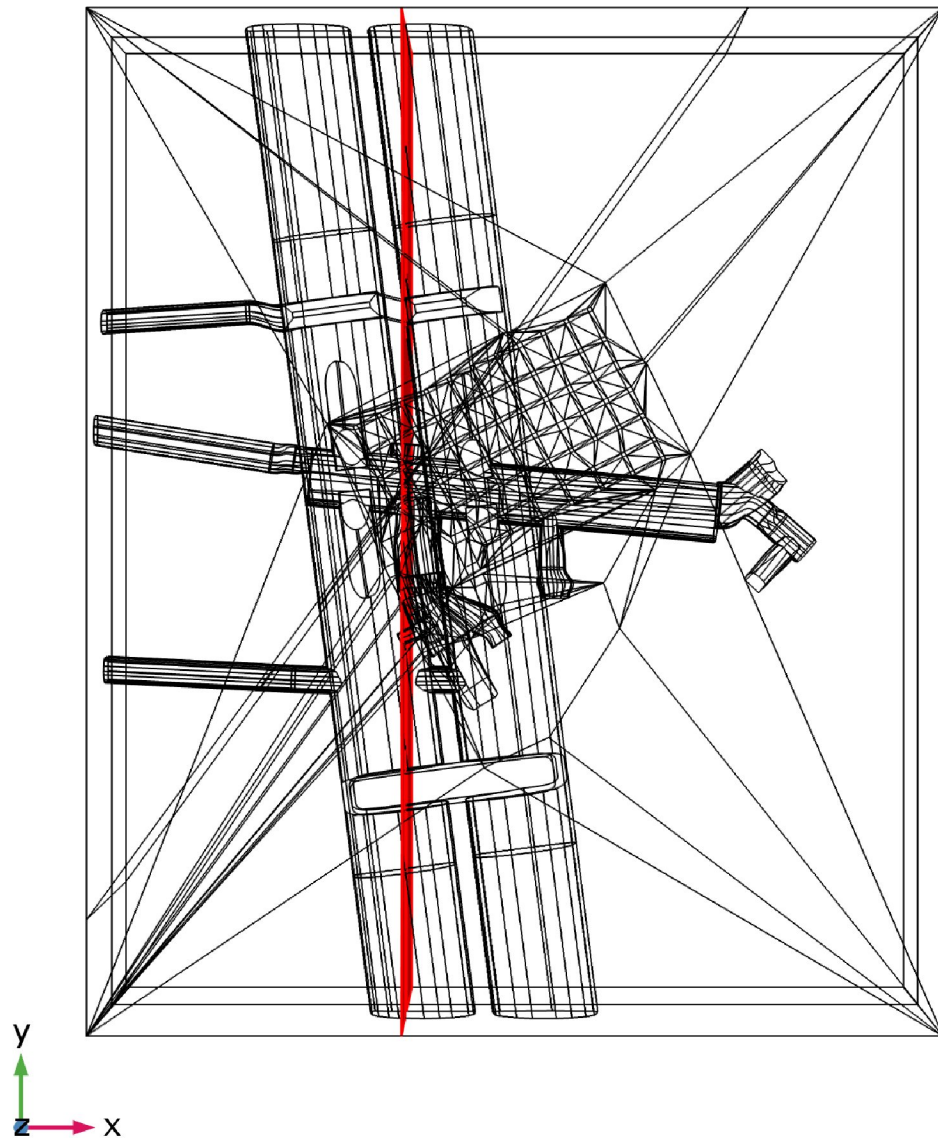
Figur 11: Vy från ovan. Figuren visar ett snittplan, se röd linje, parallellt med det globala xz-planet som skär det centrala mellanplanets hjässa.



Figur 12: Tillkommande deformationer kring centrala mellanplanets hjässa efter påbyggnad, i sektion [mm].

4.2.3 Tryckspänningsförändringar kring det centrala mellanplanet

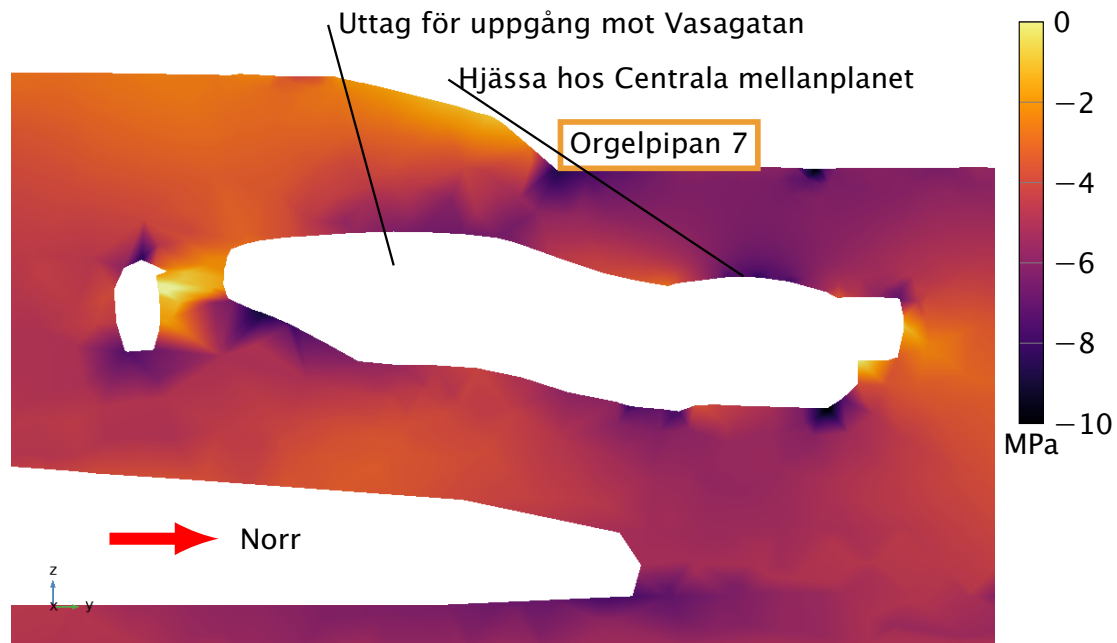
För att undersöka inverkan på bergmassan av den ökade pålastningen har spännings-tillskottet för de första huvudspänningarna plottats för ett snittplan enligt Figur 13. Snittplanet är parallellt med det globala yz-planet och skär det centrala mellanplanet i hjässan.



Figur 13: Vy från ovan. Figuren visar ett snittplan parallellt med det globala yz-planet som skär det centrala mellanplanets hjässa.

De första huvudspänningarna är de största tryckspänningarna och utgör ett viktigt bidrag till valvbildningen ovanför en undermarksanläggning. Resultatet i Figur 14 visar att det sker en avlastning kring det centrala mellanplanets hjässa och sula då grund-

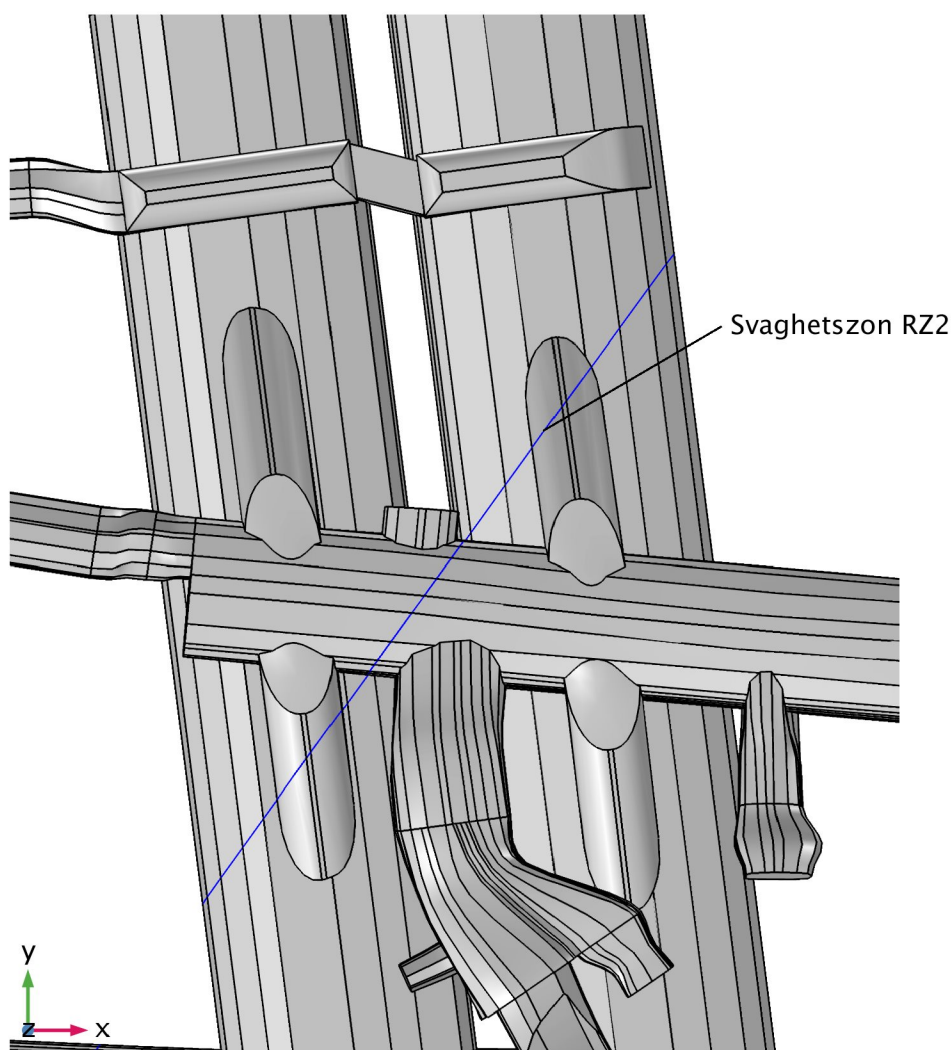
läggningslasterna ökar. Det ska förtydligas att även om det sker en avlastning för σ_3 då pelarlasterna appliceras så är bergmassan fortfarande inspänd, dvs. har tryckspänningar. Vid bergöverytan ovanför det centrala mellanplanet appliceras plintlasterna varför tryckspänningarna ökar.



Figur 14: Snittplan genom det centrala mellanplanet. Första huvudspänning σ_1 vid pålastning om tre våningar [Pa]. Negativa värden innebär ökade tryckspänningar.

4.3 Utvärdering av rörelsezon RZ2

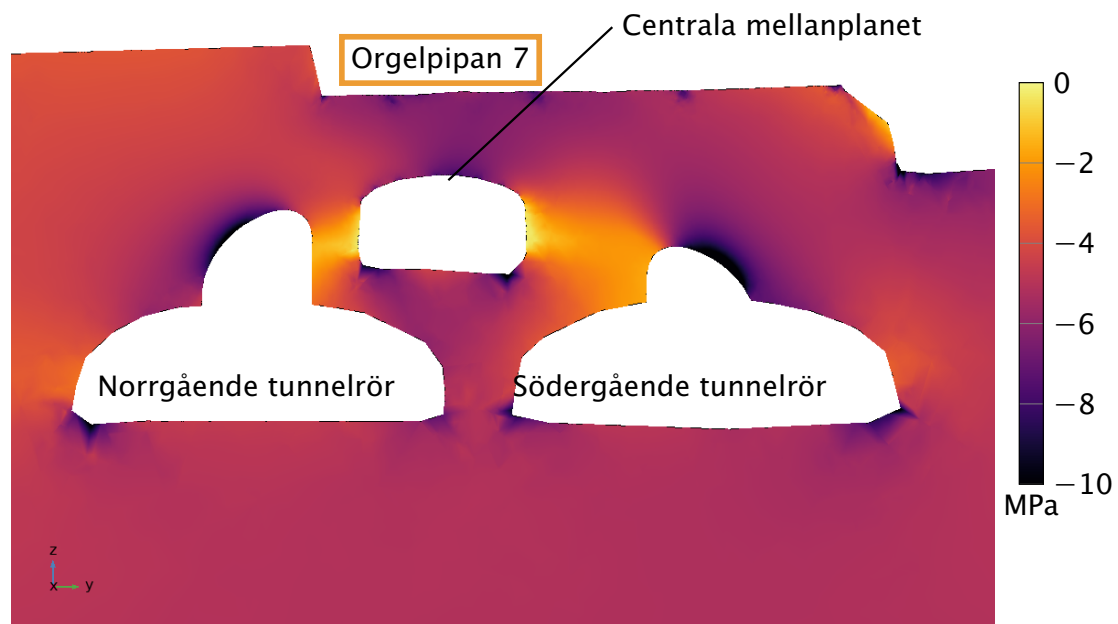
Mellan hjässan på det centrala mellanplanet och grundläggningen för Orgelpipan 7 finns en svaghetszon som benämns rörelsezon 2 (RZ2). För mer information se Ref. 6. Denna zon är inte explicit modellerad med avseende på materialegenskaper, men har nyttjats i modellerandet som snittplan för utvärdering av spänningar. Detta då zonen skär rulltrappschaktet i ett kritiskt snitt. Den första huvudspänningen genom RZ2 visas i Figur 16.



Figur 15: Vy från ovan. Figuren visar rörelsezon RZ2 som skär det centrala mellanplanet.

4.3.1 Tryckspänningsförändringar kring RZ2

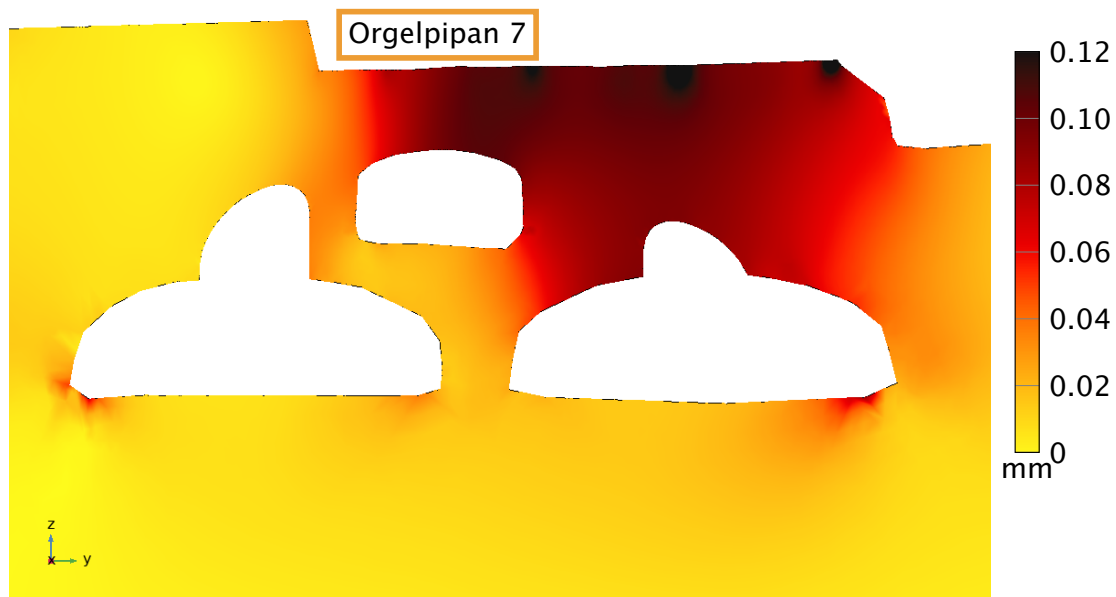
I Figur 16 har tryckspänningsförändringarna i RZ2 plottats för σ_1 . Figuren visar tydligt på den komplexa geometrin med de relativt stora spännvidderna och hur lasten förs ner i befintliga bergpelare. σ_1 är den största tryckspänningen och resultatet visar att σ_1 ökar i väggarna kring det centrala mellanplanet. I hjässan och sulan sker en avlastning.



Figur 16: Snittplan genom RZ2. Första huvudspänning σ_1 i RZ2 vid pålastning om tre våningar [MPa]. Spänningarna från byggnaden är enbart synliga precis under fundamenten. I övrigt är de försumbara i förhållande till de övriga spänningarna i bergmassan.

4.3.2 Tillkommande deformation i rörelsezon RZ2

Den tillkommande deformationen i planet som representerar RZ2 är under 1 mm och visas i Figur 17.



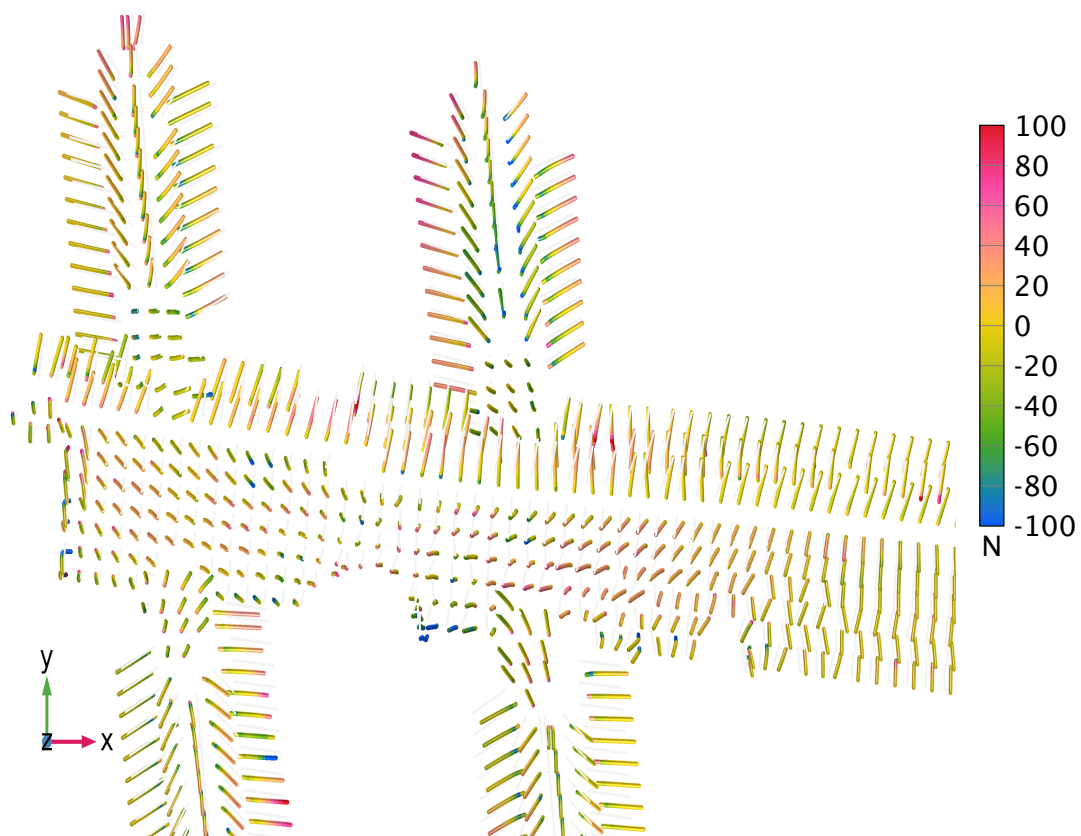
Figur 17: Snittplan genom RZ2. Total deformation i RZ2 vid pålastning om tre våningar [m].

4.3.3 Laständringar i bultarna

I beräkningen har förstärkning från bultarna betraktas som 1D-balkelement. Bultarna är 5 m långa och placerade i tunneltaket med 2 meters bultavstånd, de är orienterade vinkelrätt mot tunneltakets ytor. Bultarnas diameter är 25 mm och totalt finns det cirka 1300 bultar som är utspridda över hela centrala mellanplanet. Figur 18 visar hur kraften längs bultarna ändras av den ändrade överlasten. De flesta bultarna dragpåverkas i änden närmast plintarna och komprimeras i änden mot tunnelväggen, där valvet motverkar överlasten. Maximal kraftändring i bultarna är cirka 100 N, vilket är helt försumbart i sammanhanget.

4.3.4 Laständringar i sprutbetongen

Då deformationen i bergmassan är väldigt liten och så jämt fördelad i området är de beräknade spännings- och deformationsförändringarna i sprutbetongen i praktiken obefintliga.



Figur 18: Förändring i belastning i bultarna kring centrala mellanplanet [N]. Positiv ökning motsvarar en ökning av dragbelastningen, negativ en minskning av dragbelastningen. Förändringarna är mycket små.

5 Diskussion

Tyréns har studerat en ökad pålastning för grundläggningen under Orgelpipan 7 kring rulltrappsschaktet, där det också är karterat en rörelsezon. Resultaten visar på tilltagande skjuvspänningar i området efter ökad pålastning men spänningsökningen är liten och bedöms inte vara kritisk för bergmassans bärighet. De beräknade deformationerna från tillskottsspänningarna är också små.

Den totala tilltagande deformationen efter pålastning om tre våningar orsakar mycket små deformationer i konturen kring centrala mellanplanet. Analysen visar att det sker lastförändringar på förväntat sätt i de områden som ligger närmast de grundläggningspunkter med störst lastökning. Förändringarna är dock genomgående så små att de bedöms sakna betydelse för befintlig förstärknings dimensionering.

Underlag från projekt Citybanan har inhämtats och beaktats i modellarbetet under projektets gång. Det har kommit till Tyréns kännedom att det vid bergschakt för centrala mellanplanet uppstod omfattande sprickbildning i förstärkningen i östra plattformsrummet. Enligt det underlag som Tyréns tagit del av är sprickbildningens orsaker inte helt klarlagda, men kompletterande förstärkning är utförd i östra plattformsrummet så anläggningen är att betrakta som väl förstärkt. Uppkomsten tyder dock på att någon av de projekteringsförutsättningar som antagits vid projekt Citybanan kan vara annorlunda än förväntat. En avvikelse skulle emellertid behöva vara mycket påtaglig för att kunna påverka giltigheten i modelleringsresultatet för detta projekt.

Bärförmågan i bergmassan kring det centrala mellanplanet bygger på att bergmassan är självbärande och att bärförmågan, som skapas av inspänningarna i bergmassan, har hög kapacitet. Modelleringsresultatet visar att bärförmågan hos berget är avsevärt större än den pålastning som tre tillkommande våningsplan orsakar. Skulle spänningstillståndet vara sådant att denna slutsats inte håller borde detta ha visat sig i form av stora rörelser i Orgelpipans grundläggning i samband med bygget av Citybanan. Tyréns har inte fått tillgång till mätresultat från det övervakningsprogram som fanns under byggtiden, men har heller inte fått indikationer på att mätningarna skulle ha registrerat anmärkningsvärda rörelser. Om mätresultatet blir tillgängligt i senare skede är det angeläget att utvärdera detta tillsammans med de observationer som gjorts i östra plattformsrummet, såväl som kommande lastsituation för Orgelpipan 7.

Vid modellering uppstår alltid frågan om vilka osäkerheter modellresultatet har. Det finns avvikelser i bergschaktgeometrin som inte återspeglas i modellgeometrin, och materialegenskaperna varierar lokalt i bergmassan. Det principiella mekaniska systemet som deformeras i beräkningen är centrala mellanplanets tak. Den deformationen kan ses som deformation av en platta som är fast inspänd i sina ränder. Deformationen av en sådan styrs primärt av spännvidden som förekommer i kvadrat i motsvarande analytiska uttryck. Med de mått som råder i detta fall kan en avvikelse på 10 %, motsvarande en meter i överberg, ge cirka 20 % tillkommande deformation. Med tanke på att den största beräknade deformationen är en tiondels millimeter så är slutsatsen opåverkad av en sådan ökning.

En känslighetsstudie har dessutom utförts rörande bergtäckningen mellan Citybanan och Orgelpipan 7. Denna gjordes genom att bergytan i modellen sänktes med 1 meter, vilket minskar bergtäckningen med samma mått. Den minskningen hade ingen signifikant inverkan på resultatet.

6 Sammanfattning

Påbyggnad av tre våningsplan på Orgelpipan 7 ger störst lastpåkänning i fastigheten norra del mot Mäster Samuelsgatan, vilket ovanför ligger Citybanans spårtunnlar och tillhörande rulltrappsschakt. Den numeriska bergmekaniska modellen av lastsituationen påvisar att uppkomna förändringar i bergmassans spänningstillstånd är små och tillskottsdeformationen är som mest omkring 0,12 mm. Modellen visar även att belastningsförändringarna i befintlig förstärkning är mycket små.

Med underlag av utförd bergmekanisk analys av bergmassans bärighet under Orgelpipan 7, anses bärigheten oförändrad efter pålastning och genomförbarheten för den planerade påbyggnaden är därför god. Med avseende på eventuella försvars- och förstärkningsåtgärder, såväl som kontrollprogram för Citybanan bör tidigare upprättade avtal åberopas. Det är Tyréns bedömning att lastförändringarna är så små att några försvarsåtgärder inte är nödvändiga. Detta behöver verifieras i byggskedet med ett kontrollprogram som måste utformas i samråd med anläggningsägarens driftsavdelning.

Chunling Shan
Geofysiker

Sylvia Berg
Geolog

Rikard Gothäll
Bergmekaniker

Tyréns AB
118 86 Stockholm
Besök:
Peter Myndes Backe 16
118 86 Stockholm

Tel: 010 452 20 00
www.tyrens.se

Säte: Stockholm
Org.Nr: 556194-7986