

UTVÄRDERING OCH TOLKNING AV INITIALA BERGSPÄNNINGAR FÖR STOCKHOLM OCH GÖTEBORG

Catrin Edelbro

Fredrik Perman

Bruno Figueiredo

Jonny Sjöberg

UTVÄRDERING OCH TOLKNING AV INITIALA BERGSPÄNNINGAR FÖR STOCKHOLM OCH GÖTEBORG

Evaluation and interpretation of initial rock stresses for Stockholm and Gothenburg

Catrin Edelbro, Itasca Consultants AB

Fredrik Perman, Itasca Consultants AB

Bruno Figueiredo, Itasca Consultants AB

Jonny Sjöberg, Itasca Consultants AB

FÖRORD

Framgångsrikt berg- och undermarksbyggande kräver relevanta och tillförlitliga undersökningar och bedömningar av bergförhållanden. Eftersom det initiala bergspänningsfältet påverkar spänningsfördelningen runt undermarkskonstruktioner, är det en viktig parameter vid dimensionering.

Resultaten från denna sammanställning av mätdata i Stockholm och Göteborg har visat på stor spridning av mätdata för Stockholm och en något mindre spridning för Göteborg. Med hänsyn till den stora spridningen av mätdata ska framtagna spänningssamband för domänen centrala Stockholm och för domänen Göteborg ska användas med eftertanke för framtida undermarksprojekt. I huvudsak, enligt rekommendationerna, ska framtagna spänningssamband användas i tidigt skede, innan mätning utförs och som underlag för en känslighetsstudie.

Projektet bemannas av Jonny Sjöberg projektledare, Fredrik Perman, Catrin Edelbro, Bruno Figueiredo och Jessa Vatcher, alla från Itasca Consultants AB. I projektets referensgrupp har Axel Bolin (Trafikverket), Christin Döse (Ramboll), Märit Berglind Eriksson (Sweco), Fredrik Johansson (KTH), Jimmy Töyrä (LKAB), Karina Skrobic (WSP), Johan Berglund (SGI) och Per Tengborg, (BeFo) ingått.

Resultaten från denna studie kommer att komma branschen till stor nytta vid bland annat designarbeten inom Stockholm och Göteborg. Projektet har samfinansierats av BeFo och Itasca Consultants AB.

Stockholm, 2022

Patrik Vidstrand

SAMMANFATTNING

Med kännedom om de spänningar som råder i berget innan utbrytning sker kan stabilitetsberäkningar utföras i syfte att optimera layout och eventuella förstärkningsåtgärder för underjordskonstruktionen. Däremot är mätningar av bergspänningar både tekniskt komplicerade och relativt kostnadskrävande vilket bidrar till att tidigare utförda mätningar och spänningsdata är värdefulla och viktiga att sammanställa. Tidigare sammanställningar av bergspänningsdata för Stockholm och Göteborg har i detta arbete uppdaterats med tillkommande spänningsmätningar.

Tillförlitligheten av mätdata har bedömts genom framtagna och anpassade rankningskriterier. För de bergspänningsmätningar som utförts i Stockholm och Göteborg fanns det för de flesta mätningar inte tillräcklig dokumentation för att kunna ranka tillförlitligheten. Det i sig betyder inte att mätningarna är "dåliga" eller inte tillförlitliga utan mer att tillgänglig information inte uppfyller de krav på dokumentation som ställs i kriterierna vid rankning. För framtida bergspänningsmätningar har rekommendationer för dokumentation föreslagits.

Spridning av spänningsdata har analyserats statistiskt med tensormetoden som kräver ett underlag på minst sju spänningsmätningar inom ett begränsat djupintervall. Geologi i form av storskaliga strukturer och deformationszoner har nyttjats för att gruppera mätdata. Baserat på den statistiska analysen anses effektiv varians vara en lämplig parameter för att visa spridning av mätdata, vilken kan nyttjas för att jämföra mellan mätplatser och/eller mätnivåer.

Spänningssamband har tagits fram genom inverslösning för en grupp av mätdata, vilket ger en spänningsprofil med djupberoende. Utvärdering, tolkning och framtagande av spänningsdomäner och spänningssamband har skett genom att sammanställa resultaten från geologi och gruppering av mätdata, statistisk analys och spänningssamband med djup.

Spänningsdomäner och spänningssamband har tagits fram för de centrala delarna i Stockholm respektive för Göteborg. För de framtagna spänningssambanden ska varje komponent tolkas för sig (även riktning), där varje komponent kan vara mellan låg och hög, men inte är direkt kopplade till de andra komponenterna, samtidigt kan inte minsta horisontalspänning vara högre än största horisontalspänning.

Mätning av bergspänningar rekommenderas som utgångspunkt vid dimensionering av undermarkskonstruktioner i berg. Mätning ska alltid utföras för bergkonstruktioner med bedömd hög risk och allvarlig konsekvens. I tidigt skede, och innan mätning utförs, bör en känslighetsstudie genomföras. Om det inte är praktiskt möjligt att utföra mätningar (med befintliga metoder, alternativt p.g.a. yttre restriktioner), kan befintlig sammanställd data användas men med beaktande av topografi, jorddjup, svaghetszoner, storskaliga strukturer och skillnader i bergmassans hållfasthet vid val av spänningssamband.

Nyckelord: Bergspänning, rankning, statistisk analys, djupberoende

SUMMARY

The initial stress state is an important parameter for design of underground openings, including optimisation of layout and rock reinforcement. However, rock stress measurements are technically complex and relatively costly, which means that previously performed measurements and compiled stress data are important. In this work, previous compilation of rock stress data for Stockholm and Gothenburg has been updated with new stress data and new interpretations.

The reliability of rock stress data was ranked through developed ranking criteria. For most of the performed stress measurements in Stockholm and Gothenburg there was not enough documentation to be able to rank the data reliability. This does not, however, imply that the performed measurements are poor and not trustworthy, but rather that the available information do not meet the requirements of documentation as stated in the ranking criteria. Recommendations for relevant documentation were proposed for future rock stress measurement.

The variability of stress data was analysed statistically using a tensor method, which requires input from seven successful measurements within a limited depth range. Large-scale structures and deformation zones have been used to group stress data. Based on the statistical analysis the effective variance was shown to be a relevant parameter to visualise the variability in stress data, and which can be used to compare measurement sites or/and levels.

Stress profiles were developed based on inverse solutions for groups of stress measurement data. The evaluation, interpretation, and development of stress domains and stress profiles was based on compiled information of geology and the grouping of measurement data, statistical analysis, and the depth-dependent stress profiles.

Stress domains and stress profiles were developed for the central parts of the Stockholm and Gothenburg areas. Each stress component (including bearing of horizontal stress) of the developed stress profile should be individually interpreted; each component can vary between the provided low and high limits, but is not directly linked to the other components. At the same time, the minimum horizontal stress cannot exceed the major horizontal stress.

Rock stress measurements is recommended to be performed during design of underground rock constructions. Measurements should always be performed for rock excavations with a judged high risk and potentially severe consequences. In the early design phase, and before measurements have been performed, a sensitivity study should be performed. If it is not practically possible to perform measurements (due to measurement limitations or external restrictions), the presented stress profiles in this work can be used but with considerations of local topography, soil depth, weakness zones, large-scale structures, and differences in the rock mass strength.

Keywords: Rock stress, ranking, statistical analysis, depth dependency

INNEHÅLL

1.	INTRODUKTION.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte och mål	1
1.3	Metodbeskrivning och avgränsningar.....	2
1.4	Rapportutformning.....	2
2.	REGIONALA SPÄNNINGSDATA OCH TIDIGARE STUDIER.....	3
2.1	Regionala spänningsdata.....	3
2.2	Tidigare studier Stockholm.....	5
2.3	Tidigare studier Göteborg.....	7
3.	MÄTDATA	9
3.1	Mätmetoder.....	9
3.1.1	Överbörning	9
3.1.2	Hydrauliska metoder.....	10
3.1.3	LVDT	11
3.2	Mätplatser Stockholm.....	12
3.2.1	Huvudsta T-banestation.....	14
3.2.2	Kungliga Biblioteket	15
3.2.3	SOS Räddningscentral.....	15
3.2.4	Södra Länken.....	15
3.2.5	Norra Länken.....	16
3.2.6	Österleden.....	16
3.2.7	Arlandabanan.....	17
3.2.8	Björkö Energiprojekt.....	17
3.2.9	Citybanan.....	17
3.2.10	Förbifart Stockholm.....	18
3.2.11	Henriksdals Reningsverk.....	18
3.2.12	Nya tunnelbanan	19
3.3	Mätplatser Göteborg.....	19
3.3.1	Ramberget.....	20
3.3.2	Röda Sten Rock Laboratory (RSRL).....	20
3.3.3	Götatunneln	20

3.3.4	Västlänken	21
4.	GEOLOGI, JORDDJUP OCH TOPOGRAFI.....	23
4.1	Stockholm	23
4.2	Göteborg	26
5.	RANKNING AV MÄTDATA	31
5.1	Överborrning.....	31
5.2	Hydrauliska mätningar.....	36
5.3	<i>LVDT</i> -mätningar	38
6.	ANALYS AV MÄTDATA	41
6.1	Kvantifiering av spridning i mätdata	43
6.1.1	Stockholm.....	43
6.1.2	Göteborg	50
6.2	Spänningssamband med djup.....	54
6.2.1	Stockholm.....	55
6.2.2	Göteborg	57
7.	SPÄNNINGSDOMÄNER	59
7.1	Stockholm	59
7.2	Göteborg	62
8.	DISKUSSION	65
9.	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	67
10.	REFERENSER.....	70
	APPENDIX 1: Berggrund och jorddjup.....	75
	APPENDIX 2: Rankning mätdata	83
	Överborrning	83
	Hydraulisk mätning	85
	APPENDIX 3: Gruppering av mätdata	87
	Gruppering av mätdata i Stockholm.....	87
	Gruppering av mätdata i Göteborg	88
	APPENDIX 4: Statistisk analys, tensormetoden.....	91
	Metodik.....	91
	Resultat statistisk analys med tensormetoden för Stockholm	93
	Resultat statistisk analys med tensormetoden för Göteborg.....	108

APPENDIX 5: Spänningssamband med djup	117
Spänningssamband med djup för Stockholm	117
Spänningssamband med djup för Göteborg	125

1. INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

Framgångsrikt berg- och undermarksbyggande kräver relevanta och tillförlitliga undersökningar och bedömningar av bergförhållanden. Eftersom det initiala bergspänningsfältet påverkar spänningsfördelningen runt undermarkskonstruktioner, är det en viktig parameter vid dimensionering. Med kännedom om de spänningar som råder i berget innan utbrytning sker kan stabilitetsberäkningar utföras i syfte att optimera layout och eventuella förstärkningsåtgärder för underjordskonstruktionen. Däremot är mätningar av bergspänningar både tekniskt komplicerade och relativt kostnadskrävande vilket bidrar till att tidigare utförda mätningar och spänningsdata är värdefulla och viktiga att sammanställa.

Tidigare studier och sammanställningar av bergspänningsmätningar finns för Stockholms- och Göteborgsområdet (se t.ex. Perman & Sjöberg, 2007; Wallroth & Palmqvist, 2014) och beskrivs ytterligare i kapitel 2. Tidigare sammanställningar nyttjas flitigt vid projektering av nya anläggningar och infrastrukturprojekt. Det finns också exempel på när dessa studier har använts okritiskt och för ett annat tillämpningsområde än vad som ursprungligen avsetts.

Ytterligare mätningar har gjorts såväl i Stockholm som Göteborg under senare år. Nya metoder för statistisk tolkning och utvärdering av bergspänningar har också utvecklats (se t.ex. Javid & Harrison (2021), Gao & Harrison (2018a), (2018b)). En kompletterad sammanställning och tolkning av alla nu tillgängliga spänningsdata bedöms bidra till en säkrare bedömning av initiala bergspänningar. I denna rapport presenteras en sådan sammanställning och tolkning för Stockholms- respektive Göteborgsområdet.

1.2 Syfte och mål

Projektet syftar till att uppdatera tidigare sammanställningar av bergspänningsdata för Stockholm och Göteborg, med tillkommande spänningsmätningar. Jämfört med tidigare sammanställningar analyseras spänningsdata med mer stringent statistisk analys i detta arbete. Framtagande av spänningsdomäner och spänningssamband för Stockholms- respektive Göteborgsområdet baseras på resultat från statistisk analys tillsammans med geologi, regionala spänningar och tolkning av spänningsvariation med djup. Rekommendationer ges för ett korrekt användande av spänningssambanden och dessas giltighetsområden, samt riktlinjer för när kompletterande mätningar bör göras.

Målet är att öka förståelse och kunskap om rådande bergspänningsförhållanden i Stockholms- och Göteborgsområdet, och hur detta kan tillämpas som underlag för projektering av undermarkskonstruktioner inom branschen.

1.3 Metodbeskrivning och avgränsningar

Metodikerna utgår från en inventering av utförda mätningar i Göteborgsområdet (data fram till 2001 är sammanställda i Wallroth & Palmqvist, 2014) och i Stockholmsområdet (data fram till 2007 är sammanställda i Perman & Sjöberg, 2007). Alla mätdata har sammanställts i en gemensam databas. Tidigare studier av spänningar i Stockholm och Göteborg beskrivs kortfattat tillsammans med information om regional spänningsdata och geologi.

Framtagna rankningskriterier i arbeten för SKB och Posiva har förfinats, anpassats och beskrivits för detta projekt. Tillförlitligheten av mätdata har bedömts genom framtagna kriterier.

Geologi i form av storskaliga strukturer och deformationszoner har sammanställts och nyttjats för att gruppera mätdata. Statistisk analys genom tensormetoden har använts som metodik för att bedöma spridning av mätdata. Spänningssamband har tagits fram genom inverslösning för en grupp av mätdata, vilket ger en spänningsprofil med djupberoende.

Utvärdering och tolkning och framtagande av spänningsdomäner och spänningssamband har skett genom det sammanställda resultaten från geologi och gruppering av mätdata, statistisk analys och spänningssamband med djup.

1.4 Rapportutformning

Tidigare studier av spänningar i Stockholm och Göteborg och tolkning av regional spänningsdata presenteras översiktligt i kapitel 2. I kapitel 3 presenteras mätdata från alla mätningar i Stockholms- och Göteborgsområdet tillsammans med en kort beskrivning om respektive mätmetod. En översiktlig beskrivning av geologi, geologiska strukturer och lineament samt information om jorddjup och topografi presenteras i kapitel 4. Bedömningen av tillförlitlighet och rankning av all mätdata beskrivs i kapitel 5. Beräkningar och analyser för spridning av mätdata samt spänningssamband med djup presenteras i kapitel 6. Därefter görs en sammanfattande tolkning av spänningsdomäner och spänningsprofiler utgående ifrån regionala spänningsdata, strukturgeologiska förhållanden, rankat mätdata och dess spridning, vilket redovisas i kapitel 7. Slutligen presenteras en avslutande diskussion (kapitel 8) samt slutsatser och rekommendationer (kapitel 9). I rapporten används decimalpunkt som decimalseparator.

2. REGIONALA SPÄNNINGSDATA OCH TIDIGARE STUDIER

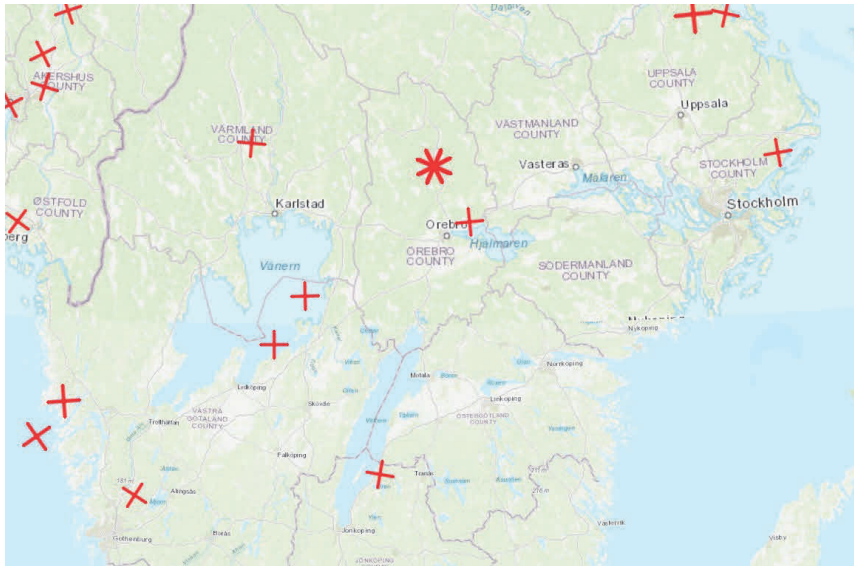
2.1 Regionala spänningsdata

I den Fennoskandiska urbergsskölden är de horisontella spänningarna generellt sett högre än de vertikala (Zhang & Stephansson, 2010). De vertikala spänningarna är generellt lika med tyngden från ovanliggande bergmassor. Den största influensen på förhöjda horisontalspänningar antas komma från platttektoniska krafter (förklarar i t.ex. Perman & Sjöberg, 2007; Söderbäck, 2008; Bäckström & Chang, 2020). För den Fennoskandiska urbergsskölden anses spridningszonen vid den mittatlantiska ryggen ge ett horisontellt Ö-V tryck medan rörelser från alpreionen ger ett N-S tryck. I databasen för "The World Stress Map Project" (WSM) finns en globalt framtagen sammanställning av spänningsdata över hela jorden (Heidbach m.fl., 2016). I den databas som lanserades år 2016 finns cirka 43 000 data från de översta 40 km av jordskorpan sammanställda. Presenterade data baseras på information från fokalplansanalys (spänningar härledda från jordbävningssdata), skador i borrhål (s.k. breakouts) och från direkta mätningar av spänningsfältet. Kvalitet på spänningsdata rankas enligt WSM:s rankingssystem mellan A och E. I Figur 1 visas tillförlitliga spänningsindikatorer enligt WSM, motsvarande spänningsdata med ranking A, B och C. Data från World Stress Map indikerar en riktning på största huvudspänningen 128° baserat på information från fokalplansanalys och en enskild fokalmekanism (nära Veda norr om Stockholm). För Göteborg är riktning på största huvudspänningen 166° baserat på information från fokalplansanalys och en enskild fokalmekanism (nära Sannum norr om Göteborg).

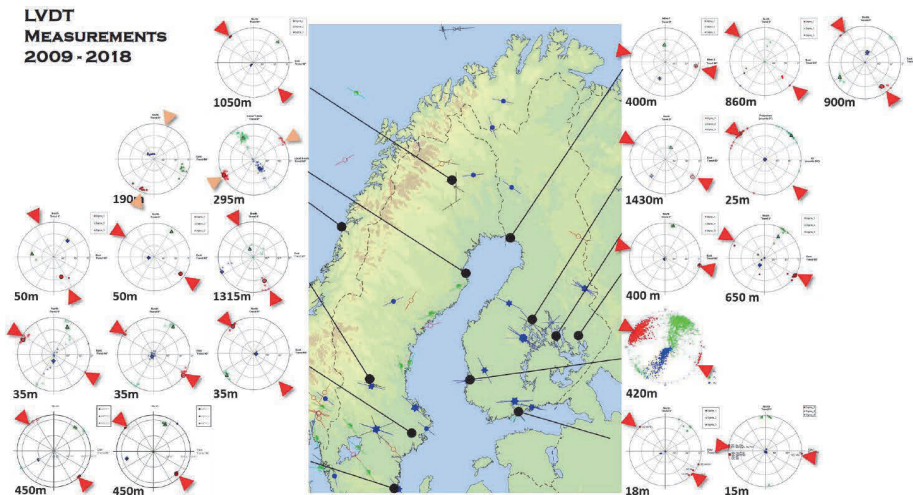
För många regioner är plattrörelserna relativt den stationära manteln en god indikation på orienteringen av den största spänningen. Eftersom den Europeiska plattan rör sig ganska långsamt är rörelsen relativt andra kontinenter, exempelvis Afrika, ofta en bättre indikator på riktningen på största spänningen (Baird, 2005). Den relativa plattrörelsen i Stockholm och Göteborg är ungefär 140° (se t.ex. UNAVCO, 2021). Plattrörelser anses ofta vara en mer tillförlitlig indikation på den regionala spänningsriktningen jämfört med data från fokalplansanalys (Baird, 2005). Baserat på bergspänningsmätningar med LVDT-metoden (se kapitel 3.1.3) i Sverige och Finland finns generellt en god enhetlighet i riktningen för största huvudspänningens orientering och överensstämmelse med den relativa plattrörelsen (Figur 2). Orientering av största horisontella spänningarna i Rönnskär antas ha påverkan av lokal geologi trots att detta inte kunnat påvisas (Hakala & Heine, 2018).

Som beskrivet i Perman & Sjöberg (2007) kan spänningsfältet i regional skala antas vara relativt väl definierat för den Fennoskandiska urbergsskölden. Däremot finns lokala spänningar som avviker från det regionala mönstret. Deformationszoner och förkastningar antas ofta påverka spänningarna men även litografiska variationer, topografiska effekter etc. kan påverka. Eftersom fler faktorer påverkar och förändrar det regionala spänningsfältet nära markytan kan en större spridning förväntas för dessa spänningar. Vid bestämning av spänningsdomäner och samband är det därmed viktigt att studera mätdata

med avseende på spridning, giltighet och representativitet i relation till geologi och strukturgeologiska förhållanden.



Figur 1. Spänningsdata från World Stress Map där de röda symbolerna visar riktning på spänningsdata (Heidbach m.fl., 2016).



Figur 2. Baserat på resultat från LVDT mätningar i Sverige, Norge och Finland visas spännings riktning som polpunkter och största horisontella spännings riktning med röda trianglar (Hakala, 2018).

2.2 Tidigare studier Stockholm

I Perman & Sjöberg (2007) finns spänningsmätningar fram till 2007 sammanställda och analyserade tillsammans med framtagna initialspänningsprofiler, enligt Tabell 1. De framtagna initiala bergspänningarna i Stockholmsområdet var underlag för projektering av Citybanan. I studien hade spänningarna i respektive domän längs Citybanan analyserats separat. Spänningsprofilerna för Södermalm och framför allt för största horisontal-spänningen på större djup ger avsevärt högre värden än motsvarande profiler för Norrmalm. De framtagna spänningsprofilerna gäller endast för ostört homogent berg på tillräckligt avstånd ifrån geologiska strukturer. Det finns dock exempel på när dessa framtagna spänningsprofiler har använts okritiskt och för ett annat tillämpningsområde än vad som ursprungligen avsetts.

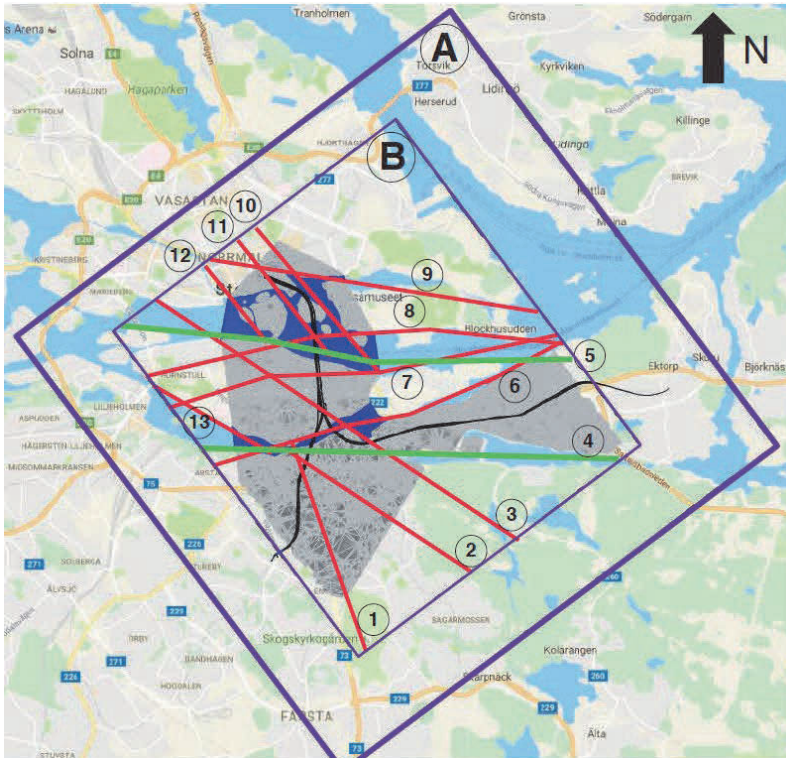
Tabell 1. Framtagna initialspänningsprofiler för Stockholm (Perman & Sjöberg, 2007).

Spännings- domän		Vertikalt djup [m]	σ_H [MPa]	σ_h [MPa]	σ_v [MPa]	Orientering σ_H [°]
Norrmalm & Riddarholmen	Min	0 – 80	$3.0 + 0.075 z$	$0.5 + 0.0275 z$	$0.021 z$	110
	Typ	0 – 80	$4.7 + 0.075 z$	$2.3 + 0.0275 z$	$0.0265 z$ ($\rho g z$)	143
	Max	0 – 80	$5.8 + 0.075 z$	$3.5 + 0.0275 z$	$0.032 z$	170
Södermalm	Min	0 – 80	$2.0 + 0.075 z$	$0.0 + 0.0265 z$	$0.021 z$	90
	Typ	0 – 80	$2.0 + 0.125 z$	$1.0 + 0.100 z$	$0.0265 z$ ($\rho g z$)	110
	Max	0 – 80	$5.8 + 0.125 z$	$2.0 + 0.100 z$	$0.032 z$	160

Vid förprojekteringen av Odenplan hade spänningsmätning med överborrning utförts i ett borrhål (Berg & Sjöberg, 2007). Mätning skedde på två nivåer varav den djupare på ca. 30 meters djup bedömdes som mest tillförlitlig och med en största huvudspänning på ca. 8 MPa. När bergmassan för station Odenplan i Citybanan sprängdes ut uppstod stora deformationer. Station Odenplan användes som en fallstudie (Ghazal m.fl., 2015; Mas Ivars m.fl., 2016) med syfte att dels föreslå en generell metodik för bakåt-analys baserat på uppmätta deformationer och dels att analysera det troliga intervallet för rådande *in situ* spänningar vid Odenplan. I Mas Ivars m.fl. (2016) har fyra spänningsfall studerats varav känslighetsanalysen antyder att *in situ* spänningarna är höga och i intervallet 5.7–7.2 MPa vid djup mellan 0–20 m. Studien visade bland annat på ett fortsatt behov av att utföra känslighetsanalyser och tillbaka-räkning av bergspänningar för utförda projekt i Stockholmsområdet.

Ytterligare studier och spänningsmodellering av storskaliga strukturer i Stockholm har utförts av Lindfors m.fl. (2017). Spänningarnas storlek och riktning kring strukturerna för

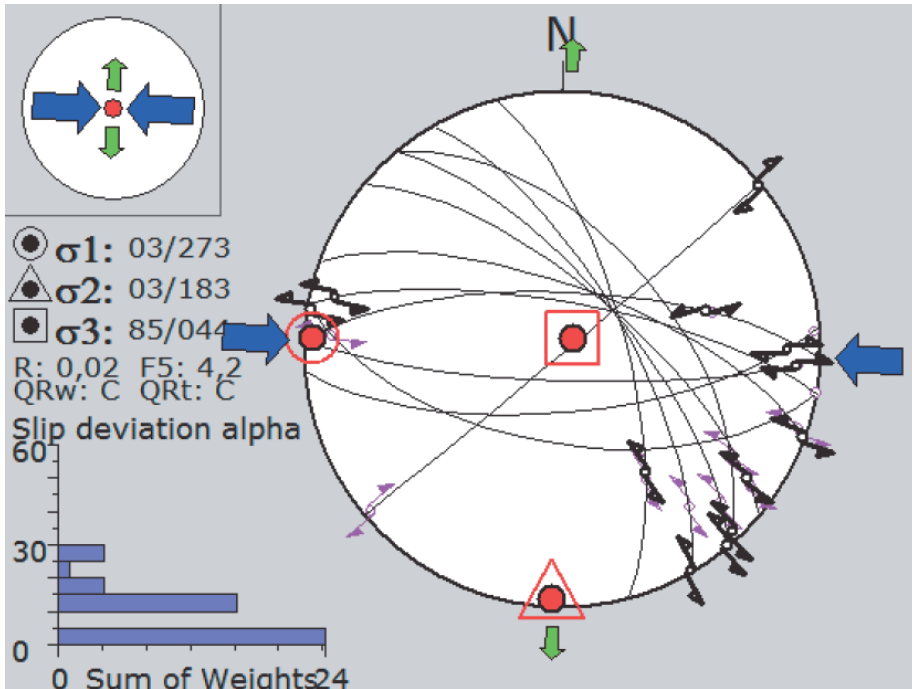
den södra delen av Stockholm ansågs osäkra samt att spänningsmätningar inte var praktiskt möjliga att genomföra. En spänningsanalys i regional skala längs den planerade sträckningen av tunnelbanan genomfördes med hjälp av tredimensionell numerisk modellering. I modellen inkluderades tretton strukturer enligt Figur 3. Resultaten visade bl.a. att den största inverkan på resultaten är strukturernas orientering i förhållande till initialspänningarna och att en spänningsomfördelning sker på ett avstånd upp till 50 m från strukturerna.



Figur 3. Plankarta över Stockholmsområdet med omfattningen av modellen som boxar (A och B) och de regionala strukturerna som ingår i modellen i grönt och rött.

I Bäckström & Chang (2020) har spänningsriktningar uppskattats genom att analysera relativa rörelser från strieringar och deformation av korsande strukturer på 46 st förkastningsytor. Metodiken baseras på "stress inverse"-teorin där rörelseriktningen på en spricka sammanfaller med den största skjuvspänningen som verkar på sprickytan. Resultaten indikerar att Stockholmsområdet har utsatts för en tektonisk rörelse i östvästlig riktning, se Figur 4. Spänningsriktningar studerades även med en förenklad 2D numerisk modell. Eftersom det finns vissa oklarheter i utförande från den numeriska analysen så kommenteras inte dessa resultat i föreliggande rapport. Man bör också beakta

att det inte är självklart att det spänningsfält som gett upphov till striering och deformation är det nu gällande spänningsfältet i bergmassan.



Figur 4. Bedömd spänningsorientering i Stockholmsområdet baserat på alla studerade relativa rörelser (Bäckström & Chang, 2020).

2.3 Tidigare studier Göteborg

I Wallroth & Palmqvist (2014) finns utförda bergspänningsmätningar från Röda Sten och Götatunneln i Göteborg sammanställda och utvärderade. Medelspänningar beräknade baserat på de godkända mätningarna vid Röda Sten gav följande resultat:

- Största huvudspänning: $\sigma_1 = 7.2 \text{ MPa} \pm 2.0 \text{ MPa}$ (N103/7°),
- Intermediära huvudspänningen: $\sigma_2 = 3.4 \text{ MPa} \pm 1.3 \text{ MPa}$ (N194/9°),
- Minsta huvudspänningen: $\sigma_3 = 2.0 \text{ MPa} \pm 1.0 \text{ MPa}$ (N335/78°).

Erhållna spänningsmagnituder och riktningar för Röda Sten bedömdes representativa för aktuellt område.

Bergspänningsmätningarna vid Götatunneln utfördes dels för att undersöka en svaghetszons påverkan på spänningsfältet och dels för att mäta sekundärspänningsfältet för att

försöka uppskatta primärspänningarna. De redovisade spänningsresultatet ansågs inte representativt för de generella förhållandena inom området (Wallroth & Palmqvist, 2014).

Baserat på sammanställda bergspänningsmätningar i Göteborg bedömdes den största huvudspänningen i regional skala som utgångspunkt för analyser antas vara horisontell och orienterad i västnordväst-ostsydost till nordväst-sydost. Vidare gavs ett förslag på uppskattning av primärspänningstillståndet inom djupintervallet 0–100 m för det, vid den tidpunkten, kommande tunnelprojektet Västlänken enligt Tabell 2. Riktningen på den största horisontella spänningen föreslogs sättas till 135° som typriktning med ett intervall 90° till 180°. Vertikalspänningen motsvarade överlagringstrycket beräknat med $\rho_{berg}=2650 \text{ kg/m}^3$ och $g=9.8 \text{ m/s}^2$.

Tabell 2. Förslag på en uppskattning av primärspänningstillståndet i Göteborg (Wallroth & Palmqvist, 2014).

	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)	σ_v (MPa)
Min	$3.0 + 0.04 z$	$1.0 + 0.02 z$	$0.026 z$
Typ	$4.5 + 0.04 z$	$2.5 + 0.02 z$	$0.026 z$
Max	$6.5 + 0.04 z$	$3.5 + 0.02 z$	$0.026 z$

3. MÄTDATA

3.1 Mätmetoder

Bergspänningsmätningar kan utföras med flera olika mätmetoder. Mätningarna i Stockholmsområdet har utförts med tre mätmetoder. Majoriteten av mätningarna har utförts med överborrningsmetoden, mer specifikt med *Borre*-cellen. Ett fåtal mätningar har utförts med hydrauliska metoder – hydraulisk spräckning (*HF*) samt återöppning av existerande sprickor (*HDPF*). Under senare tid har även överborrningsmätningar med *LVDT*-metoden utförts. För Göteborgsområdet har mätningar utförts med överborrningsmetoden och med *CSIRO*-cellen, *Doorstoppers* och *Borre*-cellen. Nedan beskrivs de olika mätmetoderna väldigt översiktligt. Eftersom överborrningsmetoden och hydrauliska metoder har beskrivits i tidigare sammanställningar av spänningar i Stockholm och Göteborg, ges lite fler detaljer för metoden *LVDT*.

3.1.1 Överborrnning

Överborrningsmetoden baseras på att *in situ* spänningarna kan beräknas från de deformationer som sker i borrhålet under det att den avlastas vid överborrnningen. Töjningar mäts med hjälp av töjningsgivare. *In situ* spänningarna kan beräknas från uppmätta töjningar och med kunskap om de elastiska konstanterna för berget. Den kompletta tredimensionella spänningstensorn bestäms ur en enda mätning under antagandet att berget är kontinuerligt, homogent, isotropt och beter sig linjär-elastiskt (Leeman & Hayes, 1966; Leeman, 1968). Det bör noteras att även anisotropa förhållanden kan beaktas, under förutsättning av elastiska konstanter för de olika anisotropi-riktningarna kan bestämmas (Hakala & Sjöberg, 2006).

Första versionen av *Borre* utvecklades 1976 (Hiltscher m.fl., 1979). Med denna mätcell skedde avläsning av mätvärden med kabel från markytan. Avläsning gjordes efter installation i borrhålet, därefter togs kabeln bort och överborrnning utfördes. Efter att mätcellen återförts till markytan kopplades den ihop med mätkabeln och en ny avläsning skedde.

Under 1987–1988 utvecklades en datoriserad version av *Borre*-cellen, i vilken data kunde lagras före, under och efter överborrnningen (Hallbjörn m.fl., 1990). Töjningsvärden avlästes 1 gång per minut. Total lagringskapacitet var 8 timmar, där första avläsning valdes till att starta strax innan överborrnning påbörjades. Denna version benämns fortsättningsvis *Borre II*.

Den tredje versionen av *Borre* (*Borre III*) utvecklades under 2003 och innefattade en ny inbyggd datalogger med högre lagringskapacitet och tätare mätintervall (Sjöberg & Klasson, 2003). Detta möjliggör töjningsregistrering såväl under inlimning som under överborrningsförloppet. Under inlimningen görs registrering var 15:e minut och under överborrnning kan mätintervallet väljas till mellan 3 och 60 s (vanligen görs mätning var

5:e sekund). Lagrings- och batterikapaciteten medger kontinuerlig mätning i upp till 40 timmar, med tätsamlade data i upp till 11 timmar.

För de mätningar som utförts i Stockholmsområdet har alla tre ovanstående versioner av *Borre*-cellen nyttjats. För mätningar i Göteborgsområdet har endast *Borre III* nyttjats.

Överborrning med *Borre*-cellen har använts i alla kända överborrningsmätningar i Stockholmsområdet och för de senast utförda mätningarna i Göteborgsområdet. I Göteborgsområdet har överborrningsmätningar även utförts med *Doorstopper* (2D-metod), *Leeman*-cellen och *CSIRO*-cellen. En mer ingående beskrivning av överborrningsmetoden finns bland annat i ISRMs föreslagna bergspänningsmätningmetoder (Sjöberg m.fl., 2003) och specifikt för *Borre*-cellen i Sjöberg & Klasson (2003).

Denna metod kräver även att ett hål borrar under utförande av mätningarna. Metoden lämpar sig mindre bra där bergmassan har många sprickor (för mätning krävs ett sprickfritt område att mäta i), innehåller stora mineralkorn eller beter sig plastiskt vid överborrningsmetoden.

3.1.2 Hydrauliska metoder

Mätning av bergspänningarna med hydrauliska metoder är en direkt metod på sådant sätt att olika tryck mäts, utifrån vilka de rådande bergspänningarna kan beräknas. Man skiljer här mellan hydraulisk spräckning (*HF*) och återöppning av existerande sprickor (*HTPF*).

Vid hydraulisk spräckning (*HF*) tätas en del av borrhålet med hjälp av manschetter ("packers") som trycksätts för att försegla testsektionen. Under hela testet registreras tryck i packers och i testsektionen samt flödes hastighet i testsektionen. Testsektionen trycksätts tills dess att en spricka initieras i borrhålsväggen, spräcktryck. Därefter dräneras utrymmet mellan manschetterna och trycksätts på nytt, vilket återöppnar den initierade sprickan. Detta upprepas ett antal gånger (vanligen tre) för att sprickan dels skall propagera långt ut i berget, dels avlägsna all form av kohesion, och därmed ge ett mått på det ostörda spänningsfältet. Efter spräckning tas manschetterna upp ur hålet. Spänningsriktning bestäms via en avtryckspacker efter avslutad spräckning, eller via geofysisk mätning under spräckningsförloppet. Hydraulisk spräckning (*HF*) utförs i en testsektion fri från sprickor.

Återöppning av existerande sprickor (*HTPF*) är en annan metod, men som utförs där existerande sprickor finns. Här placeras manschetterna på vardera sidan om en spricka. Via trycksättning öppnas sedan denna befintliga spricka och normalspänningen som verkar på sprickytan kan bestämmas. Genom att upprepa detta för ett flertal sprickor med olika orientering kan hela spänningstensorn bestämmas. Minst sex mätvärden (i olika riktningar och över ett begränsat djupintervall) krävs för en tredimensionell spänningsbestämning. Under senare år har mer avancerade utvärderingsmetoder utvecklats varvid spänningarna längs ett borrhål kan beräknas utifrån relativt få tester (18–20) över en större borrhålslängd (med olika antaganden), se t.ex. Ask (2004). En mer ingående beskrivning

av *HF* och *HTPF* finns i ISRM:s föreslagna bergspänningsmätningmetoder (Haimson & Cornet, 2003).

Dessa metoder kräver att det finns ett hål att göra mätningar i. Hålet ska idealt sett vara orienterat parallellt med en av huvudspänningsriktningarna. Denna metod lämpar sig mindre bra om mätsektionen är oval eller ojämn.

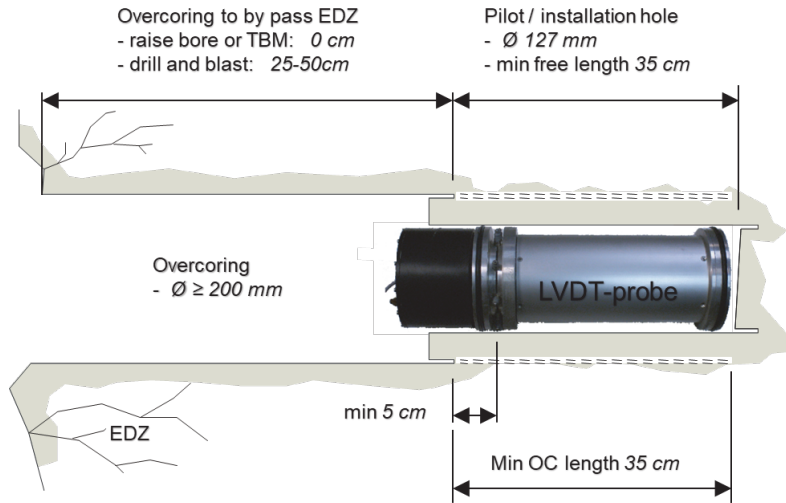
3.1.3 LVDT

LVDT (Linear Variable Differential Transducer)-cellen (Figur 5) har utvecklats för Posiva av Stress Measurement Company Oy (Hakala m.fl., 2013). Sekundärspänningsfältet mäts runt existerande berggrum genom ett antal överborrningar av mätcellen installerad i korta hål, se Figur 6. Registrering sker av den radiella konvergensen i borrhålet genom mätning av deformationer med fyra olika orienteringar.

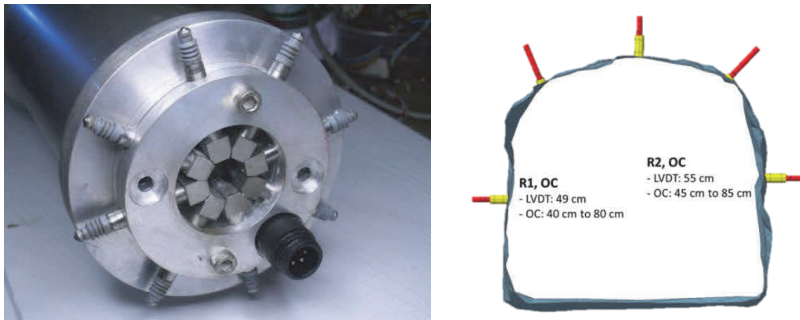
För att mäta hela spänningstensorn krävs minst tre mätningar, men rekommenderat är fyra till sex mätningar med olika placering i en sektion utförs. Efter mätning scannas tunnelns geometri och en numerisk modell över berggrummet byggs. Bakåtberäkning av det primära spänningsfältet utförs i den numerisk modellen genom spänningsinversion och med antagande om en kontinuerligt, homogent, isotropt material (eller känd anisotropi) med linjär elastiskt materialegenskaper.

Vid de traditionella mätmetoderna har limproblem vid fästningen av deformationsgivarna uppstått. Detta problem har lösts genom att fästa *LVDT*-cellen i borrhålet med hjälp av fjäderbelastning istället för lim (Hakala m.fl., 2013).

Denna metod kräver att det finns en tunnel eller ett berggrum att utföra mätningarna ifrån. Mätsektionerna bör vara i sprickfritt berg och tunneln bör ej vara förstärkt med sprutbetong alternativt att sprutbetongen kan knackas ned vid mätplatsen (Hakala, m.fl. 2013).



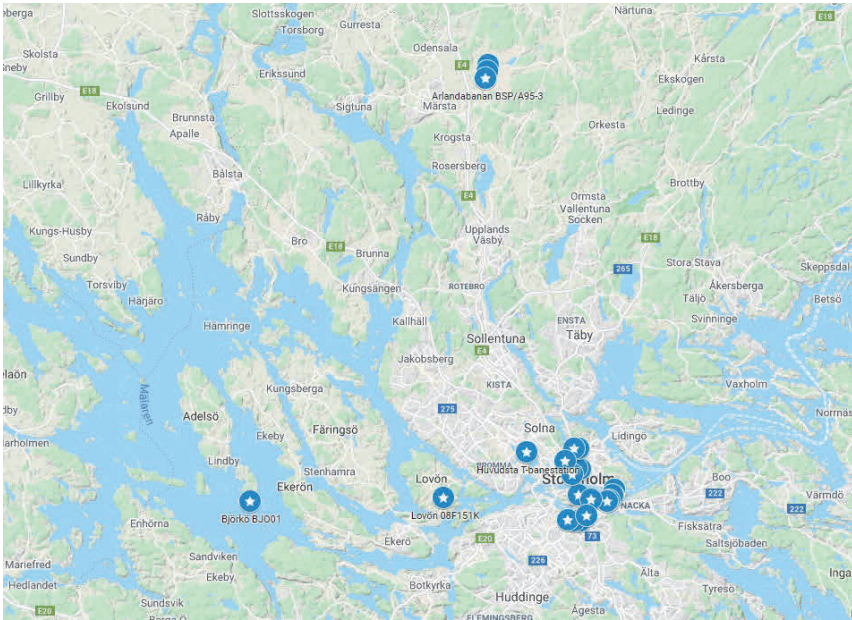
Figur 5. LVDT cellen och krav på minsta installationslängder i berget.



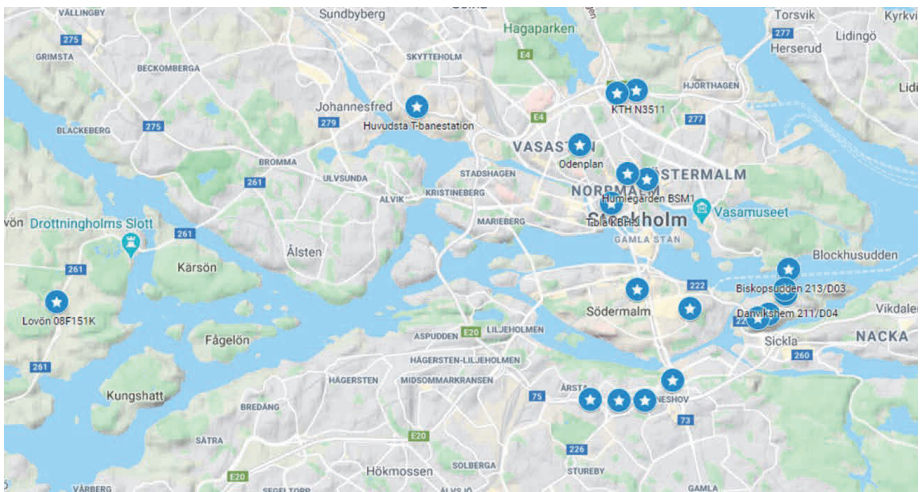
Figur 6. Detalj på LVDT-sensorer (vänster) och tunnelprofil (höger) (Hakala m.fl. 2013).

3.2 Mätplatser Stockholm

De projekt där mätningar har utförts i Stockholmsområdet beskrivs kortfattat nedan. I Figur 7 visas en översiktskarta med alla mätplatser och i Figur 8 visas de mätplatser som är mer centralt placerade i Stockholm. I Tabell 3 presenteras alla mätplatser, borrhål, mätmetod samt årtal summariskt. I avsnitten nedan följer en presentation av varje projekt i kronologisk ordning med beskrivning av respektive mätplats/borrhål.



Figur 7. Översiktskarta med alla mätplatser i Stockholmsområdet utmärkta (modifierad från Google Maps 2021a).



Figur 8. Översiktskarta med alla mätplatser i centrala Stockholm utmärkta (modifierad från Google Maps 2021a).

Tabell 3. Mätplatser i Stockholmsområdet (i kronologisk ordning).

Mätplats	Borrhål	Mätmetod	Årtal
Huvudsta T-banestation		<i>Borre</i>	1980
Humlegården	BSM1	<i>HF</i>	1992
Johannes brandstation	DBH1	<i>Borre II</i>	1993
Bolidenplan	DBH04	<i>Borre II</i>	1993
Årsta torg	DBH05	<i>Borre II</i>	1993
Slätbaksvägen	KBH12	<i>Borre II</i>	1994
Ruddammsberget	N3510	<i>Borre II</i>	1994
KTH	N3511	<i>Borre II</i>	1994
Finnboda Varv	211/D01	<i>Borre II</i>	1994
Danvikshem	211/D04	<i>Borre II</i>	1994
Biskopsudden	213/D03	<i>Borre II</i>	1994
Arlanda Terminal 5	BSP/A95/1	<i>Borre II</i>	1995
Arlanda Terminal 4	BSP/A95/2	<i>Borre II</i>	1995
Arlanda Cargo City	BSP/A95/3	<i>Borre II</i>	1995
Björkö	BJO01	<i>HF/HTPF</i>	2002
Södermalm	PH2	<i>Borre III</i>	2004
T-blå	KBH-J	<i>Borre III</i>	2005
Odenplan	KBOD3	<i>Borre III</i>	2007
Lövön	08F151K	<i>HF/HTPF</i>	2013
Henriksdals Reningsverk FRD-tunnel		<i>LVDT</i>	2015
Henriksdals Reningsverk TT5B-tunnel		<i>LVDT</i>	2015
Sofia Kyrka	BH15SO545	<i>Borre III</i>	2016
Station Gullmarsplan		<i>LVDT</i>	2018
Lövön	20A301K	<i>Borre III</i>	2020

3.2.1 Huvudsta T-banestation

Inför byggandet av Huvudsta T-banestation utfördes överborrningsmätningar (med *Borre*) 1980. Mätningarna utfördes av Vattenfall och avrapporterades i Strindell (1980). Tyvärr har denna rapport inte gått att finna utan resultaten som presenteras här har hämtats ifrån Klasson (1993a) samt Stille m.fl. (1981).

Mätningarna utfördes i ett vertikalt borrhål i en grå eller gråröd finkornig granit. Sprickfrekvensen var låg, men sprickor med kalkbeläggning förekom liksom vittrade sprickor med sandiga vittringsrester. Mätningar utfördes på två mätnivåer, ca. 10 respektive 17 m djup.

3.2.2 Kungliga Biblioteket

Inför byggandet av två stora bergrum i anslutning till Kungliga Biblioteket i Humlegården utfördes bergspänningsmätningar med hydraulisk spräckning (*HF*) av Renco AB på uppdrag av Kungliga Byggnadsstyrelsen (Klasson & Ljunggren, 1992). Mätplatsen var i Humlegården (borrhål BSM1).

Mätningarna utfördes i ett vertikalt borrhål i en gnejsartad granit. Berget bedömdes som friskt och kompetent men med några vertikala och subvertikala strukturer. Mätningar utfördes på två mätnivåer på ca. 17 och 37 m djup, i gnejsgranit respektive granit, med två mätningar på varje nivå.

3.2.3 SOS Räddningscentral

Inför byggande av SOS Räddningscentral i ett bergrum under Johannes brandstation genomfördes överborrningsmätningar (med *Borre II*) av Vattenfall Hydropower AB på uppdrag av Tyréns Företagsgrupp AB (Klasson m.fl., 1993). Mätplatsen (borrhål DBH1) var vid Johannes Brandstation, belägen på Brunkebergsåsen.

Mätningarna gjordes i ett vertikalt borrhål, i en fin- till medelkornig granit vilken bedömdes som friskt och kompetent. Ett fåtal smala pegmatitgångar skar graniten, vilken i dessa områden var mer grovkornig. Subvertikala sprickor (1–2 sprickor per m) var vanligast förekommande. Sprickfyllnad utgjordes av klorit eller kalcit som ställvis var vittrad. Fem mätningar utfördes på 21–26 m vertikalt djup.

För mätningen på 22 m djup utfördes installationen för nära toppen av pilohålet pga. en s.k. stubbe, 10 cm.

3.2.4 Södra Länken

Längs den planerade sträckningen av trafikleden Södra Länken utfördes under åren 1993–1994 utförde överborrningsmätningar (med *Borre II*) i tre borrhål. Mätningarna utfördes av Vattenfall Hydropower AB på uppdrag av Södra Länken Konsulterna (Klasson, 1993b; Klasson & Wikman, 1994a). Mätplatserna var en öppen plats direkt norr om Skulptörsvägen på Bolidenplan (borrhål DBH04), en parkeringsplats, sydväst om korsningen Bråviksvägen/Årstavägen på Årsta torg (borrhål DBH05) och på en bergknalle som omsluts av Slätbaksvägens sydvästra krök (borrhål KBH12).

På Bolidenplan borrades ett vertikalt borrhål, DBH04, i sedimentgnejs och gnejsgranit med förskiffring ca. 35° mot borrhålsaxeln. Ställvis förekom kvartsinblandning och/eller pegmatitgångar. Förekommande sprickor var råa med kalcitfyllning eller beläggning av klorit, biotit och pyrit. Mätningar utfördes på två mätnivåer på 13 respektive 21 m djup med tre mätningar på varje nivå.

På Årsta torg borrades ett 40 m långt hål, DBH05, med stupningen 70° och riktningen 33°. Bergarten var en delvis förskiffrad, medel- till grovkornig gnejsgranit. I vissa delar

förekom en svagt förskiffrad sedimentgnejs eller granit. Av de få sprickor som konstaterades, var huvuddelen subhorisontella till subvertikala och raa med kalcit, biotit och pyrit som fyllning. Mätningar utfördes på två mätnivåer på 23 respektive 30 m vertikalt djup med tre mätningar på varje nivå.

På den bergknalle som omsluts av Slätbaksvägens sydvästra krök borrades ett vertikalt borrhål, KBH12. Bergarten var grå-mörkgrå medelkornig gnejsgranit med förskiffring ca. 30–60° mot borrhålsaxeln. Vissa ljusare band av kvarts/fältspat eller pegmatitliror förekom. Mätningar utfördes på två mätnivåer på 37 respektive 47 m djup med tre mätningar på varje nivå.

3.2.5 Norra Länken

Längs den planerade sträckningen av trafikleden Norra länken utfördes överborrningsmätningar (med *Borre II*) i två borrhål. Mätningarna utfördes av Vattenfall Hydropower AB på uppdrag av Kjessler & Mannerstråle AB (Ljunggren & Wikman, 1994). Mätplatserna var vid Roslagstulls gamla sjukhus på Ruddammsberget (borrhål N3510) och Maskinteknikhallen på KTH (borrhål N3511).

På Ruddammsberget hade borrhål N3510 en stupning på 76° och en riktning om 340°. Bergarten utgjordes av en fin- till medelkornig grå granit, s.k. Stockholmsgranit. Ett fåtal smala pegmatitgångar skar den grovkorniga graniten. Berget var friskt och kompetent med en sprickfrekvens på 1–2 sprickor per m. Dessa var oftast subvertikala med sprickfyllnad av klorit eller kalcit. Tre mätningar utfördes på ca. 26 m vertikalt djup. För mätningen på 25.51 m vertikalt djup fanns en tunn läkt spricka mitt på kärnan, vilket kan ha påverkat mätresultatet.

Vid KTH hade borrhålet N3511 stupningen 74° och riktningen 70°. Bergarten var en fin- till medel- och jämnkornig grå granit med inslag av pegmatit. Regelbundet läkta sprickor förekom, med lutning om ca. 30° mot borrhålsaxeln. Två mätningar utfördes på ca. 34 m vertikalt djup.

3.2.6 Österleden

Längs den planerade sträckningen av trafikleden Österleden utfördes överborrningsmätningar (med *Borre II*) i tre borrhål. Mätningarna utfördes av Vattenfall Hydropower AB på uppdrag av VBB/VIK (Klasson & Wikman, 1994b). Mätplatserna var på Henriksdal vid Finnboda Varv (borrhål 211/D01) och Danvikshem (borrhål 211/D04), och på Djurgården vid Biskopsudden (borrhål 213/D03).

Vid Finnboda Varv hade borrhålet 211/D01 vertikalt. Bergarten var en medelkornig grå-rödgrå gnejsgranit som delvis var pegmatitiserad med läkta sprickor. En svag förskiffring orienterad 10–20° mot borrhålet kunde observeras. Mätningar utfördes på två nivåer på 19 respektive 37 m med tre mätningar på varje nivå.

Vid Danvikshem hade borrhålet 211/D04 stupningen 80° och riktningen 0°. Bergarten var en medelkornig grå gnejs/gnejsgranit som blev finkornigare mot djupet. Förskiffringen varierade mellan 10–50° mot borrhålet och det förekom läkta sprickor. Mätningar utfördes på två nivåer på 18 respektive 44 m vertikalt djup med tre mätningar på varje nivå.

Vid Biskopsudden hade borrhålet 213/D03 stupningen 84° och riktningen 180° i en medelkornig grå gnejsgranit. Parallellt med förskiffringen syntes ofta ljusare band vilka var rikare på kvarts och fältspat. Mätningar utfördes på två nivåer på 28 respektive 44 m vertikalt djup, i gnejs respektive kvartsdiorit, med två mätningar på varje nivå.

3.2.7 Arlandabanan

Längs den planerade sträckningen av Arlandabanan utfördes bergspänningsmätningar (med *Borre II*) i tre borrhål. Mätningarna utfördes av Vattenfall Hydropower AB på uppdrag av Banbrytarna (Wikman m.fl., 1995). Mätningarna utfördes vid Terminal 5 (borrhål BSP/A95/1), Terminal 4 (borrhål BSP/A95/2) och Cargo City (borrhål BSP/A95/3).

Alla tre borrhål hade stupningen 60° och riktningen 150°. Bergarten vid Terminal 5 & 4 utgjordes av glimmergnejs med lokala glimmerzoner. Förskiffringen var riktad 45° mot borrhålsaxeln och berget uppvisade ett relativt lågt *RQD*-värde. Bergarten vid Cargo City var granodiorit utan någon anisotropi. Mätningarna utfördes på två mätnivåer i varje borrhål, på ca. 12–14 respektive 18–20 m vertikalt djup, med tre till fyra mätningar på varje nivå.

3.2.8 Björkö Energiprojekt

Inom Björkö Energiprojekt utfördes hydraulisk spräckning (*HF*) och hydrauliska test på existerande sprickor (*HTPF*) genomfördes under 2002 i ett borrhål. Mätningarna utfördes av SwedPower AB på uppdrag av Björkö Energiprojekt på KTH. Mätningarna utfördes i borrhål BJO01 på sydvästra sidan av ön Björkö, väster om Stockholm (Ask, 2003).

Borrhålets orientering var ca. 85° stupning och riktningen varierade mellan 170–246°. Bergarten i borrhålet varierar mellan grejs och granit, med mycket breccia. Mätningar utfördes mellan 75 och 875 m vertikalt djup, på totalt 17 olika djup.

3.2.9 Citybanan

Inom ramen för arbetet med systemhandling för Citybanan har bergspänningsmätningar med överborrning (med *Borre III*) utförts på tre platser under 2004–2007.

På Södra Latins skolgård på Södermalm utförde SwedPower AB mätningar på uppdrag av Ramböll Sverige AB (Perman & Sjöberg, 2004). Borrhålet PH2 var vertikalt. Bergarten i övre delen av hålet var gnejs, med en del pegmatitförekomster och ett flertal sprickor (som bitvis omöjliggjorde mätning). På ca. 44 m djup påträffades en krosszon och under denna var berget av annan karaktär – en mycket finkornig, och nästan sprickfri,

granit. Mätningar utfördes på tre mätnivåer, på ca. 26, 37 respektive 52 m med två mätningar vardera på de övre nivåerna och tre mätningar på den nedre. Bergförhållanden var ej helt ideala för att utföra spänningsmätningar, särskilt i de övre delarna av borrhålet.

På perrongen på T-centralens Blå linje (Järvabanan) utfördes mätningar i tre borrhål av SwedPower AB på uppdrag av WSP (Sjöberg, 2006). Två av dessa gjordes i befintliga bergpelare och syftade till att bestämma det sekundära spänningsfältet i dessa. Det tredje borrhålet borrades snett nedåt från den södra bergpelaren i syfte att bestämma primärspänningarna i läget för planerade spårtunnlar för Citybanan. Endast mätningarna i detta borrhål har inkluderats i denna studie. Borrhålet KBH-J hade stupningen 72° och bäring 172°. Bergförhållandena var relativt goda, men för några av mätpunkterna konstaterades förekomst av relativt biotitrikt berg. Tre mätningar utfördes på 55–65 m vertikalt djup.

Vid Odenplan utfördes mätningar i ett borrhål av Vattenfall Power Consultant AB på uppdrag av Carl Bro/Sweco (Berg & Sjöberg, 2007). Borrhålet KBOD3 hade stupning ca. 80° och bäring 80–84°. Mätningarna utfördes på två mätnivåer, på ca. 20 respektive 35 m vertikalt djup med 3 respektive 4 mätningar.

3.2.10 Förbifart Stockholm

Inom projektet Förbifart Stockholm har mätningar i två borrhål utförts på Lovön. Hydrauliska mätningar (med *HF/HTPF*) utfördes 2013 av Pöyry SwedPower AB på uppdrag av ÅF. Mätningar (med *HF/HTPF*) utfördes i borrhål 08F151K med stupning 68° och bäring 345° (Ask, D. 2013). Horisontalspänningarna bestämdes på 60 m vertikalt djup.

Överborrhningsmätningar (med *Borre III*) utfördes 2020 av FracSinus RSM AB på uppdrag av AFRY/ÅF. Mätningar (med *Borre III*) utfördes ifrån tunnel i borrhål 20A301K som var något uppåtriktat -5° och riktning 234° (Ask, D. 2020). Berget hade heterogen mineralogi med mycket låg sprickfrekvens. Fyra mätningar gjordes på ca. 94 m vertikalt djup.

3.2.11 Henriksdals Reningsverk

Inför utbyggnad av Henriksdals Reningsverk har mätningar med *LVD*T-cellen utförts på två platser av Stress Measurement Company Oy på uppdrag av Sweco Civil AB (Hakala & Heine, 2015).

Mätningar utfördes i TT5B-tunneln, som är 7.5 m bred och 6.5 m hög hästskoformad tunnel och i FRD-nischen, som är 10 m lång, 8 m bred och 5 m hög. Båda tunnarna ligger på 43 m djup. Bergarten var migmatisk innehållande avsevärd mängd kvartsit.

3.2.12 Nya tunnelbanan

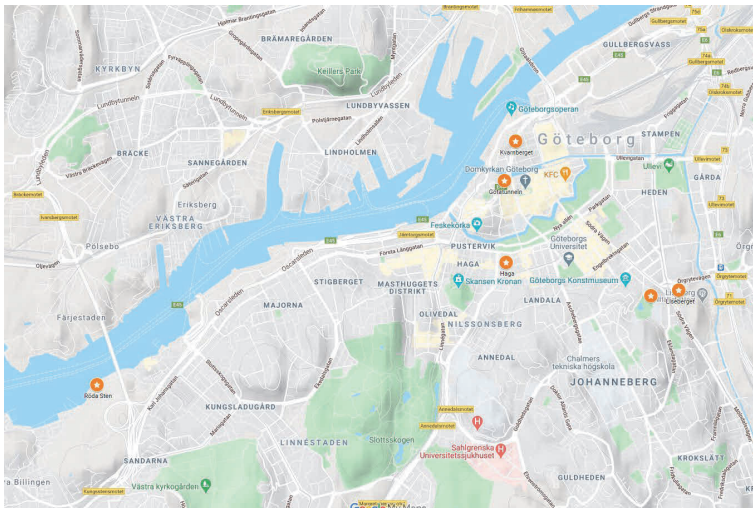
Inom projektet Nya tunnelbanan har mätningar utförts på två platser. Överbörningsmätningar (med *Borre III*) har utförts vid Sofia Kyrka av Geosigma på uppdrag av Sweco Civil (Ask, D. 2016). Vid Gullmarsplan har *LVDT*-mätningar utförts av Stress Measurement Company Oy på uppdrag av Tyréns AB (Hakala m.fl., 2018).

Vid Sofia Kyrka utfördes mätningar i borrhål BH15SO545 med stupningen 80 och bäring 337°. Bergarten var gnejs med omfattande intrusioner av grova korn som förekom från centimeterbredda bandningar av grova fältspats- och kvartskorn till halvmeterbredda pegmatitgångar. Det var en ofördelaktig sprickbild (med frekventa sprickor sub-parallella med borrhålet). Det gjordes fem mätningar på 84 till 130 m djup.

Vid Gullmarsplan utfördes mätningarna i en tunnel som är 3 m bred och 3.5 m hög och 35 m under markytan. Bergarten var gnejs med granitiska gångar, bra berg med måttligt med sprickor. I tunneln gjordes mätningar på 3 platser.

3.3 Mätplatser Göteborg

De mätningar som har utförts i Göteborgsområdet beskrivs kortfattat nedan. I Figur 9 visas en översiktskarta med alla mätplatser. I Tabell 4 presenteras alla mätplatser, borrhål, mätmetod samt årtal summariskt. I avsnitten nedan följer en presentation av varje projekt i kronologisk ordning med beskrivning av respektive mätplats/borrhål.



Figur 9. Översiktskarta med alla mätplatser i Göteborgsområdet utmärkta (modifierad från Google Maps 2021b).

Tabell 4. Mätplatser i Göteborg (i kronologisk ordning).

Mätplats	Borrhål	Mätmetod	År
Ramberget		Hällkartering	1982
Röda Sten	Hål 1	<i>CSIRO</i>	1992
Röda Sten	Hål 2	<i>CSIRO</i>	1992
Röda Sten		Hydrauliska tester	1994
Röda Sten	Bergrum B	<i>CSIRO</i>	1996
Kvarnberget		<i>Doorstopper</i>	1999
Götatunneln	Hål 1	<i>Leeman</i>	2001
Götatunneln	Hål 2	<i>Leeman</i>	2001
Haga	HH4235KBH	<i>Borre III</i>	2017
Korsvägen Landeriet	KK4207KBH	<i>Borre III</i>	2017
Korsvägen Liseberget	KK4222KBH	<i>Borre III</i>	2018

3.3.1 Ramberget

På Ramberget utfördes rikttningsbestämning av Chalmers tekniska högskola (Säwe & Tyrberg, 1982). Sprickor som uppkommit som skjuv- eller dragsprickor karterades. Töjningsmätningar utfördes nära dessa sprickor med inlimning av töjningsgivare och avlastning genom sågning. Syftet med dessa undersökningar var att bestämma orientering på största huvudspänning.

3.3.2 Röda Sten Rock Laboratory (RSRL)

Vid Röda Stens Berglaboratorium har flera mätningar utförts genom åren. Vid södra landfästet på Älvsborgsbron finns ett antal bergrum i vilka Chalmers tekniska högskola genomfört forskningsprojekt under 1980- och 1990-talet. Berggrunden vid Röda Sten utgörs av en medelkornig granit.

Överborrningsmätningar (med *CSIRO Hollow Inclusion*-cellen) utfördes i två borrhål (Dahlström & He, 1992; He, 1992). Borrhålen är placerade i en befintlig tunnel på ca. 70 m djup. Totalt utfördes 9 mätningar.

Även andra mätningar har utförts, exempelvis utfördes trycktester med luft för ett gaslager (Söder, 1994) och bestämning av tangentialspänning på bergvägg i bergrum B med töjningsgivare (Ek & Nilsson, 1996). Resultat från dessa mätningar kan inte användas i denna studie och för bestämning av primärspänningsfältet.

3.3.3 Götatunneln

Inom projektet Götatunneln utfördes överborrningsmätningar vid tre platser. Längs planerad sträcka för Götatunneln utförde bergspänningsmätningar (*CSIR*-cellen) i två borrhål av SINTEF på uppdrag av Tyréns Infrakonsult (SINTEF Bygg og Miljö, 2001).

Borrhålen borrades från tillfartstunnlar på ca. 30 m djup på var sin sida av en svaghetszon i syfte att undersöka zonen påverkan på spänningsfältet. Borrhålen var nära horisontella (något uppåtriktade) -4° respektive -6° , med riktning 42.7° respektive 207.3° . Det utfördes 8 mätningar i varje borrhål. Bergarten är en gnejsig granodiorit.

I Kvarnberget utfördes överborrningsmätningar (med *CSIR Doorstoppers*) av Chalmers tekniska högskola (Hollunger & Trappman, 1999). Mätningarna utfördes ifrån en tillfartstunnel till en undermarksanläggning i nio korta hål, ca. 1 m långa, på ca. 16 m djup under markytan. Mätningarna utfördes i en grå granitgnejs med medelstora korn med låg sprickfrekvens. Spänningsfältet var svårtolkat, med en orimligt hög spänning vinkelrätt tunneln och med dragspänning parallellt tunneln. Bakåträknningar gjordes med en 2D-modell för att få fram *in situ* spänningsfältet. Bakåträkningarna var dock inte lyckosamma.

3.3.4 Västlänken

Inom projektet Västlänken har det utförts överborrningsmätningar (med *Borre III*) på tre platser. Mätningarna utfördes av FracSinus RSM AB på uppdrag av EnviroPlanning Västra Götaland AB.

Mätningar på Haga kyrkoplan utfördes i ett sub-vertikalt hål (HH4235KBH), med stupning 85.1° och riktning 173.4° (Ask, 2018a). Bergarten var gnejs. Mätningar utfördes på två nivåer med fyra respektive två mätningar.

Mätningar vid Landeriet utfördes i ett sub-vertikalt hål (KK4207KBH) med stupning 84.6° och riktning 312.1° (Ask, 2018b). Mätningar utfördes på två nivåer med två mätningar per nivå.

Mätningar på Liseberget utfördes i ett sub-vertikalt hål (KK4222KBH) med stupning 84.4° och riktning 142.3° (Ask, 2018c). Mätningar utfördes på två nivåer med fyra respektive två mätningar.

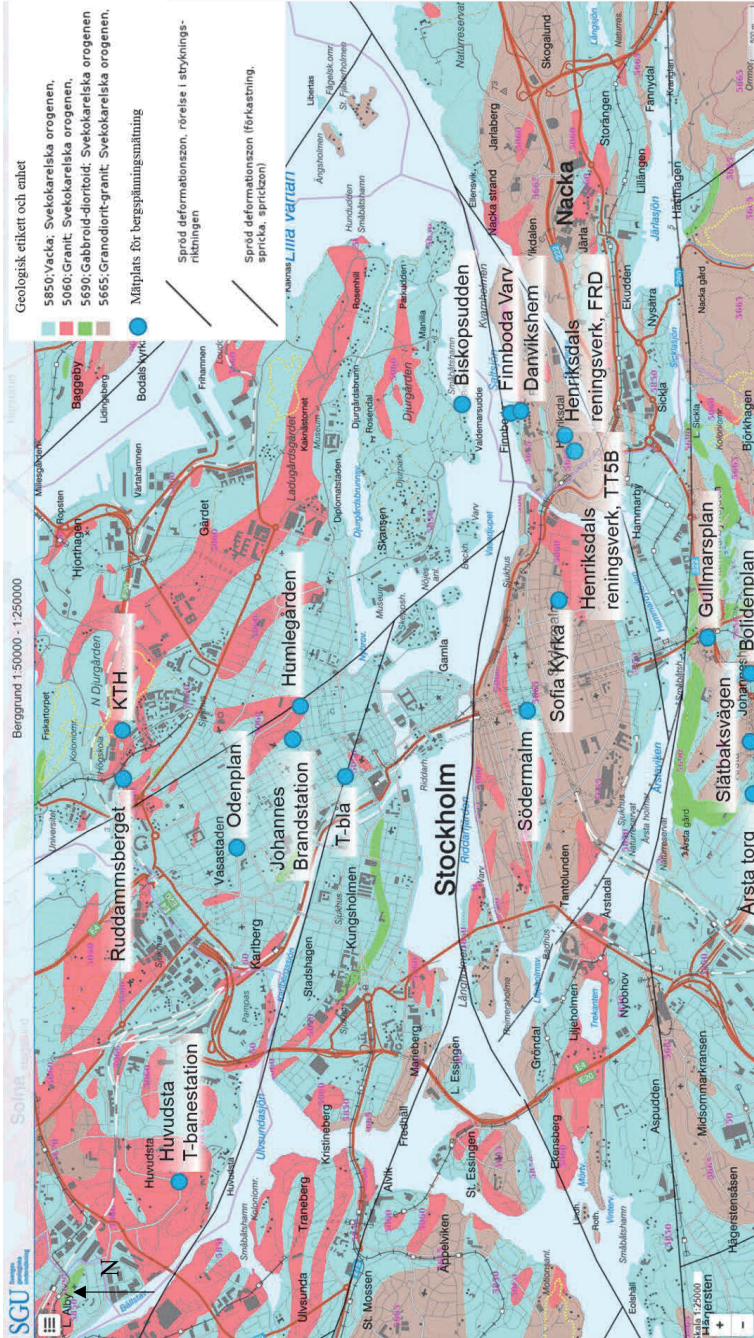
4. GEOLOGI, JORDDJUP OCH TOPOGRAFI

4.1 Stockholm

Berggrunden i Stockholmsområdet består huvudsakligen av kristallina bergarter såsom gnejs (granitisk) och fin- till medelkornig yngre granit (s.k. Stockholmsgranit), Swindell (2005). Den senare genomslår området i två vanligt förekommande varianter (röd och grå). Den röda Stockholmsgraniten har vid tidigare utförda underjordsarbeten (t.ex. Saltsjötunneln) visat sig ha en högre sprickfrekvens än den gråa, samt förekommer oftare i anslutning till svaghetszoner. Lossbrutna "öar" av gnejs påträffas oftast som brottstycken i graniten. Pegmatit och mer sällan även amfibolit (s.k. "grönsten") förekommer inlagrade i moderbergarterna. Pegmatiten kan även förekomma som distinkta gångar med skarpa kontakter med de andra bergarterna. Det yngsta bergartsledet är diabaser som oftast förekommer som enstaka VNV–OSO strykande gångar som skär igenom de andra bergarterna.

Metamorfa processer har påverkat de olika bergarterna. Gnejsen är mestadels starkt folierad och delvis migmatiserad. Linser och oregelbundna partier av glimmerskiffer förekommer ställvis inom gnejsen. De olika faserna av tektonisk sammanpressning har skapat sprickor och svaghetszoner i berggrunden. Inlandsisens avsmältning har orsakat avlastningssprickor (s.k. "bankningsplan"). Dessa förekommer som horisontella eller subhorisontella sprickor och kan vara starkt vattenförande (Swindell, 2005). Dominerande sprickriktning anses vara NV-SO (se t.ex. Möller & Stålhös, 1964; Andersson & Swindell, 2008; Bäckström & Chang, 2020). En sammanställning av storskaliga deformationszoner och lineament i centrala Stockholmsområdet presenteras i Figur 10. Ytterligare beskrivning av geologi samt svaghetszoner som bedömts med låg, medel respektive hög konfidens redovisas i APPENDIX 1.

Modellerat jorddjup finns sammanställt på SGUs kartvisare (SGU, 2021b). Jorddjupsmodellen ger en mycket översiktlig bild av jordtäcket mäktighet, se APPENDIX 1. Generellt varierar jorddjupet mellan 0–30 meter i de centrala delarna av Stockholm. Kända jorddjupsdata med avslut i berg har sammanställts i Tabell 5. Data är inhämtade nära utförda mätplatser genom exempelvis brunnar, hällobservationer och borringar (SGU, 2021b). Kända jorddjup vid eller nära mätplatser är generellt under 10 meter. För de lokala platser där bergspänningsmätningar har utförts på, har inget omfattande jorddjup angetts. Det antas därmed att utförda bergspänningsmätningar inte är markant påverkade av omfattande jorddjup.



Figur 10. Berggrundkarta över Stockholm med geologiska strukturer och lineament tillsammans med ungefärliga positioner av mätplatser markerade med blå cirkelar (modifierad från SGU, 2021a).

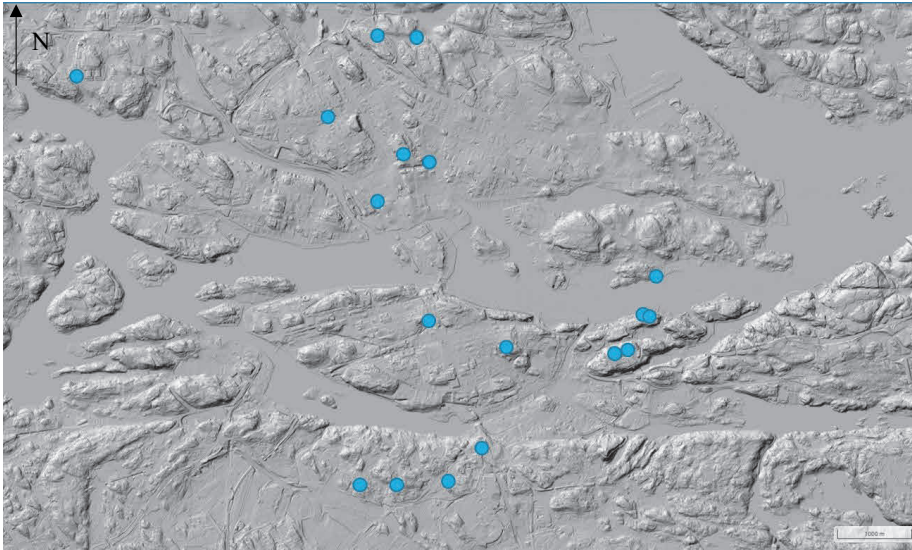
Tabell 5. Kända jorddjupsdata vid/nära mätplatser i Stockholmsområdet

Mätplats	Borrhål id	Jorddjup [m]
Huvudsta T-banestation	Hällobserver	0
Humlegården	-	-
Johannes brandstation	-	-
Bolidenplan	TRV064397	2.8
	TRV064400	4
Årsta torg	TRV066360	0.6
	TRV066361	2
Slätbaksvägen	-	-
Ruddammsberget	Brunnsarkivet	0.5
	TRV053227	5
KTH	Hällobserver	0
	TRV055577	44.5 (*)
	TRV054322	1.2
Finnboda Varv	TRV141571	4.3
Danvikshem	TRV140593	0.2
Biskopsudden	TRV140602	0.2
	TRV140690	1.8
Arlanda Terminal 5	Hällobserver	0
	Brunn	4
Arlanda Terminal 4	Hällobserver	0
Arlanda Cargo City	Brunn	2
Björkö	-	-
Södermalm	TRV136760	1
T-blå	TRV115435	5.7
	TRV115484	8.2
Odenplan	TRV292036	12.7
	TRV117540	12.8
Lövön 08F151K	TRV122567	9.4
Henriksdals Reningsverk FRD-tunnel	Hällobserver	0
	Brunnsarkivet	0
Henriksdals Reningsverk TT5B-tunnel	Hällobserver	0
	Brunnsarkivet	0
Sofia Kyrka	Hällobserver	0
Station Gullmarsplan	-	-
Lövön 20A301K	Hällobserver	0

*Angivet jorddjup för borrhåls id TRV055577 skiljer mycket i relation till närliggande borrhål.

I Stockholmsområdet finns ett fåtal bergstoppar med en höjd på över 60 meter över havet, belägna söder om centrala Stockholm (Långsjöhöjden, Hammarbyhöjden, Hökarängen). I Årsta och vid den bergspänningsmätning som är utförd vid Slätbaksvägen, finns en av

de högsta bergsknallarna i Stockholm, med en höjdmeter på 60 meter över havet. Den högsta punkten i innerstaden är Henriksdalsbergets sydvästra topp (57 m ö.h.). På Södermalm (inom tullarna) finns Skinnarviksberget på 53 meter över havet. I de centrala delarna, är det generellt ingen drastisk topografi med kraftig skillnad i höjdmeter (Figur 11). De platser där bergspänningsmätningar har utförts på, och som generellt är placerade 10–40 meter över havet, antas (eftersom höjdnivå inte finns redovisad) därmed inte vara påverkade av kraftiga höjdskillnader och topografi.



Figur 11 Karta med terrängskuggning över Stockholm med ungefärliga positioner av mätplatser markerade med blå cirklar (Lantmäteriet, 2021).

4.2 Göteborg

I de centrala delarna av Göteborg och i de områden där de sammanställda bergspänningsmätningarna är utförda domineras berggrunden av granit och granodioriter. Ett antal brantstående diabasgångar med västnordväst-ostsydostlig riktning förekommer. Gångarna skär med skarpa kontakter genom de äldre bergarterna.

Tektoniken inom området domineras av uthålliga överskjutningszoner med strykning inom ett intervall runt nord-syd och stupning mot väst (Wallroth & Palmqvist, 2014). Storskaliga deformationszoner och lineament enligt SGUs berggrundskarta, finns presenterade i Figur 12.

Baserat på Göteborgs byggnadsgeologiska karta i 3D (SGU 3D, 2021b) finns inga svaghetszoner bedömda med hög konfidens för Göteborgsområdet. Däremot finns ett flertal svaghetszoner med bedömd medelkonfidens med strykningar kring nordväst-sydost

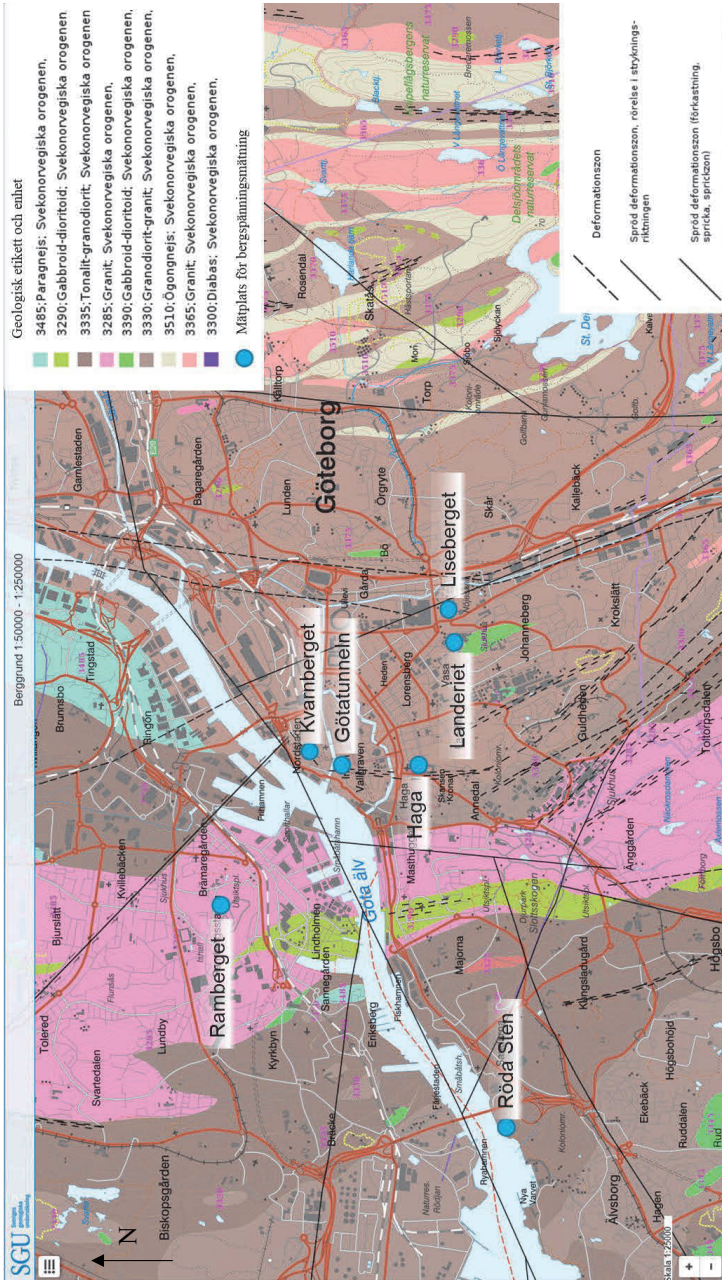
respektive nordost-sydväst. Ytterligare beskrivning med figurer över Göteborgs geologi visas i APPENDIX 1.

Den översiktliga jorddjupsmodellen över Göteborg redovisas i APPENDIX 1. Jorddjupet varierar från 0 till över 50 meter i de centrala delarna av Göteborg. Omfattande jorddjup på över 50 meter har främst observerats vid Gullbergsvass och Östra Nordstaden. Kända jorddjupsdata med avslut i berg nära utförda mätplatser har sammanställts i Tabell 6. Data är inhämtade nära utförda mätplatser genom exempelvis brunnar och hållobobservationer (SGU, 2021b). Kända jorddjup vid eller nära mätplatser är i huvudsak 0–3 m.

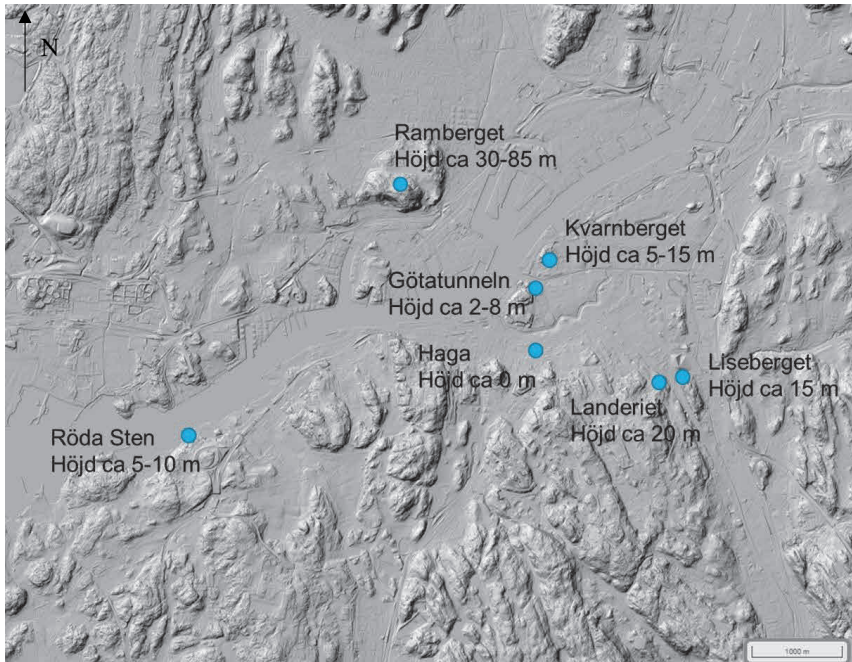
Tabell 6. Kända jorddjupsdata vid/nära mätplatser i Göteborg (SGU, 2021b).

Mätplats	Borrhål id	Jorddjup [m]
Ramberget	Hällobobservationer	0
Röda Sten	Hällobobservationer	0
Kvarnberget	Hällobobservationer	0
Götatunneln	-	-
Haga	-	-
Korsvägen Landeriet	Hällobobservationer	0
Korsvägen Liseberget	Brunnsarkiv	0.5–3

Topografin i Göteborgsområdet är varierande enligt Figur 13 och kan för de platser där det finns branta och höga bergslänter påverka riktning och storlek på bergspänningar. Exempel på dramatisk topografi har Stigberget, med en höjdskillnad på 45 meter mellan Masthuggstorget och upp till Fjällgatan. Ramberget, Lorensberg, Slottsskogen är några exempel på berg med toppar på cirka 75–90 meter över havet. I de centrala delarna, såsom inom vallgraven, Vasastaden och Heden är det flack topografi med höjder på 0–3 meter över havet. För alla mätplatser i Göteborg (förutom Ramberget) antas, eftersom faktisk höjdnivå inte finns redovisad, att närliggande höjdskillnader inte påverkar mätresultaten



Figur 12. Berggrundkarta över Göteborg med geologiska strukturer och lineament tillsammans med ungefärliga positioner av mätplatser markerade med blå cirklar (modifierad från SGU, 2021a).



Figur 13 Karta med terrängskuggning över Göteborg med ungefärliga positioner av mätplatser markerade med blå cirkelar och angiven höjd (Lantmäteriet, 2021).

5. RANKNING AV MÄTDATA

Tillförlitligheten av mätdata beror av kvalitén på data uppmätt i fält och lokala geologiska anomalier men även andra faktorer såsom testproceduren, erfarenhet och kompetens hos utförare etc. I detta kapitel beskrivs rankning av mätdata med avseende på kvalitet på mätdata. För respektive mätmetod (överborrning, hydrauliska mätningar, *LVDT*) utförs en separat rankning. Rankningskriterier är framtagna i arbeten för SKB och Posiva (se t.ex. Siren & Hakala, 2018; Figueiredo m.fl., 2021). Förfining och anpassning av rankningskriterier har utförts för detta projekt. Spänningsdata rankas från 3 till -1, enligt:

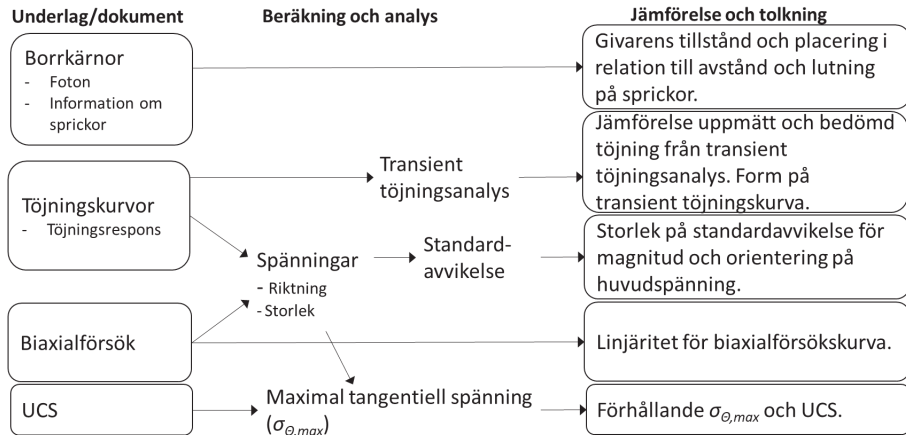
- 3: God tillförlitlighet, endast liten inverkan på erhållna resultat.
- 2: Måttlig tillförlitlighet, måttlig inverkan på erhållna resultat.
- 1: Dålig tillförlitlighet, stor inverkan på erhållna resultat.
- 0: Otillräckligt dataunderlag för att kunna utföra rankning.
- 1: Mycket otillförlitliga data, förkastas i sin helhet.

Den slutliga rankningen är min-värde av varje enskild komponent. Nedan följer en generell beskrivning av rankning för respektive mätmetod. Detaljerade tabeller för rankning redovisas i APPENDIX 2.

För de bergspänningsmätningar som utförts i Stockholm och Göteborg fanns för de flesta mätningar inte tillräcklig dokumentation för att kunna ranka tillförlitligheten. Det i sig betyder inte att mätningarna är "dåliga" eller inte tillförlitliga utan mer att de inte uppfyller den omfattning på dokumentation som ställs i genomförd rankning.

5.1 Överborrning

Tillförlitligheten av mätdata för överborrning bedöms baserat på underlag från borrkärnor, töjningskurvor, biaxialförsök och enaxiell tryckhållfasthet (UCS) enligt Figur 14. Utöver angivna faktorer i rankning-tabellerna ska hänsyn även tas till geologiska anomalier, temperaturer under borring, etc. I underlaget för mätdata har hänsyn redan tagits till sådana faktorer och de finns inte med i sammanställningen.

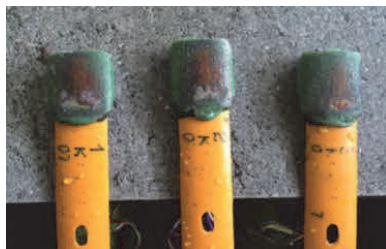


Figur 14. Flödesschema vid bedömning av tillförlitlighet av mätdata för överborrning.

För borrkärnor studeras givarens placering i relation till sprickor men också givarnas tillstånd efter mätning. En intakt borrkärna med givare som inte påverkats vid överborrningen bedöms med god tillförlitlighet (se exempel i Figur 15 respektive Figur 16). God tillförlitlighet bedöms också gälla om borrkärnan innehåller sprickor med stor vinkel från borrkärnans axel om dessa är utanför mätsektionen.



Figur 15. Överborrad kärna med god tillförlitlighet.



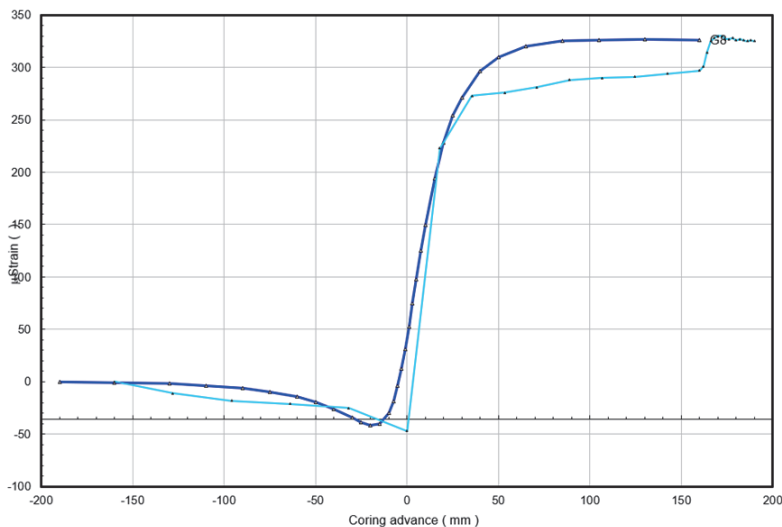
Figur 16. Töjningsgivare efter mätning med god tillförlitlighet.

I redovisad rankning har mätdata som granskats och utvärderats från tidigare utförda mät rapporter använts. Det innebär att installationer där borkärnan varit av dålig kvalitet, innehållit sprickor som påverkat givare etc. redan sorterats bort. Exempel som inte inkluderats i mätdata eftersom de redan exkluderats i mät rapporter visas i Figur 17.

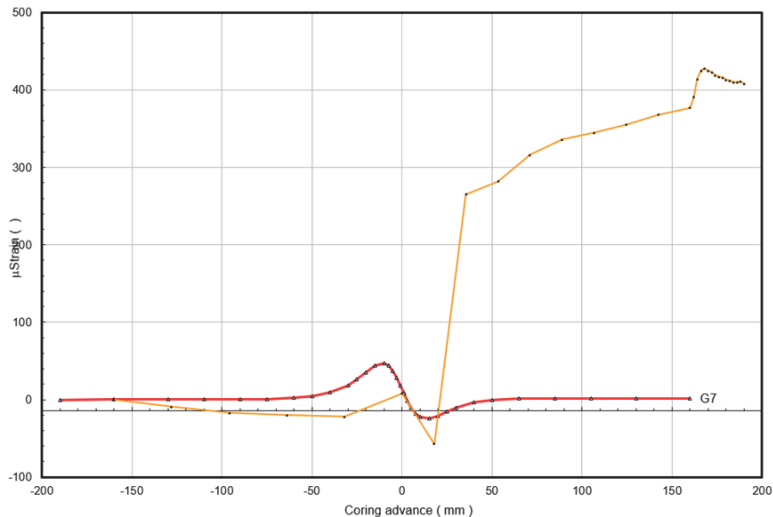


Figur 17. Exempel på bedömningen "mycket otillförlitlig" på grund av stor påverkan på mätcell och givare.

För töjningskurvor jämförs uppmätt och beräknad töjning. Den beräknade töjningskurvan är ett resultat från transient töjningsanalys där ideala förhållanden (kontinuerligt, homogent, isotropt och linjärelastiskt) antas för berget. Måttlig till god tillförlitlighet bedöms gälla om kurvorna resulterar i likartade värden och de antar en S-form (se Figur 18). Dålig tillförlitlighet bedöms gälla om kurvorna har olika beteenden och form, se exempel i Figur 19.



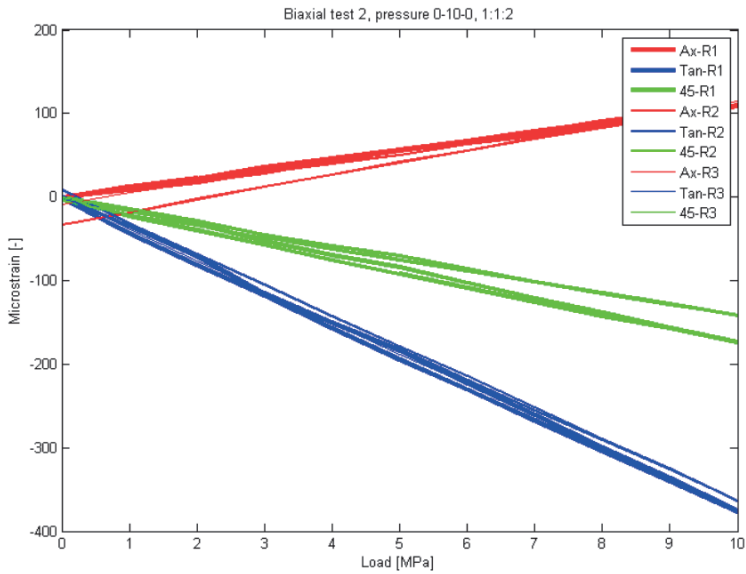
Figur 18. Exempel på måttlig till god tillförlitlighet vid jämförelsen uppmätt och beräknad töjning.



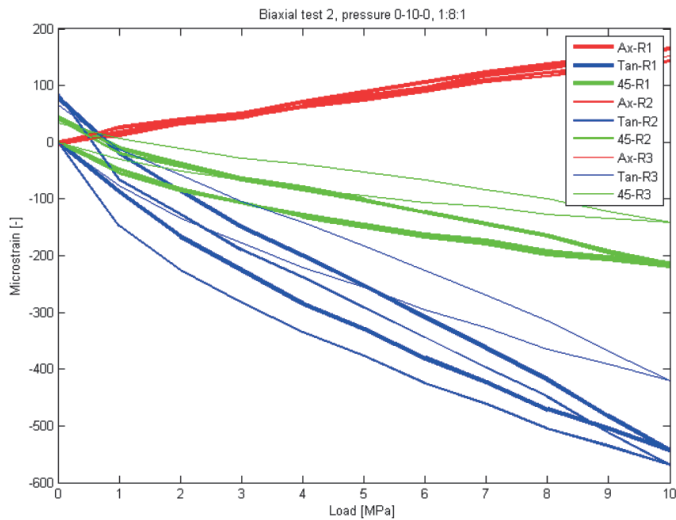
Figur 19. Exempel på dålig tillförlitlighet vid jämförelsen uppmätt och beräknad töjning.

Baserat på töjningskurvor beräknas magnitud och orientering på huvudspänningar. Beräkning av konfidensintervall har genomförts enligt den metod som föreslagits av Walker m.fl. (1990) och med det beräkningsprogram som finns beskrivet i Lindfors m.fl. (2005). Standardavvikelse för spänningar baseras på 90% konfidensintervall för både magnitud och orientering. Tillförlitligheten bedöms baserat på standardavvikelse för magnitud på huvudspänningarna (σ_1 , σ_2 , och σ_3) och orientering på största huvudspänningen (σ_1). God tillförlitlighet bedöms om standardavvikelse för magnitud är mindre eller lika med 2 MPa samt att standardavvikelsen på orienteringen för σ_1 är mindre eller lika med 15° .

Biaxialförsökskurvan används för att tolka linjäritet, anisotropi och hysteres. Om biaxialkurvorna visar linjärt beteende och är samlade bedöms mätningen vara av god tillförlitlighet (Figur 20). Ökad grad av anisotropi, att kurvorna inte följs åt och icke linjärt beteende bidrar till en minskning av tillförlitlighet (Figur 21).



Figur 20. Exempel på god tillförlitlighet vid tolkning av biaxialkurva.



Figur 21. Exempel på dålig tillförlitlighet vid tolkning av biaxialkurva.

Spänningsinducerad påverkan på kärnan bedöms genom att studera förhållandet mellan maximal tangentiell spänning ($\sigma_{\theta,max}$) i pilothålet och enaxiell tryckhållfasthet (UCS) (Ewy & Cook, 1990).

För de överborrningar som utförts i Stockholm fanns tillräcklig dokumentation för att ranka tre mätningar med måttlig tillförlitlighet. Resterande mätningar har i huvudsak otillräcklig dokumentation. Generellt var dokumentation av borrhärdar (foton), töjningskurvor och/eller resultat från biaxialtest otillräcklig och bidrog till att tillförlitligheten för de flesta mätningar inte gick att bedöma. Det fanns, på samma sätt, inte tillräcklig dokumentation för att ranka de överborrningsmätningar som är utförda i Göteborg. Ingen av mätningarna, i varken Stockholm eller Göteborg, rankades som mycket otillförlitliga.

5.2 Hydrauliska mätningar

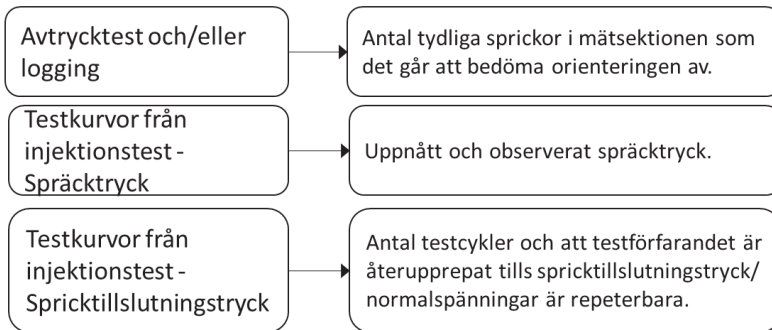
Som underlag för bedömning av tillförlitlighet av mätdata för hydraulisk mätning används avtrycktest alternativt s.k. "electrical imaging" (geofysisk mätning av resistivitet) och resultat från injektionstest enligt Figur 22. Utöver angivna faktorer i rankningstabellerna ska hänsyn även tas till geologiska anomalier, temperaturer under borring, etc. I underlaget för mätdata har hänsyn redan tagits till sådana faktorer och de finns inte med i sammanställningen.

Från avtrycktest studeras antalet sprickor i mätsektionen och om dessa är tydliga eller inte. Om det bildats en tydlig spricka inom mätsektionen vid ett *HF*-test bedöms tillförlitligheten som god. Ökad mängd sprickor inom testsektionen minskar tillförlitligheten på mätdata enligt exempel i Figur 23.

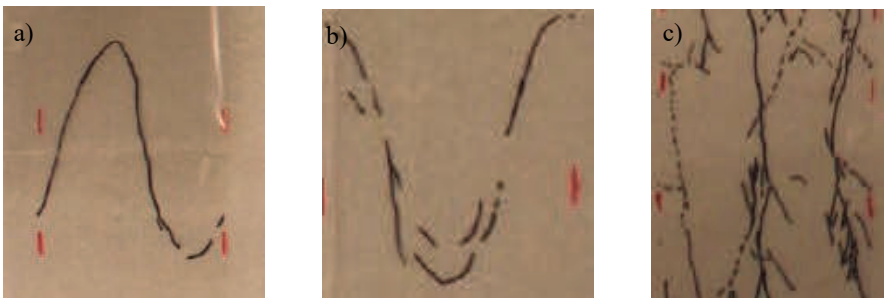
Baserat på testkurvor från injektionstester tolkas spräcktryck och repeterbarhet för spricktillslutningstryck. För måttlig till god tillförlitlighet krävs att spräcktrycket (breakdown pressure) går att observera från testkurvorna. Vidare krävs flertalet testcykler och att spricktillslutningstrycket (shut-in pressure) är repeterbart för mer än 50% av testcyklerna för att uppnå måttlig till god tillförlitlighet. För exempel på testkurvor och bedömning av tillförlitlighet se Figur 24.

Underlag/dokument

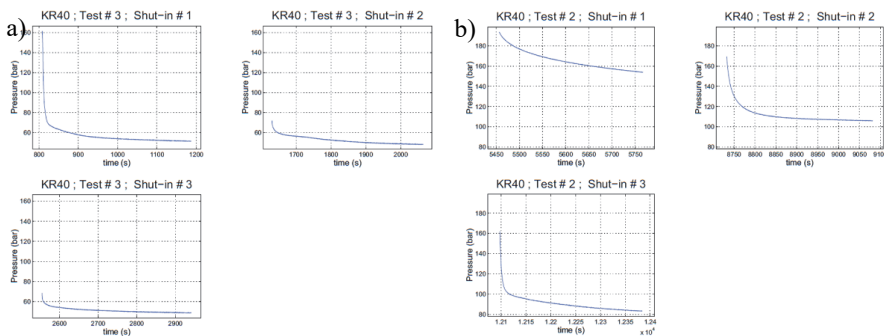
Jämförelse och tolkning



Figur 22. Flödesschema vid bedömning av tillförlitlighet av mätdata för hydraulisk mätning.



Figur 23. Tolkning av avtrycktest vid hydraulisk mätning med bedömt: a) god tillförlitlighet, b) måttlig tillförlitlighet och c) mycket otillförlitligt.



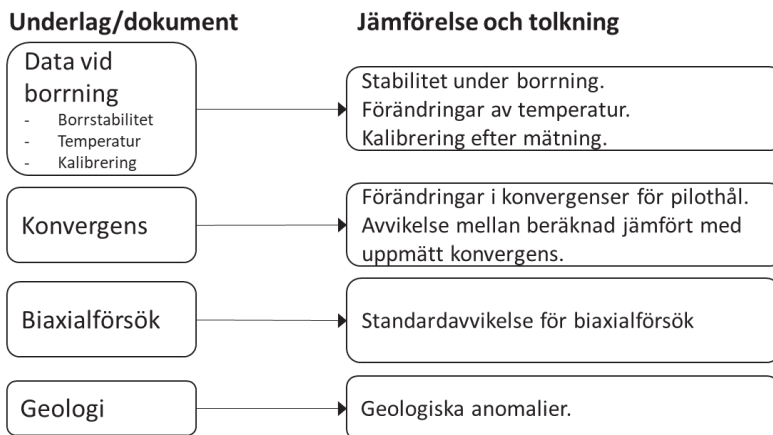
Figur 24. Exempel på testkurvor av spricktillslutningstrycket som uppvisar a) god och b) dålig tillförlitlighet.

För de tre projekt där hydrauliska mätningar använts och utförts i Stockholm fanns tillräcklig dokumentation för att ranka tillförlitlighet för en av mätplatserna. För de två övriga mätplatserna saknades underlag för att kunna bedöma tillförlitligheten.

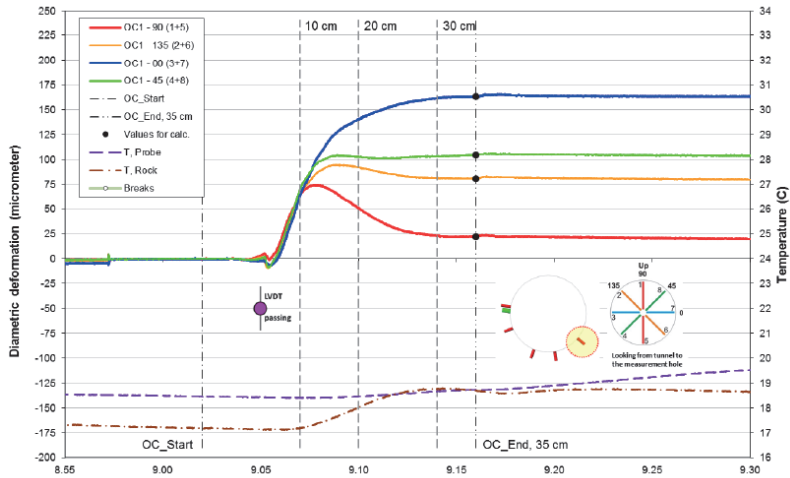
5.3 LVDT-mätningar

Borring och mätning med *LVDT* utförs efter att kalibrering och stabiliteten på borringen är bedömd som tillförlitlig. När mätningen utförs bedöms tillförlitligheten av mätdata vid borring enligt kriterier som presenteras i APPENDIX 2. Den totala bedömningen av tillförlitlighet baseras på underlag från borring, biaxialförsök, uppmätt konvergens i borrhålet och geologi enligt Figur 25.

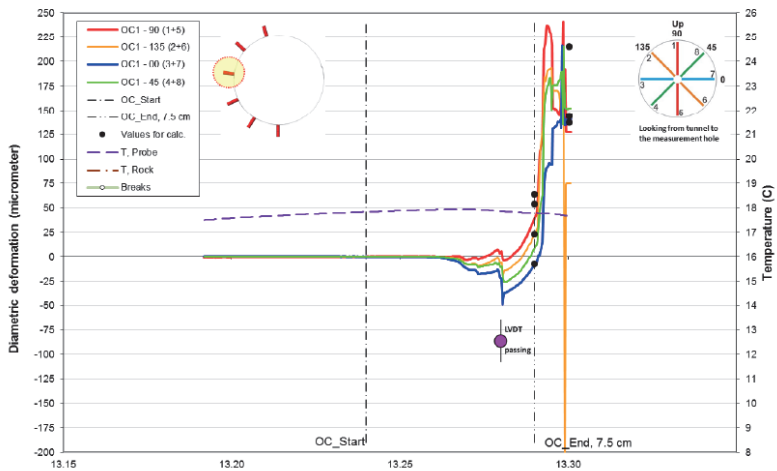
LVDT-cellen mäter diametrala konvergenserna i borrhålet och för att mätningen ska fortsätta (eller inte förkastas) så ska pilothålet ha en elliptisk eller cirkulär form. Deformation och temperatur mäts under överborringen med *LVDT* enligt exempel i Figur 26 och där konvergenserna stabiliseras innan överborringen slutförs. Exempel på mätning som förkastas i sin helhet på grund av att konvergenserna inte hinner stabiliseras visas i Figur 27. Skillnaden mellan beräknad konvergens, för perfekta förhållanden (kontinuerligt, homogent, isotropt och linjär elastiskt material) jämförs med uppmätt konvergens enligt exempel i Figur 28.



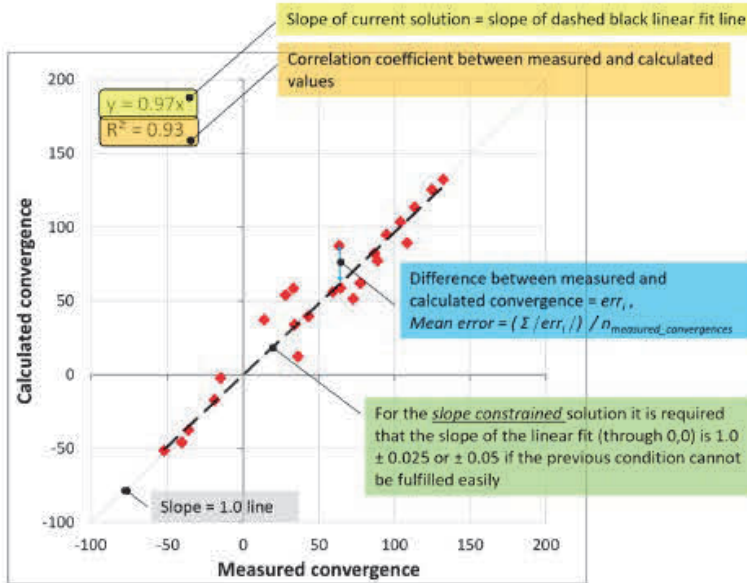
Figur 25. Flödesschema vid bedömning av tillförlitlighet av mätdata för *LVDT*.



Figur 26. Diametrala deformationen samt temperatur under överborrning för LVDT-metoden (Hakala m.fl., 2017).



Figur 27. Exempel på mätning som förkastas eftersom konvergensen inte stabiliseras innan överborrningen slutar (Hakala m.fl., 2017).



Figur 28. Exempel som visar jämförelse mellan beräknad och uppmätt konvergens (Hakala m.fl., 2017).

Biaxialförsökskurvan används för att tolka linjäritet, anisotropi och hysteres på samma sätt som vid överborring (se exempel i Figur 20 och Figur 21). Resultat från biaxialförsök bedöms med hög eller låg konfidens.

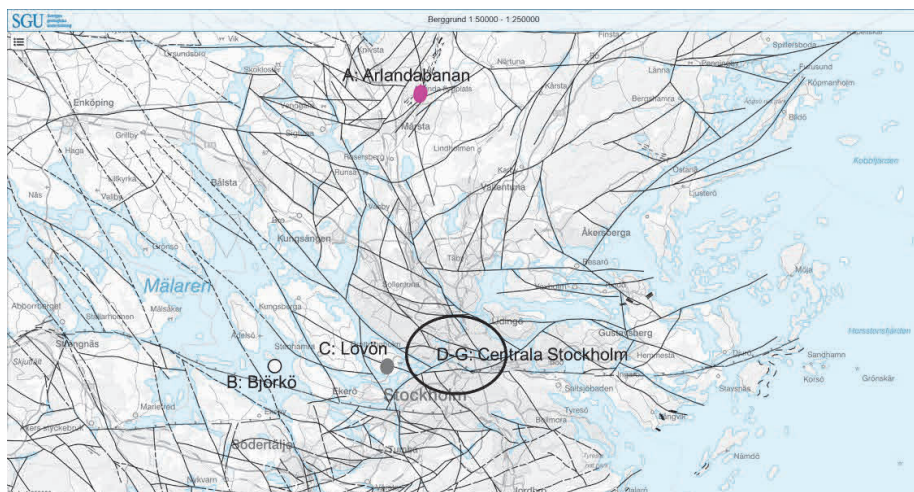
6. ANALYS AV MÄTDATA

Spänningsdata har analyserats dels genom att studera variabilitet och spridning genom statistisk analys och dels med hänsyn till djupberoende. Eftersom det för de flesta bergspänningsmätningar som utförts i Stockholm och Göteborg inte fanns tillräcklig dokumentation för att kunna ranka tillförlitligheten har i fortsatt sammanställning och utvärdering all mätdata använts.

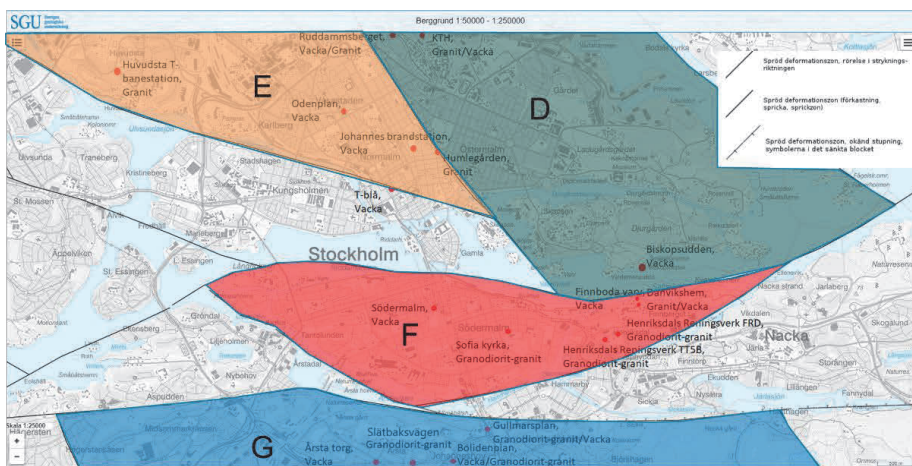
Eftersom det finns få installationer med lyckade mätningar grupperas data från flera mätplatser. Metodiken för gruppering baseras på att:

1. Gruppera platser för mätdata baserat på storskaliga strukturer och deformationszoner (enligt Figur 10 respektive Figur 12).
2. Analysera all mätdata för Stockholm, centrala Stockholm respektive Göteborg tillsammans.

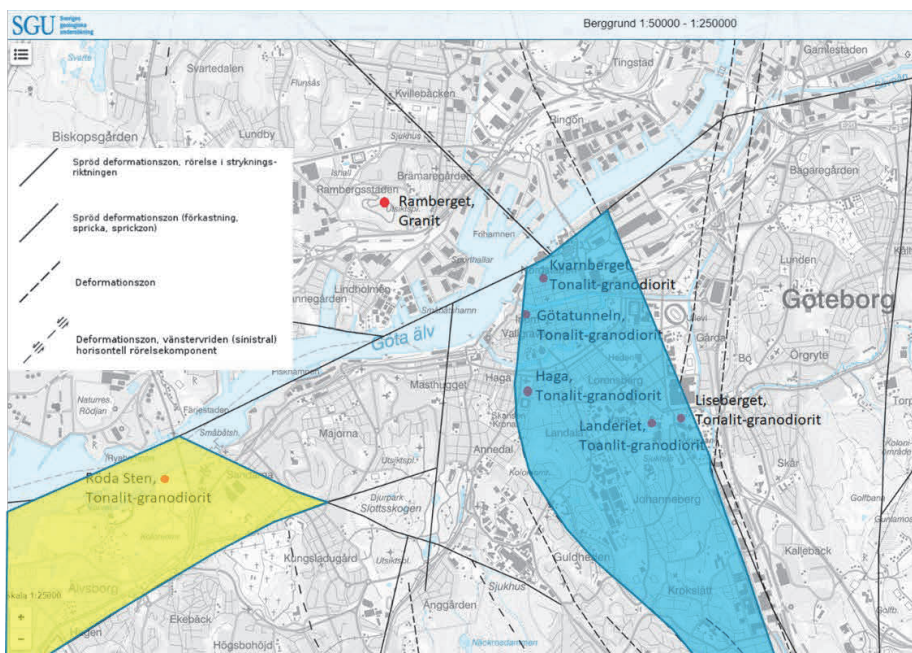
Grupperingen enligt ovan tillämpas för både studien av spridning i mätdata och för bestämning av spänningssamband med djup. Eftersom mätdata grupperas med hänsyn till storskaliga strukturer (Figur 29) särskiljs de yttre delarna av Stockholm (A: Arlandabanan, B: Björkö, C: Lovön) från de centrala delarna (D-G). En översiktsbild över grupperingen av de centrala delarna av Stockholm och deformationszoner visas i Figur 30. Grupperade mätdata med hänsyn till storskaliga strukturer för Göteborg visas i Figur 31. Ytterligare detaljer för grupperna beskrivs i APPENDIX 3.



Figur 29. Gruppering av mätdata i Stockholmsområdet med hänsyn till storskaliga strukturer (modifierad från kartvisare berg SGU, 2021).



Figur 30. Gruppering av områden baserat på deformationszoner i de centrala delarna av Stockholm (modifierad från kartvisare berg SGU, 2021).



Figur 31. Gruppering av områden baserat på deformationszoner i Göteborg (modifierad från kartvisare berg SGU, 2021).

6.1 Kvantifiering av spridning i mätdata

Spridning i spänningsdata analyseras statistiskt med tensormetoden och i enlighet med Gao & Harrison (2018a, 2018b). Tensormetoden kräver som underlag minst sju spänningsmätningar inom ett begränsat djupintervall.

För den statistiska analysen med tensormetoden begränsas mätintervallet i djupled. Mätplatser med mätningar utförda djupare än 100 m inkluderas inte. Variabilitet och spridning i mätdata beräknas, liksom 90% konfidensintervall för spänningstensor enligt metodik beskriven i Gao & Harrison (2018a, 2018b). Resultaten redovisas i spänningsplottar (för magnituder och riktningar). Metodik och resultat från statistisk analys med tensormetoden beskrivs mer utförligt i APPENDIX 4.

6.1.1 Stockholm

De grupperade mätplatserna i Stockholm med hänsyn tagen till deformationszoner, fler än sju mätningar per grupp och mätintervallet 0–100 m, redovisas i Tabell 7. Grupp B (Björkö) som endast har ett mätvärde inom 0–100 m inkluderas inte i den statistiska analysen. Grupp C (Lovön) har färre än sju mätningar på mätplatsen och studeras inte som grupp utan inkluderas i den grupp som inkluderar alla mätdata i Stockholm (grupp H). Mätplats T-blå finns nära en deformationszon och har därför både inkluderats och exkluderats ur grupp E. Mätplats Sofia Kyrka ligger på ett större djup än övriga och har inkluderats och exkluderats ur grupp F. De flesta mätningar (ca. 90 %) är utförda i djupintervallet 0–50 m och ca. 10% av mätningarna i djupintervallet 50–100 m.

Medelvärden för uppmätta huvudspänningar redovisas i Tabell 8. För flertalet grupper är medelvärdet av den största huvudspänningen horisontell eller nära horisontell och den minsta huvudspänningen vertikal. För Grupp A, dvs. mätdata från Arlandabanan, har orienteringen av den största spänningen stor lutning mot horisontalplanet och tillika är vertikalspänningen inte tydligt den minsta huvudspänningen.

Tabell 7. Gruppering av mätdata i Stockholm, baserat på deformationszoner, med mätintervallet 0–100 m, där antalet mätdata per grupp är fler än sju.

Grupp	Mätplats	Djupintervall (m)	Skillnad i djup (max-min) (m)
A	Arlandabanan (Terminal 4 och 5, Cargo City)	9.8–21.4	11.6
B	Björkö	Ej inkluderad	Ej inkluderad
C	Lövön	Färre än sju mätningar	Färre än sju mätningar
D	Biskopsudden	24.2–44.6	20.4
	KTH		
	Ruddammsberget		
E	Humlegården	10.0–65.2 (E)	55.2 (E)
	Huvudsta T-banestation		
	Johannes brandstation	10.0–37.0 ** (E*)	27.0 ** (E*)
	Odenplan		
	T-blå*		
F	Danvikshem	16.4–83.7 (F)	67.3 (F)
	Finnboda Varv		
	Henriksdals Reningsverk	16.4–53.3 *** (F*)	36.9 *** (F*)
	Sofia Kyrka*		
	Södra Latin (Södermalm)		
G	Bolidenplan	11.2–48.3	37.1
	Slätbaksvägen		
	Station Gullmarsplan		
	Årsta torg		
H	Alla mätplatser i Stockholm****	9.8–83.7	73.9
I	Alla mätplatser i centrala Stockholm*****	11.2–83.7	72.5

* Inkluderats och exkluderats ur grupp vid analys.

** T-blå exkluderad ur grupp (E*).

*** Sofia Kyrka exkluderad ur grupp (F*).

**** Grupp A-G (Grupp B (Björkö) exkluderad).

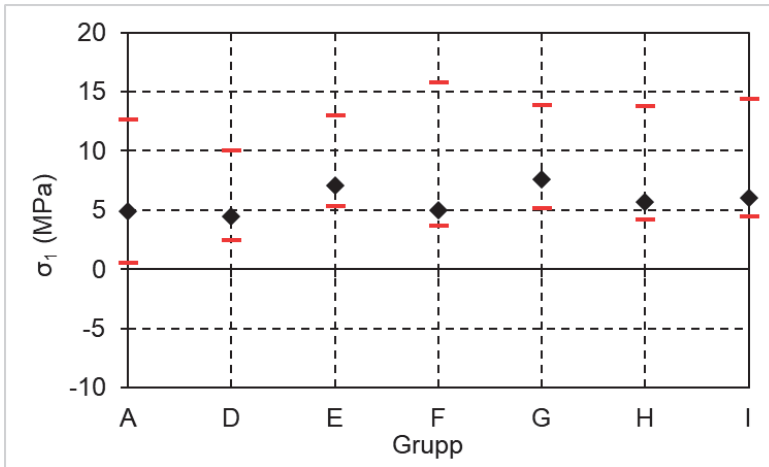
***** Grupp D-G.

Tabell 8. Medelvärden för uppmätta huvudspänningar för respektive grupp (T-blå och Sofia Kyrka är inkluderade i grupperna).

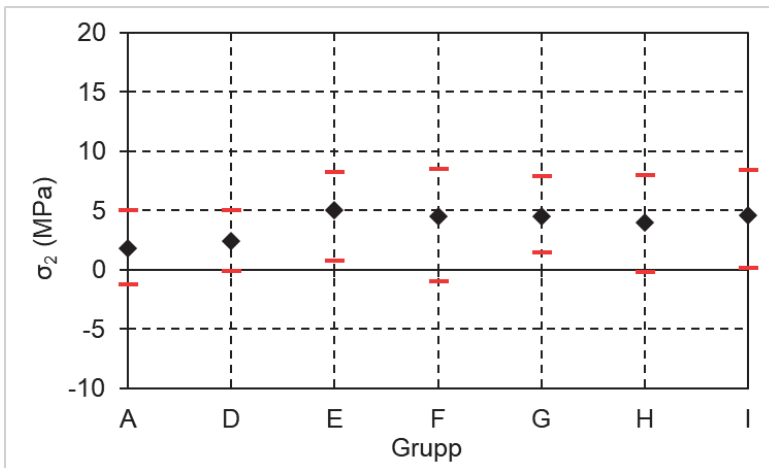
Grupp	σ_1		σ_2		σ_3	
	Magnitud [MPa]	Orientering * [°]/[°]	Magnitud d [MPa]	Orientering * [°]/[°]	Magnitud [MPa]	Orientering * [°]/[°]
A	4.9	138/37	1.8	253/30	1.3	010/39
D	4.4	146/13	2.4	052/17	0.8	272/68
E	7.3	332/17	5.0	239/09	1.9	121/71
F	4.9	133/04	4.5	223/00	2.2	315/86
G	7.6	127/14	4.5	217/02	3.1	313/76
H	5.7	140/06	4.0	049/04	2.4	285/83
I	6.0	137/02	4.6	047/02	2.4	269/88

* Bäring/Stupning

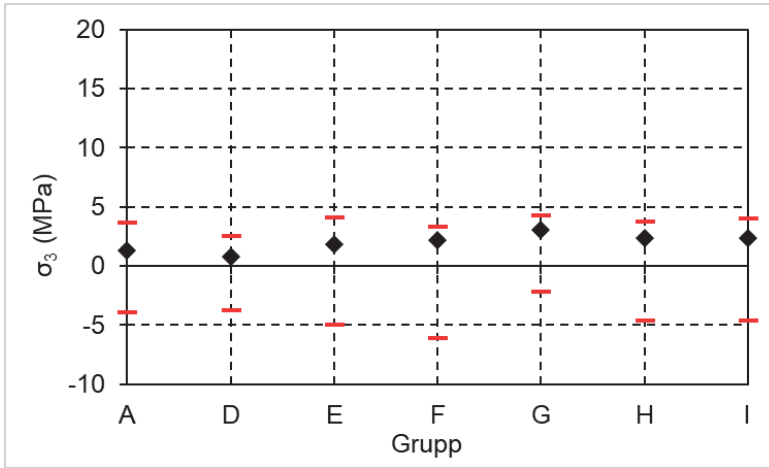
Spridningen av mätdata, med ett 90% konfidensintervall visas för huvudspänningarna i Figur 32, Figur 33 och Figur 34. Grupp A (Arlandabanan) respektive Grupp D (Ruddammsberget, Biskoppsudden och KTH) har en något lägre magnitud på medelvärde samt lägre övre och nedre värde för huvudspänningarna jämfört med övriga grupper. Grupp D (Ruddammsberget, Biskoppsudden och KTH) som innehåller minst antal mätningar (9 st) visar generellt minst spridning av de olika grupperna medan Grupp F (Södra Latin, Henriksdals, Danvikshem, Finnboda Varv, Sofia Kyrka) som innehåller flest antal mätningar (28 st) visar störst spridning mellan högsta och lägsta värde. Grupp H respektive I, som är sammanställda grupper för hela Stockholmsområdet respektive de centrala delarna av Stockholm resulterar i en likvärdig spridning av huvudspänningarna. För grupp E respektive F, som analyserats med och utan T-blå respektive Sofia Kyrka, visar resultaten för huvudspänningarna ingen märkbar skillnad i spridningen i mätdata om mätplatserna inkluderas eller exkluderas, se exempel i Figur 35.



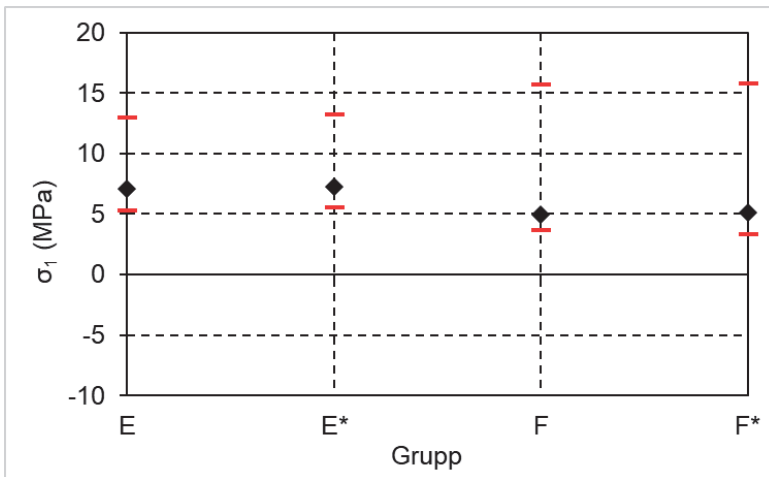
Figur 32. Spridning av mätdata för största huvudspänningen. Magnitud för medelvärde anges med romb och 90% konfidensintervall anges med röda streck.



Figur 33. Spridning av mätdata för intermediära huvudspänningen. Magnitud för medelvärde anges med romb och 90% konfidensintervall anges med röda streck.



Figur 34. Spridning av mätdata för minsta huvudspänningen. Magnitud för medelvärde anges med romb och 90% konfidensintervall anges med röda streck.

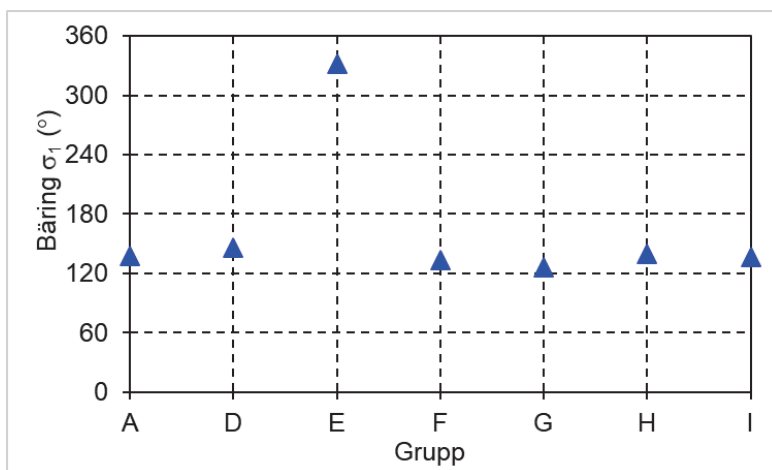


Figur 35. Spridning av mätdata för största huvudspänningen för Grupp E analyserad med och utan mätdata från T-blå och Grupp F analyserad med och utan mätdata från Sofia Kyrka. Magnitud för medelvärde anges med romb och 90% konfidensintervall anges med röda streck.

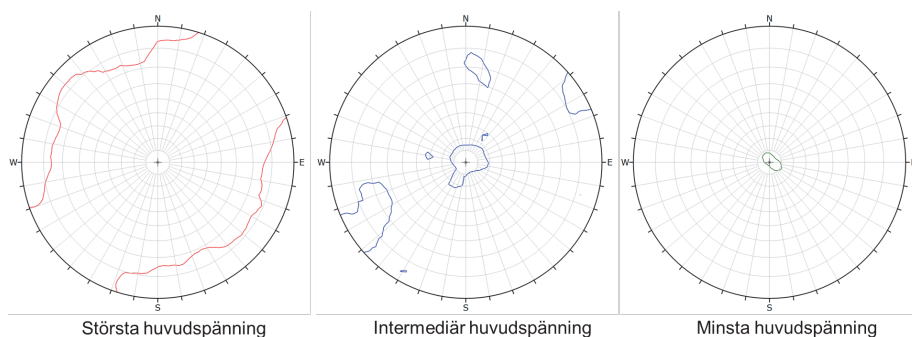
Bäring på största huvudspänningen, med ett 90% konfidensintervall, visas i Figur 36 och är i storleksordningen ca. 130–150° mot norr (grupp E har orienteringen ca. 330° vilket motsvarar samma riktning men där spänningen har en liten stupning åt motsatt håll). Spridningen av orienteringen för huvudspänningarna, med ett 90% konfidensintervall, redovisas genom sfärisk projektion och visas som exempel för Grupp I i Figur 37.

Ytterligare resultat av spridning av orientering av mätdata för övriga grupper visas i APPENDIX 4.

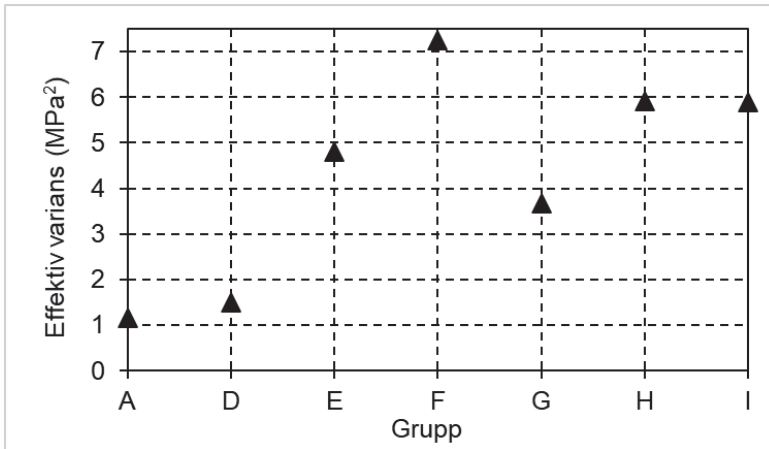
Den effektiva variansen, dvs. måttet på den totala spridningen i mätdata, är störst för Grupp F samt för grupperna med mätdata för hela Stockholmsområdet (H) och de centrala delarna av Stockholm, se Figur 38. Den effektiva variansen för den sammanställda gruppen för de centrala delarna av Stockholm (Grupp I) är lika med den med mätdata från hela Stockholmsområdet (Grupp H). Minsta spridningen mellan mätdata har Grupp A (Arlandabanan) och D (Biskopssudden, KTH och Ruddammsberget). Att inkludera eller exkludera T-blå respektive Sofia Kyrka i grupp E respektive F har ingen stor påverkan på resultatet, se exempel i Figur 39.



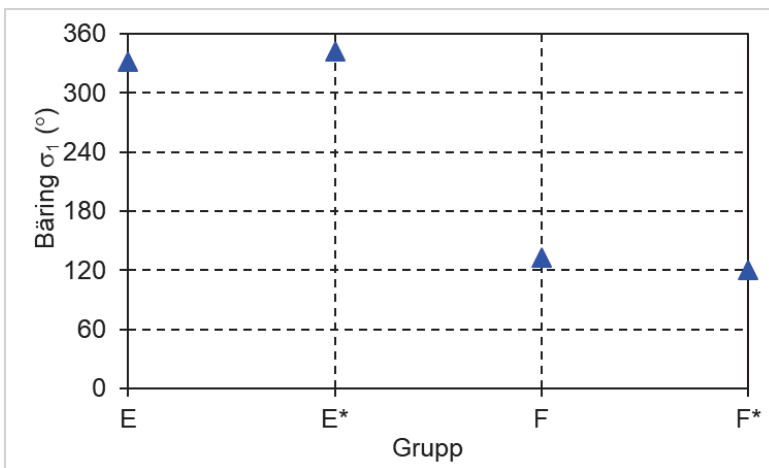
Figur 36. Medelvärde av riktning i horisontalplanet (bäring) för största huvudspänningen för respektive grupp i Stockholmsområdet.



Figur 37. Spridning i orientering av huvudspänningarna för Grupp I (centrala Stockholm).



Figur 38. Effektiv varians för respektive grupp i Stockholmsområdet.



Figur 39. Medelvärde av riktning i horisontalplanet (bäring) för största huvudspänningen för grupp E med och utan (E*) mätdata från T-blå och grupp F med och utan (F*) mätdata från Sofia Kyrka.

Av grupperna i de centrala delarna i Stockholm (Figur 29), så utmärker sig Grupp D med en mindre spridning av mätdata och lägre magnitud på största och intermediära spänningen jämfört med Grupp E, F och G. Grupp F bidrar till den största spridningen av mätdata.

6.1.2 Göteborg

På grund av bristfälliga data har mätdata från mätplatsen Ramberget och Kvarnberget inte inkluderats i de analyser som är utförda för Göteborg. Då mätdata grupperas med hänsyn till storskaliga strukturer fås en gruppering med mätdata (Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet och Korsvägen Liseberget) som uppfyller kravet på minst sju mätningar per grupp. Eftersom de mätningar som utfördes i Götatunneln delvis hade i syfte att studera påverkan av en svaghetszon (Wallroth & Palmqvist, 2014) har grupperingar enligt Tabell 9 analyserats. Sammantaget är djupintervallet för alla mätningar 17.2–70 m. Medelvärden för uppmätta huvudspänningar redovisas i Tabell 10.

Tabell 9. Gruppering av mätdata i Göteborg, baserat på deformationszoner, med mätintervallet 0–100 m, där antalet mätdata per grupp är fler än sju.

Grupp	Mätplats
A	Götatunneln
	Haga
	Korsvägen Landeriet
	Korsvägen Liseberget
A*	Grupp A men Götatunneln exkluderad ur grupp.
B	Alla mätplatser i Göteborg (Grupp A och Röda Sten)
B*	Grupp B men Götatunneln exkluderad ur grupp

Tabell 10. Medelvärden för uppmätta huvudspänningar för respektive grupp.

Grupp	σ_1		σ_2		σ_3	
	Magnitud [MPa]	Orientering ** [°]/[°]	Magnitud [MPa]	Orientering ** [°]/[°]	Magnitud [MPa]	Orientering ** [°]/[°]
A	2.7	283/08	1.6	016/20	1.4	171/68
A*	2.1	285/02	1.1	020/70	0.5	194/20
B	3.2	280/03	1.8	011/14	1.5	178/75
B*	2.4	105/00	1.2	014/69	0.6	195/21

* Götatunneln exkluderad ur grupp.

** Bäring/Stupning

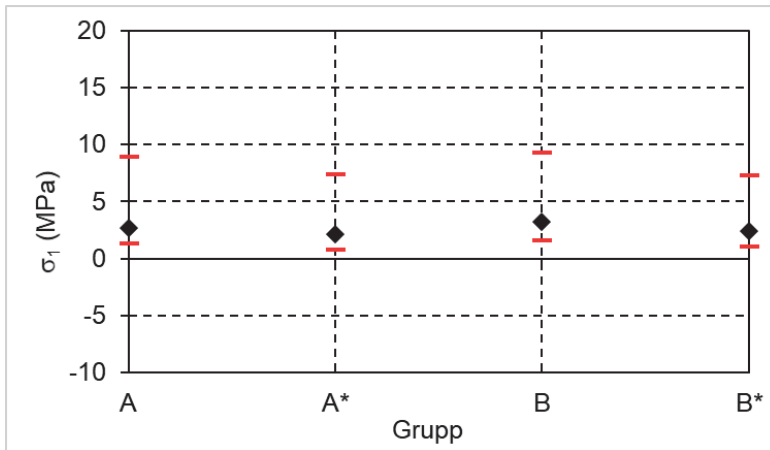
Spridningen av mätdata, med ett 90% konfidensintervall visas för huvudspänningarna i Figur 40, Figur 41 och Figur 42. Mätdata från Götatunneln har en stor påverkan på spridningen i resultaten. Mätdata från Röda Sten bidrar inte till en större spridning i resultat om Grupp A* och B* jämförs.

Bäringen på största huvudspänningen visas i Figur 43 och är i storleksordningen ca. 105° alternativt 285° mot norr. Spridningen i orientering för huvudspänningarna visas för

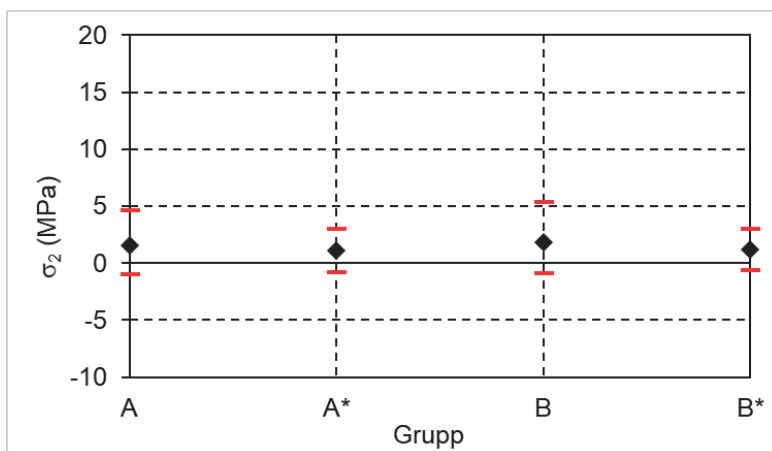
Grupp B* i Figur 44. Ytterligare resultat av spridning av orientering av mätdata för övriga Grupper visas i APPENDIX 4.

Den effektiva variansen, dvs. måttet på den totala spridningen i mätdata, är mellan 1 och 2 enligt Figur 45. Den effektiva variansen är större för de grupper där Götatunneln är inkluderad.

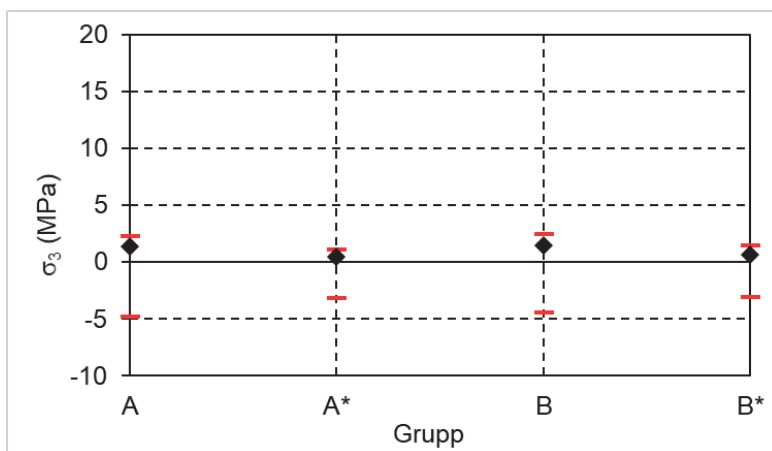
Mätningarna vid Götatunneln hade bl.a. till syfte att bestämma spänningar på olika sidor om en svaghetszon, vilket gör att spänningarna sannolikt inte är representativa för ett större område. I nedan framtagna förslag på spänningsdomän föreslås att mätdata från Götatunneln därför inte inkluderas i en gemensam tolkning.



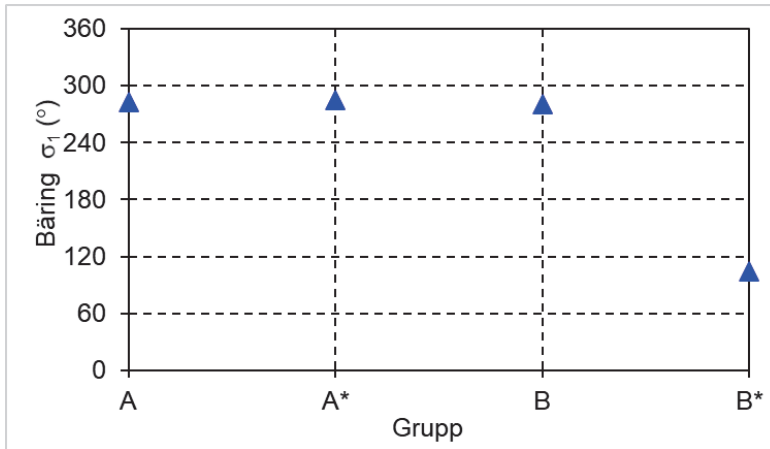
Figur 40. Spridning av mätdata för största huvudspänningen. Magnitud för medelvärde anges med romb och 90% konfidensintervall anges med röda streck.



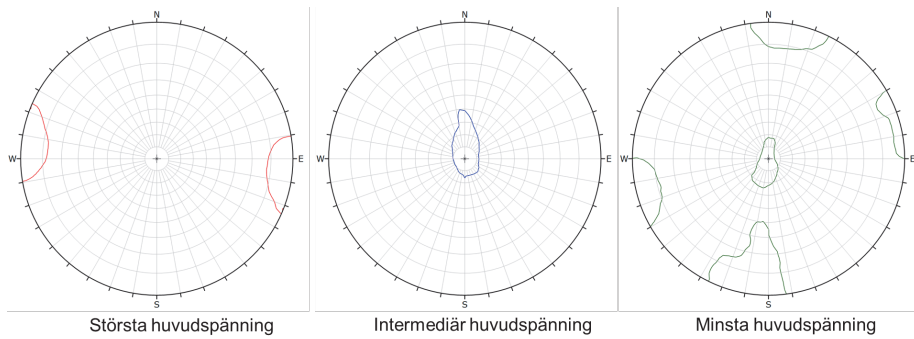
Figur 41. Spridning av mätdata för intermediära huvudspänningen. Magnitud för medelvärde anges med romb och 90% konfidensintervall anges med röda streck.



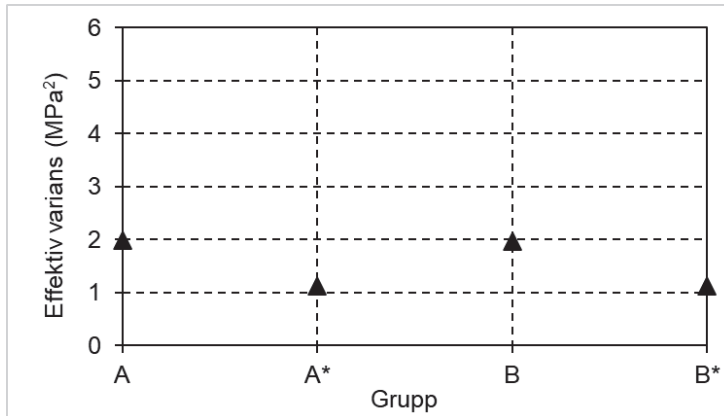
Figur 42. Spridning av mätdata för minsta huvudspänningen. Magnitud för medelvärde anges med romb och 90% konfidensintervall anges med röda streck.



Figur 43. Medelvärde av riktning i horisontalplanet (bäring) för största huvudspänningen för respektive grupp i Göteborgsområdet.



Figur 44. Spridning i orientering för huvudspänningarna i Grupp B* (Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget och Röda Sten).



Figur 45. Effektiv varians för respektive grupp i Göteborgsområdet.

6.2 Spännings samband med djup

Tolkning av spännings samband med djup har utförts för olika grupper av mätningar. För att ta fram spännings samband för ett antal mätningar har följande antaganden gjorts:

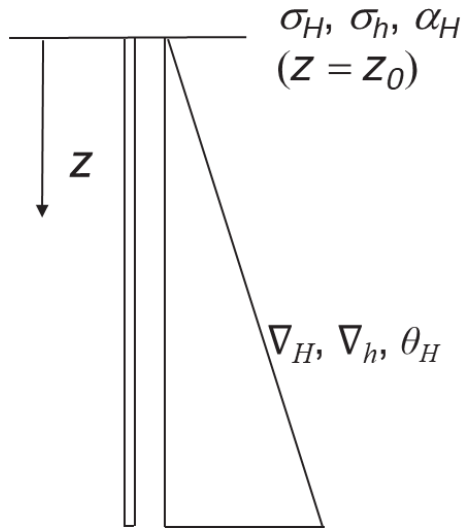
- linjär variation med djup,
- den vertikala spänningen är en huvudspänning,
- den vertikala spänningen är gravitativ, $\rho g z$,
- största horisontalspänning är alltid större än eller lika med minsta horisontalspänning,
- om en komponents (σ_H eller σ_h) gradient är negativ används samma komponents (σ_H eller σ_h) gradient från spännings sambandet för alla mätningar (lösning B1),
- om spänningarna vid markytan är negativa låses spänning vid markytan till noll, dvs inga dragspänningar tillåts (lösning B2).

Modellen som används består av sex parametrar (se även Figur 46):

- σ_H största horisontalspänning vid markytan;
- σ_h minsta horisontalspänning vid markytan;
- α_H orientering på största horisontalspänning vid markytan;
- ∇_H gradient på största horisontalspänning;
- ∇_h gradient på minsta horisontalspänning och
- θ_H rotation med djup för största horisontalspänning.

Beräkning sker av spänningstensorn vid mätningarnas djup som en funktion av de sex parametrarna. En felfunktion mellan de uppmätta och beräknade spänningarna används. Minimering av felfunktionen görs varvid de sex parametrarna kan bestämmas.

Resultaten från varje grupp sammanfattas under respektive område. Alla resultat visas i APPENDIX 5.



Figur 46. Parametrar som för spänningssamband med djup.

6.2.1 Stockholm

Vid beräkning av spänningssambanden erhöles för många fall en negativ spänning vid markytan, varpå lösning B2 nyttjades, där spänning vid markytan sattes till 0. Några spänningsgradienter blev negativa, och lösning B1 med gradienten från grupp H (alla mätningar i Stockholm) nyttjades. Tabellerad sammanställning av spänningssamband visas i Tabell 11. För minsta horisontalspänning har grupp D det spänningssamband som har lägst spänningar.

Tabell 11. Spänningssamband för mätningar i Stockholm.

Grupp	Mätplats	σ_H [MPa]	σ_h [MPa]	α_H [°]
A	Arlandabanan (Terminal 4 och 5, Cargo City)	$3.5 + 0.084 z^{B1}$	$0.080 z^{B2}$	132
B	Björkö (0–900 m)	$9.7 + 0.025 z$	$4.4 + 0.016 z$	140
C	Lövön	$7.2 + 0.076 z$	$0.1 + 0.055 z$	148
D	Biskopsudden	$2.1 + 0.084 z^{B1}$	$0.039 z^{B2}$	148
	KTH			
	Ruddammsberget			
E	Humlegården	$5.6 + 0.084 z^{B1}$	$1.6 + 0.045 z^{B1}$	151
	Huvudsta			
	Johannes brandstation			
	Odenplan			
	T-blå			
F	Danvikshem	$1.1 + 0.117 z$	$0.075 z^{B2}$	090
	Finnboda Varv			
	Henriksdals reningsverk			
	Sofia Kyrka			
	Södra Latin (Södermalm)			
G	Bolidenplan	$5.9 + 0.053 z$	$2.1 + 0.045 z^{B1}$	128
	Slätbaksvägen			
	Station Gullmarsplan			
	Årsta torg			
H	Alla mätplatser i Stockholm *	$3.5 + 0.084 z$	$2.5 + 0.045 z$	132
I	Alla mätplatser i centrala Stockholm **	$3.6 + 0.080 z$	$3.2 + 0.035 z$	132

* Grupp A-G (Grupp B (Björkö) exkluderad).

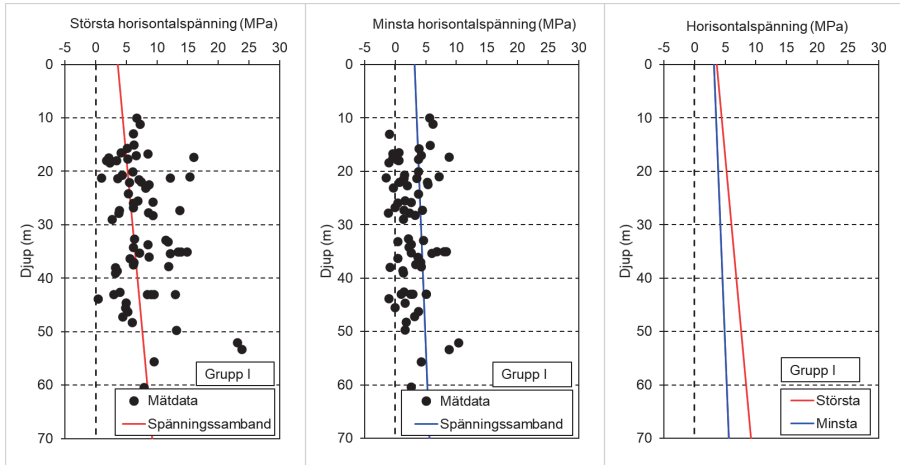
** Grupp D-G.

^{B1} Gradient från alla data (Grupp H).

^{B2} Spänning vid markytan begränsad till noll.

Att inkludera eller exkludera mätningar från T-blå, vilket studerades för grupp E, gjorde stor skillnad på gradienten för största horisontalspänning och viss skillnad på konstanten för minsta horisontalspänning. För största horisontalspänning, och för fallet då mätdata från T-blå exkluderas, blir gradienten 0 och därför väljs att inkludera T-blå.

Exempel på slutliga spänningssamband tillsammans med resultat från enskilda mätningar visas för Grupp I, dvs. de centrala delarna av Stockholm, i Figur 47. Samtliga spänningssamband för alla grupper tillsammans med mätdata visas i APPENDIX 5.



Figur 47. Spänningssamband med djup för Grupp I (centrala Stockholm). Spänningssamband är $\sigma_H = 3.6 + 0.080 z$ respektive $\sigma_h = 3.2 + 0.035 z$.

6.2.2 Göteborg

Vid beräkning av spänningssambanden erhöles för de flesta fall en negativ spänning vid markytan, varpå lösning B2 nyttjades, där spänning vid markytan sattes till 0.

Beräkningar utfördes för fall där Götatunneln inkluderas (Grupp A) eller exkluderas (Grupp A*) vilket gav stor skillnad i gradienten för både största och minsta horisontalspänning. Även beräkningar där Röda Sten inkluderas (Grupp B) eller exkluderas (Grupp A) utfördes, vilket även det gav stor skillnad i gradienten för största horisontalspänning, men ganska liten skillnad för minsta horisontalspänning. För största horisontalspänning blev skillnaden försumbar mellan grupperna A* och B*, dvs. där Röda Sten inkluderades eller exkluderades samt Götatunneln exkluderats, men skillnaden för minsta horisontalspänning blev stor.

Tabellerad sammanställning av spänningssamband för Göteborg presenteras i Tabell 12. För orienteringen på största horisontalspänning var det ingen skillnad på de olika grupperna, utan alla visade på 103° orientering. Spänningssamband tillsammans med mätdata för Grupp B* (Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget samt Röda Sten) visas i Figur 48.

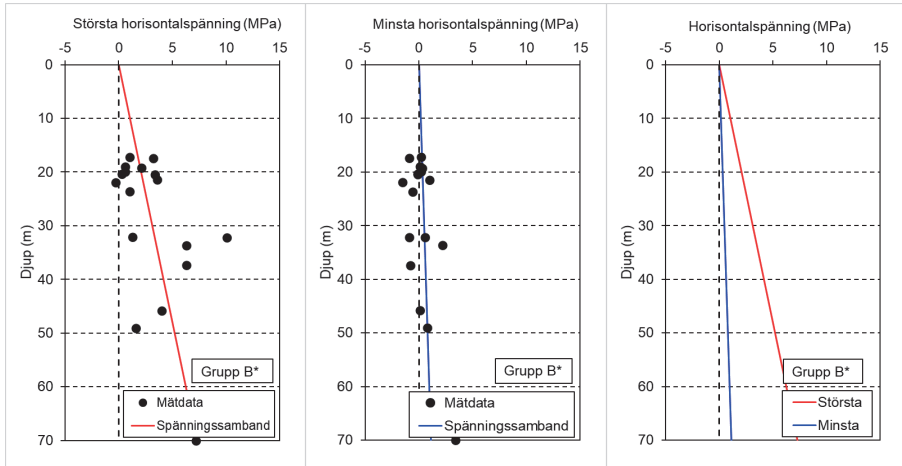
Tabell 12. Spännings samband för mätningar i Göteborg.

Grupp	Mätplats	σ_H [MPa]	σ_h [MPa]	α_H [°]
A	Götatunneln	0.137 z^{B2} 0.105 z^{B2} *	0.025 z^{B2} 0.004 z^{B2} *	103 103 *
	Haga			
	Korsvägen Landeriet			
	Korsvägen Liseberget			
B	Alla mätplatser **	0.1 + 0.090 z 0.104 z^{B2} *	0.031 z^{B2} 0.016 z^{B2} *	103 103 *

* Götatunneln exkluderad ur grupp.

** Grupp A och Röda Sten.

B^2 Spänning vid markytan begränsad till noll.



Figur 48. Spännings samband med djup för Grupp B* (alla mätplatser förutom Götatunneln). Spännings samband är $\sigma_H=0.104 z$ respektive $\sigma_h=0.016 z$.

7. SPÄNNINGSDOMÄNER

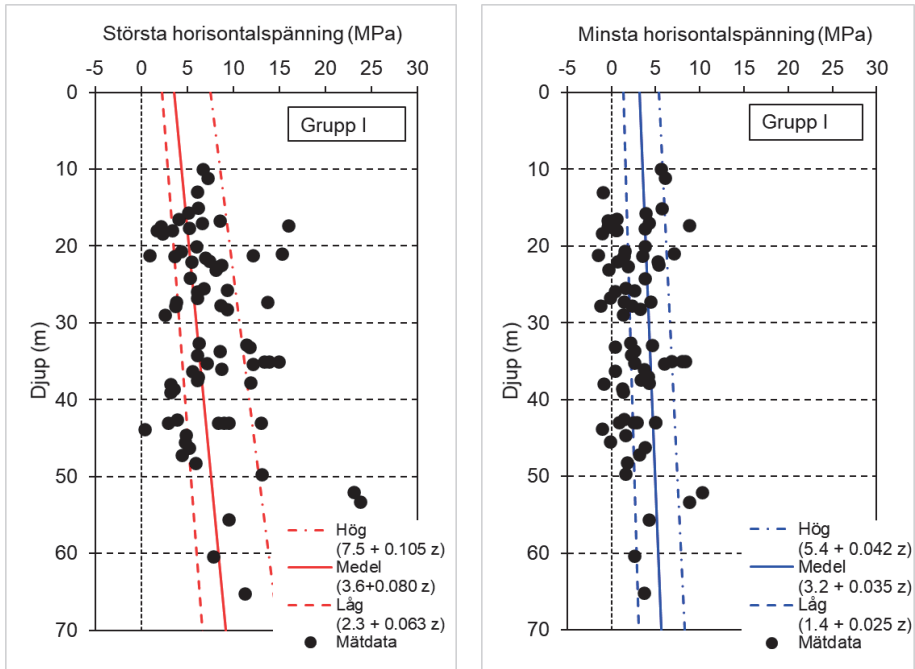
Vid bestämning av spänningsdomäner och samband har mätdata studerats med avseende på spridning, giltighet och representativitet i relation till geologi och strukturgeologiska förhållanden. Mätdata har analyserats dels uppdelade i grupper med hänsyn till deformationszoner och dels tillsammans. Sättet att analysera har gett möjligheten att studera respektive grupp separat och tillsammans.

De framtagna spänningssambanden i kapitel 6.2 motsvarar typvärden för alla mätningar i respektive grupp. För att ta fram konfidensintervall för spänningssamband har standardavvikelsen för skillnad i magnitud mellan uppmätt spänning och beräknad enligt typspänningssamband använts. Gränser för konfidensintervallet har beräknats genom beräknad magnitud på typspänning ± 1.65 standardavvikelse (vilket motsvarar 90% konfidensintervall för skillnaden mellan uppmätt och beräknad spänning). Spänningssamband för höga respektive låga värden har bestämts genom linjär regression av de övre respektive undre gränserna för detta intervall. Detta tillvägagångssätt ger ett snävare spänningsintervall för respektive komponent än om alla indata hade inkluderats, och en ingenjörsmässigt bättre anpassning.

7.1 Stockholm

Baserat på studien av spridning av data och i relation till deformationszoner visar resultat för spridning av mätdata vid mätplatserna för Arlandabanan en lägre magnitud jämfört med spridningen av mätdata för hela respektive centrala Stockholm. Om spridning av mätdata för hela eller centrala Stockholm används för nya undermarkskonstruktioner utanför de centrala delarna finns därmed en risk för en alltför konservativ dimensionering. Mätdata från respektive mätplats vid Björkö, Lovön och Arlanda föreslås därför utgöra lokala spänningsdomäner för dessa mätplatser och deras närområde. Exempelvis är mätningarna på Björkö med stor sannolikhet påverkade av den lokala geologin i området (som utgör en nedslagsplats för en meteorit). För projekt utanför de centrala delarna av Stockholm rekommenderas därför att nya lokala bergspänningsmätningar utförs i syfte dimensionera undermarkskonstruktionen för det lokala spänningsfältet, och att nedan redovisade samband inte används.

En gemensam spänningsdomän har tagits fram för de centrala delarna i Stockholm (dvs. Grupp I). Typvärden för horisontalspänningarna för spänningsdomän centrala Stockholm (Grupp I) baseras på typsambandet för spänningen enligt kapitel 6.2.1. Gränser för höga och låga värden för spänningssambanden visas i Figur 49 tillsammans med mätdata. Precis som mätdata visar kan spänningen lokalt vara både högre och lägre än de föreslagna spänningssamband.



Figur 49. Spännings samband för Grupp I (centrala Stockholm).

Baserat på både regional och lokal spänningsdata är det rimligt att anta att riktningen på största huvudspänningen för Stockholmsområdet är ca. $130\text{--}150^\circ$. Det antas att det inte är dragspänningar vid markytan samt att horisontalspänningarna inte är lägre än ett gravitativt spänningsfält, dvs. $\nu/(1-\nu)*\sigma_v$. Detta motsvarar ca. $0.009 z$ eller 0.9 MPa vid 100 m djup vid antagande att densiteten $\rho=2650 \text{ kg/m}^3$ och tvärkontraktionstalet $\nu=0.25$. För vertikalspänningen kan man på goda grunder anta att den primärt är beroende på tyngden av ovanliggande berg. En uppskattad spridning på ca 20% har antagits för att ta fram höga och låga gränsvärden för denna komponent.

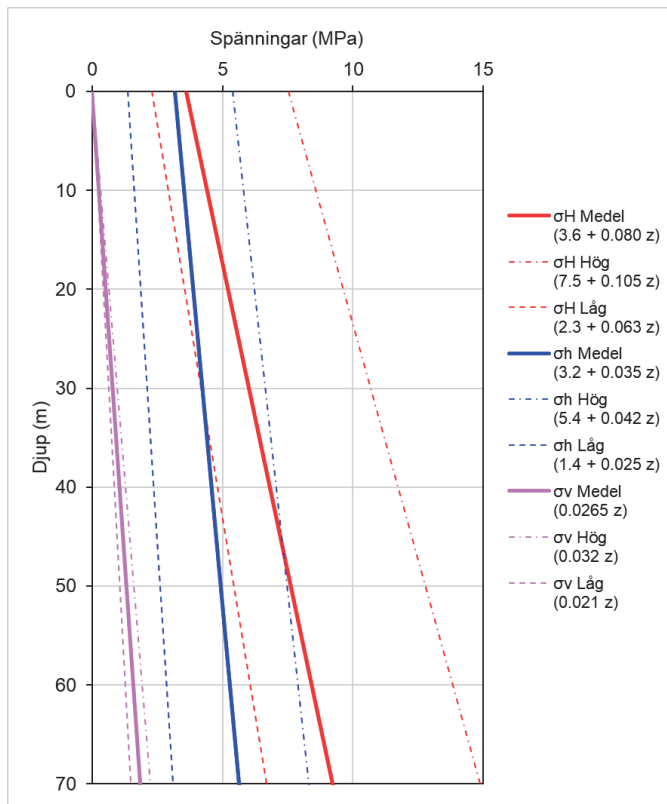
Spännings sambandet för domänen centrala Stockholm, presenteras i Tabell 13 och i Figur 53. Det framtagna spännings sambandet ska tolkas varje komponent för sig, där varje komponent kan vara mellan låg och hög, men inte är direkt kopplade till de andra komponenterna (gäller även riktning), samtidigt kan inte minsta horisontalspänning vara högre än största horisontalspänning. (Som exempel vid 20 meters djup och om σ_H är medel så kan σ_h vara låg eller medel och σ_v låg till hög och riktningen $130\text{--}150^\circ$ (låg till hög); på djupet 60 meter och om σ_H är medel kan σ_h och σ_v anta värden mellan låg till hög och riktningen $130\text{--}150^\circ$).

Spänningssambanden kan användas som en del i en känslighetsstudie i tidigt skede av byggprocessen, innan mätning utförs. Om den framtida bergkonstruktionen ligger nära en av de tidigare utförda mätplatserna så bör information från denna mätning primärt användas. I centrala Stockholm kan framtaget spänningssamband Tabell 13 annars nyttjas.

Tabell 13. Spänningssamband för Stockholm.

	σ_H [MPa]	σ_h [MPa]	σ_v	α_H [°]*
Låg	$2.3 + 0.063 z$	$1.4 + 0.025 z$	$0.021 z$	130
Typvärde (medelvärde)	$3.6 + 0.080 z$	$3.2 + 0.035 z$	$\rho g z$	140
Hög	$7.5 + 0.105 z$	$5.4 + 0.042 z$	$0.032 z$	150

* Observera att riktning, precis som övriga komponenter, inte är direkt kopplade till de andra komponenterna.

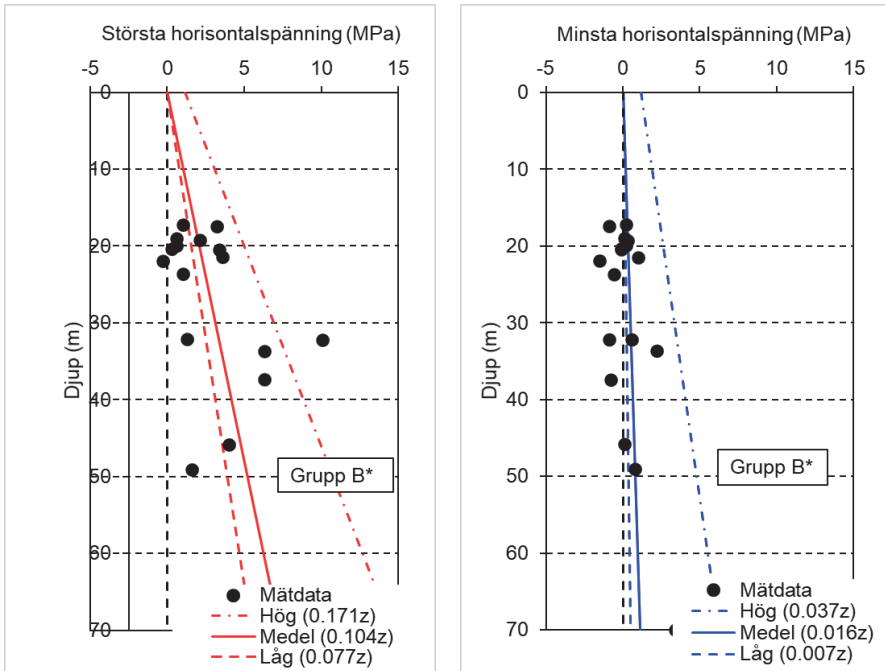


Figur 50. Spänningssamband för Stockholm (Grupp I centrala Stockholm).

7.2 Göteborg

Baserat på resultaten från spridning av mätdata för Göteborgsområdet så inkluderas inte Götatunneln i en gemensam spänningsdomän. Att inkludera mätdata från Röda Sten bidrog inte till en ökad spridning i resultaten. Sammanställningen från spridning av mätdata gav att en orientering på 80–115° (se också APPENDIX 4) kan antas för största huvudspänningen.

Typvärden för huvudspänningarna för spänningsdomän Göteborg (Grupp B*) baseras på den mest troliga spänningen enligt kapitel 6.2.1. Gränser för låga och höga spänningssamband visas i Figur 54 tillsammans med mätdata.



Figur 51. Spännings samband för Grupp B*, Göteborg.

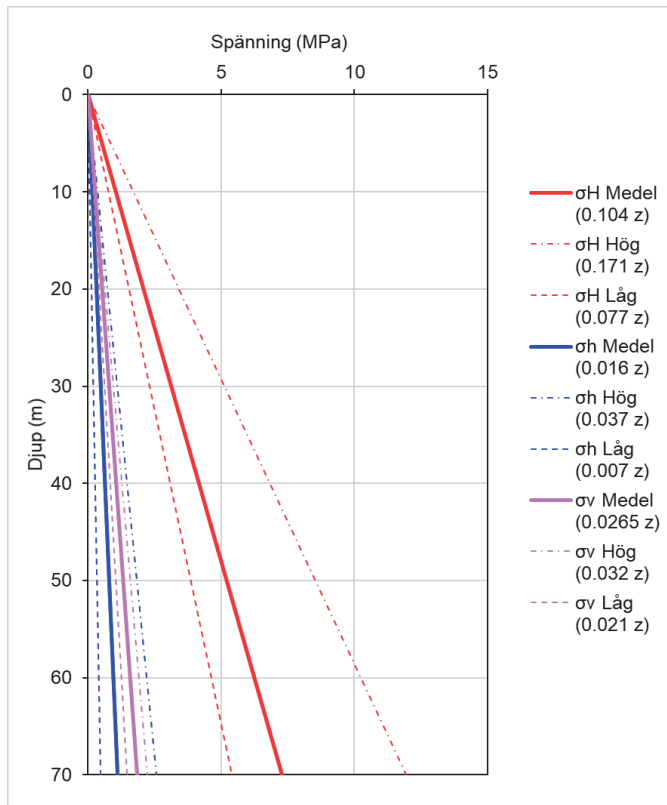
Spännings sambandet för domänen Göteborg presenteras i Tabell 14 och i Figur 58. Både största och minsta horisontalspänningen är låg för de mätningar som utförts i Göteborg. Om den framtida bergkonstruktionen ligger nära en av de tidigare utförda mätplatserna så bör information från den primärt användas. Baserat på variationer i den lokala topografin tillsammans med bitvis omfattande jorddjup så bör bergspänningsmätningar utföras och rankas vid framtida projektering där lokal topografi och jorddjup antas ha stor påverkan på den blivande konstruktionen. För bergkonstruktioner bedömda med hög risk och som kan leda till allvarlig konsekvens rekommenderas särskilt att nya bergspänningsmätningar utförs. De framtagna spännings sambanden ska tolkas varje

komponent för sig, där varje komponent kan vara mellan låg och hög, men inte är direkt kopplade till de andra komponenterna. Minsta horisontalspänning kan inte vara högre än största horisontalspänning. Minsta horisontalspänning kan inte heller vara lägre än gravitativt spänningsfält.

Tabell 14. Spännings samband för Göteborg.

	σ_H [MPa]	σ_h [MPa]	σ_v	α_H [°]*
Låg	$0.077 z$	$0.007 z$	$0.021 z$	080
Typvärde (medelvärde)	$0.104 z$	$0.016 z$	$\rho g z$	103
Hög	$0.171 z$	$0.037 z$	$0.032 z$	115

* Observera att riktning, precis som övriga komponenter inte är direkt kopplade till de andra komponenterna.



Figur 52. Spännings samband för Göteborg (Grupp B* utan Götatunneln).

8. DISKUSSION

Rankning av mätdata baseras på metodik för att bedöma tillförlitlighet från *LVDT*-mätning (Siren & Hakala, 2018). I denna studie var inte all information tillgänglig och beskriven för att kunna bedöma tillförlitlighet på mätdata från alla utförda mätningar. Om endast högt rankad mätdata inkluderats i studien hade underlaget för statistisk analys inte varit tillräckligt. Alla mätningar är därför medtagna eftersom det, baserat på tillgänglig information, inte går att avgöra om några data ska exkluderas. Viss teknikutveckling och kvalitetsgranskning har medfört en högre tillförlitlighet för själva tekniken. Olika ålder på utförda mätningar och mätutrustning som använts (ex. *Borre*, *Borre II*, *Borre III*) gör troligen att det blir större spridning på mätdata. Information saknas från äldre mätningar. För Huvudsta T-banestation utfördes mätningarna med den första versionen av *Borre*, vilket tillsammans med att mätreporten inte kunnat hittats medför att tillförlitligheten till dessa data är låg. Mest tillförlitliga är generellt de mätningar som gjorts med nyare mätutrustning, och särskilt *LVDT*-mätningarna, men för dessa krävs tillgång till en existerande tunnel. De mätningar som utfördes längre tillbaka hade förmodligen sämre teknik och är därmed inte lika tillförlitliga, även om det inte kan verifieras fullt ut.

För framtagna rankning med *LVDT*-metoden finns uppsatta kriterier som bedöms innan och under själva borringen. Motsvarande föreslås utvecklas och förtydligas för överborrings- och hydrauliska metoder. För de flesta mätreporter finns temperaturkurvor och kalibreringar utförda som jämförts mot projektspecifikt uppsatta krav. Rankning av mätdata går därmed att förfinas och utveckla ytterligare med hänsyn till kriteriet och kravställande för själva utförandet och borringen.

För de lokala platser där bergspänningsmätningar har utförts på, har inget omfattande jorddjup angetts vare sig för Stockholm eller Göteborg. Det antas därmed att utförda bergspänningsmätningar inte är markant påverkade av omfattande jorddjup. De platser där bergspänningsmätningar har utförts på i Stockholm och Göteborg, antas generellt inte vara påverkade av kraftiga höjdskillnader och topografi. Det bör dock poängteras att mätningen på Södermalm utfördes på en höjd och med flera tunnlar och bergutrymmen i nära anslutning till mätningarna. Detta kan, åtminstone delvis, förklara varför spridningen på orienteringar och magnituder är stor för dessa mätningar. Mätningarna på Slätbaksvägen var belägna på en bergknalle vilket kan vara skälet till att uppmätta spänningsmagnituder är låga i dessa mätpunkter.

För flertalet av de utförda mätningarna hade det varit intressant med z-nivåer (möh) för att kunna göra tydligare koppling mot eventuell påverkan från topografi. För framtida bergspänningsmätningar rekommenderas att positionen av utförd mätning även anges i meter över havsnivå.

Statistisk analys med tensormetoden har fungerat bra för att studera spridning i mätdata. Däremot tar den statistiska analysen ej hänsyn till djup och fungerar därför mindre bra att använda för ett större djupintervall.

Spänningssamband med djup fungerar bra för att ta fram spänningssamband, men är inte helt korrekt, eftersom inte spänningstensorn ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$) används, utan förenklas till horisontal- och vertikalspänningar, gradienter och rotation.

I detta arbete har uppdelningar av mätdata i domäner baserats på deformationszoner. För Stockholm hade det varit intressant att göra en analys där mätningar delas upp i mätmetoder för att kunna svara mer konkret på om olika mätmetoder ger olika svar. Ett annat alternativ är att genomföra motsvarande studie men att också separera mätdata baserat på äldre och ny data.

9. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Alla mätdata har sammanställts i en gemensam databas. Tidigare studier av spänningar i Stockholm och Göteborg har beskrivits kortfattat tillsammans med information om regionala spänningsdata och geologi. Framtagna rankningskriterier i arbeten för SKB och Posiva har förfinats, anpassats och beskrivits för detta projekt. Tillförlitligheten av mätdata har bedömts genom framtagna rankningskriterier. I denna studie var inte all information tillgänglig och beskriven för att kunna bedöma tillförlitlighet på mätdata från alla utförda mätningar. Det i sig betyder inte att mätningarna är "dåliga" eller inte tillförlitliga utan att tillgänglig information inte uppfyller de krav på dokumentation som ställs i genomförd rankning. För framtida bergspänningsmätningar och för att kunna uppfylla rankningskriterierna föreslås en mer tydlig dokumentation och kvalitetskontroll vid mätningar enligt följande:

- Dokumentation av borrhävar eller mätsektion, såsom beskrivande geologisk text, information om sprickor och foton.
- Redovisade mätkurvor (ex. töjningskurvor, biaxialtest, temperaturkurvor).
- Redovisade mätresultat (ex. UCS).
- Positionen av utförd mätning anges i koordinater samt djup under jord- och bergyta och i meter över havsnivå.

Det kan noteras att nyligen utförda mätningar vanligen uppfyller ovan krav på redovisning och kvalitetskontroll.

Spridning av spänningsdata har analyserats statistiskt med tensormetoden som kräver ett underlag på minst sju spänningsmätningar inom ett begränsat djupintervall. Geologi i form av storskaliga strukturer och deformationszoner har nyttjats för att gruppera mätdata. Baserat på den statistiska analysen anses effektiv varians vara en lämplig parameter för att visa spridning av mätdata, och vilken kan nyttjas för att jämföra mellan mätplatser och/eller mätnivåer. Den effektiva variansen för grupperat mätdata i Göteborg indikerar en relativt liten spridning. Den effektiva variansen för grupperat mätdata i Stockholm indikerar en relativt stor spridning.

Baserat på både regionala och lokala spänningsdata är det rimligt att anta att riktningen på största huvudspänningen för Stockholmsområdet är i ca. 130–150°. Orienteringen på största horisontalspänning i Göteborg bedömdes med hänsyn till främst lokala mätdata ha orienteringen 80–115°.

Tolkning av spänningssamband med djup har resulterat i flertalet tabellerade spänningssamband som motsvarar typvärdet. För mätdata från de centrala delarna av Stockholm (Grupp I) samt för alla mätdata (Grupp B*) i Göteborg (exklusive Götatunneln) har gränser för höga och låga spänningssamband tagits fram.

Spänningssambandet för domänen centrala Stockholm presenteras i Tabell 15 och motsvarande samband för domänen Göteborg presenteras i Tabell 16. Det framtagna spänningssambandet ska tolkas varje komponent för sig, där varje komponent (även riktning) kan vara mellan låg och hög, men inte är direkt kopplade till de andra komponenterna. Minsta horisontalspänning kan inte vara högre än största horisontalspänning. Minsta horisontalspänning kan aldrig vara lägre än gravitativt spänningsfält ($\sigma_v \cdot \nu/(1-\nu)$).

Tabell 15. Spänningssamband för Stockholm.

	σ_H [MPa]	σ_h [MPa]	σ_v	α_H [°]*
Låg	$2.3 + 0.063 z$	$1.4 + 0.025 z$	$0.021 z$	130
Mest trolig (medelvärde)	$3.6 + 0.080 z$	$3.2 + 0.035 z$	$\rho g z$	140
Hög	$7.5 + 0.105 z$	$5.4 + 0.042 z$	$0.032 z$	150

* Observera att riktning, precis som övriga komponenter inte är direkt kopplade till de andra komponenterna.

Tabell 16. Spänningssamband för Göteborg.

	σ_H [MPa]	σ_h [MPa]	σ_v	α_H [°]*
Låg	$0.077 z$	$0.007 z$	$0.021 z$	080
Mest trolig (medelvärde)	$0.104 z$	$0.016 z$	$\rho g z$	103
Hög	$0.171 z$	$0.037 z$	$0.032 z$	115

* Observera att riktning, precis som övriga komponenter inte är direkt kopplade till de andra komponenterna.

Mätning av bergspänningar rekommenderas som utgångspunkt vid dimensionering av undermarkskonstruktioner i berg. Mätning ska alltid utföras för bergkonstruktioner med bedömd hög risk och allvarlig konsekvens. I tidigt skede, och innan mätning utförs, bör en känslighetsstudie genomföras. Hänsyn bör tas till följande:

- Tidigare utförda mätningar som är nära den framtida konstruktionen.
- I centrala Stockholm kan framtaget spänningssamband enligt Tabell 15 användas.
- I Göteborg kan framtaget spänningssamband enligt Tabell 16 användas.

Om det inte är praktiskt möjligt att utföra mätningar (med befintliga metoder, alternativt p.g.a. yttre restriktioner), kan befintlig sammanställd data användas. I dessa fall måste bland annat följande beaktas vid val av spänningssamband:

- Lokal topografi och jorddjup.
- Svaghetszoner, storskaliga strukturer.
- Skillnader i bergmassans hållfasthet.

Om spridning av mätdata för hela eller centrala Stockholm används för nya undermarks-konstruktioner utanför de centrala delarna, finns en risk för en alltför konservativ dimensionering. Mätdata från respektive mätplats vid Björkö, Lovön och Arlanda föreslås därför utgöra lokala spänningsdomäner för dessa mätplatser och deras närområde. För projekt utanför de centrala delarna av Stockholm rekommenderas därför att nya lokala bergspänningsmätningar utförs i syfte att dimensionera undermarksstrukturen för det lokala spänningsfältet.

10. REFERENSER

- Andersson, U. B. & Swindell, R. 2008. Engineering geology along the planned northern stretch of the City Line (Citybanan) tunnel system, north-central Stockholm, Sweden. *33rd International Geological Congress*, Oslo, Abstract nr: 1346486.
- Ask, D. 2003. *Hydraulic rock stress measurements in borehole BJO01, Björkö island, lake Mälaren, Sweden*. KTH, Stockholm.
- Ask, D. 2004. *New developments of the integrated stress determination method and application to the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden*. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden.
- Ask, D. 2013. *Hydrauliska bergspänningsmätningar i borrhål 08F151K, Lovön, Stockholm*.
- Ask, D. 2016. *Spänningsmätning med överborrningsteknik, Sofia kyrka - Förundersökning Tunnelbana*.
- Ask, D. 2020. *Bergspänningsmätning med överborrningsteknik, borrhål 20A301K, Lovön, Förbifart Stockholm*.
- Ask, D. 2018a. *Bergspänningsmätning med överborrningsteknik, borrhål HH4235KBH, Haga, Västlänken*. Trafikverket PM MPU02-17-550-05-0001.
- Ask, D. 2018b. *Bergspänningsmätning med överborrningsteknik, borrhål KK4207KBH, Korsvägen, Västlänken*. Trafikverket PM MPU02-17-550-07-0001.
- Ask, D. 2018c. *Bergspänningsmätning med överborrningsteknik, borrhål KK4222KBH, Korsvägen, Västlänken*. Trafikverket PM MPU02-17-550-07-0002.
- Baird, A. 2005. Personlig kommunikation.
- Berg, S. & Sjöberg, J. 2007. *Bergspänningsmätning i borrhål KBOD3, Odenplan*. Vattenfall Power Consultant AB.
- Bäckström, A. & Chang, Y. 2020. *Study on correlations between rock stresses and major fault zones*. BeFo Report 174, Stockholm 2020, ISSN 1104-1773.
- Chang, Y. 2007. *Uppskattning av initiala bergspänningar med hjälp av linjär regression*. 0237-CT13-080-CT2_bil02, 2007-01-31. WSP.
- Dahlström, L-O. & He, J. 1992. *Interpretation of in-situ stresses at the Röda Sten Rock Laboratory (RSRL)*. Research Report RRI:2, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Ek, M. & Nilsson, C. J. 1996. *Bestämning av tangentialspänningar i bergrumsvägg. Mätning och analys av spänningar kring bergrum B i Röda Stens Berglaboratorium i Göteborg*. Examensarbete 1996:5 Chalmers

- Ewy, R. T. & Cook, N. G. W. 1990. Deformation and fracture around cylindrical openings in rock—I. Observations and analysis of deformations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 27 (5): 387–407.
- Figueiredo, B., Mattila, J. Sjöberg, J. & Hakala, M. 2021. *Analysis and determination of the stress field at the Olkiluoto site*. Posiva Working Report in progress (to be published).
- Gao, K. & Harrison, J. P. 2018a. Multivariate distribution model for stress variability characterization. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 102: 144–154.
- Gao K. & Harrison, J. P. 2018b. Scalar-valued measures on stress dispersion. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 106: 234–242.
- Ghazal, R., Mas Ivars, D., Johansson, F. & Batres-Estrada, R. 2015. Back analysis of in situ stress at shallow depth using discontinuum numerical modeling - a case study at the Odenplan station in Stockholm, Sweden. **EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium**. Schubert (ed.)
- Google Maps. 2021a. *Karta över Stockholm*. 2021-09-20
https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1swJWiUKZiKo7g8KMRq_OmuWV-P1CpQWU
- Google Maps. 2021b. *Karta över Göteborg*. 2021-09-20
https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1utf0ZxWs3wAKGcozhJw-ZjMAAWY_y6OI
- Haimson, B. C. & Cornet, F. H. 2003. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 40: 1011–1020.
- Hakala, M. 2018. Personlig kommunikation.
- Hakala, M. & Sjöberg, J. 2006. *A Methodology for Interpretation of Overcoring Stress Measurements in Anisotropic Rock*. Posiva Working Report 2006-99. Olkiluoto: Posiva Oy, 207 p.
- Hakala, M., Siren, T., Ström, J., Valli, J., Hakala, V., Heine, J., Sireni, S., Kempainen, K. & Savunen, J. 2017. *In Situ Stress Measurements in ONKALO with LVDT – Cell*. Posiva 2016-20. ISBN 978-951-652-263-3. ISSN 2343-4740. April 2017.
- Hakala, M., Siren, T., Kempainen, K., Christiansson, R., Martin, D. 2013. *In situ stress measurements with LVDT-cell – method description and verification*. POSIVA 2012-43 (ISBN 978-951-652-223-7). Posiva Oy, Eurajoki.
- Hakala, M & Heine, J. 2015. *In Situ Stress Measurements with LVDT-cell in Hedriksdals regningsverk*.
- Hakala, M. & Heine, J. 2018. *In Situ Stress Measurement with LVDT-cell in Boliden Rönnskär at 295 m level*. Tampere, Finland: Stress Measurement Company Oy.

- Hakala, M., Heine, J. & Caballero, E. 2018. *Stockholm, Gullmarsplan. In Situ Stress Measurement with LVDT-method at 35 m depth* (konfidentiell).
- He, J. 1992. *Lined underground openings. Rock mechanical effects of high internal pressure*. PhD thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology.
- Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K. & Ziegler, M. 2016. *World Stress Map Database Release 2016*. V. 1.1. GFZ Data Services. <https://dataservices.gfz-potsdam.de/wsm/showshort.php?id=escidoc:1680890>, <https://doi.org/10.5880/WSM.2016.001>.
- Hallbjörn, L., Ingevald, K., Martna, J. & Strindell, L. 1990. A new automatic probe for measuring triaxial rock stresses in deep bore holes. *Tunneling and Underground Space Technology*, 5, pp. 141-145.
- Hiltscher, R., Martna, J. & Strindell, L. 1979. The measurement of triaxial rock stresses in deep boreholes. Proc. 4th *Int. Congress on Rock Mechanics (Montreaux, 1979)*, Vol. 2, pp. 227-234. Rotterdam: Balkema.
- Hollunger, A. & Trappman, T. 1999. *Bergspänningsmätning i korta borrhål i befintlig tunneln experimentell studie*. Examensarbete 1999:3. Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Javaid, M.A. & Harrison, J.P. 2021. Heterogeneity of *in situ* stress: A Review. *EUROCK 2021*, Mechanics and Rock Engineering, from Theory to Practice. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 833 012058.
- Klasson, H. 1993a. *Prognostisering av bergspänningar. Södra Länken PM 1993-09-21*. Södra Länkenkonsulterna (SLK).
- Klasson, H. 1993b. *Bergspänningsmätningar i borrhål DBH04 Bolidenplan, och borrhål DBH05 Årsta torg*. Förhandskopia. Vattenfall Hydropower AB.
- Klasson, H. & Ljunggren, C. 1992. *Bergspänningsmätningar i borrhål BSM1, Humlegården, slutrapport*. Renco AB, Luleå.
- Klasson, H. & Wikman, A. 1994a. *Södra länken PM 1994-04-07. Bergspänningsmätning i borrhål KBH12, Slätbaksvägen*. Vattenfall Hydropower AB.
- Klasson, H. & Wikman, A. 1994b. *Österleden. Bergspänningsmätningar i borrhål 213/D03 - Biskopsudden, borrhål 211/D01 - Finnboda Varv & borrhål 211/D04 - Danvikshem*. Vattenfall Hydropower AB.
- Klasson, H., Wikman, A. & Ljunggren, C. 1993. *Bergspänningsmätningar i borrhål DBH1, Johannes brandstation - slutrapport*. Vattenfall Hydropower AB.
- Lantmäteriet. 2021. <https://minkarta.lantmateriet.se/>. Besökt 2021-06-13.
- Leeman, E. R. 1968. The determination of the complete state of stress in rock using a single borehole—laboratory and underground measurements. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 5, 31-56.

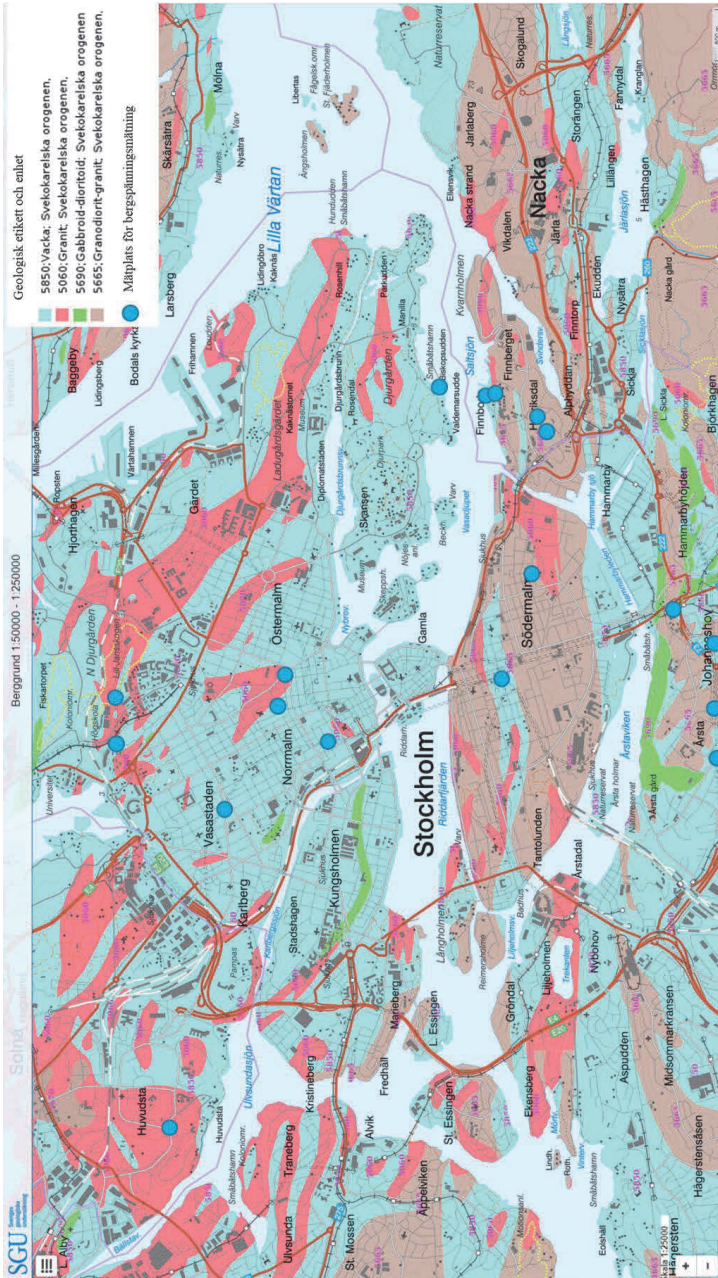
- Leeman, E. R. & Hayes, D. I. 1966. A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole. In *Proceedings of the 1st International Congress on Rock Mechanics (Lisboa, 1966)*, Vol. 2, pp. 17-24.
- Lindfors, U., Perman, F. & Sjöberg, J. 2005. *Evaluation of the overcoring results from borehole KFM01B*. SKB P-report, P-05-66.
- Lindfors, U., Lope Alvarez, D., Perman, F., Johansson, F. & Stille, B. 2017. Spänningsmodellering av storskaliga strukturer i Stockholmsområdet. *Bergmekanikdagen 13 mars 2017*, BeFo Stiftelsen för Bergteknisk forskning, pp. 81-91. ISSN 0281-4714.
- Ljunggren, C. & Wikman, A. 1994. *Norra länken II. Bergspänningsmätningar i borrhål N3510 Ruddammsberget, och borrhål N3511 KTH*. Vattenfall Hydropower AB.
- Mas Ivars, D., Johansson, F., Ghazal, R., Sánchez Juncal, A. & Batres-Estrada, R. 2016. *A case study of the Odenplan station in the Stockholm City Link project - Analysis of in situ stresses and observed ground behaviour*. BeFo Report 139, Stockholm 2016. ISRN BEFO-R—139—SE, ISSN 1104-1773.
- Möller, H. & Stålhös, G. 1964. *Beskrivning till geologiska kartbladet Stockholm NO*. Sveriges geologiska undersökning Serie Ae Nr 1.
- Perman, F. & Sjöberg, J. 2004. *Bergspänningsmätning på Södermalm*. SwedPower AB Uppdragsgivare Ramböll Sverige AB, Rapportnummer: 2049500-01, 2014-12-21.
- Perman, F. & Sjöberg, J. 2007. *Initiala bergspänningar i Stockholmsområdet – Underlag för projektering av Citybanan*. Vattenfall Power Consultant.
- SGU. 2018. Produkt: *Svaghetszoner, tolkade linjer (öppna data)*. Produktbeskrivning. Fastställd 2018-08-22. Dokumentversion 1.2.
- SGU. 2021a. *Kartvisare berg*. <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-berg-50-250-tusen.html>. Besökt Januari 2021.
- SGU. 2021b. *Kartvisare jorddjup*. <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jorddjup.html>. Besökt mars 2021.
- SGU 3D. 2021a. *Stockholms byggnadsgeologiska karta i 3D*. https://apps.sgu.se/sgu3d/3dgeomdb/tinmodel.html?model_id=103. Besökt februari 2021.
- SGU 3D. 2021b. *Göteborgs byggnadsgeologiska karta i 3D*. https://apps.sgu.se/sgu3d/3dgeomdb/tinmodel.html?model_id=102. Besökt februari 2021.
- SINTEF Bygg og Miljø, 2001. *Tredimensjonale bergspenningsmålinger ved Götatunnelen, hull 1 og hull 2*. Rapport STF22 F01167.
- Siren, T. & Hakala, M. 2018. *In Situ Stress Measurements in ONKALO with LVDT Cell – in 2017*. Working Report 2018-23. Posiva Oy.

- Sjöberg, J. 2006. *Bergspänningsmätning i borrhål KBH-J, T-blå*. SwedPower AB.
- Sjöberg, J. & Klasson, H. 2003. Stress measurements in deep boreholes using the *Borre (SSPB)* probe. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40, No. 7-8, pp. 1205-1233.
- Sjöberg, J. Christiansson, R. Hudson, J.A. 2003. ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 2: overcoring methods. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 40: 999–1010
- Strindell, L. 1980. *Huvudsta subway station Rock Stress Measurement*. Report L-593. Swedish State Power Board (SSPB).
- Swindell, R. 2005. *PM Geologi. Citybanan i Stockholm – Del B*. WSP. 0237-0013-025.
- Säwe, G. & Tyberg, Å. 1983. *Analys av sprickkartering på Ramberget, Göteborg med hjälp av ett Basic-program*. Examensarbete Publ B 218. Chalmers.
- Söder, C-O. 1994. *Water curtains in gas storage. An experimental study*. PhD thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology.
- Söderbäck, B. 2008. *Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas. Site descriptive modelling. SDM-Site*. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB R-08-19, Stockholm, Sweden.
- Stille, H., Olsson, L. & Delin, P. 1981. *Bergmekaniska mätsystem. Deformationsmätningar vid utbyggnad av tunnelbanestation Huvudsta*. Stiftelsen Bergteknisk Forskning. BeFo Nr 48:1/81.
- UNAVCO. 2021. <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion/model>. Besökt 2021-08-11.
- Walker, J. R., Martin, C. D. & Dzik, E. J. 1990. Technical Note: Confidence intervals for *in situ* stress measurements. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 27, No. 2, pp. 139-141.
- Wallroth, T. & Palmqvist, K. 2014. *Bergspänningssituationen i Göteborgsområdet – sammanställning av befintlig information*. Trafikverket PM AKF 06 – 011, 2014-02-25.
- Wikman, A., Bergsten, K-Å., Söder, P-E. & Ljunggren, C. 1995. *Bergspänningsmätningar på Arlanda, Arlandabanan, Flygstationsområdet*. Vattenfall Hydropower. Projektrapport Banbrytarna.
- Zang, A. & Stephansson, O. 2010. *Stress Field of the Earth's Crust*. ISBN 978-1-4020-8443-0, Heidelberg: Springer, 322 p.

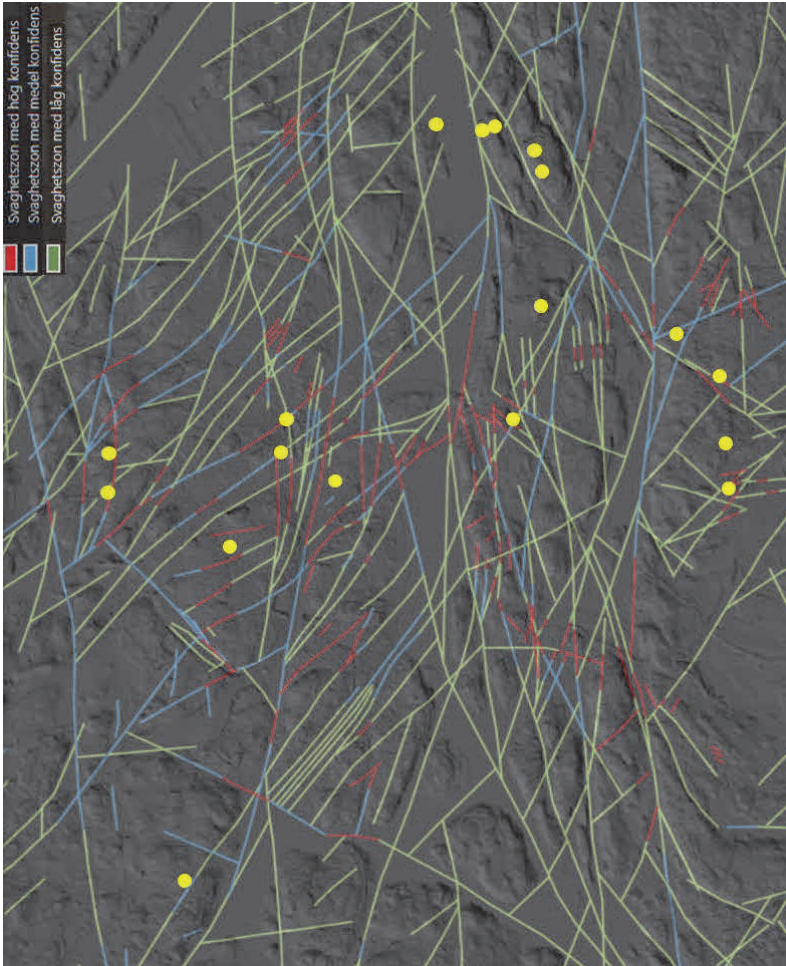
APPENDIX 1: Berggrund och jorddjup

I de byggnadsgeologiska kartorna redovisas bland annat de svaghetszoner som bedömts med låg till hög konfidens. Nedan beskrivs de olika konfidensintervallen (SGU, 2018):

- Hög konfidens = bedömning oftast baserad på en eller flera tydliga tunnel-, borrhåls- eller hållobobservationer i kombination med ett topografiskt eller geofysiskt lineament (t.ex. magnetiskt). Utsträckningen är starkt kopplad till lineamentens tydlighetsgrad och uthållighet.
- Medel konfidens = kan vara en förlängning av en högkonfidenszon eller en zon som är baserad på mindre entydig(a) observation(er) och är relaterad till ett lineament.
- Låg konfidens = förmodad zon och är i huvudsak baserad på ett identifierat lineament. Notera att flack topografi och vattenområden kan leda till hög osäkerhet i en zons positionering.



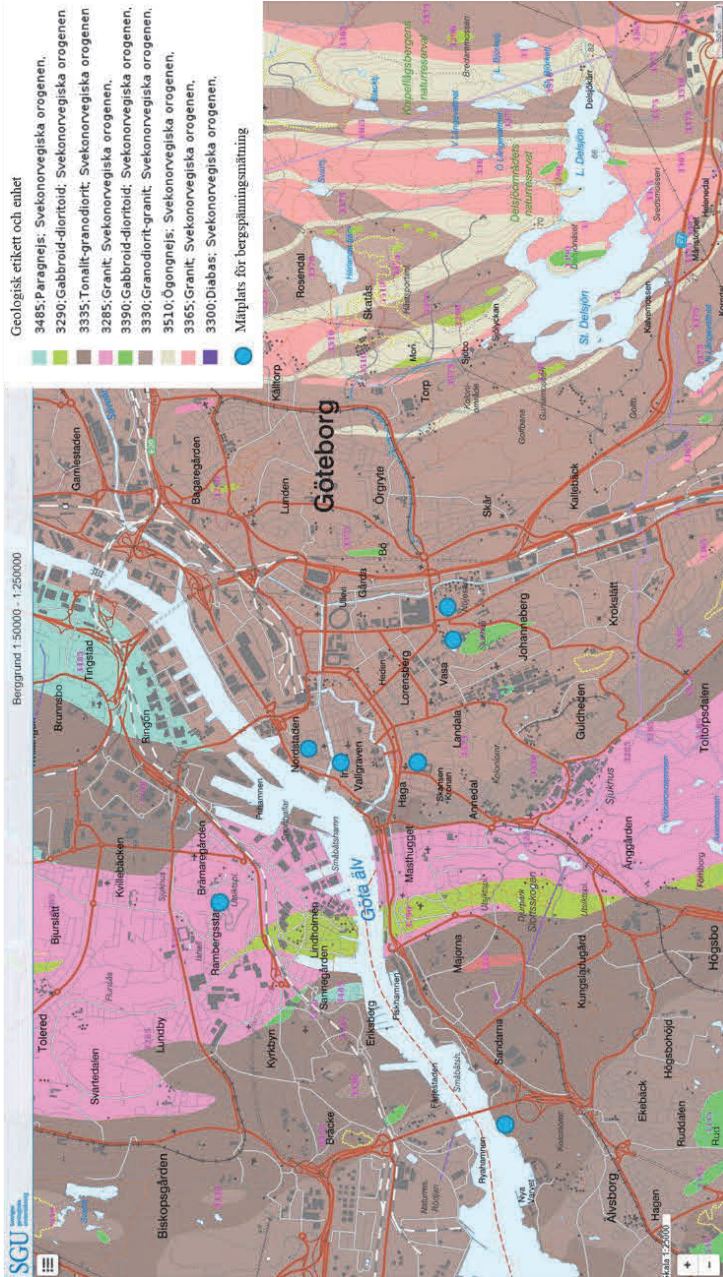
Figur 53. Berggrundskarta över Stockholm tillsammans med ungefärliga positioner av mätplatser markerade med blå cirklar (modifierad från SGU, 2021).



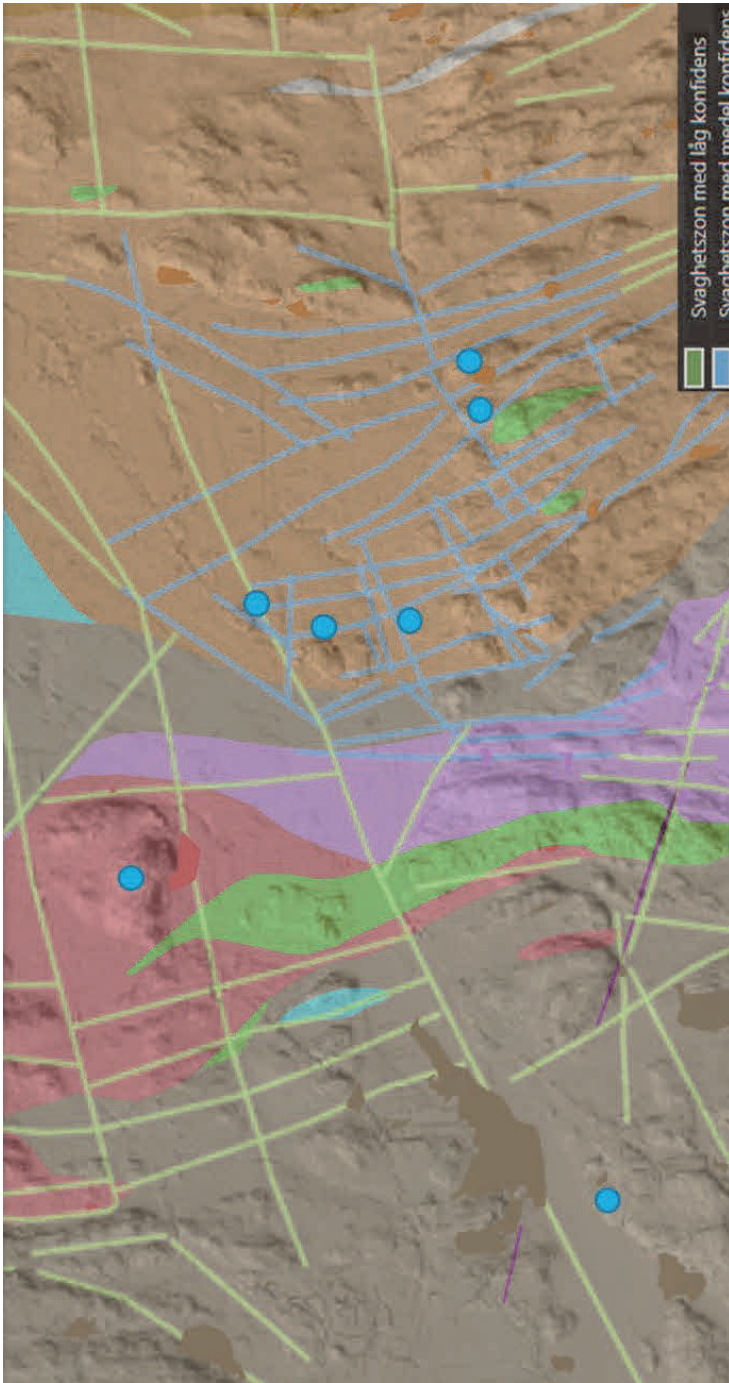
Figur 54. Svaghetszoner med hög, medel och låg konfidens enligt Stockholms byggnadsgeologiska karta i 3D tillsammans med ungefärliga positioner av mätplatser markerade med gula cirklar (modifierad från SGU 3D, 2021a).



Figur 55. Modellerat jorddjup i centrala Stockholm enligt SGUs kartvisare (SGU 3D, 2021b).



Figur 56. Berggrundkarta över Göteborg tillsammans med ungefärliga positioner av mätplatser markerade med blå cirklar (modifierad från SGU, 2021).



Figur 57. Svaghetszoner med medel och låg konfidens enligt Göteborgs byggnadsgeologiska karta i 3D tillsammans med ungefärliga positioner av mätplatser markerade med blå cirklar (modifierad från SGU 3D, 2021b).



Figur 58. Modellerat jorddjup i Göteborg enligt SGUs kartvisare (SGU 3D, 2021b).

APPENDIX 2: Rankning mätdata

Överborrning

Tabell 17. Bedömning av tillförlitlighet av mätdata vid överborrning.

Tillförlitlighet av mätdata					
Underlag	God (3)	Måttlig (2)	Dålig (1)	Mycket otillförlitlig (-1)	Otillräckligt underlag (0)
Borrkärna	Intakt kärna utan skada alternativt kärna som innehåller sprickor (utanför mätsektion) vinkelräta eller med stor vinkel från borrkärnans axel.	Kärna som i mätsektionen innehåller sprickor vinkelräta eller med stor vinkel från borrkärnans axel. Sprickorna har ingen påverkan på töjningsgivare.	Kärna som innehåller sprickor med liten vinkel från borrkärnans axel och kort avstånd från töjningsgivare.	Givare som korsas av sprickor eller spänningsinducerad påverkan på kärna.	Information om borrkärnan (bilder och/eller beskrivning) finns inte tillgänglig.
Töjningskurvor	Uppmätt och beräknad töjning från transient töjningsanalys resulterar i likartade värden. Formen på töjningskurvorna från analys är S-formade.	Subjektiv bedömning och tillförlitlighet baserat på jämförelse mellan uppmätt och beräknad töjning samt form på beräknade töjningskurvor.	Information från uppmätta töjningskurvor finns inte tillgängliga.		

Tabell 17. (forts). Bedömning av tillförlitlighet av mätdata vid överborring.

Underlag	Tillförlitlighet av mätdata				Mycket otillförlitlig (-1)	Ottillräckligt underlag (0)
	God (3)	Måttlig (2)	Dålig (1)			
Spänningar	Standardavvikelse för magnitud (σ_1 , σ_2 , och σ_3) och orientering (σ_1).				Mag. > 4 MPa & Orient. $\sigma_1^* > 40^\circ$	Inte tillräckligt med mätningar för att utföra bedömning.
	Mag. ≤ 2 MPa Orient. $\sigma_1^* \leq 15^\circ$	2 MPa < Mag. ≤ 4 MPa 15° < Orient. $\sigma_1^* \leq 25^\circ$	Mag. > 4 MPa 25° < Orient. $\sigma_1^* \leq 40^\circ$			
Biaxialförsök	Biaxialförsökskurvan visar linjärt beteende.	Uppvisar viss anisotropi och/eller hysteres	Ökad grad av icke linjärt beteende för biaxialförsökskurvan bidrar till en subjektiv minskning av tillförlitlighet.		Information från biaxialförsökskurva finns inte tillgänglig.	
UCS	Förhållandet mellan maximal tangentiell spänning ($\sigma_{\theta, \max}$) i pilothålet och enaxlig tryckhållfasthet (UCS) (Ewy & Cook, 1990).					Ingen information angående enaxiell tryckhållfasthet finns tillgänglig.
	$\leq 2,0$	$\leq 2,5$	$\leq 3,0$	$> 3,0$		

* Om förhållandet mellan största huvudspänningen (σ_1) och intermedieärspänningen (σ_2) är mindre än 1,2, exkluderas bedömning av orientering av σ_1 . Om största huvudspänning (σ_1) är nära vertikal kan inte standardavvikelsen användas.

Hydraulisk mätning

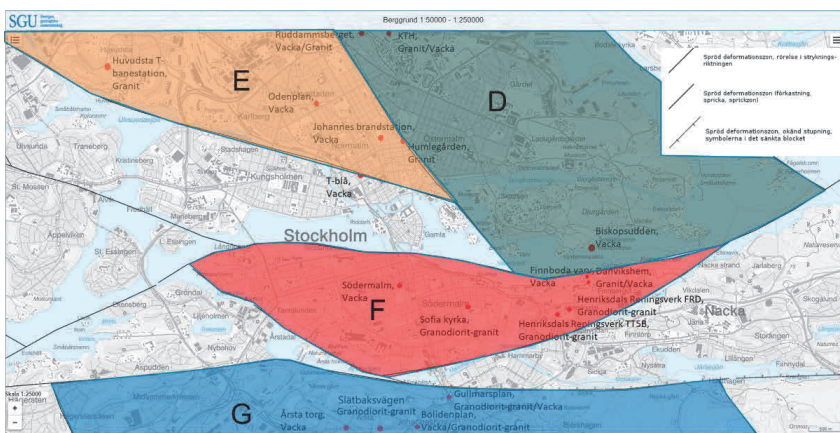
Tabell 18. Bedömning av tillförlitlighet av mätdata vid hydraulisk mätning.

Tillförlitlighet av mätdata					
Underlag	God (3)	Måttlig (2)	Dålig (1)	Mycket otillförlitlig (-1)	Otillräckligt underlag (0)
Avtrycktest och/eller elektrisk imaging	En tydlig <i>HF</i> eller <i>HTPF</i> spricka identifierad i mätsektionen.	Två <i>HF</i> eller <i>HTPF</i> sprickor identifierade i mätsektionen.	Tre <i>HF</i> eller <i>HTPF</i> sprickor identifierade i mätsektionen.	Mer än tre sprickor identifierade i mätsektionen.	Information från avtrycktest är inte tillgänglig.
Spräcktryck	Spräcktryck observerat vid <i>HF</i> test.		Inget spräcktryck observerat vid <i>HF</i> test.		Information om eller tabellerade värden av spräcktryck är inte tillgänglig.
Spricktillslutningstryck	Repeterbart spricktillslutningstryck för 75% eller 100% av testcyklerna.	Repeterbart spricktillslutningstryck för 50% eller 67% av testcyklerna.	Endast en testcykel genomförd.	Ett icke repeterbart spricktillslutningstryck.	Information om eller tabellerade värden av spricktillslutningstryck är inte tillgänglig.

APPENDIX 3: Gruppering av mätdata

Gruppering av mätdata i Stockholm

Då mätdata grupperas med hänsyn till storskaliga strukturer särskiljs de yttre delarna av Stockholm (A: Arlandabanan, B: Björkö, C: Lovön) från de centrala delarna (D-G). En översiktssbild över grupperingen av de centrala delarna av Stockholm och deformationszoner visas i Figur 65. Grupperingen av alla mätplatser i Stockholm baserat på deformationszoner visas i Tabell 19. Mätplats T-blå finns nära en deformationszon och har därför både inkluderats och exkluderats ur grupp E. Mätplats Sofia Kyrka ligger på ett större djup än övriga och har inkluderats och exkluderats ur grupp F.



Figur 59. Gruppering av områden baserat på deformationszoner i de centrala delarna av Stockholm (modifierad från kartvisare berg SGU, 2021).

Tabell 19. Gruppering av mätdata i Stockholm baserat på deformationszoner.

Grupp	Mätplats	Djup-intervall (m)	Skillnad i djup (max-min) (m)	Antalet mätningar mellan 0–50 m	Antalet mätningar djupare än 50 m
A	Arlandabanan (Terminal 4 och 5, Cargo City)	9.8–21.4	11.6	19	0
B	Björkö	74.7–872.1	797.4	0	17
C	Lovön	21.7–60	38.3	4	1
D	KTH	24.2–44.6	20.4	9	0
	Ruddammsberget				
	Biskopsudden				
E	Huvudsta T-banestation	10.0–65.2 / 10.0–37.0**	27.0/55.2	17	3
	Odenplan				
	Johannes brandstation				
	Humlegården				
	T-blå*				
F	Södra Latin (Södermalm)	16.4–130.2 / 16.4–53.3 ***	36.9/113.8	21	7
	Henriksdals Reningsverk				
	Finnboda Varv				
	Danvikshem				
	Sofia Kyrka*				
G	Station Gullmarsplan	11.2–48.3	37.1	20	0
	Bolidenplan				
	Slätbaksvägen				
	Årsta torg				

* Inkluderats och exkluderats ur grupp vid analys.

** T-blå exkluderad ur grupp

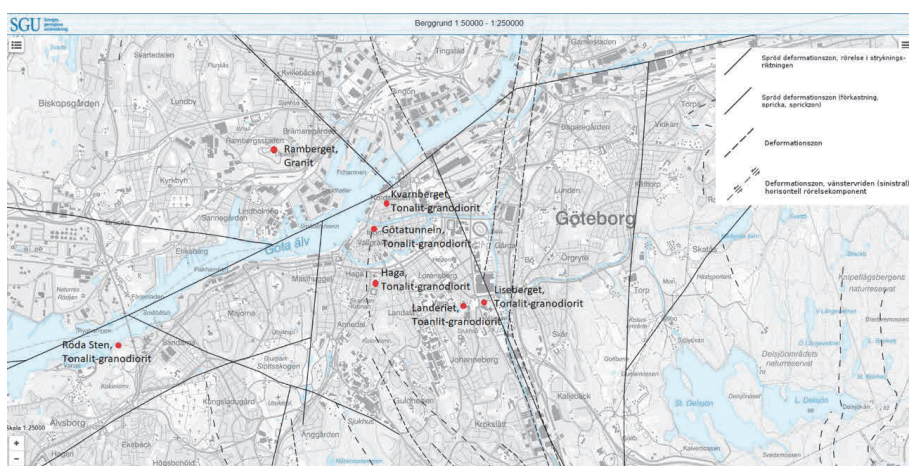
*** Sofia Kyrka exkluderad ur grupp

Gruppering av mätdata i Göteborg

En översiktsbild över grupperingen av mätplatser i Göteborg och deformationszoner visas i Figur 66. Då mätdata grupperas med hänsyn till storskaliga strukturer fås samma gruppering som i Tabell 20 exklusive Röda Sten

Tabell 20. Alla mätplatser i Göteborg.

Mätplats	Djupintervall (m)	Skillnad i djup (max-min) (m)	Antalet mätningar mellan 0–50 m	Antalet mätningar djupare än 50 m
Götatunneln	17.2–70	52.8	18	1
Haga				
Korsvägen				
Landeriet				
Röda Sten				

**Figur 60.** Översikt över alla mätplatser i Göteborg inklusive deformationszoner (modifierad från kartvisare berg SGU, 2021).

APPENDIX 4: Statistisk analys, tensormetoden

Metodik

Vid statistisk analys med tensormetoden behandlas spänning som en tensor (σ_{ij}), vilket innebär att vanlig statistik inte är giltig. Det bör poängteras att denna är den enda matematiskt korrekta ansatsen eftersom man inte får använda klassisk statistik på en tensor. Vid statistisk utvärdering med tensormetoden bedöms den maximala sannolikhetsuppskattningen av medelvektorn m_d som innehåller de sex spänningskomponenterna (s_d) enligt följande ekvation:

$$\widehat{m}_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{d_i} = \bar{s}_d \quad (\text{A4.1})$$

i vilken n är antalet spänningsdata (spänningsmätningar).

Fördelningsfunktionen f_{sd} för den multivariata normalfördelningen av den distinkta spänningskomponenten s_d ges av följande ekvation (Gao & Harrison, 2018a):

$$f_{sd} = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{\frac{1}{2}p(p+1)} |W|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(s_d - m_d)^T (W)^{-1} (s_d - m_d)\right) \quad (\text{A4.2})$$

I ovan ekvation är p lika med dimensionen för spänningstensor (dvs. 2 eller 3), T betecknar transponering av matrisen och uppskattningen av kovariansmatrisen (W) bedöms genom:

$$W = \text{cov}(s_d) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_{d_i} - \bar{s}_d) (s_{d_i} - \bar{s}_d)^T \quad (\text{A4.3})$$

Den effektiva variansen, dvs. måttet på den totala spridningen i mätdata, V_{eff} , beskrivs med följande ekvation (Gao & Harrison, 2018b):

$$V_{eff} = \frac{1}{2} p(p+1) \sqrt{|W|} \quad (\text{A4.4})$$

Ju större värdet på den effektiva variansen är, desto större är spridningen i spänningsdata. Tensormetoden är tillämpbar och tillförlitlig när antalet spänningsdata (n) är fler än antalet tensorkomponenter som ska lösas enligt:

$$n \geq 0.5 p(p + 1) + 1. \quad (\text{A4.5})$$

För en 2D-spänningstensor (p lika med 2) är, enligt ekvation (I.5), minsta antal n av spänningsdata 4. För en full 3D-spänningstensor (p är lika med 3) är minsta antal n av spänningsdata 7. En beräkning med tensoransatsen för 3D förhållanden kräver alltså minst sju (7) spänningsmätningar inom ett begränsat djupintervall för att kunna användas.

Det statistiska förhållandet mellan variabler bestäms genom att beräkna korrelationskoefficienten, r , som för två variabler x och y är:

$$r = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{\text{var}(x)\text{var}(y)}} \quad (\text{A4.6})$$

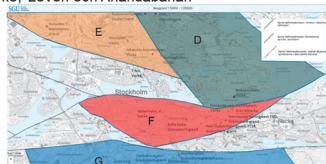
i vilken $\text{var}()$ betecknar variansfunktionen. Denna korrelationskoefficient är 1 eller -1 om variablerna är totalt korrelerade och 0 om de inte är korrelerade.

Resultat statistisk analys med tensormetoden för Stockholm

Resultat från den statistiska analysen med tensormetoden och Stockholm visas i nedanstående bildbilaga.

Gruppering av mätdata med hänsyn till deformationszoner

Grupp A	Arlandabanan
Grupp B	Björkö (OBS - djupare än 100 m, inkluderas inte)
Grupp C	Lovön (OBS - färre än sju mätningar)
Grupp D	Ruddammsberget, Biskoppsudden & KTH
Grupp E	Johannes brandstation, Humlegården, Odenplan, Huvudsta, T-blå
Grupp E*	Johannes brandstation, Humlegården, Odenplan, Huvudsta
Grupp F	Södermalm, Henriksdals, Danvikshem, Finnboda Varv, Sofia Kyrka (0-100 m)
Grupp F*	Södermalm, Henriksdals, Danvikshem, Finnboda Varv
Grupp G	Årsta torg, Bolidenplan, Slätbaksvägen, Station Gullmarsplan
Grupp H	All mätdata (Grupp A-G (Grupp B (Björkö) exkluderad)
Grupp I	Centrala Stockholm (Grupp D-G) dvs. utan Björkö, Lovön och Arlandabanan



Storlek och orientering av huvudspänningar

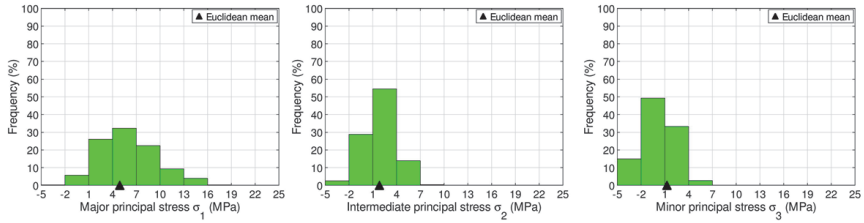
Medelvärden för uppmätta huvudspänningar i respektive grupp

Grupp	σ_1			σ_2			σ_3		
	Storlek [MPa]	Trend [°]	Plunge [°]	Storlek [MPa]	Trend [°]	Plunge [°]	Storlek [MPa]	Trend [°]	Plunge [°]
A	4.9	138	37	1.8	253	30	1.3	10	39
D	4.4	146	13	2.4	52	17	0.8	272	68
E	7.1	332	17	5.0	239	9	1.9	121	71
E*	7.3	343	12	4.9	249	17	1.7	106	69
F	4.9	133	4	4.5	223	0	2.2	315	86
F*	5.1	120	4	4.4	30	0	2.1	296	86
G	7.6	127	14	4.5	217	2	3.1	313	76
H	5.7	140	6	4.0	49	4	2.4	285	83
I	6.0	137	2	4.6	47	2	2.4	269	88

σ_1 – största huvudspänning, σ_2 – intermediär huvudspänning, σ_3 – minsta huvudspänning

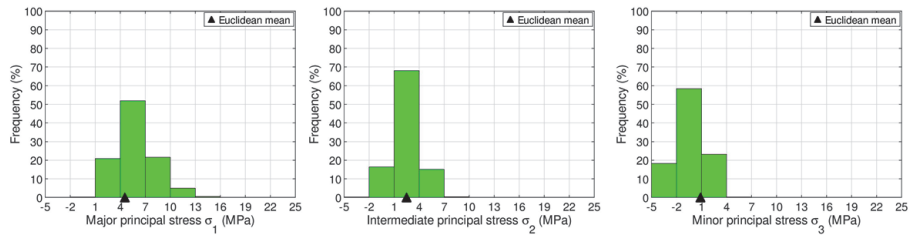
Histogram huvudspänningar

- Grupp A - Arlandabanan



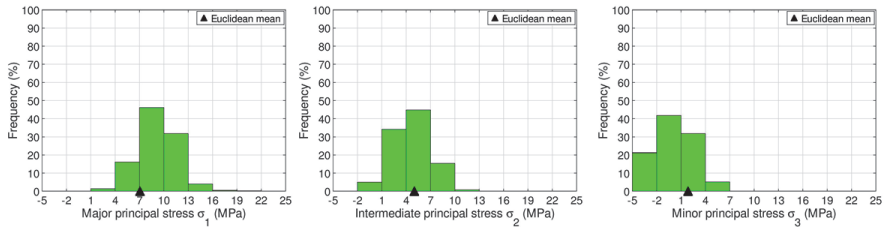
Histogram huvudspänningar

- Grupp D – Biskoppsudden, KTH & Ruddammsberget



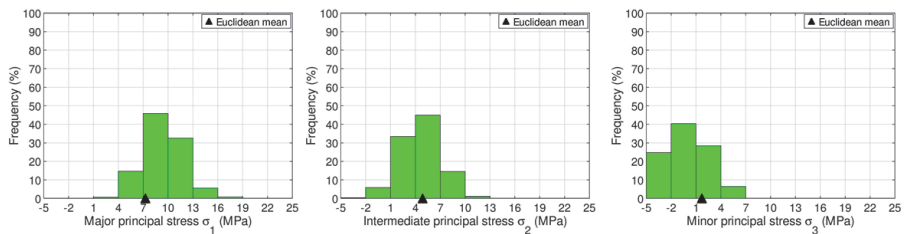
Histogram huvudspänningar

- Grupp E - Humlegården, Huvudsta, Johannes brandstation, Odenplan & T-blå



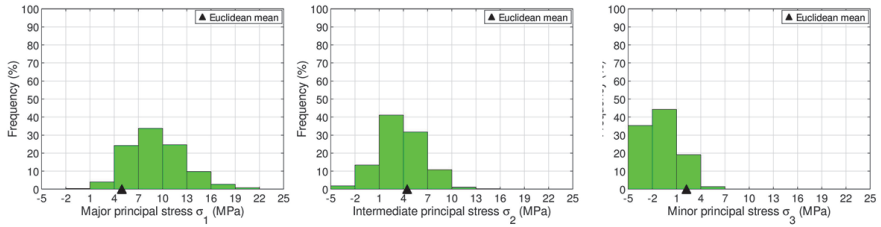
Histogram huvudspänningar

- Grupp E* - Humlegården, Huvudsta, Johannes brandstation & Odenplan



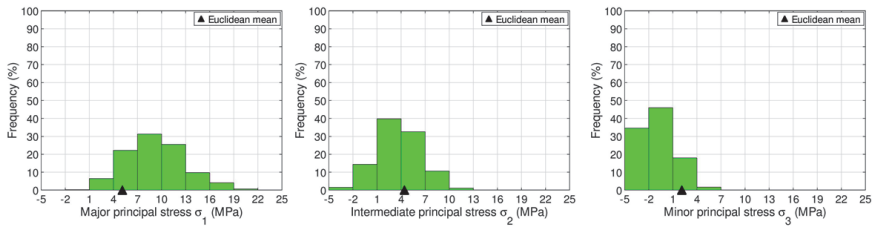
Histogram huvudspänningar

- Grupp F - Danvikshem, Finnboda Varv, Henriksdals, Sofia Kyrka (0-100 m) & Södermalm



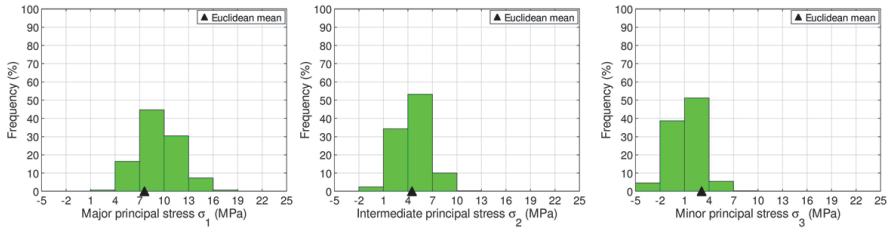
Histogram huvudspänningar

- Grupp F* - Danvikshem, Finnboda Varv, Henriksdals & Södermalm



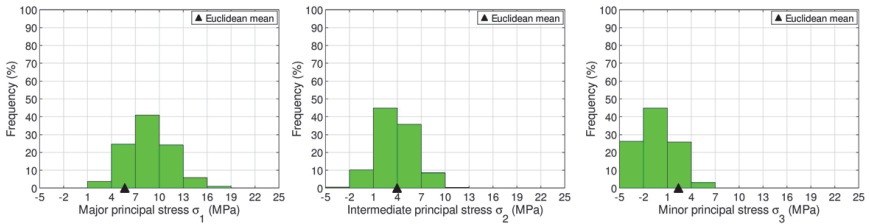
Histogram huvudspänningar

- Grupp G - Bolidenplan, Slätbaksvägen, Station Gullmarsplan & Årsta torg



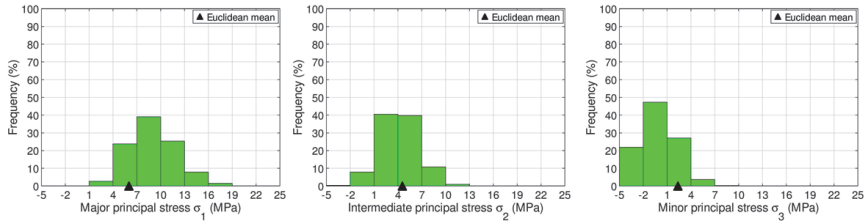
Histogram huvudspänningar

- Grupp H - All mätdata (Grupp A-G (Grupp B (Björkö exkluderad)))



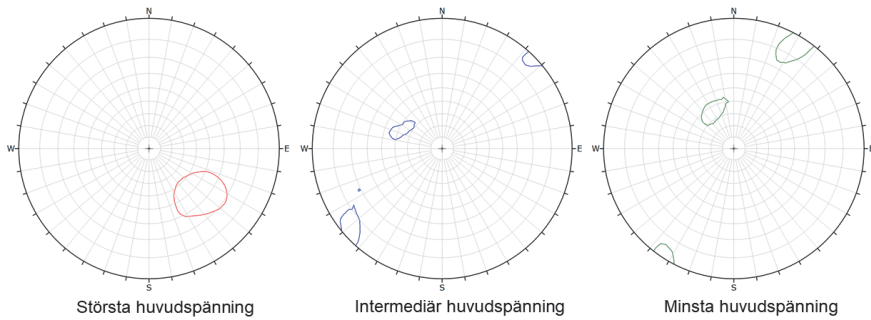
Histogram huvudspänningar

- Grupp I – Centrala Stockholm (Grupp D-G)



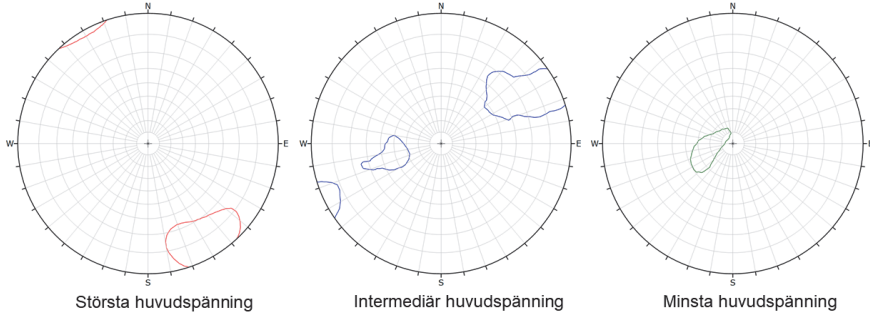
Stereografiska projektioner

- Grupp A - Arlandabanan



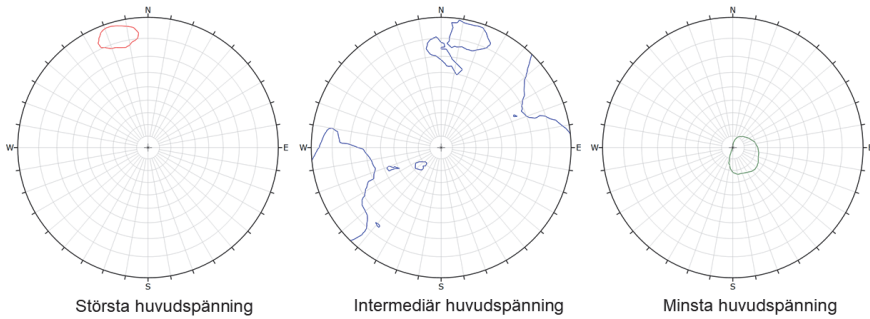
Stereografiska projektioner

- Grupp D – Biskoppsudden, KTH & Ruddammsberget



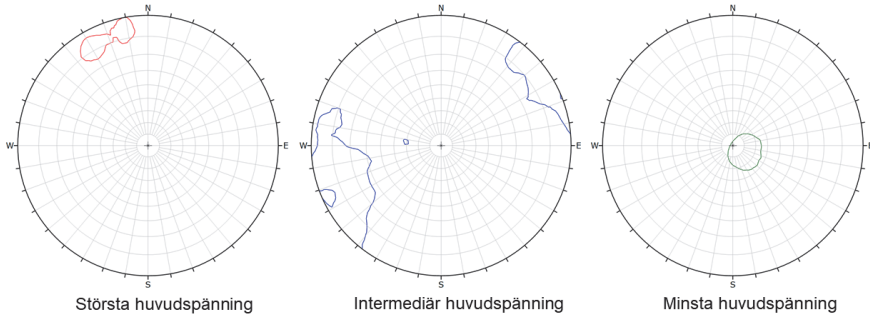
Stereografiska projektioner

- Grupp E - Humlegården, Huvudsta, Johannes brandstation, Odenplan & T-blå



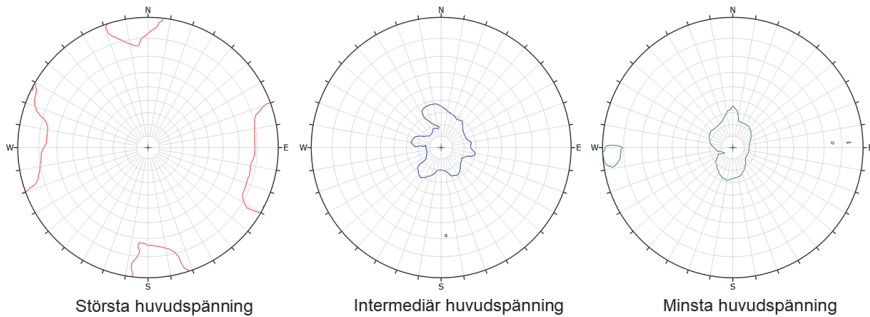
Stereografiska projektioner

- Grupp E* - Humlegården, Huvudsta, Johannes brandstation & Odenplan



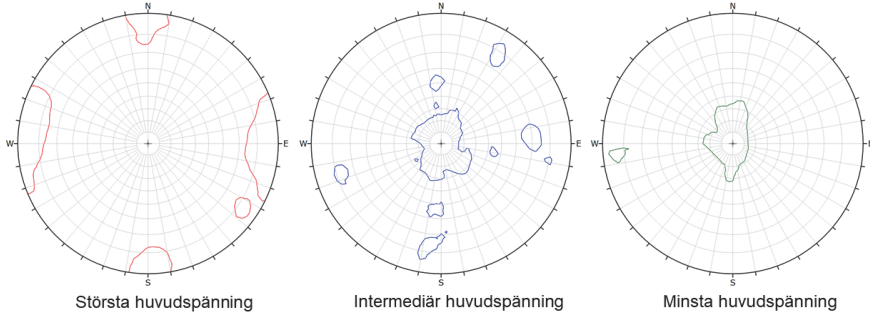
Stereografiska projektioner

- Grupp F - Danvikshem, Finnboda Varv, Henriksdals, Sofia Kyrka (0-100 m) & Södermalm



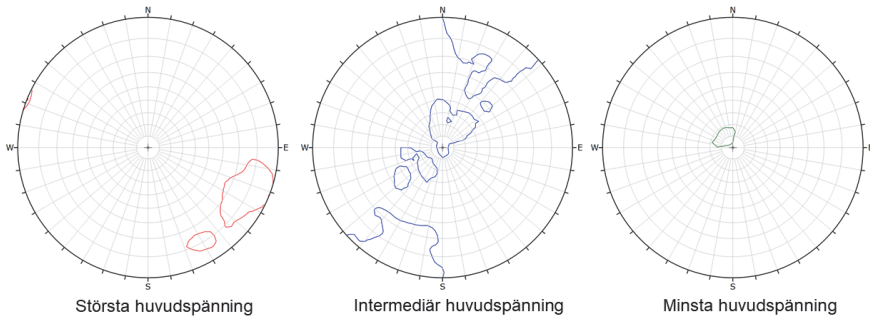
Stereografiska projektioner

- Grupp F* - Danvikshem, Finnboda Varv, Henriksdals & Södermalm



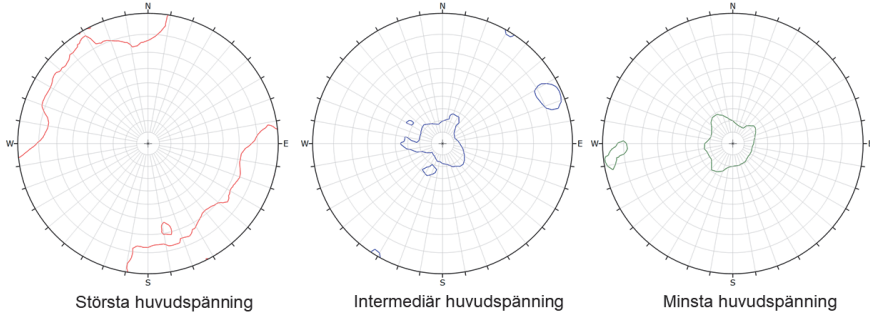
Stereografiska projektioner

- Grupp G - Bolidenplan, Slätbaksvägen, Station Gullmarsplan & Årsta torg



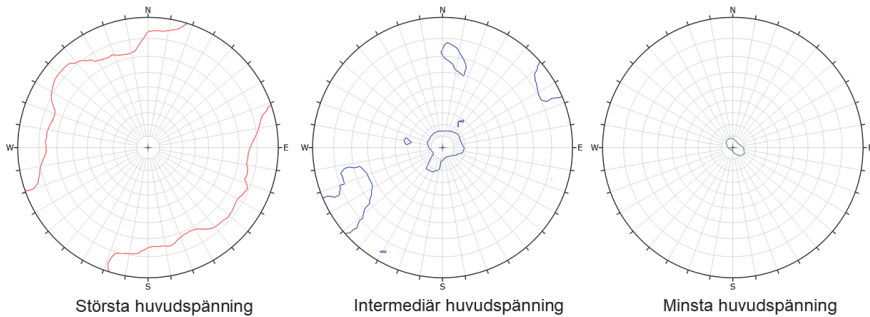
Stereografiska projektioner

- Grupp H - All mätdata (Grupp A-G (Grupp B (Björkö exkluderad)))



Stereografiska projektioner

- Grupp I – Centrala Stockholm (Grupp D-G)



90% konfidensintervall (stokastisk generering)

Grupp	Huvudspänningar	Nedre gränsen [MPa]	Övre gränsen [MPa]
A	σ_1	0.6	12.6
	σ_2	-1.3	5.0
	σ_3	-3.9	3.6
D	σ_1	2.5	10.0
	σ_2	-0.1	5
	σ_3	-3.8	2.5
E	σ_1	5.3	13.0
	σ_2	0.8	8.3
	σ_3	-5.0	4.1
E*	σ_1	5.6	13.3
	σ_2	0.4	8.8
	σ_3	-5.1	4.2

90% konfidensintervall (stokastisk generering)

Grupp	Huvudspänningar	Nedre gränsen [MPa]	Övre gränsen [MPa]
F	σ_1	3.6	15.8
	σ_2	-1.0	8.5
	σ_3	-6.1	3.3
F*	σ_1	3.4	15.8
	σ_2	-0.9	8.5
	σ_3	-6.3	3.0
G	σ_1	5.2	13.9
	σ_2	1.4	7.9
	σ_3	-2.1	4.3
H	σ_1	4.2	13.8
	σ_2	-0.1	8.0
	σ_3	-4.7	3.7

90% konfidensintervall (stokastisk generering)

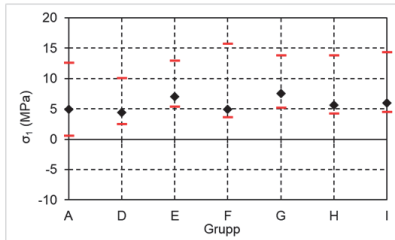
Grupp	Huvudspänningar	Nedre gränsen [MPa]	Övre gränsen [MPa]
I	σ_1	4.5	14.4
	σ_2	0.2	8.4
	σ_3	-4.6	4.0

Effektiv varians [MPa²]

Grupp	Effektiv varians V_{eff} [MPa ²]
A	1.16
D	1.49
E	4.80
E*	5.21
F	7.25
F*	7.27
G	3.68
H	5.91
I	5.89

Spridning av mätdata för största huvudspänningen

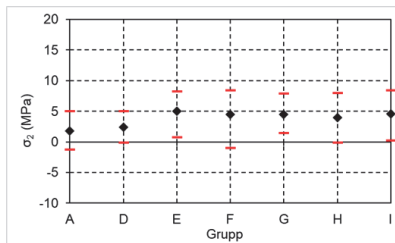
- 90% konfidensintervall, stokastisk generering



- Grupp A - Arlandabanan
- Grupp B - Björkö (OBS djupare än 100 m, inkluderas inte)
- Grupp C - Lovön (Få mätdata inkluderas inte)
- Grupp D - Ruddammsberget, Biskoppsudden & KTH
- Grupp E - Johannes brandstation, Humlegården, Odenplan, Huvudsta, T-blå
- Grupp F - Södermalm, Henriksdals, Danvikshem, Finnboda Varv, Sofia Kyrka (0-100 m)
- Grupp G - Årsta torg, Bolidenplan, Slätbäcksvägen, Station Gullmarsplan
- Grupp H - All mätdata
- Grupp I - All mätdata utan Björkö, Lovön och Arlandabanan

Spridning av mätdata för intermediär huvudspänningen

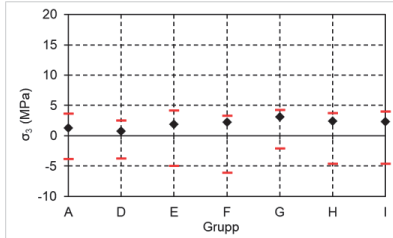
- 90% konfidensintervall, stokastisk generering



- Grupp A - Arlandabanan
- Grupp B - Björkö (OBS djupare än 100 m, inkluderas inte)
- Grupp C - Lovön (Få mätdata inkluderas inte)
- Grupp D - Ruddammsberget, Biskoppsudden & KTH
- Grupp E - Johannes brandstation, Humlegården, Odenplan, Huvudsta, T-blå
- Grupp F - Södermalm, Henriksdals, Danvikshem, Finnboda Varv, Sofia Kyrka (0-100 m)
- Grupp G - Årsta torg, Bolidenplan, Slätbäcksvägen, Station Gullmarsplan
- Grupp H - All mätdata
- Grupp I - All mätdata utan Björkö, Lovön och Arlandabanan

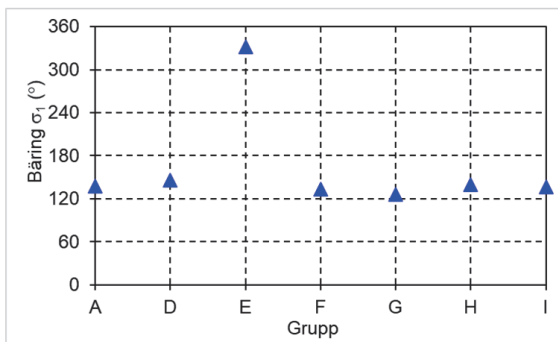
Spridning av mätdata för minsta huvudspänningen

- 90% konfidsensintervall, stokastisk generering

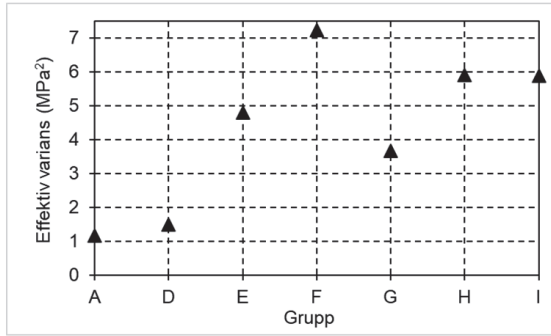


Grupp A - Arlandabanan
 Grupp B - Björkö (OBS djupare än 100 m, inkluderas inte)
 Grupp C - Lovön (Få mätdata inkluderas inte)
 Grupp D - Ruddammsberget, Biskoppsudden & KTH
 Grupp E - Johannes brandstation, Humlegården, Odenplan, Huvudsta, T-blå
 Grupp E* - Johannes brandstation, Humlegården, Odenplan, Huvudsta
 Grupp F - Södermalm, Henriksdals, Danvikshem, Finnboda Varv, Sofia Kyrka (0-100 m)
 Grupp F* - Södermalm, Henriksdals, Danvikshem, Finnboda Varv
 Grupp G - Årsta torg, Bolidenplan, Slätbäcksvägen, Station Gullmarsplan
 Grupp H - All mätdata
 Grupp I - All mätdata utan Björkö, Lovön och Arlandabanan

Bäring av största huvudspänning



Effektiv varians

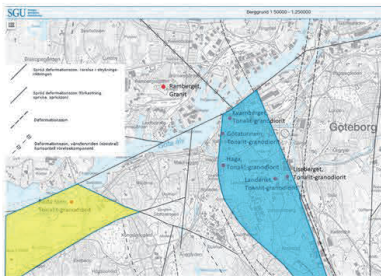


Resultat statistisk analys med tensormetoden för Göteborg

Resultat från den statistiska analysen med tensormetoden och Göteborg visas i nedanstående bildbilaga.

Gruppering av mätdata med hänsyn till deformationszoner

- Grupp A Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget
- Grupp A* Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget
- Grupp B Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Röda Sten
- Grupp B* Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Röda Sten



Storlek och orientering av huvudspänningar

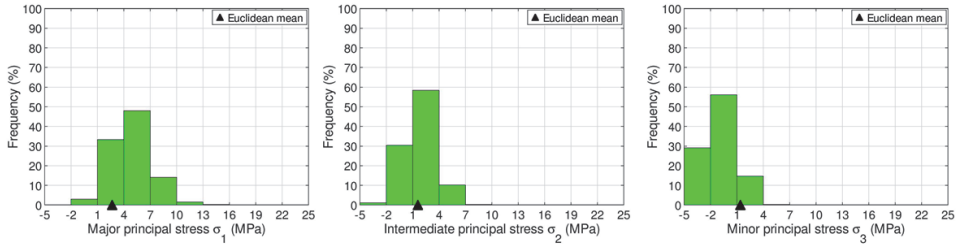
Medelvärden för uppmätta huvudspänningar i respektive grupp

Grupp	σ_1			σ_2			σ_3		
	Storlek [MPa]	Trend [°]	Plunge [°]	Storlek [MPa]	Trend [°]	Plunge [°]	Storlek [MPa]	Trend [°]	Plunge [°]
A	2.7	283	8	1.6	16	20	1.4	171	68
A*	2.1	285	2	1.1	20	70	0.5	194	20
B	3.2	280	3	1.8	11	14	1.5	178	75
B*	2.4	105	0	1.2	14	69	0.6	195	21

σ_1 – största huvudspänning, σ_2 – intermediär huvudspänning, σ_3 – minsta huvudspänning

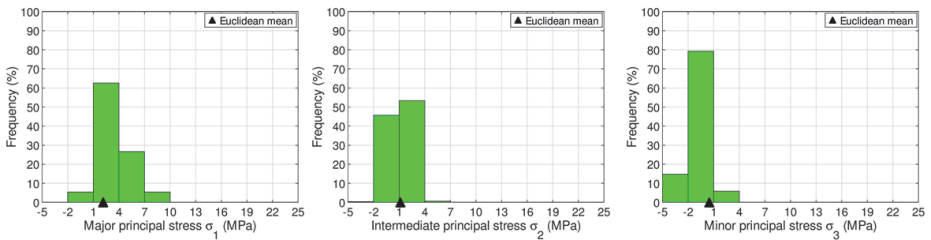
Histogram huvudspänningar

- Grupp A - Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget



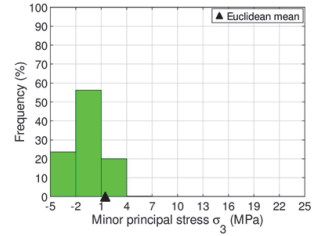
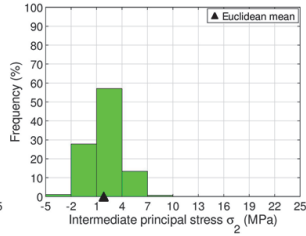
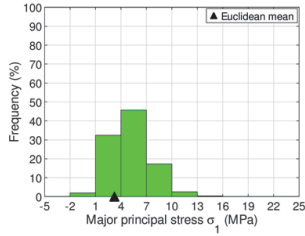
Histogram huvudspänningar

- Grupp A* - Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget



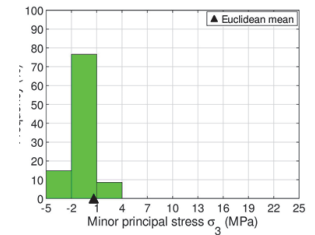
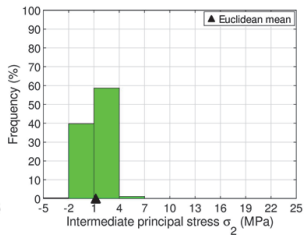
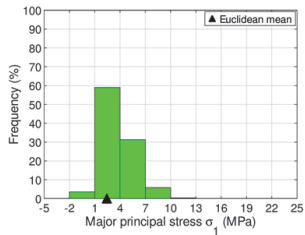
Histogram huvudspänningar

- Grupp B - Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Röda Sten



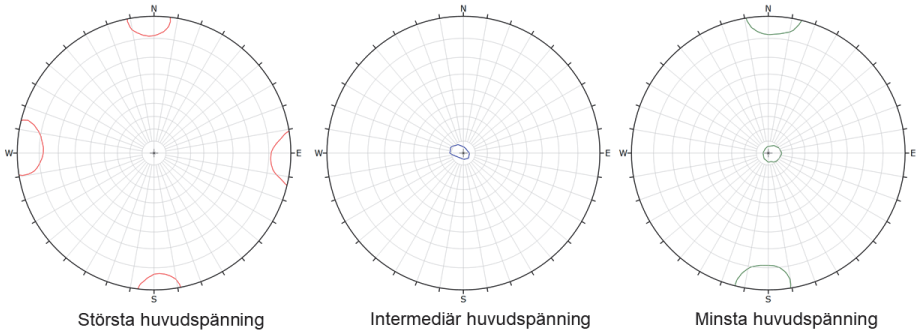
Histogram huvudspänningar

- Grupp B* - Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Röda Sten



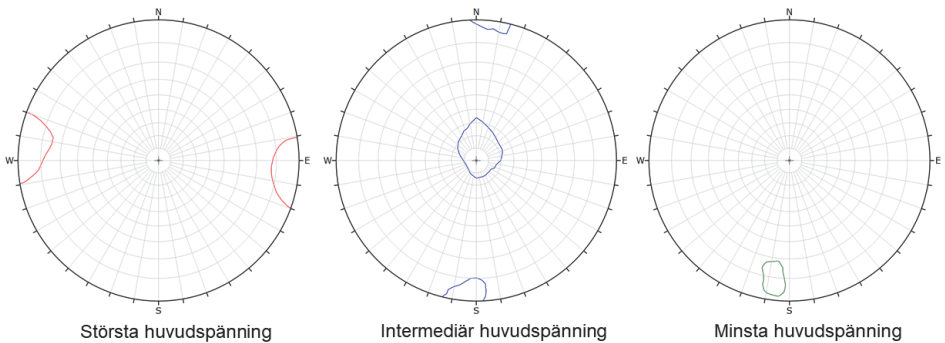
Stereografiska projektioner

- Grupp A - Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget



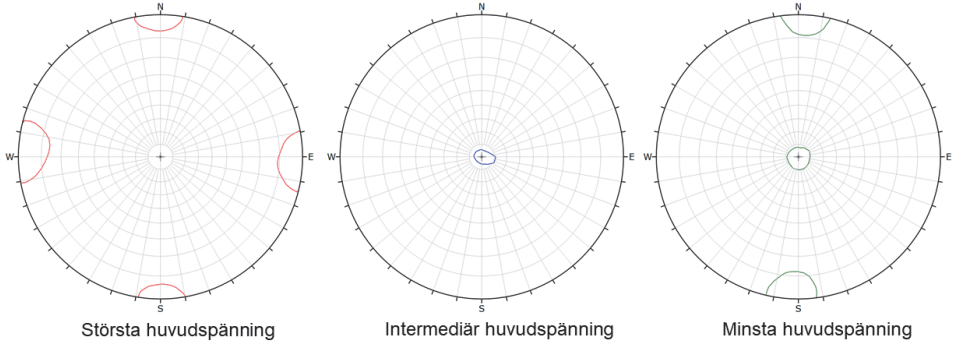
Stereografiska projektioner

- Grupp A* - Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget



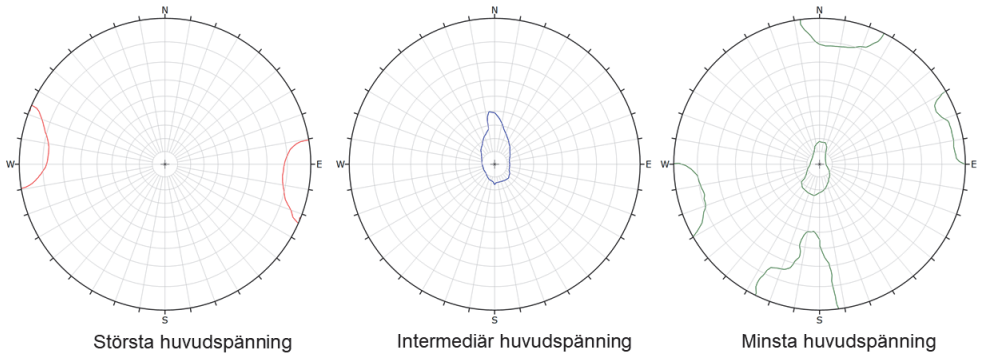
Stereographic projections

- Grupp B - Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Röda Sten



Stereographic projections

- Grupp B* - Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Röda Sten



90% konfidensintervall (stokastisk generering)

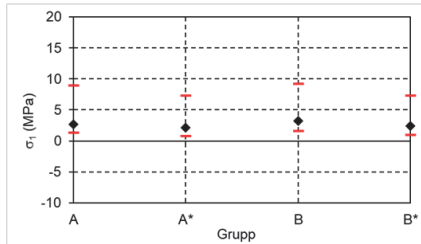
Grupp	Huvudspänningar	Nedre gränsen [MPa]	Övre gränsen [MPa]
A	σ_1	1.3	8.9
	σ_2	-1.0	4.7
	σ_3	-4.8	2.3
A*	σ_1	0.8	7.4
	σ_2	-0.8	3.0
	σ_3	-3.1	1.1
B	σ_1	1.6	9.2
	σ_2	-0.9	5.3
	σ_3	-4.4	2.5
B*	σ_1	1.0	7.3
	σ_2	-0.6	3.0
	σ_3	-3.1	1.5

Effektiv varians [MPa²]

Grupp	Effektiv varians V_{eff} [MPa ²]
A	1.99
A*	1.12
B	1.97
B*	1.13

Spridning av mätdata för största huvudspänningen

- 90% konfidensintervall, stokastisk generering



Grupp A Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget

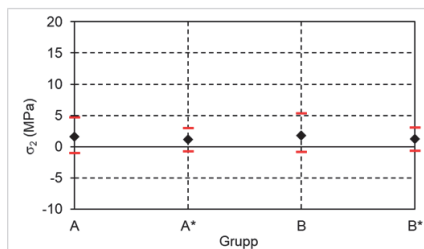
Grupp A* Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget

Grupp B Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget, Röda Sten

Grupp B* Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget, Röda Sten

Spridning av mätdata för intermediär huvudspänningen

- 90% konfidensintervall, stokastisk generering



Grupp A Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget

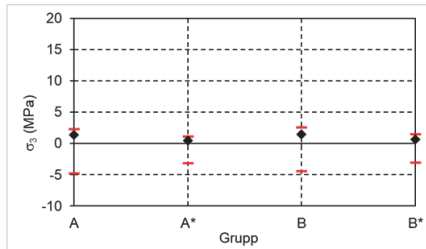
Grupp A* Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget

Grupp B Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget, Röda Sten

Grupp B* Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget, Röda Sten

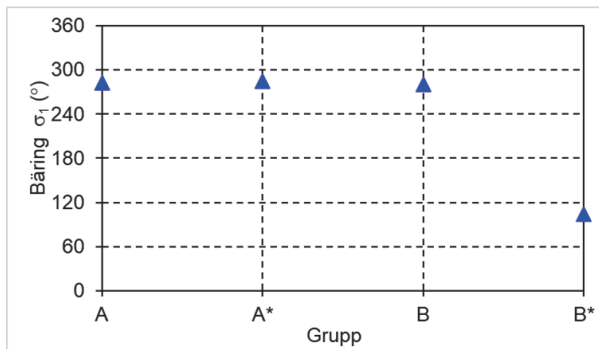
Spridning av mätdata för minsta huvudspänningen

- 90% konfidensintervall, stokastisk generering

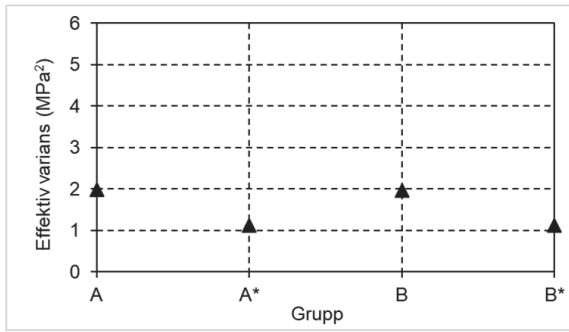


Grupp A Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget
 Grupp A* Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget
 Grupp B Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget, Röda Sten
 Grupp B* Haga, Korsvägen Landeriet och Liseberget, Röda Sten

Bäring av största huvudspänningen



Effektiv varians

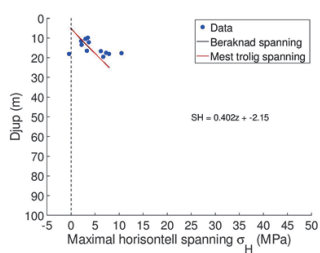


APPENDIX 5: Spännings samband med djup

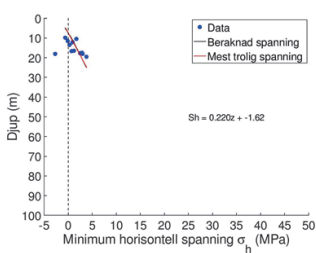
Resultat från analys av spännings samband med djup redovisas i nedanstående bildbilaga.

Spännings samband med djup för Stockholm

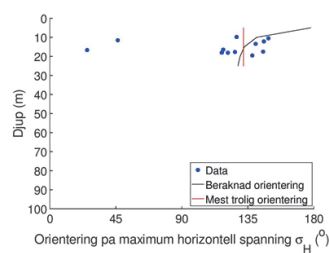
Grupp A: Arlandabanan (Terminal 4 och 5, Cargo City)



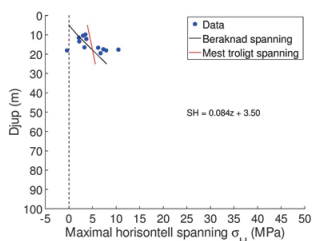
Notera: negativ spänning vid markytan



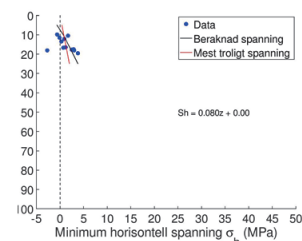
Notera: negativ spänning vid markytan



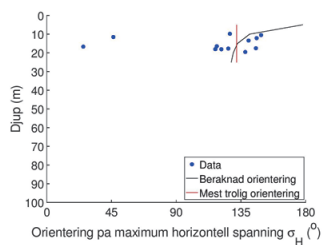
Grupp A: Arlandabanan (Terminal 4 och 5, Cargo City) Linjär passning med begränsning



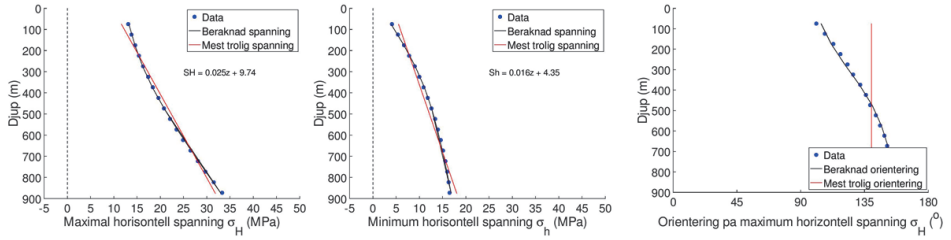
Notera: lutning erhållen genom att beakta alla data
Lösning B1



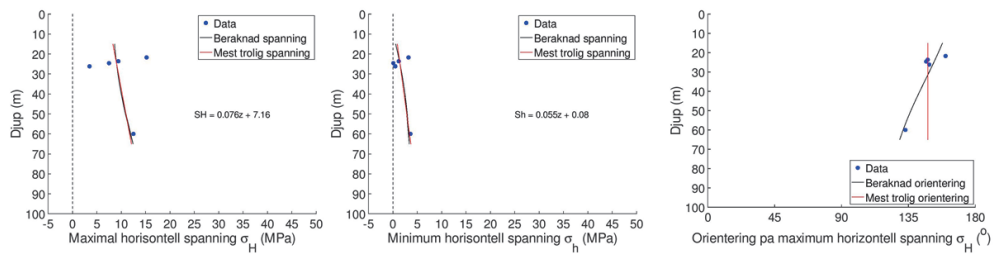
Notera: lutning erhållen genom nollspänningar vid markytan
Lösning B2



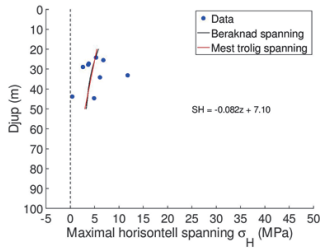
Grupp B: Björkö (0–900 m)



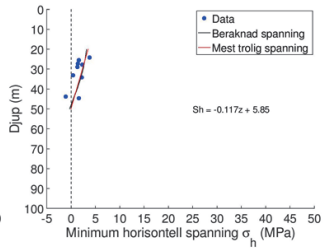
Grupp C: Lovön



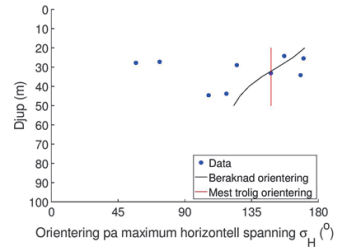
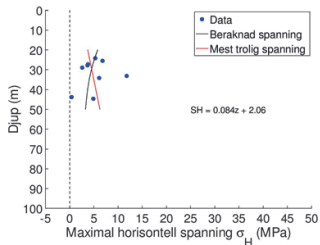
Grupp D: Biskopsudden, KTH & Ruddammsberget



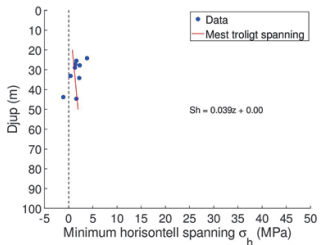
Notera: negativ lutning



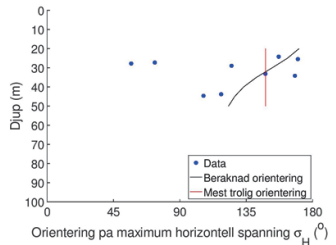
Notera: negativ lutning

Grupp D: Biskopsudden, KTH & Ruddammsberget
Linjär passning med begränsning

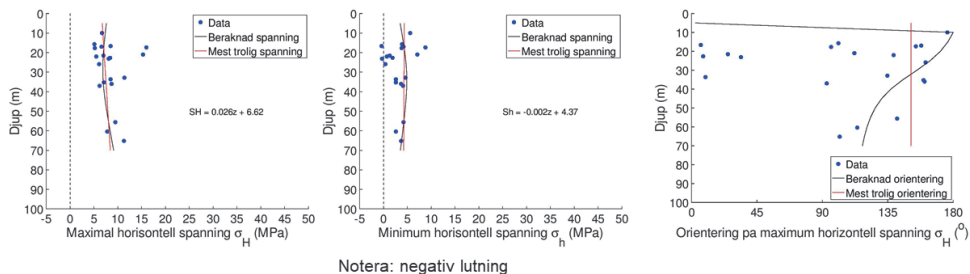
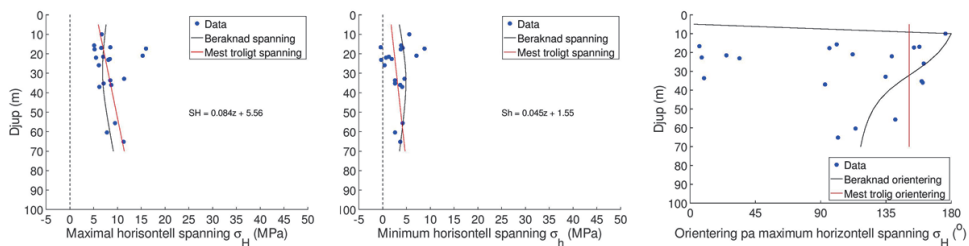
Notera: lutning erhållen genom att beakta alla data
Lösning B1



Notera: lutning erhållen genom nollspänningar vid markytan
Lösning B2



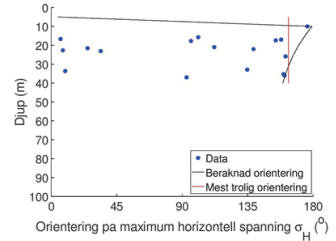
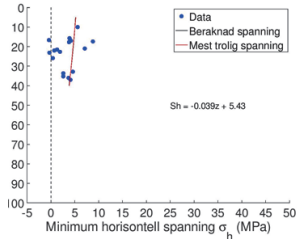
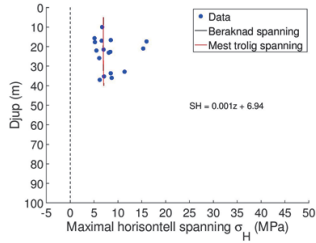
Grupp E: Humlegården, Huvudsta, Johannes brandstation, Odenplan, T-blå

Grupp E: Humlegården, Huvudsta, Johannes brandstation, Odenplan, T-blå
Linjär passning med begränsning

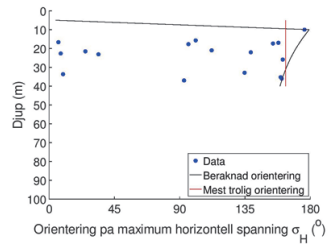
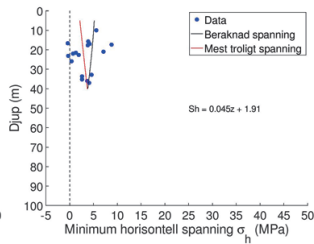
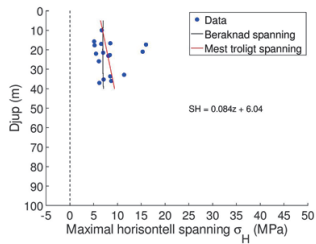
Notera: justerad eftersom σ_h ska vara mindre än eller lika med σ_H
lutning erhållen genom att beakta alla data
Lösning B1

Notera: lutning erhållen genom att beakta alla data
Lösning B1

Grupp E*: Humlegården, Huvudsta, Johannes brandstation, Odenplan (ej T-blå)



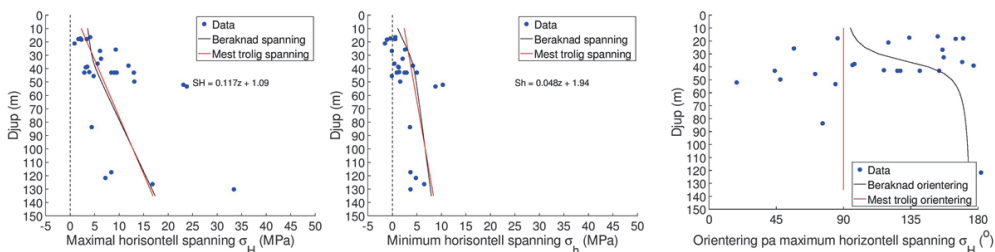
Notera: negativ lutning

Grupp E*: Humlegården, Huvudsta, Johannes brandstation, Odenplan (ej T-blå)
Linjär passning med begränsning

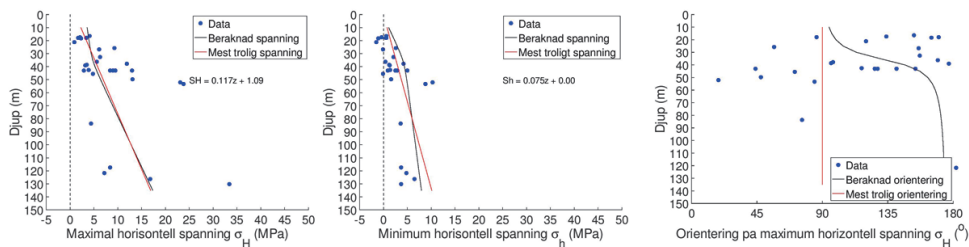
Notera: lutning erhållen genom att beakta alla data
Lösning B1

Notera: lutning erhållen genom att beakta alla data
Lösning B1

Grupp F: Danvikshem, Finnboda Varv, Henriksdals reningsverk, Södra Latin (Södermalm), Sofia Kyrka

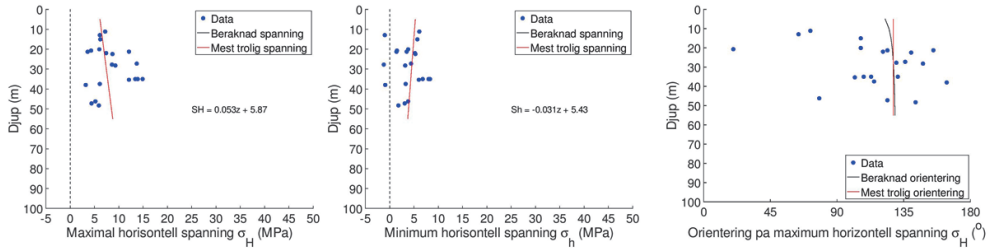


Notera: högre spänning vid markytan än för σ_H

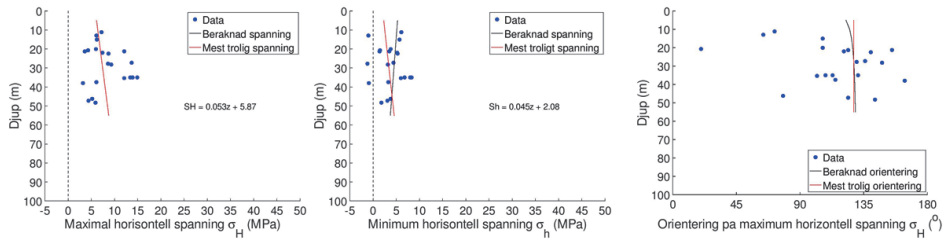
Grupp F: Danvikshem, Finnboda Varv, Henriksdals reningsverk, Södra Latin (Södermalm), Sofia Kyrka
Linjär passning med begränsning

Notera: lutning erhållen genom nollspänningar vid markytan
Lösning B2

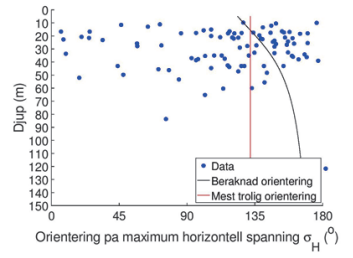
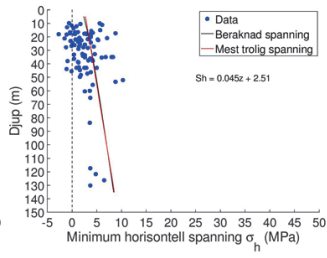
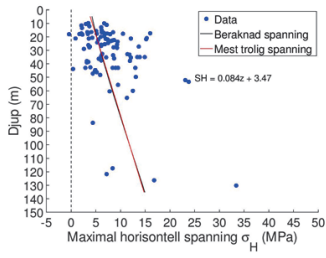
Grupp G: Bolidenplan, Slätbaksvägen, Station Gullmarsplan, Årsta torg



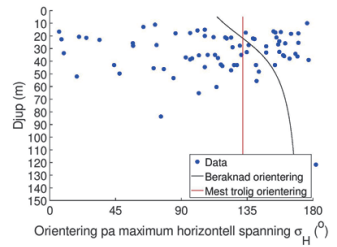
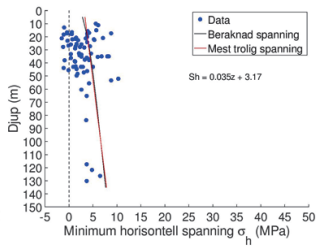
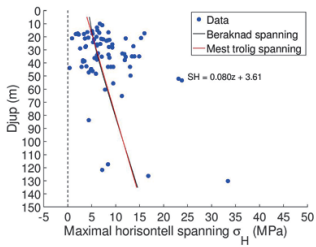
Notera: negativ lutning

Grupp G: Bolidenplan, Slätbaksvägen, Station Gullmarsplan, Årsta torg
Linjär passning med begränsningNotera: lutning erhållen genom att
beakta alla data
Lösning B1

Grupp H

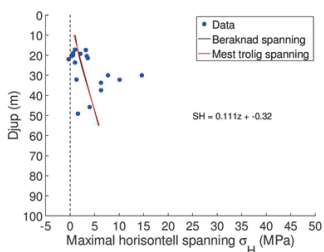


Grupp I

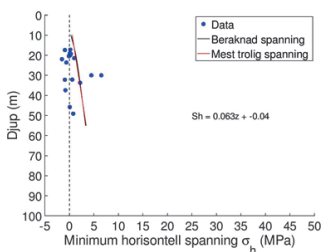


Spänningssamband med djup för Göteborg

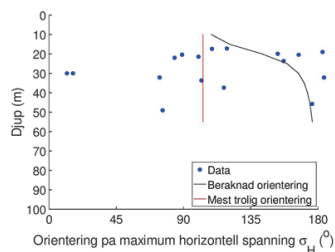
Grupp A: Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Götatunneln



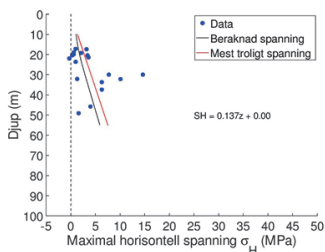
Notera: negativ spänning vid markytan



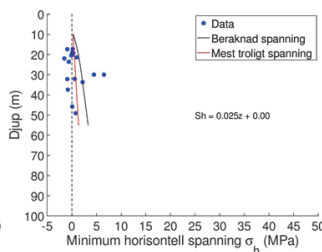
Notera: negativ spänning vid markytan



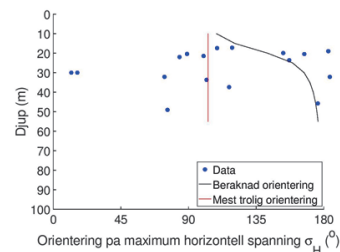
Grupp A: Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Götatunneln
Linjär passning med begränsning



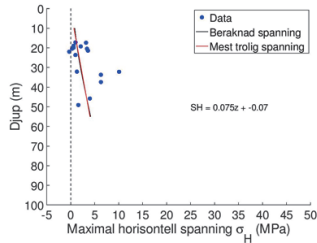
Notera: lutning erhållen genom nollspänningar vid markytan
Lösning B2



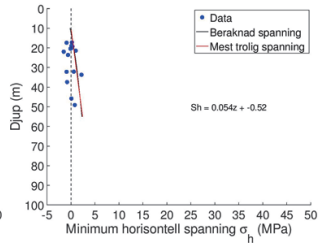
Notera: lutning erhållen genom nollspänningar vid markytan
Lösning B2



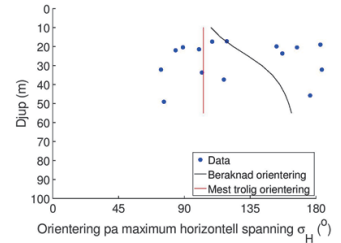
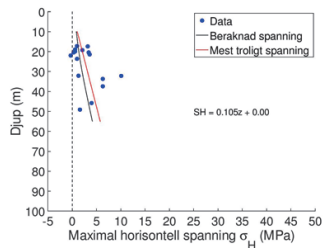
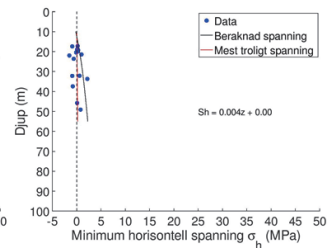
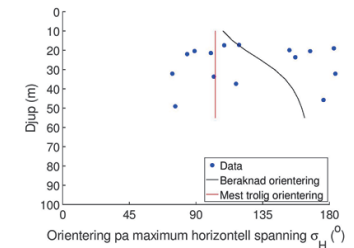
Grupp A*: Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget (ej Götatunneln)



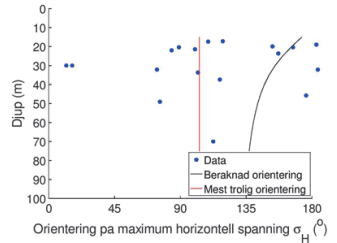
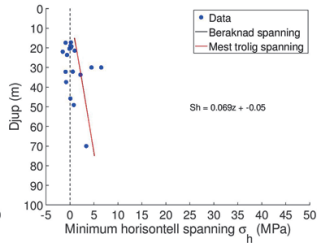
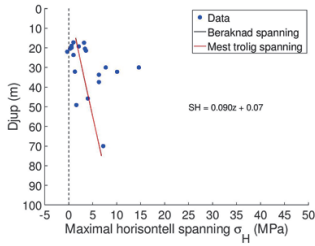
Notera: negativ spänning vid markytan



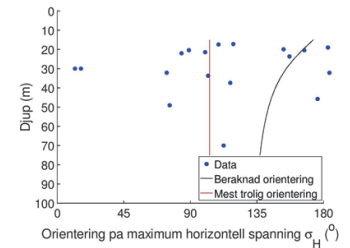
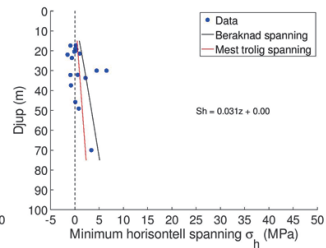
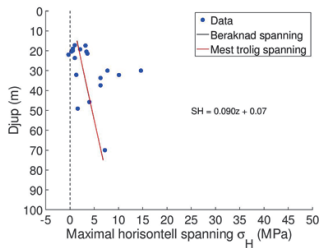
Notera: negativ spänning vid markytan

Grupp A*: Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget (ej Götatunneln)
Linjär passning med begränsningNotera: lutning erhållen genom
nollspänningar vid markytan
Lösning B2Notera: lutning erhållen genom
nollspänningar vid markytan
Lösning B2

Grupp B: Götatunneln, Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Roda Sten

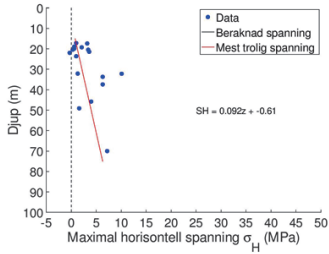


Notera: negativ spänning vid markytan

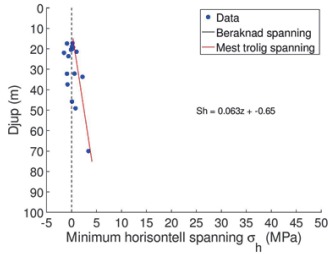
Grupp B: Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Götatunneln, Roda Sten
Linjär passning med begränsning

Notera: lutning erhållen genom
nollspänningar vid markytan
Lösning B2

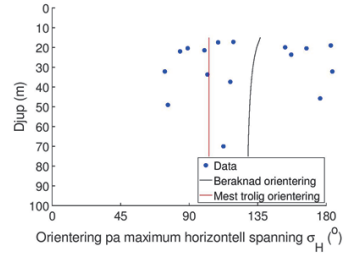
Grupp B*: Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Roda Sten (ej Götatunneln)



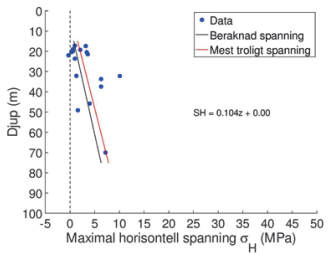
Notera: negativ spänning vid markytan



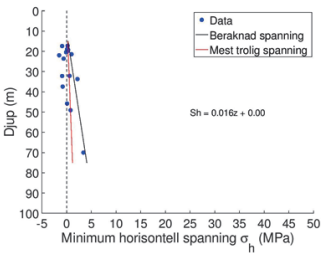
Notera: negativ spänning vid markytan



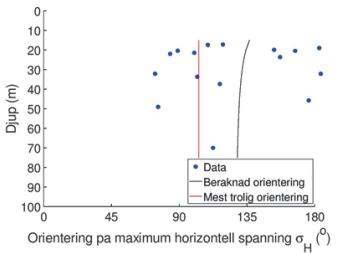
Grupp B*: Haga, Korsvägen Landeriet, Korsvägen Liseberget, Roda Sten (ej Götatunneln)
Linjär passning med begränsning



Notera: lutning erhållen genom nollspänningar vid markytan Lösning B2



Notera: lutning erhållen genom nollspänningar vid markytan Lösning B2





Box 5501
SE-114 82 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19, Stockholm

ISSN 1104-1773