



INSPÄNNINGENS BETYDELSE FÖR VIBRATIONSNIVÅN – Etapp 2 Fältförsök

Bengt Niklasson

Mats Olsson

Ali Beyglou

Nikolaos Petropoulos

INSPÄNNINGENS BETYDELSE FÖR VIBRATIONSIVÅN

Etapp 2 Fältförsök

How does confinement affect the vibration level in blasting

Phase 2 Field trials

Bengt Niklasson, Geosigma/NBMT AB

Mats Olsson, EDZ-Consulting AB

Ali Beyglou, Swebrec

Nikolaos Petropoulos, Swebrec

BeFo Rapport 151

Stockholm 2016

ISSN 1104 – 1773

ISRN BEFO-R – 151 – SE

Förord

I samband med byggnation av anläggningar i hårt berg i vårt land så används huvudsakligen sprängning. I närheten av bebyggelse krävs det att sprängningsarbeten utförs utan alltför höga vibrationsnivåer eftersom det kan leda till skador på befintliga strukturer.

Vi har idag en förståelse för vilka mekanismer som genererar vibrationer och kan dimensionera salvorna för att undvika alltför höga vibrationsnivåer. Det finns dock oklarheter kring hur inspända håll/laddning påverkar vibrationsnivåerna. Här finns både de i branschen som hävdar att inspända laddningar förhöjer vibrationsnivån och de som menar att det inte har någon påverkan. Så frågan är om det finns en fysikalisk förklaring till förhöjda vibrationsnivåer eller om denna uppfattning saknar grund?

En inledande studie (Ettapp 1) utfördes och rapporterades som BeFo-rapport 132 i juli 2014. Studien bestod av en litteraturstudie, en teoretisk betraktelse av vibrationer samt en genomgång av ett antal bomsalvor och visade inget samband mellan inspändhet och vibrationsnivåer.

För att komma vidare så beslutades att genomföra ett fältförsök (Ettapp 2) under kontrollerande förhållanden avseende sprängning, mätning och känd geologi. Föreliggande rapport redovisar det arbetet och har inneburit omfattande försök med sprängning i en bergtäkt. Analysen av resultatet tyder inte på att det är någon skillnad på vibrationer från inspända laddning eller de med fritt utslag.

Arbetet initierades och leddes av Mats Olsson (EDZ-consulting) och Bengt Niklasson (Niklassons Berg och Marinteknik). Övriga medverkande var Ali Beyglou (Swebrec), Nikolaos Petropoulos (Swebrec), Pier Goliats (Årsta Berg och Bygg), Ulf Nyberg (Swebrec) och Daniel Johansson (Swebrec). En referensgrupp bestående av Daniel Johansson (Swebrec), Pier Goliats (Årsta Berg och Bygg), Anders Östberg (Scandinavian Tunnelling AB), Mathias Jern (Nitro Consult) och (Per Tengborg BeFo) har bidragit med synpunkter under projektets gång. Projektet finansierades av BeFo (Stiftelsen Bergteknisk Forskning).

Stockholm i juni 2016

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

Vid sprängning inom tätbebyggt samhälle så måste alltid hänsyn tas till nivån på vibrationerna vilket ofta medför komplicerade och dyrbara åtgärder. Den sprängtekniska litteraturen brukar ange laddningens inspänning som en av de viktigaste orsaker till förhöjda vibrationsnivåer. Det är en vanlig uppfattning att mer inspända laddade hål ger förhöjda vibrationsnivåer i jämförelse med laddningar med normal försättning. Finns det någon fysikalisk förklaring till detta eller är påståendena om förhöjda vibrationer en missuppfattning?

En förstudie har tidigare genomförts och redovisats i BeFo-Rapport 132, (Niklasson et.al, 2014). Denna förstudie omfattade en litteraturstudie, en teoretisk betraktelse av vibrationer samt en genomgång av ett antal observerade bomsalvor från tunneldrivning och en försöksserie enhålssprängning i pall. Resultatet av förstudien visar att det finns två skilda uppfattningar i världen vad gäller inspändhet och då uppkomna vibrationer. Den ena uppfattningen är att inspändheten har betydelse på vibrationerna och den andra uppfattningen är att inspändheten saknar betydelse. Förstudien visade vidare genom studier av vibrationer från ett antal bomsalvor att bevis saknas på att inspändheten hos laddningar skulle ha någon betydelse för vibrationsnivån.

Denna rapport redovisar ett omfattande fältförsök med vibrationsmätning vid sprängning av hål med fritt utslag resp. inspända hål. Försöket utfördes vid Långåsens bergtäkt i Arlanda. Här sprängdes i en pall 13 hål med fritt utslag samt 10 inspända hål. Försättningen för hålen med fritt utslag var ca 1,5 m och de inspända hålen låg ca 15 m bakom pallkanten. Håldimensionen var 45 mm hål, håldjupet ca 3 m och laddningsvikten var ca 1kg/hål. Samtliga hål förladdades med grus. Mellan raderna med fritt utslag och de inspända hålen borrades hål för vibrationsmätningarna. Vibrationerna mättes här med hjälp av 3 st. tre-axiella geofoner som var fastgjutna i borrhålen. Ytterligare en tre-axiell geofon placerades på bergytan för ytregritering av vibrationerna.

Sprängarbetena gick mycket bra och samtliga hål med normal försättning slog ut ordentligt. Några av de inspända hålen orsakade att en bergskiva lyftes och att befintliga sprickor öppnades upp.

Den efterföljande vibrationsanalysen omfattade bl.a. en vektorsummering av vibrationsnivåerna i olika riktningar. Resultatet av denna analys visade att det inte var någon skillnad på toppvärdet för vibrationernas vektorsumma från hål som var inspända jämfört med hålen med fritt utslag.

Nyckelord: Vibrationer, inspända hål, sprängning, geofoner, stenbrott

SUMMARY

Blasting in urban areas must involve techniques to control the vibration level. Charge confinement is one of the parameters that are believed to influence the vibration level. A charge could be too confined due to:

- Incorrect charge calculation (charge weight is too small for the drilled burden)
- Incorrect interval-time (holes behind are initiated before holes ahead)
- Incorrect selection of explosive for the burden or an influence of dead pressing
- Unfavourable selection of geometry
- Drill hole deviation

A common opinion among blasters is that an increased confinement results in a higher vibration level. Is there a physical explanation for this or is it just a common misunderstanding established a long time ago?

A feasibility study was previously conducted and reported in BeFo Report 132, (Niklasson et.al, 2014). The report comprised a literature study and an assessment of a number of observed misfires in tunnels, still with correctly detonating charges but with a reduction of more than 50 % in pull or rock breakage. It also comprised a statistical analysis of some of the rounds. The result of the study found no evidence for a relationship between degree of charge confinement and vibration level.

As a result of the feasibility study a field study was proposed. This study was performed in a quarry, some 40 km north of Stockholm, close to Arlanda airport. A number of single holes were blasted; both holes with full breakage and confined holes and the vibration levels were measured.

13 single holes with full breakage and 10 totally confined single holes were blasted. The burden was 1.5 m for the holes with breakage and the confined holes had a distance to the free surface of some 15 m. The hole diameter was 45 mm and hole depth 3 m. The holes were charged with a dynamite explosive, Minex Eco, and the charge weight was 1 kg/hole. The charges were initiated with electric detonators. All holes were stemmed.

The vibration levels were measured in three holes with a depth of 3 m. In the bottom of the holes three-axial geophones were grouted. A fourth geophone was placed on the surface.

Single hole blasting were performed with very good result. The holes close to the surface gave full breakage while the confined holes showed no breakage.

The vibration signals were vector summarised and analysed. The distances from each hole to each geophone was determined. The vibration PPV-values were plotted as a function of the distances.

The final result showed that there were no significant differences in vibration levels between confined holes and holes with full breakage.

Key words: Vibrations, confined holes, blasting, geophones, grouting, quarry

Innehållsförteckning

1	BAKGRUND	1
2	MÅLSÄTTNING	1
3	GENOMFÖRANDE	3
3.1	Val av bergtäkt	3
3.2	Geologi	4
3.3	Inmätning av försöksområdet	5
3.4	Borr- och laddplan	6
3.5	Mätteknik för vibrationer	8
3.6	Borning och sprängning	9
3.7	Vibrationsmätning	13
4	RESULTAT	15
4.1	Sprängning	15
4.2	Vibrationsmätning	18
4.3	Kartering efter sprängning	27
5	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	29
5.1	Tidigare resultat	29
5.2	Sammanställning av fältförsöken	30
5.3	Slutsats	32
6	Fortsatta undersökningar	35
7	ERKÄNNANDE	37
8	REFERENSER	39
	APPENDIX 1. Mätadata från geofonerna	41
	APPENDIX 2. Avstånd mellan mätpunkter	45
	APPENDIX 3. Evaluation of vibrations from the field tests- Rapport från Ali Beyglou	47

1 BAKGRUND

Vid sprängning inom tätbebyggt samhälle så måste man alltid ta hänsyn till nivån på vibrationerna. Detta kan medföra komplicerade och dyrbara åtgärder. I den sprängtekniska litteraturen så brukar laddningens inspänning nämnas som en av de viktigaste orsaker till förhöjda vibrationsnivåer. Inspända förhållanden kan t.ex. uppkomma vid:

- Felaktig laddningsberäkning
- Fel intervalltid
- Fel val av sprängämne
- Ogynnsam geologi
- Borrhålsavvikelse

Oftast brukar man med inspändhet mena att laddningen har fått för stor försättning för att åstadkomma planerat utslag. Det är en vanlig uppfattning bland sprängare att dessa inspända hål då ger förhöjda vibrationsnivåer. Finns det någon fysikalisk förklaring till detta eller är påståendena om förhöjda vibrationer en missuppfattning?

Det är viktigt att konstatera om vibrationsnivåerna verkligen påverkas av det man brukar kalla för inspändhet. I vissa handböcker om sprängning påstås att inspändheten påverkar vibrationsnivåerna vid sprängning och därför skyller man ofta på inspända hål vid överskridande av vibrationsnivåerna vid bergschakt. Konsekvenserna av ett produktionsstopp pga. vibrationsöverskridanden kan innebära höga kostnader och förseningar. Då den korrigerande åtgärden ofta är att ändra borrhåls- eller tändplan i syfte att minska inspänningen är det viktigt att vara klar över om denna åtgärd egentligen har någon effekt.

Som ett första led i undersökningen av inspänningens betydelse för vibrationsnivån har en förstudie genomförts och redovisats i BeFo-Rapport 132, (Niklasson et.al, 2014). Denna förstudie omfattade en litteraturstudie, en teoretisk betraktelse av vibrationer samt en genomgång av ett antal observerade bomsalvor från tunneldrivning och en försöksserie enhållsprängning i pall. Resultatet av litteraturstudien visar att det finns två skilda uppfattningar i världen vad gäller inspändhet och då uppkomna vibrationer. Den ena uppfattningen är att inspändheten har betydelse på vibrationerna och den andra uppfattningen är att inspändheten saknar betydelse. Den genomförda studien av vibrationer från ett antal bomsalvor och den statistiska analysen visar inga bevis på att inspändheten hos laddningar skulle ha någon betydelse för vibrationsnivån. I förstudien föreslogs att en noggrant kontrollerad undersökning borde göras genom sprängning av ett antal hål med olika försättningar och med registrering av vibrationerna. Denna rapport redovisar genomförandet och resultatet av detta fältförsök.

2 MÅLSÄTTNING

Målsättningen är att undersöka om inspända laddningar ger högre vibrationsnivåer vid sprängning jämfört med vibrationsnivåerna från laddningar med fritt utslag.

Projektresultatet förväntas få stor nytta hos entreprenörer och beställare genom att bättre kunna vidta rätta åtgärder vid överträdande av tillåtna vibrationsvärden.

3 GENOMFÖRANDE

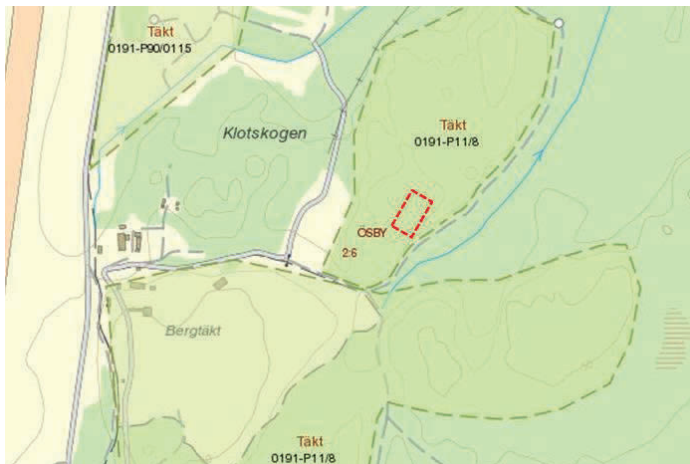
3.1 Val av bergtäkt

En förfrågan gjordes till Skanska och NCC om förslag på lämpliga täkter för försöket.

NCC Roads bergtäckt i Långåsen valdes som lämplig försöksplats och täkten besöktes för urval av lämpligt område. Ett stort område var avröjt för framtida brytning och här hittades också ett område som bedömdes intressant för försöket, se Figur 1. Området var ca 30x 30 m med en befintlig pallhöjd på 2-5 m. Figur 2 visar en karta över området.



Figur 1. Försöksområdet i Långåsens bergtäkt. *The test bench in the quarry.*



Figur 2. Karta över området, provområdet markerat (i vänster del syns Arlandas Bana 3). *Map over the area (the test bench marked red).*

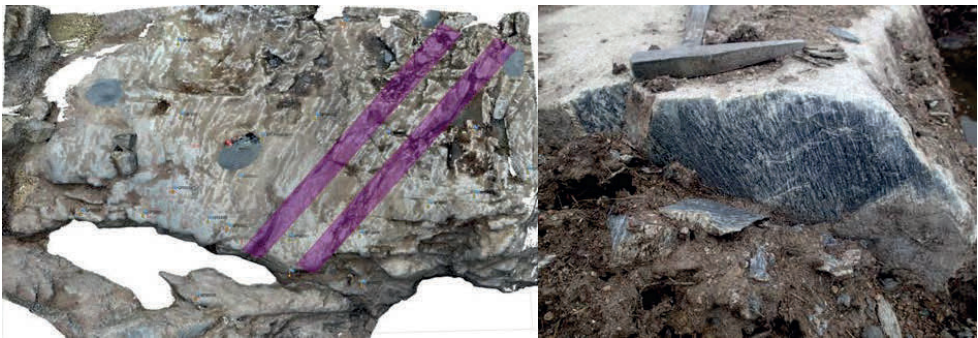
3.2 Geologi

3.2.1 Topografi

Hällen som utgör provområdet begränsas i nordväst av en slänt som är ca 3-4 m hög. I släntfoten finns en ca 1 m bred spröd deformationszon orienterad 040/70. Den stupar brant in under provområdet och påverkar således inte bergmassan i provområdet. Övriga sidor begränsas av medelbranta 30° – 60°svackor i berget.

3.2.2 Bergarter

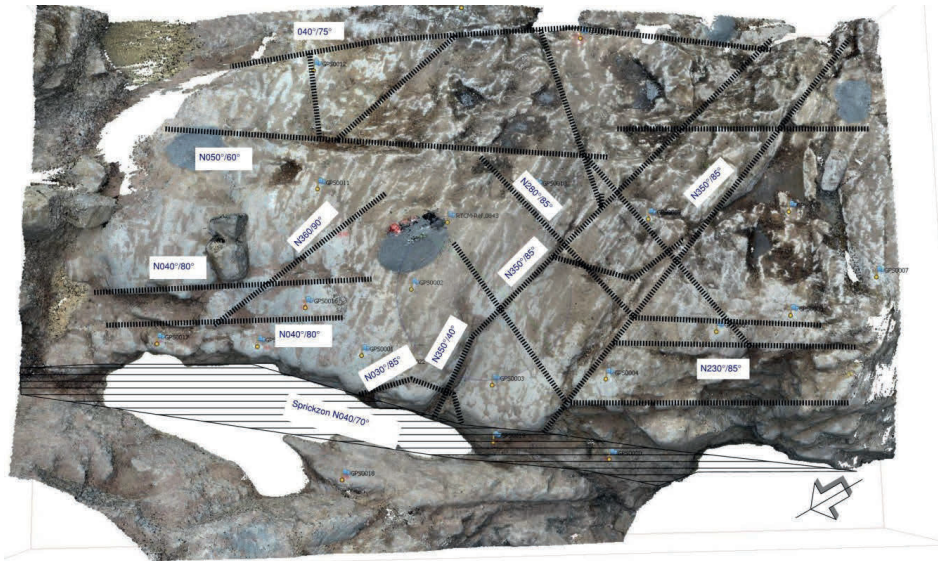
Bergarten inom området för provsprängning utgörs till största del av gnejsgranit. Gnejsgraniten är grå till färgen och fin till medelkornig. Bergarten är i huvudsak frisk, inga större omvandlingar eller vittringszoner har observerats. Bergarten är förskiffrad och med all säkerhet påverkad av de större plastiska och spröda deformationszoner, redovisade på SGU:s berggrundskarta. Huvudriktning för foliationsplanen har orienteringen 030/70 (strykning/stupning). Huvudbergarten genomsetts av några mindre diabasgångar 0,5- 1,0 m breda varav två stycken karterades i området för provsprängning. De har båda orienteringen 350/85 och har få öppna sprickor. Gångarna av diabas har läkta spricknätverk som till största del utgörs av kvarts och kalcit. Figur 3 visar några foton på bergarten.



Figur 3. Provområdets bergartsfördelning. Lila-markerade områden utgörs av diabasgångar. Övriga delar av hällen utgörs av gnejsgranit (höger bild). *Geology in the test area (diabase dike)*

3.2.3 Tektonik

Provområdet domineras av två spricksystem, ett brant som stryker i nord-sydlig riktning och ett brant som stryker i nordöst-sydväst. Sprickorna är i huvudsak plana. Karterade spricksystem redovisas i Figur 4.



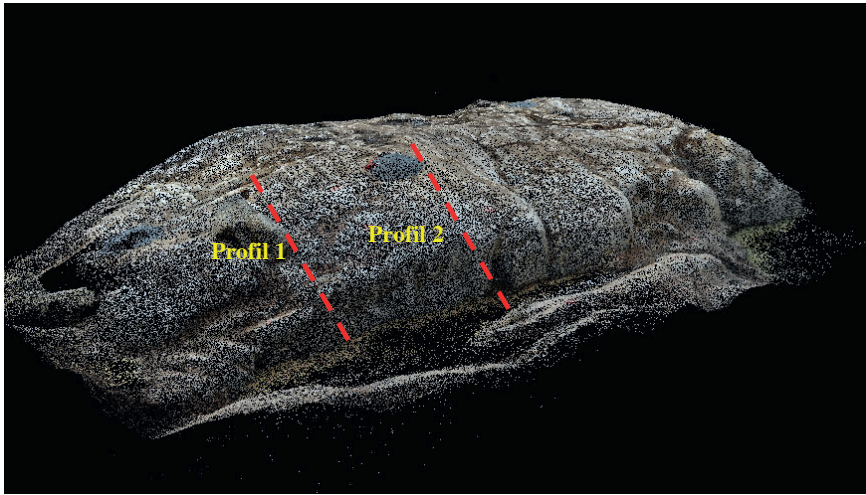
Figur 4. Öppna sprickor som karterats innan sprängning. *Opened fractures before blasting*

3.3 Inmätning av försöksområdet

En inmätning med 3D fotografering (ca 1000 bilder) gjordes av Geosigma av hela försökspallen. Med hjälp av inmätta punkter kunde hela området digitaliseras med möjlighet t.ex. till att bilda profiler längs pallkanten. Figur 5 visar en 3D översiktsbild av området med fixpunkter och Figur 6 en digitaliserad bild. Profiler lades tvärs över området och med hjälp av dessa kunde sedan läget för borrhålen bestämmas, se vidare avsnitt 3.4.1.



Figur 5. 3D-bild av området. *3D picture of the area*



Figur 6. Digitaliserad bild av försöksområdet. *Digitized picture of the area with profiles*

3.4 Borr- och laddplan

3.4.1 Planering av borr-laddplan

Vid planeringen av projektet, innan provplatsen var känd, föreslogs att ett antal borrhål skulle sprängas, dels med normal försättning för vald borrhålsdiameter och laddningsvikt och dels med en så stor försättning att utslag inte var möjligt. Planerna var att använda 51 mm hål då denna håldimension inte är helt olik de håldimensioner som vanligtvis används vid tunnelsprängning. Vidare föreslogs använda relativt korta hål, ca 3 m, och att hålen skulle laddas med ett dynamitsprängämne med en laddning på ca 2kg/hål. För att erhålla ett bra statistiskt underlag skulle 10 hål sprängas med utslag och 10 hål utan utslag. Salvorna skulle enbart bestå av enhållsprängning och de två grupperna om 10 hål indelas i två rader med 5 hål/rad.

Vibrationerna skulle mätas i 3 riktningar med accelerometrar eller geofoner, nedsänkta i borrhål och där fastgjutna. Mäthålen skulle vara 3 m djupa och placeras 30 m bakom den fria pallytan och med 30 m fram till hålen med de inspända laddningarna.

På den valda försöksplatsen i Långåsen fanns det inte plats för den planerade layouten utan en ny layout togs fram.

3.4.2 Verklig borr-laddplan

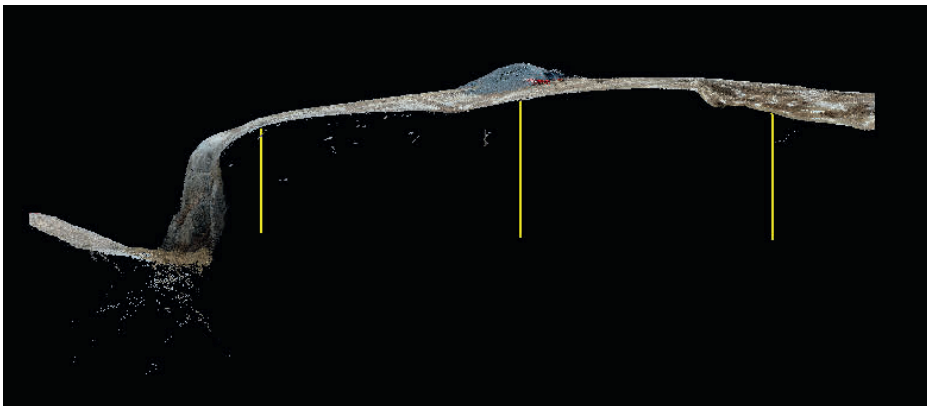
Den nya layouten anpassades efter försökspallen i Långåsen och avstånden mellan försöksraderna och mäthålen reducerades från 30 m till ca 8 m. Efter inmätning lades profiler ut vinkelrät mot pallfronten med hjälp av datorprogrammet Fugro Viewer, se några exempel i Figur 7 och Figur 8. Detta gjorde det möjligt att kunna bestämma borrhålslägen och borrhålsdjup för både spränghål och mäthål och tillse att mäthålen hamnade på rätt djup i förhållande till spränghålen, se ett exempel i Figur 9.



Figur 7. Tvärprofil 1(se Figur 3). *Cross profile 1(see Figure 3)*



Figur 8. Tvärprofil 2 (se Figur 3). *Cross profile 2(see Figure 3)*



Figur 9. Exempel på konstruktionshjälp för spräng- och mätåål. *Planning of holes*

För den personliga säkerheten borrades förankringsbultar i berget varefter rep kopplades mellan förankringsbult och säkerhetssele. På så sätt kunde borrhålen sedan säkert märkas ut. Korta hål borrades därefter med en Hilti för att underlätta den efterföljande bormingen.

3.5 Mätteknik för vibrationer

Swebrec vid LTU ansvarade för vibrationsmätningarna vid fältförsöket. Utrustningen bestod av geofoner, kablage samt registreringsutrustning.

3.5.1 Geofoner

Geofonerna köptes från Institute of mine seismology i Australien. De var 3-axiella och mäter inom frekvensen 2,6-2000 Hz. Geofonerna utrustades med styrfjädrar för att passa bra i hålen. Figur 10 visar en geofon på väg att sänkas ner i ett borrhål. Mer data om geofonerna hittas i Tabell 1.



Figur 10. Installation av en geofon i ett mätthål. *Installation of a geophone in a hole*

Tabell 1. Data för geofonerna. *Technical data of the geophones*

Frequency range ($\pm 3\text{dB}$)	2,6-2000 Hz
Natural frequency	4,5Hz \pm 0,5 Hz
Open circuit sensitivity	28,8 V/m/s \pm 5%
Moving mass	11,1 g
Max coil excursion (peak to peak)	4 mm
Diameter	55 mm
Length	300 mm
Mass	1,3 kg
Min hole diameter	76 mm

3.5.2 Registreringsutrustning

En 32 kanals mätenhet (PXIe-1073) från National instruments inställd på samplingsfrekvensen 25 kHz användes för att samla in data från geofonerna. Denna anslöts sedan till en vanlig laptop för överföring av data.

3.6 Borrning och sprängning

3.6.1 Borrning av försökshål

Årsta Berg&Bygg var ansvariga för borrning och sprängning under projektet. Hålen borrades med en Atlas Copco Roc D3. Håldimensionen för språnghålen var 45 mm och för mätålen 76 mm. Håldjup och riktning på hålen erhöles från tidigare inmättningsresultat och håldjupet var i snitt ca 3 m. Figur 11 visar några bilder från borrningen.



Figur 11. Borrning av försökshål. *Drilling of the test holes*

3.6.2 Inmätning av borrhålslägen

Efter avslutad borrning mättes håldjup varefter det exakta läget av påhuggen mättes in, se Figur 12. Hålens exakta lägen var viktigt att bestämma för att kunna utföra den efterföljande beräkningen av hålavstånd mellan språnghål och mätålen.

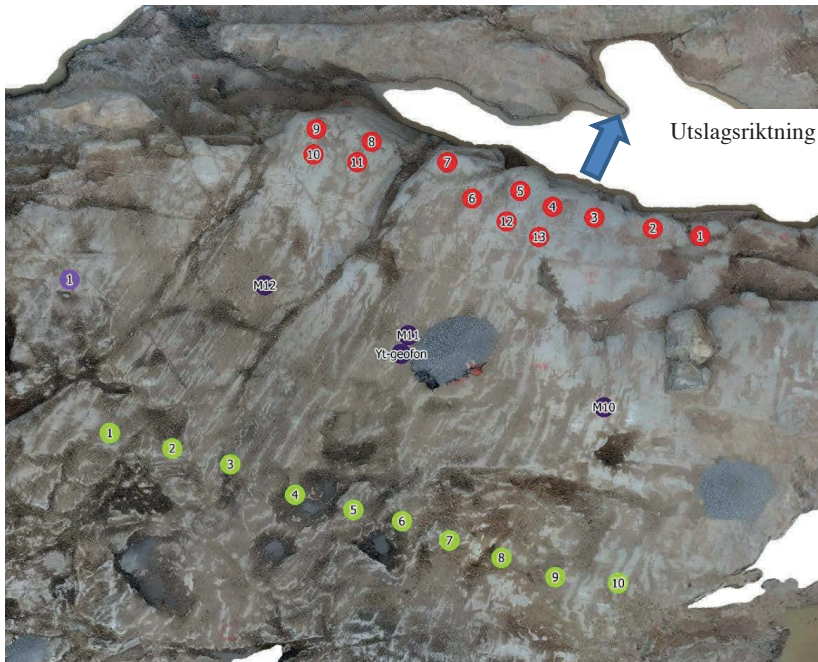


Figur 12. Inmätning av borrhål. *Surveying of the holes*

Resultatet av inmätningen av samtliga hål visas i Figur 13 samt i Figur 14.



Figur 13. Inmätta hål (hål med fritt utslag är röda, inspända laddningar är gröna och mät hålen mellan dessa). *The test holes (holes with breakage are red, confined holes are green and geophones, blue, in between)*



Figur 14. Inmätta hål, 13 hålen med utslag (röda) och 10 inspända helt utan utslag (gröna). De fyra mätpunkterna, M10, M11, M12 och ytgeofon är markerade med blå färg. *The test holes (holes with breakage are red, confined holes are green and geophones, blue, in between)*

3.6.3 Riskanalys

Innan försöket inleddes gjordes en riskanalys bl.a. utifrån närheten till Arlanda flygplats. Ett urval av påverkande parametrar visas här.

Kast

- Avstånd till flygplatsgränsen är 700 m. En noggrann avtäckning är utförd
- Hålen är maximalt 3,2 m långa
- Laddningen är maximalt 1,2 kg
- Proppningens längd är ca 2 m vilket reducerar kast i vertikal riktning
- Ett hål skjuts år gången
- Blåsning av borrhål sker innan borring
- Utslag sker i botten på en mindre ravin som skyddar mot kast

Risk: Låg risk för skador pga. kast.

Halkrisk

- Dubbar finns för att koppla fast säkerhetssele vid laddningsarbete nära pallkanten
- Dubbhål för säkring av maskin finns borrade
- Bergytan avtäckt

Risk: Låg till måttlig risk.

Dolor

- Eftersom laddningarna sprängs en och en är en dola lätt att detektera
- Ingen risk för felkoppling föreligger

Risk: Låg risk.

Postning

- Information till samtliga inom arbetsplatsen ges
- Postning görs på platser med god överblick över området
- Signal ges före sprängning
- Särskild uppmärksamhet på att obehöriga kan befinna sig inom industriområdet

Risk: Hög risk.

Sannolikheten att någon kommer in framför hålet då det sprängs är mycket låg men om detta ändå skulle hända kan konsekvensen bli mycket allvarlig.

3.6.4 Laddning och sprängning

Hålen laddades med 32 mm patronerade laddningar Minex Eco som är ett dynamit-sprängämne. Varje patron av detta sprängämne väger 625 g. Varje hål laddades med 1,5 st laddningar, se Figur 15, vilket motsvarar 938 g/hål. Patronerna tejpadades ihop till en laddningslängd av 825 mm. Hålen blåstes rena innan laddning.



Figur 15. Hoptejpade laddningar. *Charges used.*

Sprängämnet initierades med FIREX VA Ms-Elsprängkapsel nr 19 från Forcitet. Laddningarna fördes ner i hålet och ovanpå laddningen trycktes lite papper ner. Avstånd yta till proppen mättes varefter proppgrus hälldes på och fyllde hålet ända upp, se Figur 16. Detta innebär en förladdning på 1,4–2,5 m beroende på hållängd. I Tabell 2 visas en sammaställning av hållägen för fritt utslag. Försättningen varierar beroende på att pallfronten var ojämn. Hål 10-13 placerades bakom hål 4-9 och sprängdes efter hål 4-9.

De inspända hålen låg ca 15 m bakom pallkanten och dessa hål laddades och initierades på samma sätt som hålen med fritt utslag.

Tabell 2. Håldata (hål 10-13 låg ca 1,3 m bakom hålråd 1-9). *Spacing, burden and hole depth*

Hål Hole no	Hålavstånd (m) Spacing (m)	Försättning (m) Burden (m)	Håldjup (m) Hole depth (m)
1		0,8	2,2
2	2,2	1,0	2,7
3	2,3	1,0	2,3
4	2,3	1,2	3,3
5	2,1	1,6	3,3
6	3,4	Ca 1,8	2,7
7	1,9	Ca 1,8	3,3
8	2,5	Ca 1,5	2,5
9	2,5	Ca 1,5	2,5
10		Ca 1	3,0
11		Ca 1,3	2,6
12		Ca 1,3	3,5
13		Ca 1,3	3,3



Figur 16. Proppat hål. *Stemming of a hole*

Hålen laddades och sprängdes var för sig och resultatet efter varje håls sprängning bestämde vilket hål som skulle laddas och sprängas härnäst.

3.7 Vibrationsmätning

Expanderande snabbcement, Weber exm 702, hälldes i mätthålen och geofonerna trycktes ner med hjälp av hopsatta stänger, se Figur 17. För varje hål användes ca 3 l betong vilket innebar att betongen nådde 30-50 cm över geofonerna.

Kablar drogs mellan geofonerna och registreringsenheten. Då igen fast el fanns på platsen användes ett bärbart Honda elverk. Såväl registreringsenhet som elverk jordades för att undvika störningar.



Figur 17. Geofonerna trycks ner i cement i mätthålet. *Pushing the geophones down*

Förutom ingjutna geofoner placerades även en geofon på bergytan nära mätthål 2 i en speciellt framtagen gjuten fixtur, se Figur 18.



Figur 18. Gjuten fixtur för ytgeofon. *Fixture for the surface geophone*

4 RESULTAT

4.1 Sprängning

Innan det egentliga försöket startade så gjordes en provsprängning i ett särskilt hål i syfte att kalibrera vibrationsmätningstrustningen. Försökssprängningen omfattade därefter 13 hål med utslag och 10 hål utan utslag (inspända laddningar).

4.1.1 Sprängning med utslag

Försökssprängningarna inleddes med sprängning av hål nr 9, se Figur 19. Resultat var bra med fullt utslag där laddningen var placerad.



Figur 19. Resultat från sprängning av hål 9 (hålet låg framför hål 10). *Blasting result from hole 9*

Hålen sprängdes därefter växelvis höger pallkant och vänster pallkant för att undvika styrd sprickbildning. I Figur 20 visas ett antal resultat från sprängningen av hålen med fritt utslag. Generellt gick sprängningarna mycket bra och kastningen togs, som planerat, upp till största delen av motstående bergvägg.



Figur 20. Resultat från sprängning av håll 1, 2, 8, 12 och håll 13. *Blasting result from some of the holes*

Utkast av sten begränsades beroende på korta laddningslängder och långa förladdningar. Längsta kastet uppskattas till ca 100 m, se Figur 21.



Figur 21. Längsta stenkast var ca 100 m. *Longest throw was up to 100 m.*

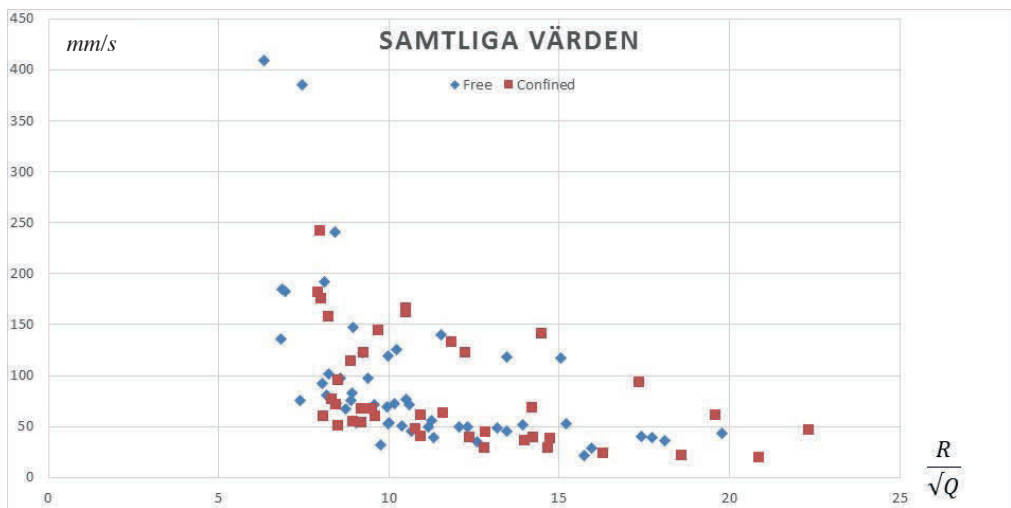
4.1.2 Sprängning utan utslag (inspända laddningar)

Vid dessa sprängningar förväntades endast att laddningarna skulle detonera men utan utslag. Sprängningen av hål 7 öppnade upp en spricka mot hål 6 och sprängning av hål 9 och 10 medförde att en skiva lyftes upp. Orsaken till detta var att ett sprickplan öppnades, se vidare kapitel 5.3.

4.2 Vibrationsmätning

Resultatet av vibrationsmätningar kan ses i Appendix 1 där vektorsumneringen av varje mätpunkt är redovisad för varje laddning som sprängdes. I detta kapitel kommer för enkelhetens skull benämningen hål eller testhål att användas för att beskriva det som även kan uttryckas för testskott eller laddning. Begreppet hål innebär alltså ett laddat borrhål.

Sambandet mellan det vektorsumnerade vibrationsvärdet och avståndet mellan spränghål och geofoner redovisas i Figur 22. Diagrammet visar vibrationsnivån i mm/s som funktion av laddningsvikt och avstånd i form av en skalning av $\frac{R}{\sqrt{Q}}$ där R är avståndet i m och Q är laddningsvikten i kg. Eftersom laddningsvikten är nära 1 så skiljer sig kvoten i skalningen inte nämnvärt från storleken på avståndet.



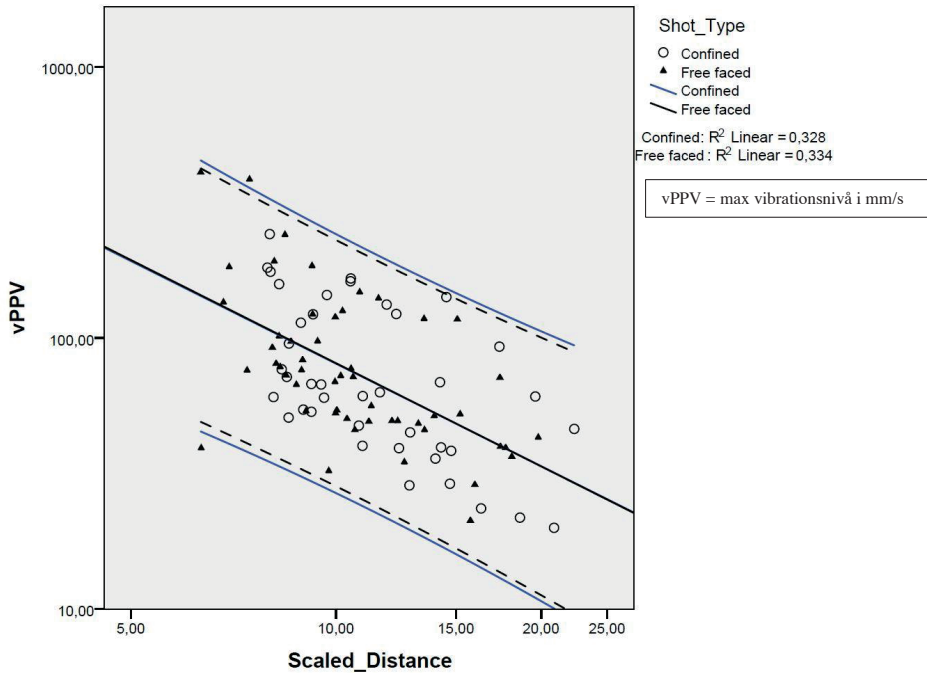
Figur 22. Sambandet mellan vibrationer (mm/s), avstånd (m) och laddningsvikt (kg) för samtliga hål. *PPV (mm/s) as a function of distance (m), charge weight (kg) and scaled distance, for all shots.*

4.2.1 Analyser

Vissa av analyserna har gjorts på hela materialet där samtliga mätpunkter och hål ingår. Andra analyser fokuserar på delområden av bergplinten där försöken utfördes, för att se om det finns lokala strukturella skillnader i bergmassan som har påverkat resultaten. Ytterligare analyser syftar till att undersöka om mätriktningen eller mätgivare i vissa riktningar påverkat resultatet.

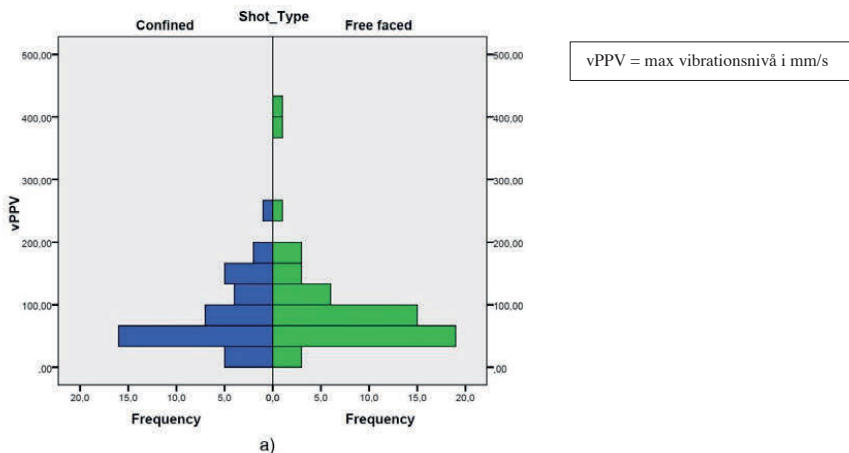
4.2.1.1 Hela mätresultatet.

I resultatet från Figur 22 kan det rent visuellt konstateras att skillnader i vibrationsnivån mellan helt inspända hål och hål med utslag är svåra att se. I en analys gjord av Ali Beyglou, Swebrec, se Appendix 3, framgår att om man tittar på hela resultatet så ligger det 95 procentiga konfidensintervallet för båda typer av testhål i stort sett överlagrade, se Figur 23.



Figur 23. Figuren visar 95-procentsintervallen för både helt inspända hål och laddningar med utslag. *The 95% confidence intervals for vibrations from confined and free faced shots.*

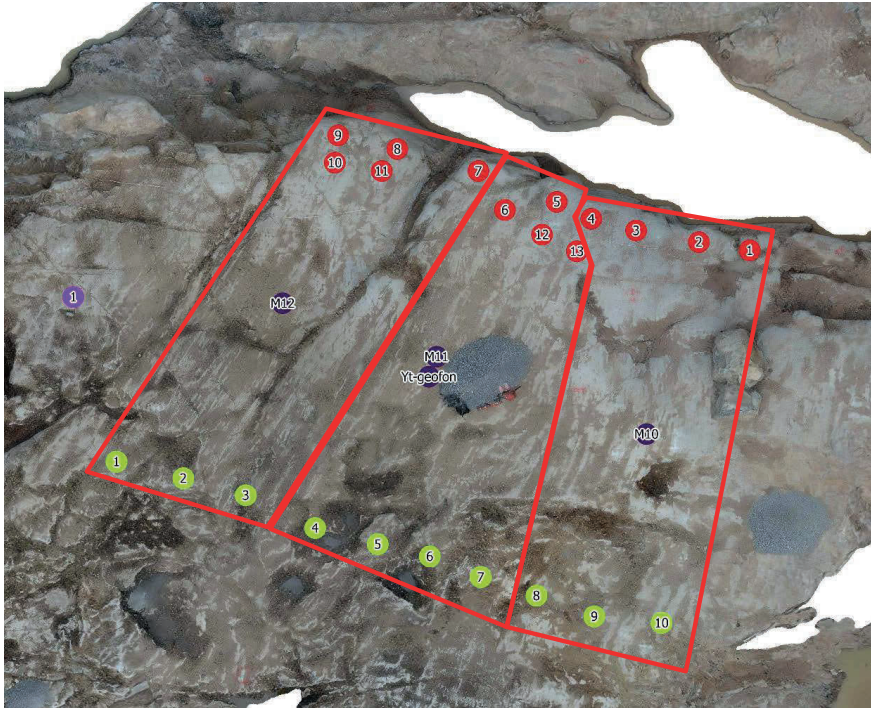
Tittar man vidare på fördelningen av vibrationsvärden för hål med utslag och helt inspända så ser den i stort sett lika ut, se Figur 24. Det kan konstateras att de högsta värdena som uppmättes kommer från testhål med utslag.



Figur 24. Fördelningen av samtliga vibrationsvärden för samtliga hål. Gröna staplar är testhål med utslag och de blå är inspända. *Distribution of all PPV values for all shots.*

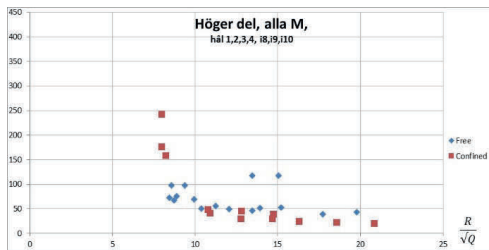
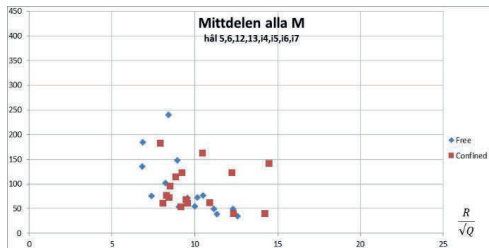
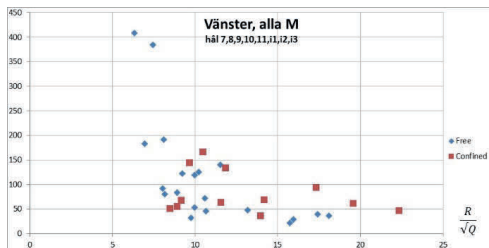
4.2.1.2 Resultat utifrån område på pallen

En indelning av pallen har gjorts för att se om olika delar ger olika resultat. Pallen har indelats i en högerdel, en mittdel och en vänsterdel, se Figur 25. De mätdata som redovisas i Figur 26 är från samtliga givare.



Figur 25. Indelningen av pallen i tre olika områden. *The test bench is divided into three areas. Measuring data is evaluated for each area but only by the one measuring point in the area.*

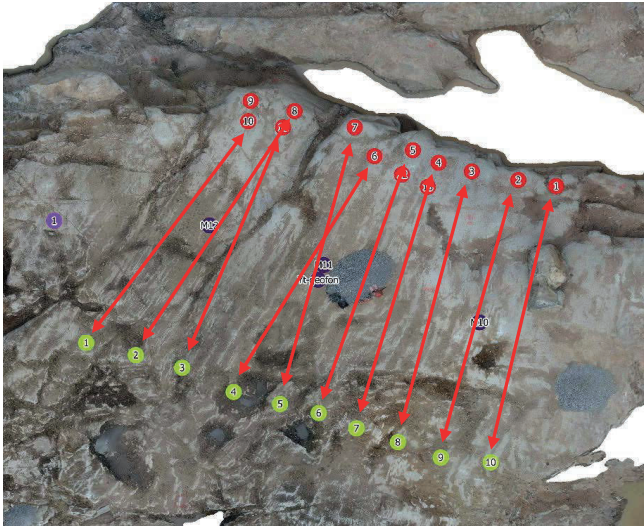
Resultatet från det högra området visas i Figur 26/a. Inga tydliga skillnader finns mellan inspända hål och hål med normalt utslag. Liknande resultat uppvisas även i den mittre och den vänstra delen av testpallen Figur 26/b och 26/c.

a) Höger del. *Right part.*b) Mittdelen. *Middle part*c) Vänster del. *Left part*

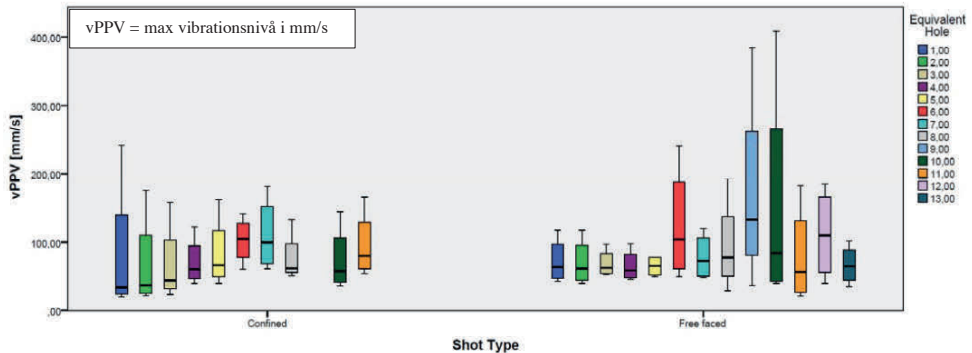
Figur 26 a-c. Resultaten från pallens olika delar, höger, mitt och vänster. Ingen tydlig skillnad i resultatet mellan de olika håltyperna kan ses. *Figure a, b and c shows the results from three different parts of the bench. No difference between free faced and confined holes could be seen.*

Ett annat sätt att dela in pallan i mindre områden är att titta på hålen parvis, dvs. ett hål med utslag jämförs med motsvarande inspända hål i rakt motsatt riktning av mätpunkten. Ali Beyglou har tittat på denna utvärdering, se Appendix 3. De hål som parvis jämförts kan ses i Figur 27. Mätdata kommer från samtliga mätpunkter, inte enbart den som ligger mitt emellan de parvisa hålen.

Figur 28 visar resultatet av den parvisa jämförelsen. Det kan åter konstateras att vibrationsvärdena inte skiljer nämnvärt mellan inspända hål och hål med utslag. De högsta värdena finns registrerade för hål 9 och 10 med utslag. I diagrammet ska staplar av samma färg jämföras. Till vänster i diagrammet visas de inspända hålen och till höger hålen med utslag.



Figur 27. Figuren visar de valda paren som utvärderats. *Each pair of holes has been evaluated.*



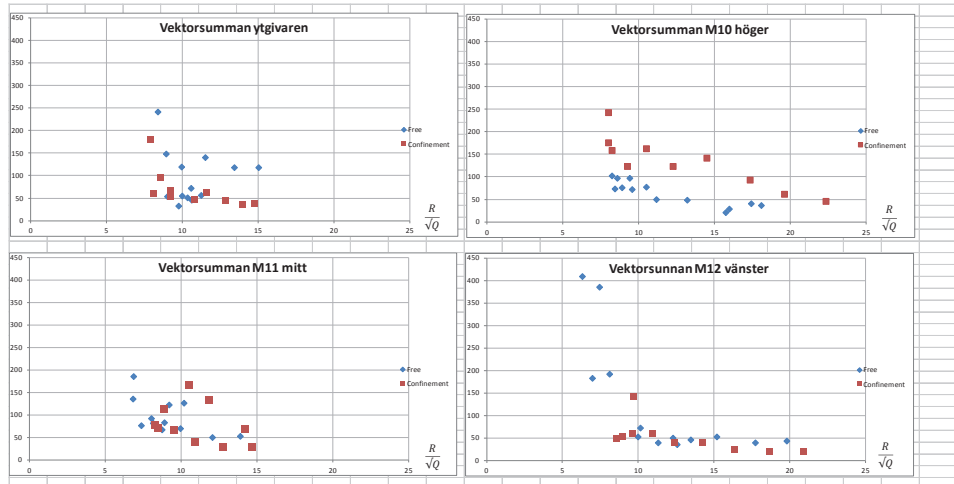
Figur 28. Resultat av den parvisa jämförelsen. De 10 inspända hålen finns i diagrammets vänstra del och de 13 hål som sköts med utslag finns i den högra delen. Staplar som har samma färg ska jämföras. *A group-wise comparison of each of registered PPV-values. Each color represents one pair of holes.*

4.2.1.3 Resultat utifrån olika mätgivare och olika mätriktningar

Två olika jämförelser har gjorts varav den första var att titta på om det finns några tecken på skillnader mellan inspända hål och hål med utslag mellan de olika mätgivarna. En andra jämförelse var att titta på om specifika mätriktningar påverkar vibrationerna.

Olika mätgivare

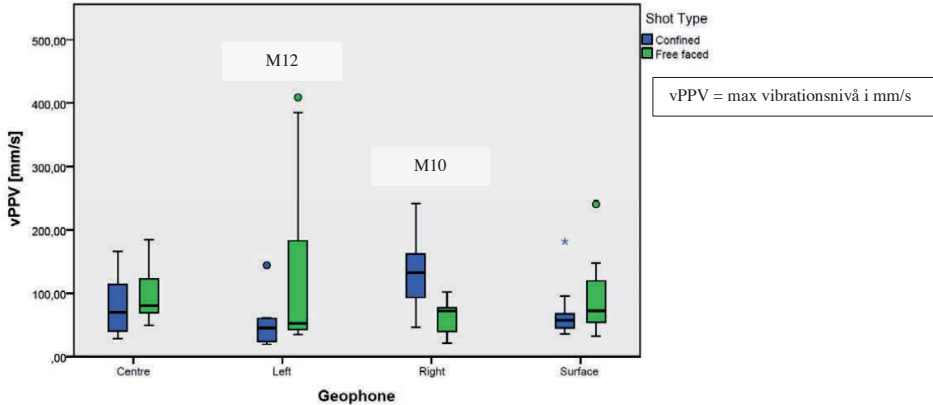
Figur 29 visar resultaten för de olika mätpunkterna. Här kan man se en tydlig tendens i resultatet från mätpunkt M10. Värdena för de inspända hålen ligger här tydligt högre än för hålen med utslag. Resultaten för övriga mätpunkter i Figur 29 visar på mycket små skillnader mellan de båda håltyperna.



Figur 29. Vibrationsnivåer från de olika mätgivarna. I diagrammet för givare M10 ses en klar skillnad i vibrationsnivå för inspända och icke inspända hål där de inspända ligger högst. *The results from the four different measuring points, surface, M10, M11 and M12, show that the confined holes from M10, have significantly higher PPV:s compared to the free faced holes. This could not be seen in the other measuring points.*

Beyglou visar i Figur 30 att det inte är någon skillnad på vibrationsnivåerna mellan mätpunkt M11 och ytmätpunkten (ytmätpunkten låg mycket nära mätpunkt M11). Däremot finns det enligt Beyglou tydliga tendenser på skillnader i vibrationsnivåer från framför allt givare M10 men även från givare M12. Mätpunkt M12 uppvisar högre vibrationer för hål med utslag medan mätpunkt M10 visar att de inspända hålen ger de högsta värdena.

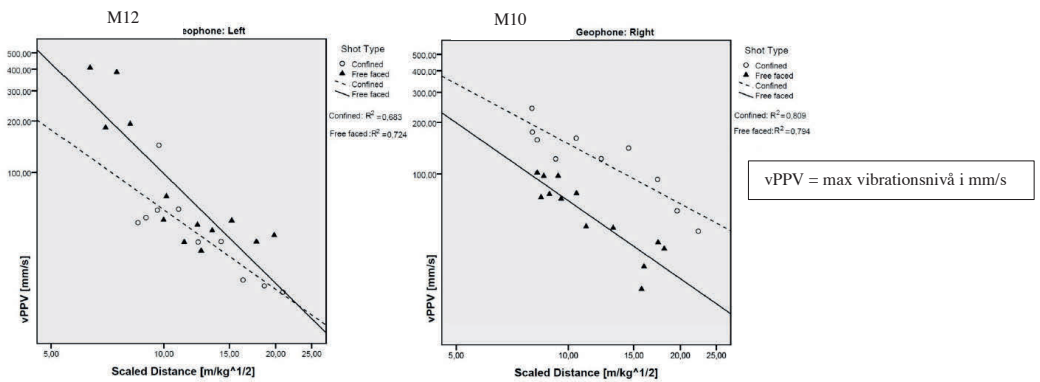
I diagrammet från Beyglou framgår skillnaderna för M10 tydligt men mindre tydligt för givare M12. Medelvärde ligger ungefär lika men på grund av två mycket höga värden från hål 9 och 10 med utslag, tolkar Beyglou det som att hål med utslag har högre värde än inspända hål.



Figur 30. Vibrationer från samtliga mätpunkter (max, min-och medelvärde). *Vibration recordings for all holes from the different measuring points.*

I Figur 31 har Beyglou plottat samtliga hål för M10 och M12 och sökt skillnader för de bägge håltyperna i en regressionsanalys. Resultatet visar att regressionslinjen för de båda håltyperna klart skiljer sig åt för M10 men att skillnaden för M12 troligen endast beror på de bägge höga värdena från hål 9 och 10 med utslag.

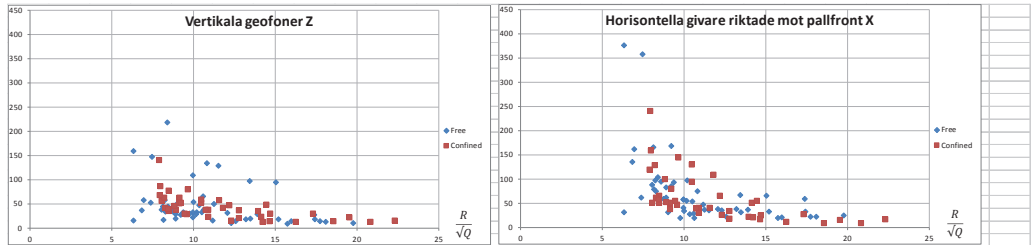
I den högra grafen finns en tydlig skillnad mellan de två håltyperna där de inspända hålen har högre vibrationsvärden än de med utslag. I den vänstra grafen är denna skillnad mindre signifikativ och påverkas till stor del av de två oväntat höga mätvärdena från hål 9 och 10 med utslag.



Figur 31. Regressionslinjerna för inspända hål respektive hål med utslag för givare M10 och M12. *Comparison of recorded vPPV values of confined and free faced shots, isolated for left and right geophones.*

Mättriiktning

Slutligen har några givarriktningar i de triaxiella mätpunkterna studerats för att se om det här finns skillnader i vibrationerna mellan hål med utslag och inspända hål. Data från den vertikala geofonen, Z, och den horisontella geofonen, X, som är orienterad vinkelrät pallfronten, har sammanställts för samtliga mätpunkter. Inga tendenser på skillnader hittades här, vilket framgår av graferna i Figur 32 som jämför vibrationsnivån mellan inspända hål och hål med utslag.



Figur 32. Resultatet från vertikalt resp. horisontellt orienterade geofoner. Inga skillnader i vibrationsnivån mellan hål med utslag och hål med utslag kan urskiljas. *Results from all Z and X geophones. Z is vertically oriented and X is oriented perpendicular to the bench face. No clear indications of differences in PPV:s between the two hole types could be seen.*

4.3 Kartering efter sprängning

4.3.1 Observationer efter sprängning

Vid sprängning med fritt utslag har block brutits loss längs befintlig sprickor, sprickytorna där uppvisar vittring och är rostfärgade, se Figur 33.

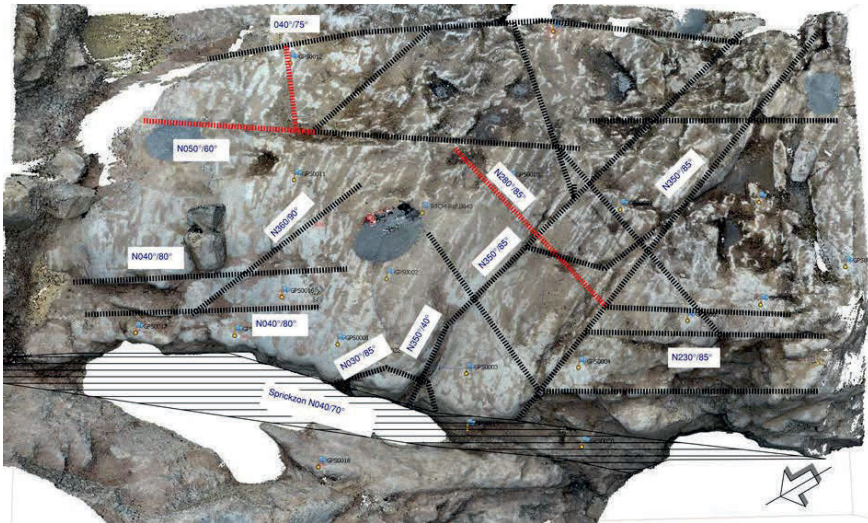


Figur 33. Vittrade och rostfärgade sprickplan där blockutfall skett i samband med sprängning med fritt utslag. *Blocks from blasting due to fracture plans*

Efter sprängning av inspända laddningar observerades en del blockrörelser, se några exempel i Figur 34. I Figur 35 har dessa rörelser i sprickplanen markerats.



Figur 34. Sprickor där rörelser skett i samband med inspänd sprängning. *Fractures opened up due to blasting*



Figur 35. Sprickplan och rörelser i dessa (markerade med rött) beroende på sprängning av inspända laddningar. *Fracture plans (in red) due to blasting*

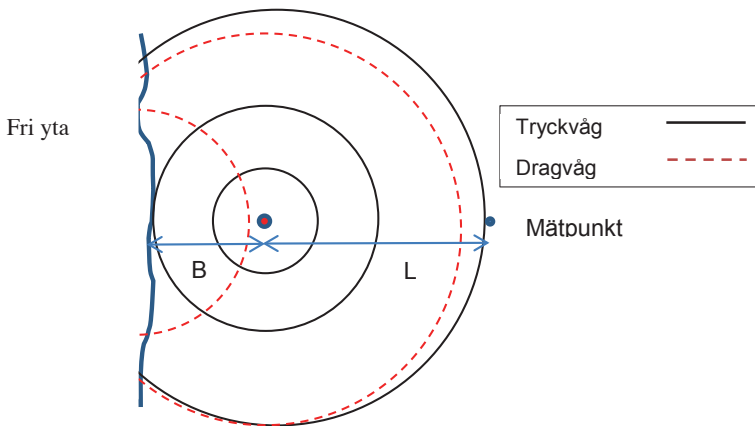
5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

5.1 Tidigare resultat

I förstudien visades att det finns två olika uppfattningar om inspändhetens betydelse för vibrationer, att inspändheten har betydelse resp. att den saknar betydelse för vibrationernas storlek. Den senare uppfattningen, dvs. att inspändheten hos laddningar saknar betydelse för vibrationsnivån, stöddes också av data som togs fram från ett antal bomsalvor.

Ur ett teoretiskt perspektiv är det svårt att förstå att inspända hål ger högre vibrationer än hål med fritt utslag. Då en laddning i ett hål detonerar bildas en stötvåg som utbreder sig sfäriskt runt hålet och ut i det omgivande berget, se Figur 36. Stötvågen kan inte bära med sig någon som helst information om var i berget laddningen befunnit sig. Stötvågen kan inte heller veta hur långt avståndet är till en fri yta.

Den första vågen som når mätpunkten är just stötvågen/tryckvågen. Dragvågen som bildats när stötvågen nått den fria ytan når mätpunkten senare än tryckvågen. Dragvågen har färdats en mycket längre sträcka, har också passerat uppsprucket berg, och borde därför vara svagare, när den når mätpunkten, än tryckvågen.



Figur 36. Vågors utbredning runt ett borrhål. *Travel distances for the different waves*

Tryckvågen har färdats sträckan L medan dragvågen färdats $L+2B$ innan dragvågen når mätpunkten. Dragvågen borde dessutom tappat en hel del energi beroende på ojämnheten på den fria ytan.

Tryckvågen som först når mätpunkten kan inte heller bära med sig någon information om hur långt det är till den fria ytan och av denna anledning verkar det inte särskilt troligt att en ökning av avståndet till den fria ytan, ökad försättning, skulle medföra en ökad vibrationsnivå.

Det saknas med andra ord en fysikalisk förklaring till att det skulle finnas ett samband mellan inspända hål och vibrationsnivån.

5.2 Sammanställning av fältförsöken

5.2.1 Övergripande resultat

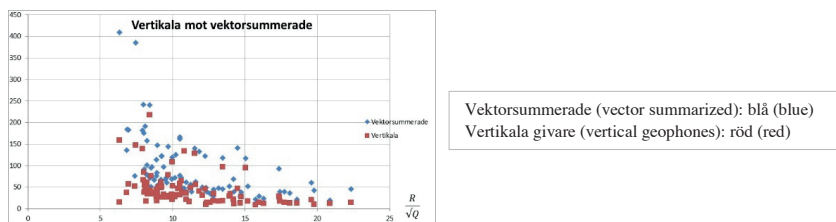
Det övergripande resultatet av fältförsöken visar att helt inspända laddningar som detonerar inte ger högre vibrationsnivåer än då laddningar med normala försättningar sprängs. Flera olika sätt att jämföra de båda försöksupställningarna har gjorts utan att, förutom i ett fall, kunna observera några skillnader i uppmätta vibrationsnivåer. Detta resultat stämmer också väl överens med det arbete som utfördes i förstudien för detta projekt, Niklasson et. al. 2014. I detta arbete sammanställdes ett antal ”inspända” tunnelsalvor, som inte haft mer än ett 50-procentigt utslag men där initieringen av salvhålen fungerat normalt. Dessa ”bomsalvor” jämfördes med salvor med normal inspändhet som sprängdes i direkt anslutning till bomsalvan, vanligtvis direkt före och direkt efter. Vibrationsnivåerna visade inga skillnader mellan salvorna. Resultaten både från förstudien och från fältförsöket uppvisar samstämmiga resultat.

Två avvikelser i resultatet från fältförsöken bör belysas ytterligare. Det ena är de höga vibrationsvärdena från hål 9 och 10, båda med normal försättning. Den andra avvikelser är resultatet från mät punkt M10 där de inspända hålen, hål i9-i10 har högre vibrationsvärden än hålen med utslag.

Bland hålen med utslag gav hål 8-11 de högsta vibrationerna, där hål 9 och 10 gav 400 mm/s och hål 8 och hål 11 ca 200 mm/s. Samtliga dessa hål låg i pallens vänstra del.

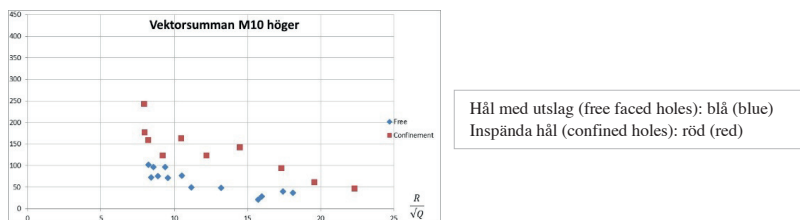
Även om vibrationerna från hålen 8 och 11 endast gav ca hälften av hålen 9 och 10 så är dessa värden bland de högre i försöken. Att samtliga dessa hål funnits inom samma del av bergplinten kan peka på strukturella betingelser i bergmassan som en förklaring till de höga värdena. Andra värden som varit höga, 240 respektive 180 mm/s, kommer från hål 6 mätt i ytgivaren, och hål 12 mätt i M11, båda placerade i pallens centrala del.

Rent generellt, när det gäller vibrationsnivåer och olika mätkonfigurationer, kan nämnas att vid mätning av sprängningsinducerade vibrationer sker mätningen normalt enligt Svensk Standard SS 4604866 vilket innebär att mätningen sker med vertikalt orienterade geofoner och inom frekvensområdet 5-300 Hz. I detta försök användes triaxiella mätgivare där mätresultatet från var och en av de tre geofonerna vektorsummerades. Detta ger normalt högre vibrationsvärde än om endast en vertikal geofon används. Vibrationsnivåerna i detta försök bör därför ligga högre än för motsvarande sprängning vid normal bergschakt. Ingen filtrering av vibrationssignalerna gjordes vid utvärderingen. Figur 37 visar att vibrationsnivåerna från de vertikala geofonerna ligger lägre än de vektorsummerade värdena.



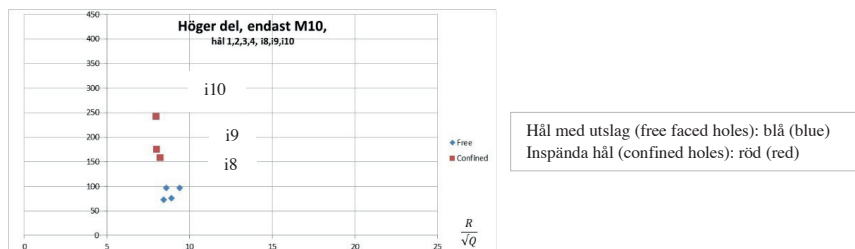
Figur 37. Vibrationsvärden från endast vertikala mätgivare är plottade mot vektorsummerade värden. Generellt ligger de vertikala mätvärdena lägre än värdena från vektorsummeringen. *The PPV:s from the vertical geophones are in general lower compared to the vibration levels from the vector summarized measuring points.*

Resultatet från mätgivare M10, se Figur 38, visar tydligt att de helt inspända hålen ger högre vibrationsnivåer än för hålen med normalt utslag.

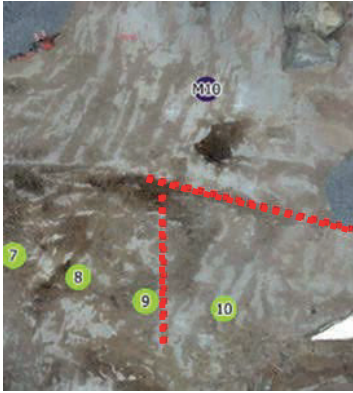


Figur 38. Vibrationsvärden i mätpunkt 10. Vibrationerna för de inspända hålen är högre än för de med utslag. *At M10, the PPV:s are clearly higher for confined holes compared to the free faced holes.*

Vidare kan man titta på resultatet från de inspända hålen i8, i9 och i10 för att se hur mätresultaten ser ut vid M10 och då särskilt komma ihåg de rörelser i sprickplanen som uppkom redan då hålen i6 och i7 sköts. I Figur 39 visas registreringarna från M10 där det framgår att nivåerna är höga, speciellt för det sista hålet i raden, i10, som ligger helt skymt av den nyöppnade sprickan, vilket framgår av Figur 40. Även hålen i9 och i8 uppvisar höga vibrationsvärden.



Figur 39. Vibrationsvärden från de inspända hålen i8-i10 visar att trots den öppna sprickan, se Figur 40, mellan hål i10 och mätpunkt M10 är vibrationsnivån hög. *Despite the open fracture in front of hole i10, high PPV:s were recorded on M10*



Figur 40. Läget på de nyöppnade sprickorna. *The positions of the open fractures with regards to hole i7 to i10 and M10.*

Förklaringen till att vibrationsvärdena från i8 till i10 var högst av de uppmätta kan vara att dessa också låg närmast M10. Att det inte finns någon synbar dämpningseffekt från det öppnade sprickplanet kan höras samman med att uppsprickningen endast skedde i överytan på pallen och inte gick ner till samma djup som där laddningen och geofonerna var placerade.

5.2.2 Frekvensinnehåll

Det har noterats att signalerna som registrerades innehöll förhållandevis låga frekvenser, i huvudsak under 100 Hz. Ett förväntat värde vid dessa korta avstånd ligger betydligt högre, kanske upp mot 200 Hz. Ingen filtrering av signalerna är gjord vilket innebär att frekvensinnehållet kan ha påverkats av geofonernas egenfrekvens. En stickprovskontroll från en av medlemmarna i referensgruppen visade att så också var fallet. Ett högpassfilter på 15 Hz höjde frekvensinnehållet generellt på de testade signalerna. Detta påverkade inte maxamplituden. Inga andra utvärderingar kring frekvensinnehåll har gjorts i detta projekt eftersom avgränsningen endast innefattade svängningshastigheten.

Ytterligare noteringar av mer praktisk natur under försöken var att sprängbarheten var god samt att ljudet från laddningarna när de sköts var förhållandevis dova.

5.3 Slutsats

De resultat som tagits fram, i förstudien och i fältförsöket, visar att det inte finns något samband mellan inspänningsgraden för en laddning och vibrationsnivån när den detonerar. Att ett felborrat hål som fått lite för mycket försättning skulle ge högre vibrationer är därför inte troligt. Att ett hornhål med lite för mycket stickning i en tunnelsalva skulle vara orsaken till ett vibrations-övertramp är definitivt att dra fel slutsats. Men, det ska också villigt erkännas att de försök som utförts i detta projekt har arbetat efter vissa förutsättningar som inte alltid utgör normen för bergsprängning generellt. Skalan har varit liten med korta hål och små laddningar. Geometrin har också varit förhållandevis kompakt med avstånd upp till ca 20 m. Uppstår andra fenomen när hela sprängsalvor skjuts? Är effekterna av bergsmassans egenskaper helt avgörande för utgången?

I detta projekt har mätdata både från fältförhållanden vid tunneldrivning och renodlade enhålsförsök används. Resultaten från båda fallen pekat åt samma håll.

Svaret eller förklaringen till varför uppfattningen finns, om att det föreligger ett samband mellan inspändhet och vibrationsnivå, ryms inte inom detta projekt men några lösryckta uppsnappade förslag kan ändå återges:

- Den vanligaste är att personer i bergbranschen påstår sig ha sett detta samband klart och tydligt vid många tillfällen.
- Det förekommer olika resonemang om att mer energi går bakåt i berget om försättningen är större.
- Vid vibrationsmätningar nära salvan kan även små skillnader i avståndet mellan olika hål och mätpunkten resultera i tydliga skillnader i den uppmätta vibrationsnivån. Vibrationsnivån ökar kraftigt och exponentiellt när avståndet minskar. Detta kan glömmas bort och vara orsaken till att ett hål ger högre vibrationer än ett annat hål som "nästan" ligger på samma plats i salvan kan tolkas som att det beror på en högre inspänning och inte på skillnaden, om än liten, i avståndet till mätpunkten.
- Laddningsvikten har varit högre än vad som var planerat pga att hålet felborrats och fått en större försättning än planerat. Laddaren har kompenserat för den större försättningen.
- Laddningsvikten kan också ha varit högre än vad som var planerat pga utrustningsfel, kunskapsbrist eller slarv.

Detta projekt kommer troligen inte att sätta stopp för uppfattningen att inspända hål ger högre vibrationsnivåer än hål med lägre inspänning men det kommer förhoppningsvis att höja uppmärksamheten kring frågan och fler inom branschen kommer att vara på alerten för att se om denna rapport stämmer eller inte.

Att avliva myten är kanske för tidigt, men vi har kommit en bra bit på väg.

6 Fortsatta undersökningar

Ursprunget till dessa undersökningar kommer från observationer gjorda i urban miljö i samband med tunneldrivning. Då fältförsöken har utförts i en bergtäkt finns det säkert kritiker som menar att försöken borde ha utförts i tunnel eller bekräftas med försök i tunnel. Problem med för höga vibrationsvärden finns vid bergschakt både ovan och under jord.

Med förhoppningen att kunna visa att slutsatserna även kan tillämpas för tunneldrivning föreslås följande:

1. Val av försöksplats-tunnel

Lämpliga tunnlar väljs, kan t.ex. vara tunneldrivning i samband med projekt Förbifart Stockholm eller annat kommande tunnelprojekt.

2. Vibrationsmätning

Vibrationsmätning görs t.ex. från en parallelltunnel eller från markytan ovanför tunneln.

3. Inspända hål

Förhållande för inspända hål kan fås vid ändring av intervalltider. Detta kan erhållas om man t.ex. låter ett hörnhål i tunnelkonturen initieras tidigare än normalt. Laddningen som detoneras blir då enligt tidigare definition ”inspänd”.

4. Få störningar i tunnelentreprenaden

Försöken kommer inte att störa tunnelentreprenaden. Mätning av vibrationerna sker inte i tunneln. Inga extra kostnader tillkommer för själva tunnelsalvan.

5. Försöksomfattning

Försöket omfattar ett 10-tal tunnelsalvor med avsiktlig felaktig initiering av hål samt ett antal ordinarie tunnelsalvor som referens.

7 ERKÄNNANDE

Författarna vill rikta ett varmt tack till Pier Goliats, Ulf Nyberg och Daniel Johansson för deras direkta medverkan i projektet. Ett tack går även till Mathias Jern för stickprovskontrollen av frekvensinnehållet i signalerna.

Ett stort tack också till referensgruppen bestående av:

Daniel Johansson	Swebrec
Per Tengborg	BeFo
Pier Goliats	Årsta Berg och Bygg
Anders Östberg	Scandinavian Tunnelling AB
Mathias Jern	Nitro Consult

Samt till Carl Lind, Nitro Consult, för värdefulla synpunkter.

8 REFERENSER

Blair, D. P. & Armstrong, L. W. (2001) The influence of burden on blast vibration. *Fragblast*, 5(1-2). pp. 108-129.

Blair, D.P. & Birney, B. (1994) *Vibration Signatures Due to Single Blastholes Fired in the Charlotte Deeps*. ICI Confidential Internal Report. 10. [in Blair and Armstrong, 2001].

Institute of mine seismology-Australia, Sensor 4,5 Hz Geophones, Produktbeskrivning.

Jern M, (2011). Test blasts and vibration prediction, AVM project Klinthagen Quarry, Gotland, Sweden. *Proc. of the 6th world Conference on Explosives and Blasting*. Lisbon, Portugal, EFEE. Pp 91-116.

Niklasson, B, Olsson, M, Beyglou, A. Does charge confinement affect the vibration level in blasting? BeFo Rapport 132, 2014.

Mattson, K-J. Geologisk översikt Långåsen, personlig kontakt.

Ramulu, M., Chakraborty, A. K., Raina, A. K., Reddy, A. H. & Jethwa, J. L. (2002) Influence of Burden on the Intensity of Ground Vibrations in a Limestone Quarry. *The seventh Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 7*. Beijing, China. pp.617-624.

Ramulu, M., Chakraborty, A. K., Raina, A. K., Choudhury, P. B. & Bandopadhyay, C. (2005) Influence of burden size on blast-induced ground vibrations in open-cast mines. *Brighton Conference proceedings, European Federation of Explosives Engineers*. pp. 103-109.

Ramulu, M., Chakraborty, A. K., Raina, A. K. & Reddy, A. H. (2004) Influence of burden on the intensity of ground vibrations and air overpressure in opencast bench blasting. *Proceedings of the ISEE's 30th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques*. New Orleans, LA. pp. 465-478.

Ramulu, M. (2010) Development of a New Blast Vibration Prediction Model Incorporating Burden Variations in Surface Blasting. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering (IJGEE)*. 1(2). pp. 72-88.

APPENDIX 1. Mätadata från geofonerna

Hål nr	Geofon nr	PPV (mm/s) Max			PPV (mm/s) Min		
		x	y	z	x	y	z
1	M10	62,65455	40,54545	28,72727	-58,0727	-42	-27,6
	M11	36,43636	36,72727	25,6	-19,6364	-21,4545	-29,3818
	M12	24,98182	35,56364	10,07273	-14,2909	-17,3091	-10,7273
	Ytgeofon	65,49091	28,03636	27,6	-34,4	-10,3636	-95,9636
2	M10	54,07273	27,27273	12,4	-56,6909	-25,2	-43,9636
	M11	38,54545	33,56364	28,61818	-18,3273	-20,2909	-31,0909
	M12	22,58182	32,72727	14,10909	-12,3273	-16,7636	-10,5455
	Ytgeofon	67,23636	31,49091	28,07273	-36,7273	-9,34545	-97,2727
3	M10	95,30909	26,4	21,45455	-56,7273	-25,8909	-38
	M11	57,30909	37,85455	33,30909	-43,1636	-24,9455	-24,6182
	M12	32,25455	42,29091	17,63636	-20,3636	-29,0182	-18,1091
	Ytgeofon	36,69091	10,29091	49,27273	-30,4364	-14,1818	-42,4
4	M10	93,63636	17,30909	12,43636	-45,5273	-50,3273	-33,8182
	M11	59,78182	30,03636	22,18182	-32,1455	-29,0909	-34,6545
	M12	31,12727	33,85455	18,87273	-11,3091	-22,7636	-14,3636
	Ytgeofon	27,81818	9,454545	32,90909	-26,8727	-6,76364	-47,7455
5	M10	54,25455	19,16364	12,61818	-25,5273	-54,0727	-32,3636
	M11	75,41818	44,94545	17,16364	-35,9273	-26,9455	-34
	M12	35,52727	34,36364	9,127273	-15,7091	-28,8727	-10,9091
	Ytgeofon	28	13,70909	30,03636	-34,8727	-10,3273	-53,1636
6	M10	47,09091	21,12727	14,4	-29,4909	-40,3636	-16,2182
	M11	133,5273	26,4	29,52727	-48,2545	-28,4364	-37,6
	M12	55,56364	48,69091	18,65455	-42,8364	-22,4	-28,4
	Ytgeofon	104,8	8,290909	46,4	-65,3818	-45,1273	-218,655
7	M10	38	23,05455	13,23636	-16,7273	-41,2364	-18,9455
	M11	88,47273	42,47273	18,8	-34,7273	-21,6364	-38,2545
	M12	40,72727	34,25455	12,14545	-15,7455	-22,8	-22,2182
	Ytgeofon	57,96364	14,65455	35,63636	-56,7636	-11,0182	-109,345
8	M10	21,16364	15,67273	12,18182	-18,4	-21,8909	-14,0364
	M11	82	13,96364	17,49091	-20,1818	-47,2	-19,4909
	M12	166,8727	106,2909	29,52727	-73,2727	-36,3636	-45,8545
	Ytgeofon	29,96364	17,74545	24,83636	-19,8182	-17,0909	-65,2364
9	M10	358,5091	182,4	102,1091	-121,236	-102,364	-147,091
	M11	97,70909	24,90909	32,03636	-38,6909	-73,2364	-21,7091
	M12	22,36364	24,47273	16,83636	-13,7091	-33,6727	-13,4909
	Ytgeofon	35,12727	24,58182	29,96364	-18,2182	-43,5636	-129,273

Hål nr	Geofon nr	PPV (mm/s) Max			PPV (mm/s) Min		
		x	y	z	x	y	z
10	M10	32	16,47273	16,90909	-18,0727	-38,4	-18,4727
	M11	85,01818	14,36364	27,05455	-36,5455	-83,8909	-19,5273
	M12	376,3273	176,4	126,0364	-108,727	-78,8364	-159,564
	Ytgeofon	18,8	25,81818	20,87273	-20,7636	-25,8545	-38,7636
11	M10	20,50909	8,763636	8,618182	-11,2	-19,6	-9,27273
	M11	79,56364	18,43636	10,72727	-21,0545	-41,8909	-17,4909
	M12	162,3636	83,56364	27,67273	-48,6545	-43,8545	-57,4909
	Ytgeofon	19,78182	11,63636	14,58182	-18,7273	-11,4909	-30
12	M10	59,49091	17,6	13,6	-42,1091	-57,9273	-27,7455
	M11	168,8727	68,03636	39,01818	-43,8545	-29,5636	-52,6545
	M12	31,23636	30,36364	8,981818	-15,1636	-20,6182	-15,0545
	Ytgeofon	75,63636	10,25455	39,78182	-69,1636	-9,16364	-134,255
13	M10	97,2	26,76364	17,85455	-49,1636	-86,7273	-57,8545
	M11	62,90909	52,90909	24,25455	-20,5818	-29,2727	-52,7636
	M12	22,43636	30,21818	14,4	-13,0545	-14,8364	-14,4364
	Ytgeofon	31,56364	13,85455	34,61818	-28,5818	-7,34545	-51,6727
Inspända							
i1	M10	15,67273	20,8	13,56364	-8,98182	-45,6	-14,5455
	M11	17,74545	24,61818	16,36364	-49,4909	-53,0182	-22,5091
	M12	41,56364	31,30909	22,4	-143,382	-20,9455	-78,0364
	Ytgeofon	11,23636	23,52727	27,70909	-21,9273	-23,0182	-34,2909
i2	M10	14,83636	28,61818	17,41818	-11,0182	-60,2182	-21,6727
	M11	31,63636	37,92727	23,96364	-107,273	-82,7636	-41,7818
	M12	33,81818	34,50909	24,94545	-50,6182	-31,9273	-34,9818
	Ytgeofon	17,81818	14,25455	33,56364	-39,9636	-25,0909	-56,6545
i3	M10	26,94545	23,70909	29,41818	-20,8	-90,7273	-28,7636
	M11	26,76364	17,30909	31,01818	-128,582	-108	-51,0909
	M12	26,21818	41,74545	17,30909	-51,7818	-9,12727	-37,8182
	Ytgeofon	33,16364	16,14545	38,50909	-49,3818	-23,5636	-61,0182
i4	M10	29,05455	27,70909	47,45455	-53,1273	-128,691	-45,3818
	M11	22,47273	35,6	25,12727	-98,1455	-57,0545	-45,0182
	M12	23,96364	38,94545	14,47273	-46,4727	-10,1091	-27,0182
	Ytgeofon	34,43636	15,63636	45,45455	-64,6909	-13,3818	-76
i5	M10	36,65455	22,76364	39,92727	-64,5818	-100,655	-46,8
	M11	31,38182	53,70909	23,70909	-60,4727	-11,5273	-40,7636
	M12	29,05455	47,92727	16,50909	-39,8182	-9,92727	-36,4727
	Ytgeofon	86,69091	20,07273	56,65455	-118,109	-22,2909	-139,418
i6	M10	19,78182	46,83636	46,32727	-93,6727	-124,291	-58,7273
	M11	22,98182	44	29,16364	-56,9818	-7,16364	-38,4
	M12	18,50909	32,25455	13,96364	-25,2	-9,67273	-12,4364

Hål nr	Geofon nr	PPV (mm/s) Max			PPV (mm/s) Min		
		x	y	z	x	y	z
i7	Ytgeofon	43,45455	25,30909	49,63636	-49,3455	-17,4909	-55,5273
	M10	19,09091	23,45455	32,58182	-79,6727	-92,4	-51,3818
	M11	20,69091	44,72727	19,6	-53,4545	-8,8	-28,9091
	M12	13,01818	35,81818	11,12727	-19,4182	-8,69091	-11,2727
	Ytgeofon	28,58182	30,50909	40,54545	-36,5455	-23,4909	-49,9273
i8	M10	32,21818	30	34	-127,127	-90,2909	-62,7636
	M11	17,81818	29,70909	22,21818	-28,1455	-6,36364	-17,2
	M12	7,563636	22,36364	12,72727	-10,3636	-8,58182	-9,2
	Ytgeofon	28,98182	27,92727	36,72727	-38,1455	-22,0727	-21,8182
i9	M10	28,36364	40,61818	56,4	-158,182	-84,1455	-85,6727
	M11	11,2	25,89091	19,01818	-17,2364	-7,41818	-12,3636
	M12	6,545455	21,23636	13,12727	-7,70909	-8,65455	-12,5818
	Ytgeofon	23,45455	29,74545	35,70909	-33,8182	-18,9818	-22,1818
i10	M10	38,07273	45,2	27,09091	-239,636	-26,6545	-67,1273
	M11	12,76364	28,8	13,63636	-15,9636	-14,5818	-10,9091
	M12	7,963636	19,16364	9,6	-5,85455	-9,34545	-12,1818
	Ytgeofon	22,14545	21,85455	28,4	-23,5636	-17,4545	-26,3636

APPENDIX 2. Avstånd mellan mätpunkter

Avståndet D mellan mäthål och samtliga spränghål beräknas ur formeln:

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Avstånden redovisas i Tabell A2 och varierar från ca 6 m upp till ca 22 m.

Tabell A2. Avstånd mäthål till spränghål. *Distance from holes to the geophones*

Spränghål	Mäthål M10	Mäthål M11	Mäthål M12	Yt-geofon
Utslag				
1	8,62	13,5	19,18	14,59
2	8,18	11,7	17,18	13,04
3	8,32	9,64	14,73	10,91
4	9,1	8,47	13,06	10,05
5	10,19	8,02	11,93	9,71
6	10,82	6,62	9,84	8,15
7	12,79	7,81	9,67	9,66
8	15,48	8,65	7,86	10,26
9	17,54	9,9	7,23	11,18
10	16,88	8,95	6,13	10,32
11	15,25	7,91	6,75	9,45
12	16,85	8,93	6,14	10,49
13	7,99	7,17	12,2	8,75
Inspända laddningar				
1	21,66	13,76	9,39	13,55
2	18,99	11,49	8,25	11,23
3	16,82	10,18	8,67	9,33
4	14,06	8,6	9,3	8,26
5	11,87	8,06	10,6	7,68
6	10,17	8,2	11,98	7,84
7	8,96	9,21	13,81	8,91
8	7,99	10,59	15,81	10,46
9	7,76	12,41	18,03	12,44
10	7,74	14,23	20,23	14,29

Dessa avstånd användes för att beräkna vibrationerna i de olika mätpunkterna under antagande att laddningskoncentrationen var densamma i alla hål (938 g).

APPENDIX 3. Evaluation of vibrations from the field tests- Rapport från Ali Beyglou

The ANCOVA (Univariate analysis of variance) statistical method was used in previous analysis for Fatburs and Citybanan vibration data. This method is only applicable if the data meets a certain series of requirements. These requirements are usually tested through some statistical tests and if all requirements are met, the analysis will be valid. For this set of data from the field test, the requirements are not met, thus the ANCOVA method will not be valid and the data must be interpreted analytically.

A simple look at the logarithmic plot of vector PPV versus Scaled Distance can shed some light on the issue. As seen in Fig. 1, the vPPV values for free faced and confined shots lie in more or less similar range with no visual distinction between them.

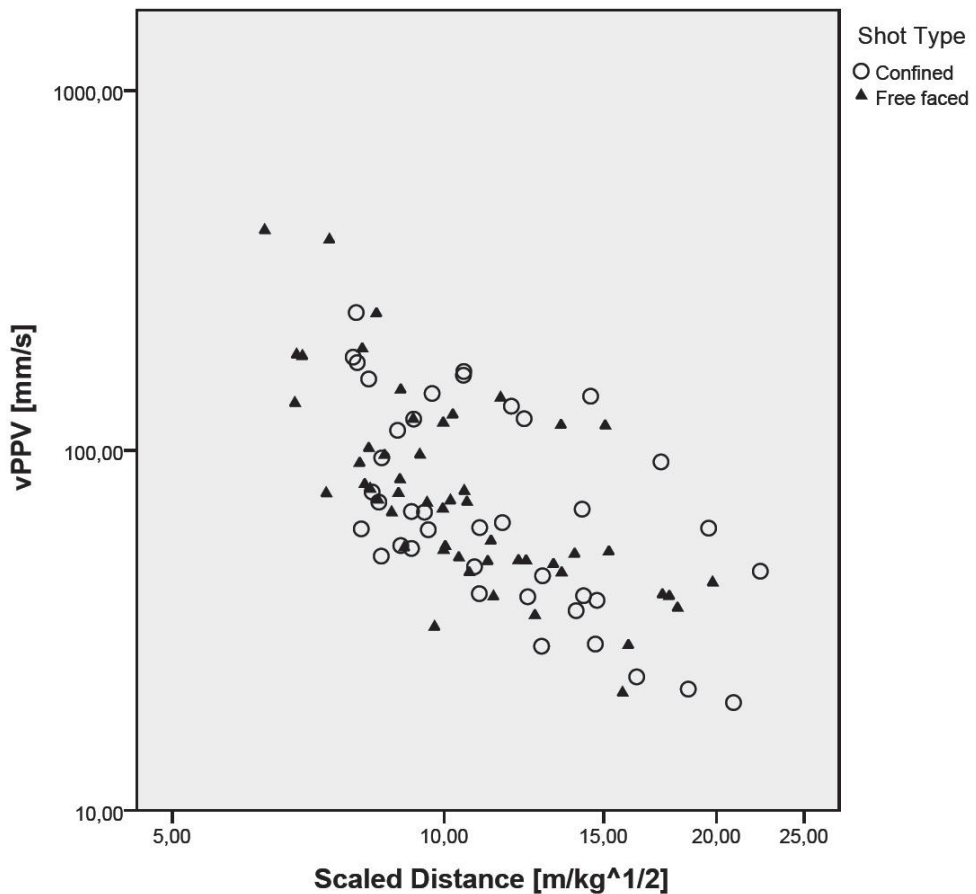


Fig. 1. Vector Peak Particle Velocities versus Scaled Distance for confined and free faced shots.

The only difference between the two sets of points could be visually seen in the similar plot with the regression lines and 95% confidence intervals included (Fig. 2). As seen, the regression lines for both groups (Free faced and Confined) are quite close to one another. The large variations in vPPV values and small range of Scaled Distances lead to two point-clouds in the plot which show almost identical confidence bands with regard to the regression lines, which indicates that there's no significant difference between the two groups.

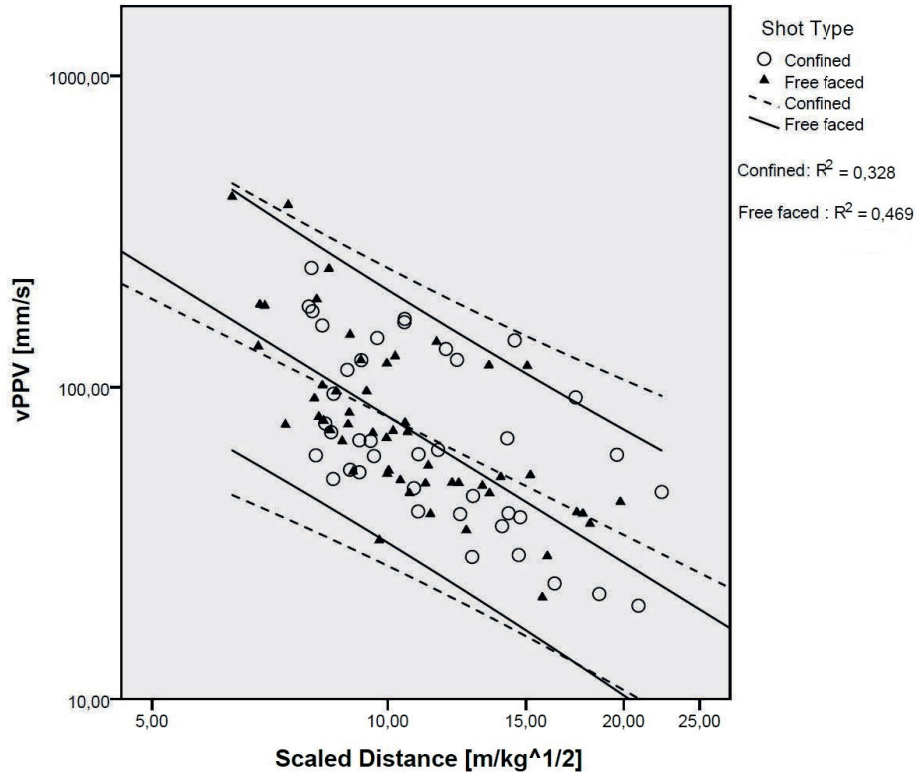


Fig. 2. The 95% confidence intervals for vibrations from confined and free faced shots.

In order to look further into the details, we look at different variables separately. Due to the fact that the charge weights in all holes are equal and all holes are within very close range, we can discard the Scaled Distance and take a closer look at the distribution of the measured vPPV values (Fig. 3), which shows that there is no significant difference between the distributions and ranges for the two shot types.

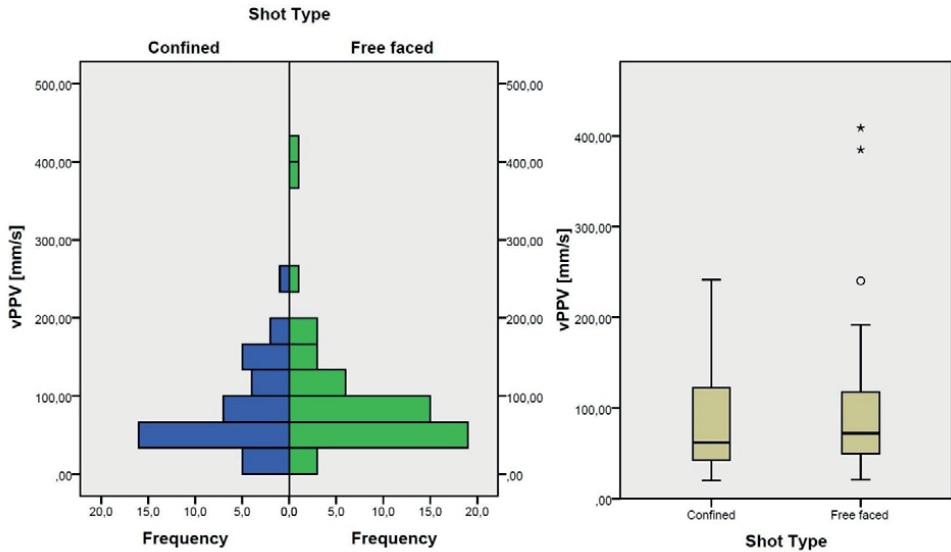


Fig. 3. a) Distribution of all vPPV values for all shots; b) Range of variations of vPPV for confined and free faced shots.

Another observation from Fig. 3 is that contrary to the common belief, the largest vPPV values were registered from free faced shots. This can be seen in more details in Fig. 4, which shows the vPPV values at four geophones for each pair of holes; the holes are re-arranged in such way that each hole number corresponds to one free faced hole and the mirrored confined hole with approximately similar distance to the geophones. The largest values were registered from free face shots at holes 9 and 10. Once again, a pairwise comparison of equivalent holes shows that vibration levels for confined holes with similar distance to geophones do not show an increased level of vibrations compared to free faced shots.

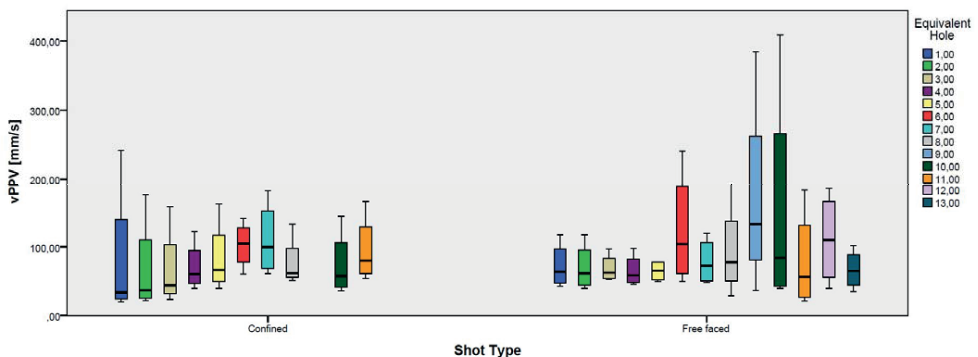


Fig. 4. group-wise comparison of registered vPPV values.

For further investigation, the vibration data were sorted by their corresponding geophone and plotted in Fig. 5 to check for variations due to instrumentation. The plot clearly shows that the

measurements at the centre and surface geophones show similar values for both confined and free faced shots. However, the left and right geophones show distinctly contrary recordings. Left geophone recorded larger vibrations from free faced shots compared to confined shots, while right geophone shows smaller vPPV values for free faced shots.

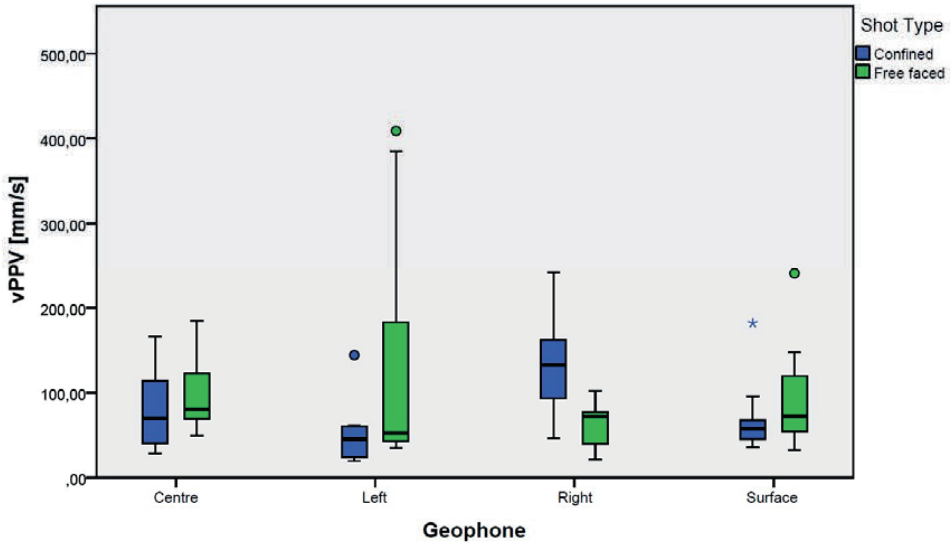


Fig. 5. Vibration recordings for all shots from different geophones.

In order to investigate the contrary readings recorded at left and right geophones, all recordings from those two geophones are isolated and plotted for individual holes in Fig. 6.

Considering that the vibration recordings at centre and surface geophones were more or less similar, the variation between left and right geophones could be interpreted as a result of either instrumentation or some geological feature of the host rock.

Fig. 6a shows that almost all vPPV values for confined shots registered at left geophone were smaller than those of their equivalent free faced shots. However, the vPPV value for the same shots recorded at the right geophone show completely contrary results. As seen in Fig. 6b, the right geophone recorded larger vPPVs for all confined shots compared to their equivalent free faced shot.

Taking the effect of scaled distance into consideration shows the same trend. In Fig. 6c the free faced shots resulted in slightly larger vPPVs at the left geophone, while in Fig. 6d the same shots show larger vPPVs for confined shots compared to free faced shots.

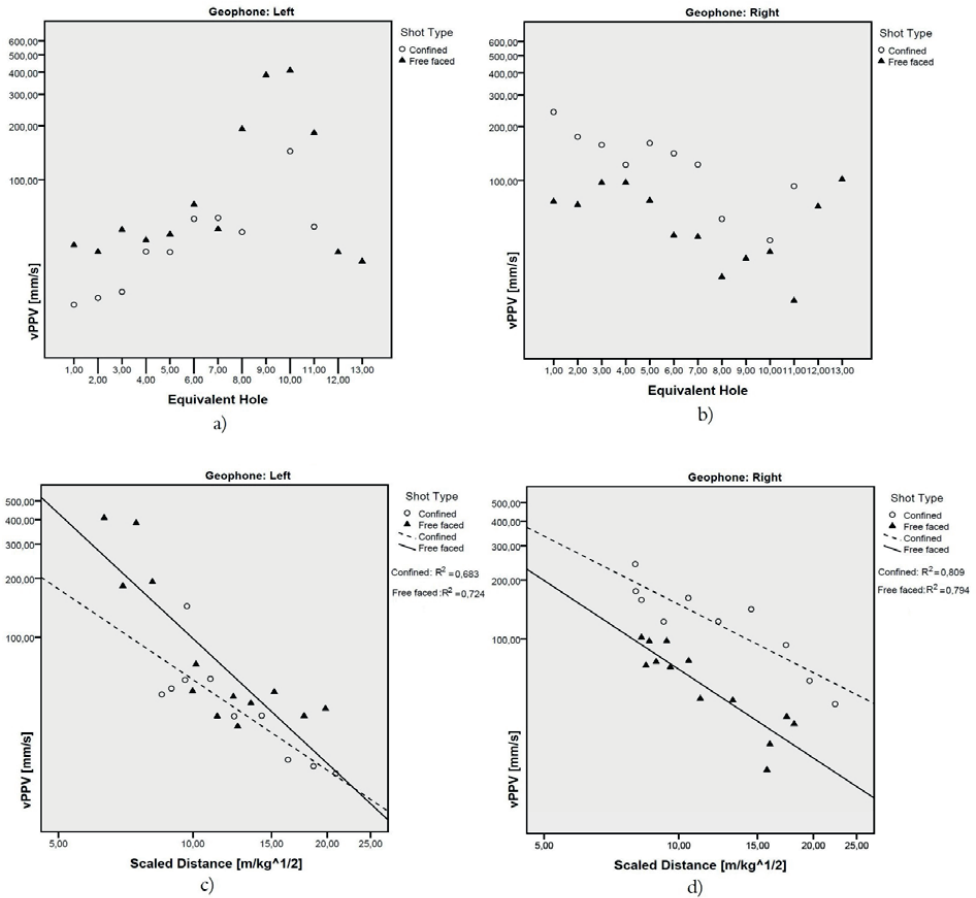


Fig. 6. Comparison of recorded vPPV values of confined and free faced shots, isolated for left and right geophones.

One explanation for the contrary recordings at left and right geophones could be the unidirectional behavior of the host rock in response to the vibrations. A schematic in Fig. 7 shows this probable explanation.



a)



b)

Fig. 7. Schematic direction for a) largest recorded vPPV values and b) smallest registered vPPVs for left and right geophones.

As seen in Fig. 7a, largest vPPVs in both left and right geophones were recorded from the directions marked in red, and similar lines in Fig. 7b indicate the direction the lowest vPPVs were recorded at. Keeping in mind that the vibrations recorded at centre and surface geophones did not show this behavior (due to their placement at the centre of blast holes), and comparing Fig. 6c and d with Fig. 7 shows that the effect of this hypothetical uni-directional behavior is more probable than the shot type, i.e. confinement conditions.

Finally, one can conclude that the overall vibrations from confined and free faced shots did not show any significant difference between the two. The results do not support the belief that increased confinement increases vibration levels whatsoever.

Furthermore, a partial comparison between the left and right geophones introduced the probability of the host rock affecting the wave propagation in two different hypothetical directions. This could be further investigated by comparing the structural features of the test area, i.e. fractures. Even if this hypothesis turns true, it still supports the claim that vibration levels are not influenced by the confinement, but are more affected by the surrounding geology.

BeFo



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

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

ISSN 1104-1773