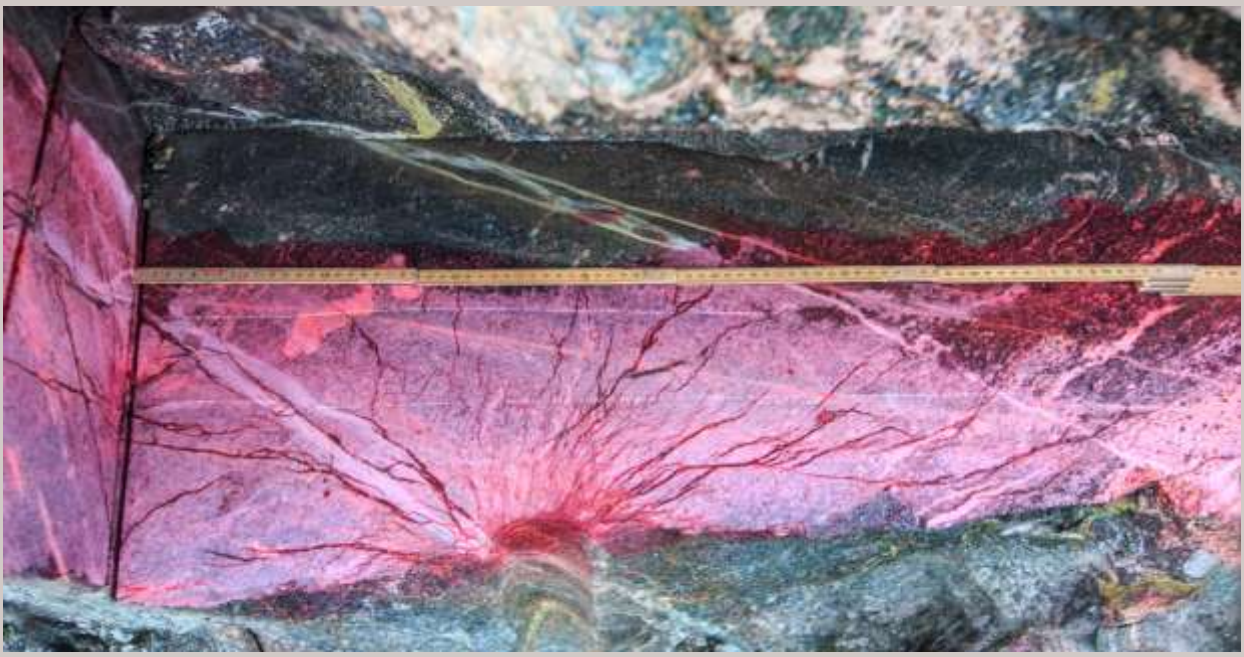
TRAFIKVERKET

RAPPORT

Skadezonsutbredning vid skonsam sprängning



Dokumenttitel: Skadezonsutbredning vid skonsam sprängning
Skapat av: Mats Olsson, EDZ-consulting AB, Nils Rydén LTH och Urban Åkeson, Trafikverket
Dokumentdatum: 2015-04-20
Dokumenttyp: Rapport
Publikationsnr: 2015:067
ISBN: 978-91-7467-723-2
Version: 0.1

Publiceringsdatum: 2015-04-10
Utgivare: Trafikverket
Kontaktperson:
Uppdragsansvarig:
Tryck:
Distributör: Trafikverket, Adress, Post nr Ort, telefon: 0771-921 921

Sammanfattning

I AMA och Trafikverkets egen TRV-AMA finns material- och arbetsbeskrivningar för anläggningsarbeten. I AMA finns en tabell med olika bergschaktningsklasser som anger hur stor skadezonen får vara för respektive klass. Denna tabell är framtagen utifrån teoretiska beräkningar och har inte verifierats. I handlingarna ställs för närvarande inga krav på hur skadezonen ska kontrolleras.

Trafikverket startade 2011 ett projekt vars mål var att ta fram metodik för att karakterisera sprängskadezonen och utifrån resultaten från projektet kunna revidera texterna som berör skonsam sprängning i AMA 10, eftersom delar av dessa är föråldrade och ej anpassade till dagens sprängteknik och sprängämnen.

Sprängskadezonens utbredning i kvarstående berg beror enligt tidigare undersökningar på flera parametrar. De två viktigaste är förhållandet mellan sprängämnesdiameter och borrhålsdiameter, oftast kallat frikoppling, samt initieringstiden för hålen, där momentan initiering ger kortast skadezon.

I detta projekt har sprängskadezonen undersökts dels genom seismiska mätningar och dels genom sprickkartering av utsågade bergytor som infärgades med penetrantvätska för att förtydliga skadezonens utbredning. Försök har gjorts i flera olika bergarter och med olika sprängämnen i flera infrastrukturprojekt i vägskärningar och i tunnlar.

Resultaten från de geofysikaliska mätningarna har inte gett några tydliga samband med verklig sprickutbredning. Resultaten är svårtolkade och det är för närvarande inte möjligt att från enbart seismiska metoder bedöma hur uppsprucket berget är.

Sprickarteringen med penetranter har givit en tydlig bild av hur sprickutbredningen kan påverkas. Frikoppling, initieringstid och sprängämnestyp påverkar sprickbildningen mest. Vilken bergart som försöken utförs i spelar en mindre roll.

Sprickarteringen med penetranter från samtliga försök visade att sprängskadezonen understeg 0,30 m, vilket är kravet för bergschaktningsklass 2. Flertalet försök klarade även skadezonskravet för bergschaktningsklass 1 på 0,2 m även om detta inte var kravställt i handlingarna.

Innehåll

Sammanfattning 3
1. Bakgrund 7
2. Målsättning 7
3. Mätmetoder för sprängskadezonen 7
    3.1. Skadezonen 7
    3.2. Geofysikaliska mätmetoder 8
    3.3. Kartering av sprängskadezonen genom utsågning i berg 10
4. Omfattning av projektet 12
    4.1. Försök 1 12
    4.2. Försök 2 13
    4.3. Försök 3 16
    4.4. Försök 4 19
    4.5. Försök 5 20
5. Genomförande 22
    5.1. Försök 1 22
    5.2. Försök 2 24
    5.3. Försök 3 25
    5.4. Försök 4 26
    5.5. Försök 5 27
6. Resultat 28
    6.1. Resultat försök 1 28
    6.2. Resultat försök 2 32
    6.3. Resultat försök 3 45
    6.4. Resultat försök 4 58
    6.5. Resultat försök 5 59
7. Diskussion 63
8. Slutsatser 67
    8.1. Fortsatta undersökningar och krav 67
9. Referenser 68

1. Bakgrund

Vid planering av uttag av bergschakt gäller det att hitta en balans mellan optimalt uttag och acceptabla skador på kvarstående berg. Bergschakt ska också utföras så att det framtida underhållet av berguttaget kan minimeras. Det är därför av största vikt att berguttaget sker skonsamt så att bergskador kan minimeras. Skadorna på kvarstående berg efter sprängning beror på kvaliteten på borr-och spräng-tekniken samt naturligtvis även på de platsspecifika geologiska förhållandena.

Vid upprättande av förfrågningsunderlag för utförandet av bergschakt hänvisas i huvudsak till AMA. Tyvärr är specifikationerna för borrning och sprängning bristfälliga, och det saknas ofta kontrollmetoder för att verifiera att de uppställda kraven har blivit uppfyllda. Detta gäller i huvudsak för uppföljning av krav för bergschaktningsarbeten och bedömning av skadezon efter berguttag i kvarstående berg.

Trafikverket har påbörjat arbete för att ta fram lämplig undersökningsmetodik för bedömning av skadezons utbredning i kvarstående berg. Två mätmetoder har använts i ett antal försöksomgångar. Den ena metoden som använts är en seismisk metod direkt på bergytan och den andra metoden är kartering av sprickor i kvarvarande berg genom sågning och infärgning av snittytan med penetranter.

2. Målsättning

Målsättningen med detta projekt har varit att utveckla och utvärdera metodik för att karakterisera sprängskadezoner i fält för bergskärningar, samt bereda underlag för revidering av regelverk.

3. Mätmetoder för sprängskadezonen

3.1. Skadezonen

Sedan en längre tid har det i Sverige använts ett flertal tabeller där skadezoner listas för olika sprängämnen och/eller laddningskoncentrationer. Tabellerna grundar sig på några enstaka försök med Gurit och ANFO på 60-talet (Sjöberg, 1977). En enkel formel togs fram som gav ett förhållande mellan laddningskoncentration och skadezon. Tillsamman med teoretiska beräkningar utgående från ett samband mellan svängningshastighet, laddningsvikt och avstånd (Holmberg, Persson, 1979) kunde nu skadezonen hos ett antal sprängämnen beräknas.

Tabellerna har ibland anpassats för speciella projekt och fanns även i tidigare utgåvor av AMA. I AMA-13 finns en tabell där den teoretiska skadezonen kopplats till olika bergschaktningsklasser, se Tabell 1.

Tabell 1. Bergschaktningstolerans och teoretisk skadezon, CBC/2 AMA-13

Bergschaktningsklass	Teoretisk skadezon (m)	
	Slänt/vägg	Botten
1	0,2	0,5
2	0,3	0,7
3	0,5	1,1
4	1,1	1,7
5	Schaktad bergkontur ska ligga utanför teoretisk bergkontur	

Ett problem med tabellerna är att de saknar en entydig definition av skadezon. Ett annat problem är att svängningshastigheten inte kan korreleras till skadezon och speciellt inte om många hål detonerar momentant.

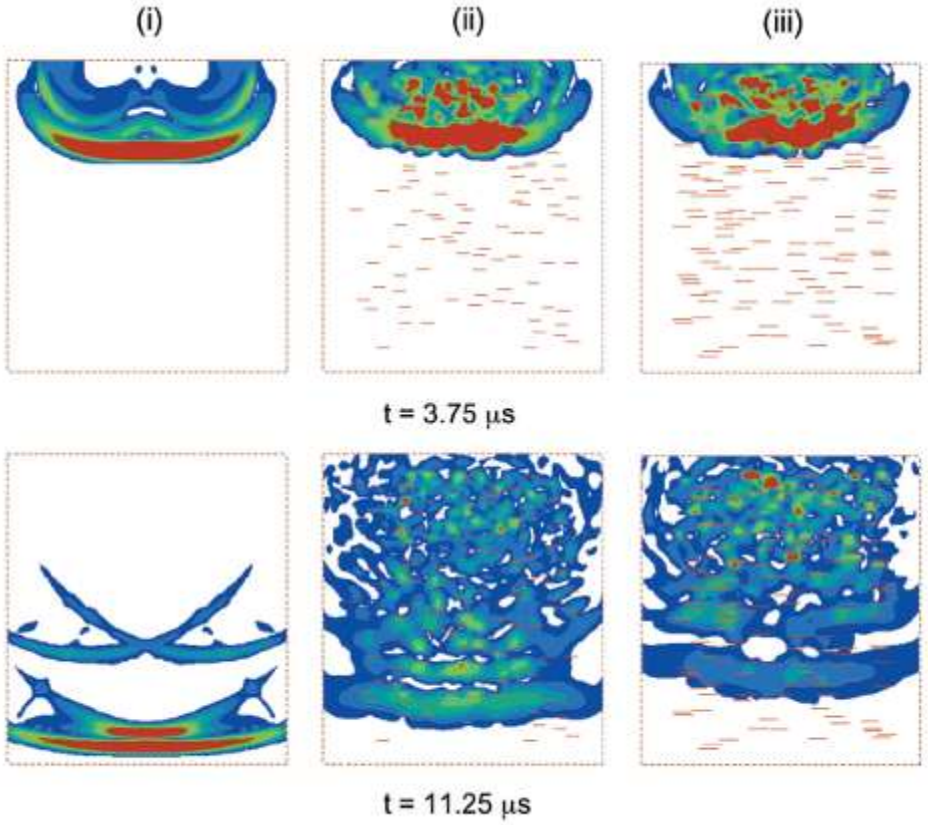
Tillåten skadezon brukar anges i handlingarna men uppnådd skadezon kontrolleras generellt inte. Det finns således ett stort behov att kunna mäta och kontrollera skadezonen efter sprängning. Mer om sprängning och skadezoner finns att läsa i Trafikverkets Handbok för ovanjordssprängning, 2014.

Mätmetoderna kan indelas i två huvudgrupper, utanpåliggande (icke förstörande) och (förstörande) inträngande metoder. De utanpåliggande metoderna använder geofysikaliska mätmetoder bl.a. seismiska- och radarmätningar. De inträngande metoderna kännetecknas av någon form av provtagning som kan ske antingen genom att undersökningshål borras eller genom utsågning i berg. I detta projekt användes både geofysikaliska metoder och sprickkartering genom utsågning av berg.

3.2. Geofysikaliska mätmetoder

Geofysiska utanpåliggande metoder bygger på att mäta upp en fysikalisk respons på ytan av en okänd struktur och på så sätt försöka "se in" i materialet. De flesta tillämpningar av geofysik är indirekta vilket betyder att man ofta inte kan mäta upp den önskade materialegenskapen direkt. Istället måste man gå via en indirekt tolkning eller utvärdering av någon direkt mätbar parameter. För att karakterisera skadezonen efter sprängning har flera försök med seismik och radar utförts tidigare (Maxwell et al. 1998; Schuster et al. 2001; Kwon et al. 2009; Silvast et al. 2010). Det finns olika varianter på mätningar med radar och seismik, men i de flesta metoder skickas en våg ut från en punkt och detekteras i samma eller en närliggande punkt. Utbredningen av seismiska vågor sker med små elastiska spänningar och töjningar i materialet. Seismiska metoder är väl lämpade för att studera variationer i elastiska materialegenskaper och/eller strukturella variationer såsom sprickor i berg. Radar bygger på elektromagnetisk vågutbredning och kan användas för att se reflektioner från olika lager med olika dielektricitetstal (elektromagnetisk våghastighet) vilket kan ge information om strukturella variationer i berg. För att en seismisk eller elektromagnetisk våg ska reflekteras mot en spricka i berg så krävs det att förhållandet mellan sprickans storlek och våglängden (hastighet/frekvens) är tillräckligt stort. En lång våglängd kan passera en liten spricka nästan helt opåverkad med mycket liten reflekterad energi. I en större volym av många små sprickor kan dock även långa våglängder påverkas och därmed avspegla ett medelvärde av hela volymen av sprickor.

För seismiska vågor i sprucket berg innebär detta att hastigheten och amplituden minskar när vågen passerar genom en volym med många små sprickor. Hildyard et al. (2005) har illustrerat detta fenomen genom att simulera seismisk vågutbredning i en homogen (i) respektive uppsprucken volym (ii och iii), se Figur 1. Figur 1 visar simulerade partikel-hastigheter i materialet efter 3.75 s (övre delen) respektive 11.25 s (undre delen) för de tre studerade fallen. Horisontella små streck i modell (ii) och (iii) illustrerar de modellerade sprickorna i materialet. En enskild liten spricka påverkar inte vågen, men tillsammans gör alla sprickor att energi reflekteras tillbaka mot ytan (backscattering) och både hastighet och amplitud på den genomgående vågen minskar med ökande antal sprickor.



Figur 1. Numerisk simulering av seismisk vågutbredning i homogent (i) respektive sprucket berg (ii och iii). Figur från Hildyard et al. (2005).

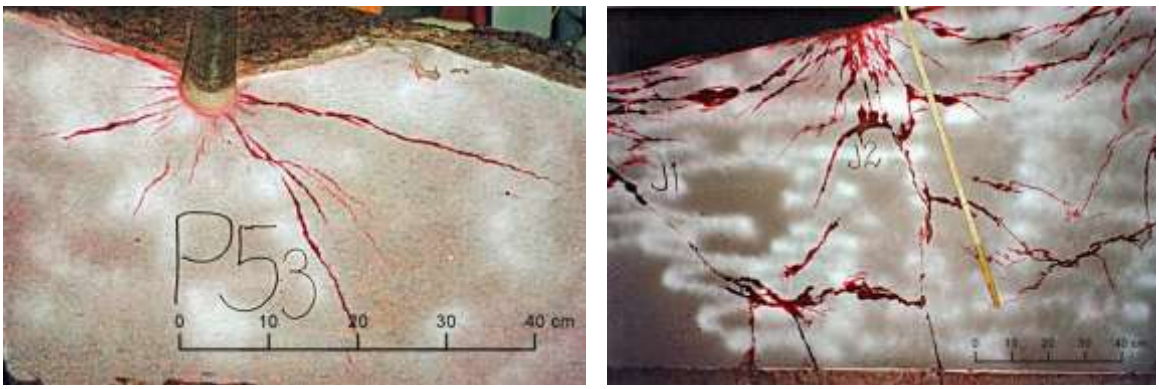
Seismiska mätningar mellan parallella borrhål i bergväggar har i flera olika studier visat på tydliga resultat där sprängskadezon kunnat identifieras som en zon med lägre seismisk hastighet och större dämpning (Luke et al. 1999; Schuster et al. 2001; Malmgren et al. 2007). Traditionella utanpåliggande seismiska mätningar längs med bergytan (ytvågsseismik, reflektionsseismik, och refraktionsseismik) har dock visat sig vara svårare att tyda och bergytans ojämnheter i kombination med sprickor och ytnära heterogeniteter har ofta angetts som förklaring till svårtolkade mätningar (Luke et al. 1999; Malmgren et al. 2007; Enescu och Cosma, 2010; Silvast et al. 2010).

En relativt lägre hastighet och amplitud kan relateras till sprängskadezon. Posiva i Finland har undersökt både radar och seismik i flera forskningsprojekt under de senaste åren. Resultaten indikerar att radarmätningar inte kan se enskilda sprickor i

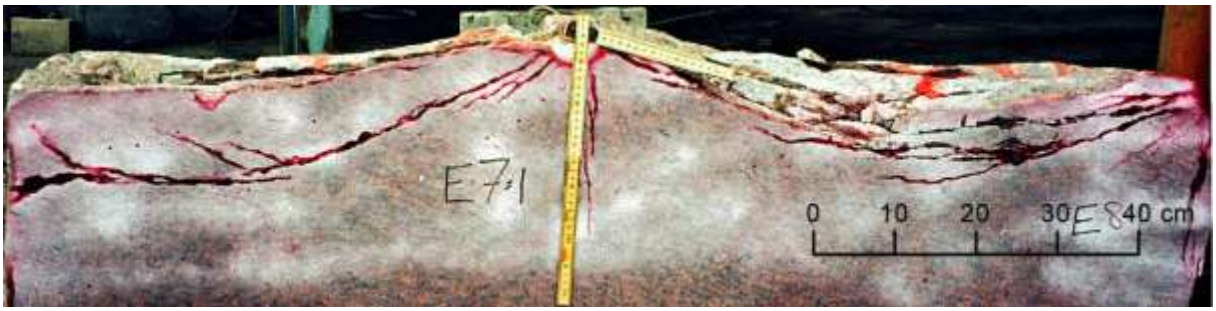
sprängskadezon men ändå påverkas globalt genom dels en förhöjd frekvensberoende dämpning samt en hastighetsvariation (dispersion) i sprängskadezon (Heikkinen et al. 2010; Silvast et al. 2010). I rapporterna används ett relativt dispersionsindex för att karakterisera sprängskadezonen i flera olika fält och laboratorieförsök. Ännu har inget absolut mått på relationen mellan uppmätt dispersion och sprängskadezon hittats men genom att kalibrera mätningarna mot känd information har djupet på sprängskadezon kunnat kartläggas med radar (Silvast et al. 2010). I flera av försöken undersöks också seismiska mätningar på ytan och i borrhål. I Heikkinen et al. (2010) har förutom radar också högfrekvent ultraljud utvärderats och preliminära resultat indikerar att enskilda sprickor i sprängskadezon går att se med ultraljud. Mätningarna med ultraljud är dock betydligt långsammare jämfört med radarmätningar och ställer högre krav på en jämn bergyta. I denna rapport har inledande seismiska mätningar utvärderats och jämförts med sprickkartering på utsågade bergskivor.

3.3. Kartering av sprängskadezonen genom utsågning i berg

En mer direkt metod att mäta skadezon, och mer specifikt spricklängder från sprängning, är att såga ut skivor och spruta på penetranter på sågytorna varvid sprickorna i berget framträder mycket tydligt. Denna metod har tidigare framgångsrikt använts på många olika ställen såväl i bergskärningar, blockstenstäkter som i tunnlar (Olsson, Ouchterlony 2003). Metoden användes och utvecklades för att undersöka vilka faktorer som påverkar sprickbildning i kvarstående berg efter sprängning (Olsson, Bergqvist 1995). Vägverket tog initiativet till dessa undersökningar då man hade problem med höga underhållskostnader för vägskärningar. Omfattande försök genom sprängning av > 500 hål har tidigare genomförts av SveDeFo och SveBeFo baserad på ovanstående teknik dvs. att ta ut block eller skivor från berget vinkelrät mot spränghålen och sedan spraya penetrantvätska på de frisågade ytorna. I Figur 2 och 3 visas några exempel på resultaten.



Figur 2. Sprickutbredning för 22 mm Gurit I 64 mm hål (vänster bild), frikopplad laddning, (laddn.diam. < hål.diam.) och 22 mm Gurit i 24 mm hål (höger bild), fulladdat. Hålen momentant initierade



Figur 3. Sprickutbredning ("bananssprickor") mellan hålen. Hålen momentant initierade

Slutsatserna av dessa undersökningar gav följande åtgärder för att reducera sprickor i kvarstående berg:

- Använd frikopplande laddningar
- Undvik vatten i hålen (kan förlänga sprickorna 3-4 gånger)
- Använd momentan initiering
- Reducera hålastånd
- Reducera laddningsvikten

Metoden att undersöka sprängskadezon med hjälp av sågning och penetranter har också vid ett flertal tillfällen använts av både SKB och Posiva. SKB och Posiva har ett stort intresse av att undersöka skadezonen inför slutförvaret av kärnbränsleavfall. De har också undersökt berget i sina tunnlar med geofysikaliska metoder.

Metoden att såga ut skivor i berget ger en mycket illustrativ, tydlig och lättolkad bild av sprickutbredningen från sprängning i kvarstående berg.

4. Omfattning av projektet

Trafikverkets skadezonsprojekt har genomförts i olika omgångar och omfattar följande fältförsök, se Tabell 2.

Tabell 2. Försöksplatser

Försök	Försöksplats	Objekt	Vägskärning/Tunnel
1	Knäm-Lugnet	E6	Vägskärning
2	Edet Rasta-Torpa	E45	Vägskärning
3	Pålen-Tanumshede	E6	Vägskärning
4	Norsborg	Tunnelbanegarage	Tunnel
5	Tanumshede	E6	Tunnel

De olika försöken har genomförts mellan år 2011 och 2014. Trafikverket, genom Karl-Johan Loorents och Urban Åkeson har varit beställare. Utförare av försöken har varit CBI (Försök 1), Nils Rydén, Lunds Tekniska Högskola (Försök 1-3) samt EDZ-consulting AB genom Mats Olsson (Försök 1-5).

4.1. Försök 1

Försök 1 utfördes i en vägskärning på E6:an i området Knäm-Lugnet.

Platsbeskrivning

Undersökningsområdet ligger i Bohuslän, mellan Strömstad och Tanumshede, se Figur 4. Undersökningen har skett i samband med utbyggnad av E6, på etappen Knäm-Lugnet. Anledningen till att denna plats valdes var att berggrunden är väldigt homogen, samt att förekomsten av naturliga sprickor som kunde störa försöken är liten. Berget i försöksområdet var bra, men ett flertal kraftiga spricksystem, både horisontella och vertikala korsade området.

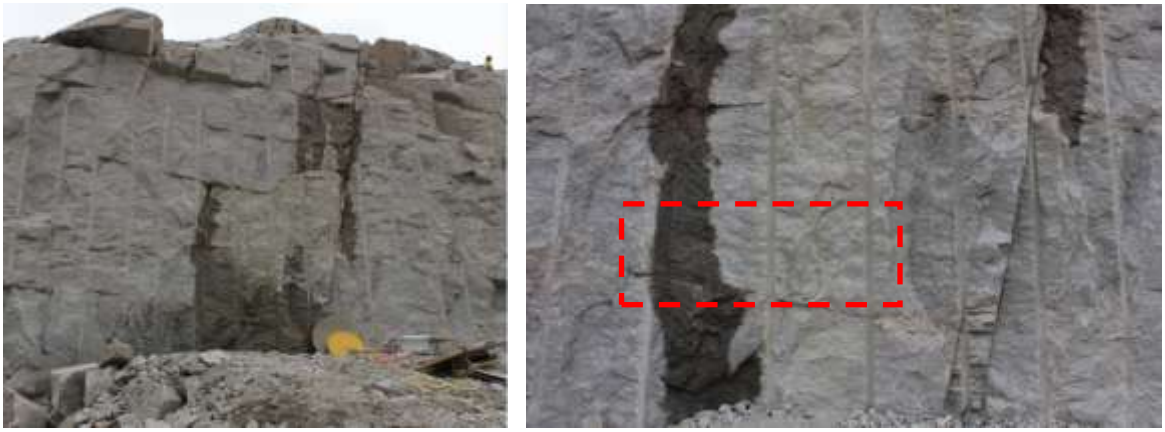


Figur 4. Översiktskarta E6, norra Bohuslän

Geologi
Området domineras av Bohusgranit. Generellt har Bohusgraniten en relativt enhetlig mineralogisk sammansättning, men dess färg och textur skiljer sig jämförelsevis åt. Färgen varierar från grå till röd och texturen varierar från jämnkornig till porfyrisk. Vanligen har den en kornstorlek mellan medel- och grovkornig, men även finkorniga och pegmatitiska led förekommer. Bohusgraniten i försöksområdet är gråröd till rödgrå, medelkornig, massformig och ovittrad.

Ometamorfa bergarter har generellt en högre sprickfrekvens än metamorfa, sammansvetsade bergarter och därför är Bohusgraniterna generellt sett mer spröda än andra bergarter i Västsverige.

Försöksområde
Försöksområdet bestod av en ca 10 m hög bergskärning och omfattade 3 borrhål, se Figur 5. Längden på försöksområdet var ca 2,3 m och hålavståndet var 0,8 m men varierade från 0,75 m till 0,95 m.



Figur 5. Försöksområdet

Borr- och laddplan
Borrhålsdiametern i konturhålen var 70 mm. Kontursprängningen utfördes med slätsprängning vilket här innebar att livhålen sprängdes först och därefter sprängdes hjälpare- och konturhål. Konturen initierades momentant och laddades med Riogur.

4.2. Försök 2
Försök 2 utfördes i en vägskärning på E45, etappen Edet Rasta-Torpa.

Platsbeskrivning
Försöken gjordes på en av etapperna i infrastrukturprojektet Bana Väg i Väst, vilket är utbyggnaden av E45 till 7,5 mil fyrfälts väg respektive dubbelspårig järnväg mellan Göteborg och Trollhättan, se Figur 6. Projektet blev klart i december 2012 till en kostnad på ca 15 miljarder. Den aktuella etappen Edet rasta-Torpa ligger mellan Lilla Edet och Slumpån. I projektet har befintlig E45 breddats till fyrfältsväg och ny lokalväg (LV31) har byggts parallellt med E45. De stora bergschakterna på etappen har varit i samband med byggandet av lokalvägen. Den undersökta bergskärningen ligger på lokalvägen och har en högsta höjd på ca 15 m.



Figur 6. Karta och översiktsbild över försöksområdet

Geologi

Berggrunden i bergskärningen utgörs av en grå medelkorning gnejsig granit med inslag av rödare sliror av medel till grovkornigt material, bestående av i huvudsak kvarts och fältspat. Berggrunden är delvis veckad, men den dominerande foliationsriktningen går längs med skärningen, och salvan är i huvudsak sprängd parallellt med denna. Den dominerande sprickriktningen är längs foliationen men det finns ett flertal sprickgrupper observerade.

Försöksområde

Försöksområdet bestod av en ca 15 m hög bergskärning. I en av vägskärningarna på sträckan sprängdes ett antal konturhål på olika sätt för att undersöka hur sprängmetoden påverkar sprickutbredningen i den slutliga vägslänten. Försöksområdet, se Figur 7, bestod av fem sektioner med olika typer av laddning.



Figur 7. Försöksområdet

Borr-och laddplan

I Tabell 3 visas borr-och laddplanen och i Tabell 4 visas specifikt laddplanen för försöksområdet.

Tabell 3. Normal laddning på delsträckan Edet-Rasra-Torpa

Parametrar	Sort	Konturhål	Hjälparrad 1	Hjälparrad 2
Pallhöjd	m	15	15	15
Håldim.	mm	70	70	70
Hålavstånd	m	0,8	1,2	2,0
Försättning	m	1,2	1,4	2,0
Bottenladdning	kg	0,5 kg Dynomit	2 kg Dynomit	4 kg Dynomit
Pipladdning		Dynotex 17 mm	Dynorex 32 mm	Dynomit 43 mm
Laddn.konc.	kg/m	0,2	1,0	2,0

Tabell 4. Laddningsplan för försöksområdet

Sektion	Konturhål	Hjälparrad 1	Slätspr/förspr
1	80 g cord	Magnasplit 32 mm	Förspräckning
2	80 g cord	Magnasplit 32 mm	Förspräckning
3	80 g cord	Magnasplit 32 mm	Slätsprängning
4	150 g cord	Magnasplit 32 mm	Slätsprängning
5	Dynotex 17 mm	Magnasplit 32 mm	Slätsprängning

Konturhålen sprängdes momentant och kopplades ihop med 5 g cord. Hjälparraderna initierades med 42 ms ytfördröjning mellan hålen och 17 ms mellan raderna. I Figur 8 visas resp. försöksområden.


Förspräckning



Cord 80g/m



Cord 150 g/m


Dynotex 17 mm

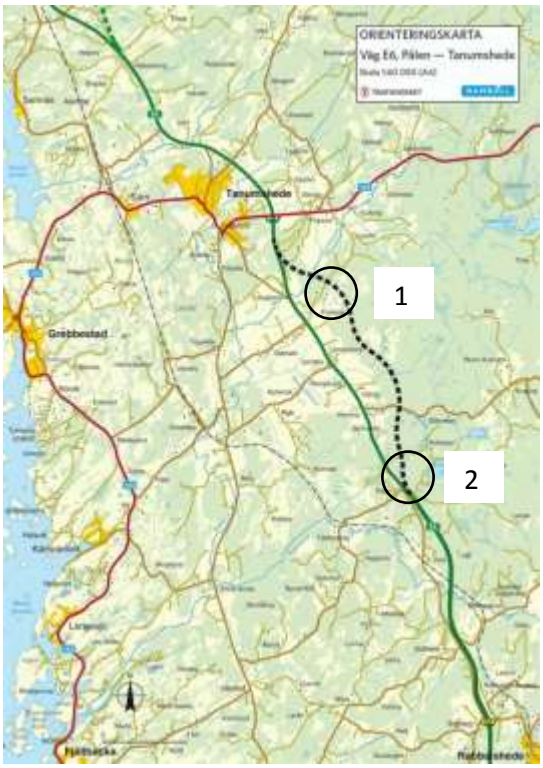
Figur 8. Försöksområdena med olika typer av sprängning

4.3. Försök 3

Försöken gjordes på två platser längs utbyggnaden av E6 mellan Pålen och Tanumshede, se Figur 9. Den ena provplatsen var vid det södra tunnelpåslaget till höger om det högra tunnelröret. Den andra provplatsen var en vägskärning vid Pålen.

Geologi

Den dominerande bergarten i området är en rödgrå medelkornig massformig Bohusgranit. Graniten är spröd för att vara granit på grund av en hög frekvens av naturliga mikrosprickor. Övriga bergarter är sedimentgnejs (Stora Le Marstrands gnejs) och pegmatit.



Figur 9. Karta och översiktsbild över de två försöksområdena

Försöksområde

Försöksområdet bestod av två områden, dels en vägskärning med ca 5 m höjd, och dels ett tunnelpåslag, se Figur 10. Snittet vid tunnelpåslaget tvärade 3 st hål, se Figur 11. Berget här var en granit.



Figur 10. Tunnelpåslaget (försöksområdet på höger sida om högra röret-rödmarkerat i figuren)



Figur 11. Försöksområdet vid tunnelpåslaget

Det andra försöksområdet bestod av två snitt som tillsammans tvärade 8 st. hål, se Figur 12. Snittet över hål 1-2 tvärade en pegmatitzon. Berget i mellan hål 3-4 bestod av gnejs och berget mellan hål 5-8 var huvudsakligen granit.



Figur 12. Försöksområde 2 i olika geologier

Borr- och laddplan

Tabell 5 visar borr-och laddplan för tunnelpåslaget och Tabell 6 visar borr-och laddplan för vägskärningen. Konturhålen sprängdes momentant.

Tabell 5. Borr-och laddplan för tunnelpåslaget

Parametrar	Sort	Konturhål	Hjälparrad 1	Hjälparrad 2
Pallhöjd	m	20	20	20
Håldim.	mm	70	70	70
Hålavstånd	m	0,3	0,8	1,6
Försättning	m	0,6	1,0	n/a
Bottenladdning	kg	0,15	0,3	1,0
Pipladdning		40 g cord	22 mm dyn	32 mm dyn
Laddn.konc.	kg/m	0,04	0,3	1,1

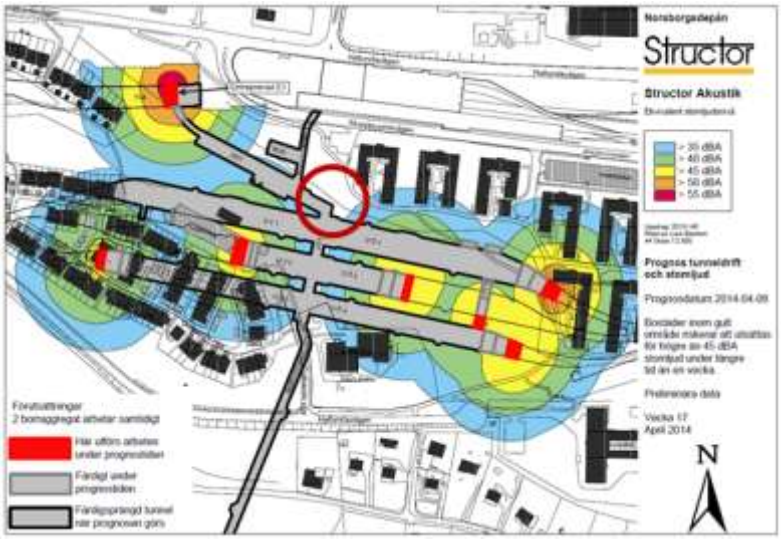
Tabell 6. Borr-och laddplan för vägskärningen

Parametrar	Sort	Konturhål	Hjälparrad 1	Hjälparrad 2
Pallhöjd	m	5-10	5-10	5-10
Håldim.	mm	70	70	70
Hålavstånd	m	0,6	1,2	1,8
Försättning	m	0,8	1,45	n/a
Bottenladdning	kg	0,3	1,5	3,0
Pipladdning		Riogur 17	25 mm dyn	40 mm dyn
Laddn.konc.	kg/m	0,22	0,6	1,7

4.4. Försök 4

Detta försök gjordes i en tunnel i Norsborg. Här byggs en depå för Röda linjen i Stockholms tunnelbana. Depån byggs 18 till 37 meter ner i berget och anslutas till tunnelbanan vid Norsborgs station. I berget kommer det att kunna stå 17 tågsätt. Anläggningen förväntas stå färdig omkring år 2016 och finansieras av SL (Storstockholms Lokaltrafik).

Skanska bygger tunnlarna som bl.a. består av tre st. parallella tunnlar för uppställning av tågen. En del av denna konstruktion framgår av Figur 13. Försöksområdet för EDZ är utmärkt i figuren och bestod av en tvärtunnel till en av de tre parallella tunnlarna.



Figur 13. Försöksområdet

Geologi

Geologin i området bestod av en medelkornig gnejs med lerfyllda sprickor. Det förekommer kalcitzoner och berget är ofta skivigt med ca 20 cm skivtjocklek.

Försöksområde

Försöksområdet var i en nisch av en tunnel med kvarvarande halvpipor, se Figur 14. Försöksområdet tvärade tre horisontella halvpipor.



Figur 14. Försöksområdet i tunneln

Borr- och laddplan

Hålen var laddade med pumpemulsion. Laddningskoncentrationen i konturhålen var 0,35 kg/m och Nonel LP användes som tändare. Hålavståndet i konturhålen var 0,6 m. Håldimensionen var 48 mm.

4.5. Försök 5

Detta delförsök gjordes i en tunnel på utbyggnaden av motorvägen E6 mellan Pålen och Tanumshede, se Figur 15. Tunneln som byggs av Skanska är ca 250 m lång och består av två tunnelrör.



Figur 15. Byggnad av motorväg Pålen-Tanumshede

Geologi
Den dominerande bergarten i tunneln utgörs av porfyrisk medelkorning Bohusgranit med inslag av pegmatit. Berggrunden är storblockig med dominerande branta till vertikala sprickor. Två dominerande sprickriktningar förekommer, ca N150° och ca N200 ° samt subhorisontella sprickor, s.k bankningsplan.

Försöksområde
Försöksområdet var i det högra tunnelrörets (från söder räknat) högra vägg, ca 100 m in i tunneln, se Figur 16. Området tvärade tre halvpipor.



Figur 16. Försöksområde i tunneln på E6:an

Borr-och laddplan
Hålen var laddade med pumpemulsion. Laddningskoncentrationen i konturhålen var 0,35 kg/m och Nonel LP användes som tändare. Hålavståndet i konturhålen var 0,6 m.

5. Genomförande

5.1. Försök 1

Geofysikaliska mätmetoder

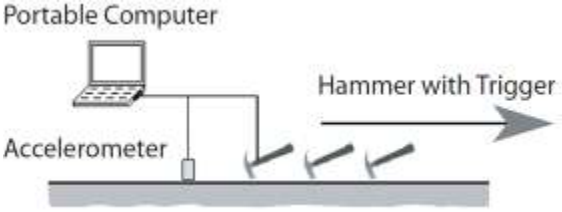
Geofysikaliska mätningar utfördes längs två horisontella profiler/linjer i mitten av provområdet, vinkelrätt mot borrhålen. I fält och laboratorium utfördes seismiska mätningar med en hammare (PCB modell 086C04) och en accelerometer (PCB modell 352B10) samt med en mer högfrekvent (55 kHz) ultraljudsantenn från ACSYS (modell A1220).

Mätutrustningen från ACSYS är av samma typ som använts av Heikkinen et al. (2010) för karakterisering av sprängskadezon på utskurna stavar. Denna ultraljudsutrustning är speciellt utvecklad för mätningar på inhomogena material och ojämna ytor såsom betong, se Figur 17. Totts detta var bergytan i fält för ojämn för ultraljudmätningarna och insamlade data från fält anses inte ha tillräcklig god kvalitet för vidare utvärdering.



Figur 17. 55 kHz ultraljudsantenn från ACSYS.

I fält utfördes seismiska mätningar för att kunna analysera reflekterade och refrakterade vågor samt ytvågsseismik (MASW). Figur 18 visar en schematisk figur över mätuppställningen och utrustningen.



Figur 18. Seismisk mätning med en hammare och en instrumenterad hammare.

Sågning, berguttag och sprickkartering

Fem stycken bergsskivor sågades ut ur bergskärningen. Totalt omfattade sågningsarbetet 2 st. vertikala snitt och 6 st. horisontella snitt med ett totalt sågdjup på ca 0,5 m. Arbetet utfördes av Bommelins Bygg & Industrihåltagning.

En gejder bultades fast i berget och på denna hängdes en fjärrstyrd sågmotor och sågklinga, se figur 19. Då alla snitt hade sågats, lossades skivorna genom att järnkilar slogs in i de sågade snitten. Skivorna märktes och lyftes ner. Ett par av skivorna fraktades till CBI.



Figur 19. Sågning.

Figur 20 visar en bild av de olika skivorna. Det kvarvarande ”golvet” i slitsen rengjordes och torkades med varmluftspistoler varefter penetrant Bycotest RP-20 sprayades på. Överflödig penetrant sköljdes av varpå ”golvet” torkades ånyo. Sprickmönstret framträdde nu mycket tydligt och dokumenterades genom fotografering.

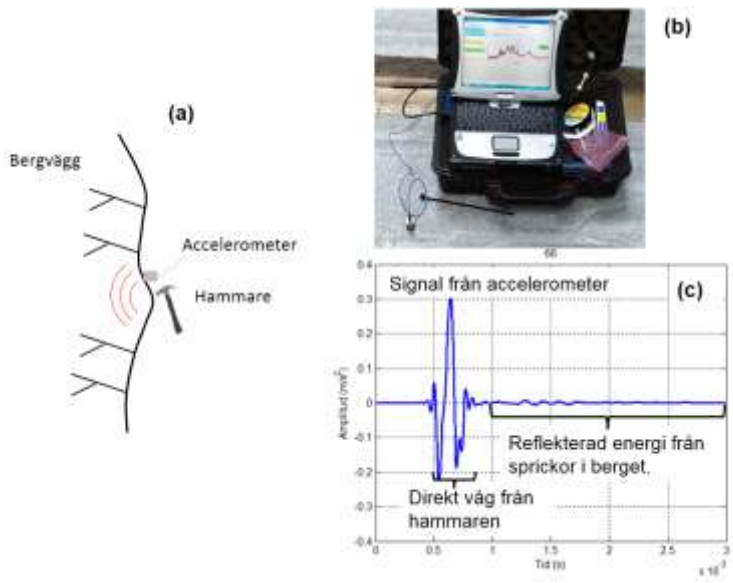


Figur 20. Foto av de olika bergskivorna, innan losstagning. Skiva 4 och 5 karterades på CBI i Borås. Golvet under skiva 1, slitsbotten, karterades på plats.

5.2. Försök 2

Geofysikaliska mätmetoder

Seismiska mätningar utfördes med en liten hammare (PCB modell 086C04) och en treaxlig accelerometer (PCB modell 352B10). Figur 21 visar schematiskt mätuppställningen och utrustningen. Metoden liknar närmast så kallad reflektionsseismik eller Impact Echo mätning. Seismiska vågor genereras av hammaren och resulterande vibrationer registreras med accelerometern så nära slagpunkten som möjligt. Efter den direkta vågen från slagpunkt till accelerometer bör teoretiskt ingen annan våg kunna nå accelerometern om berget är oändligt stort och helt homogent. Om bergmassan däremot är begränsad i geometrin, skadad, eller inhomogen kommer delar av de seismiska vågorna reflekteras tillbaka till accelerometern. Genom att mäta upp energin i den senare delen av signalen kan ett relativt mått på skador (reflektorer) mätas upp. Teoretiskt finns det också en möjlighet att ”känna av” ytliga skador eller djupare skador genom att titta på energin i höga respektive låga frekvenser. I resultaten nedan har mätningen upprepats i ett stort antal punkter längs samma linje i bergschakten vilken sedan sågats ut.



Figur 21. (a) Mätuppställning i fält, (b) datainsamlingssystem, och (c) exempel på signal från en bergschakt.

De seismiska mätningarna utfördes i sektion 2-5, se laddning i Tabell 4. Accelerometern flyttades i 5 cm intervall längs mätlinjen och 5 slag utfördes i varje punkt och medelvärdesbildades.

Sågning, berguttag och sprickkartering

Sågningen gjordes av en sågklinga och bestod av 2 st ca 1 m långa vertikala sågspår och ca 4 st 2-3 m långa horisontella sågspår. Efter utsågning kilades skivorna bort för att ge plats för kartering och fotografering, se Figur 22.

Sprickundersökningen bestod i att efter rengöring och torkning av bottenytorna i de utsågade slitsarna så påfördes ytorna penetrantvätska vilket får sprickorna i berget att tydligt framträda. Bergytorna fotograferades därefter.



Figur 22. Kilning för borttagning av utsågade skivor

5.3. Försök 3

Geofysikaliska mätmetoder

Metodiken och utrustningen som användes här är densamma som vid försök 2, se kapitel 5.2. I figur 23 visas de seismiska mätningarna och mätutrustningen som användes.





Figur 23. De seismiska mätningarna och mätutrustning

Sågning, berguttag och sprickkartering

Sågningsarbetet bestod av 2 st. ca 1 m långa vertikala sågspår och ca 3 st. 2-5 m långa horisontella sågspår. Efter utsågning kilades skivorna bort för att ge plats för kartering och fotografering. Förutom kilning provades även en specialtillverkad tunn hydraulisk ”domkraft”. Denna bestod av två tunna hopsvetsade plåtar och ett förbindelserör, se Figur 24. Domkraften trycktes in i sågspåret och en hydraulisk handpump anslöts. Genom att pumpa in hydraulolja mellan plåtarna utvidgas sågspåret och den sågade bergskivan bryts loss.

Efter att skivorna lossats lyftes de ut och kunde karteras på sprickor. Därefter kunde den kvarvarande sulan i slitsen karteras.



Figur 24. Hydraulisk domkraft

Sprickundersökningen utfördes enligt tidigare beskrivning, se kapitel 5.2. Skivytorna fotograferades och dessutom scannades skivytorna och resultatet överfördes till en dator, se Figur 25.



Figur 25. Scanningsutrustning

5.4. Försök 4

Geofysikaliska mätmetoder

Inga geofysikaliska mätningar utfördes.

Sågning, berguttag och sprickkartering

Försöksområdet tvärade 4 halvpipor och hålavstånden varierade mellan 25-70 cm. Sågningsarbetet omfattade två horisontella sågspår och 6 vertikala sågspår. Efter utsågning kilades skivorna bort för att ge plats för skanning. Figur 26 visar ett foto på sågningen i tunneln. Sprickundersökningen utfördes med penetranter och efterföljande scanning av de vertikala bergytorna i slitsarna.



Figur 26. Den färdiga utsågningen av de två profilerna

5.5. Försök 5

Geofysikaliska mätmetoder

Inga geofysikaliska mätningar utfördes.

Sågning, berguttag och sprickkartering

Försöksområdet, beläget i höger tunnelvägg, tvärade 3 halvpipor och hålavståndet var ca 60 cm. Sågningsarbetet omfattade två horisontella sågspår och 6 vertikala sågspår. Efter utsågning kilades skivorna bort för att ge plats för skanning. Figur 27 visar ett foto på sågningen i tunneln. Sprickundersökningen utfördes med penetranter och efterföljande scanning av de vertikala bergytorna i slitsarna.



Figur 27. Den färdiga utsågningen av de två profilerna

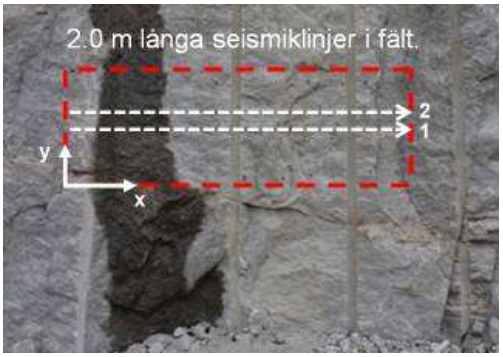
6. Resultat

6.1. Resultat försök 1

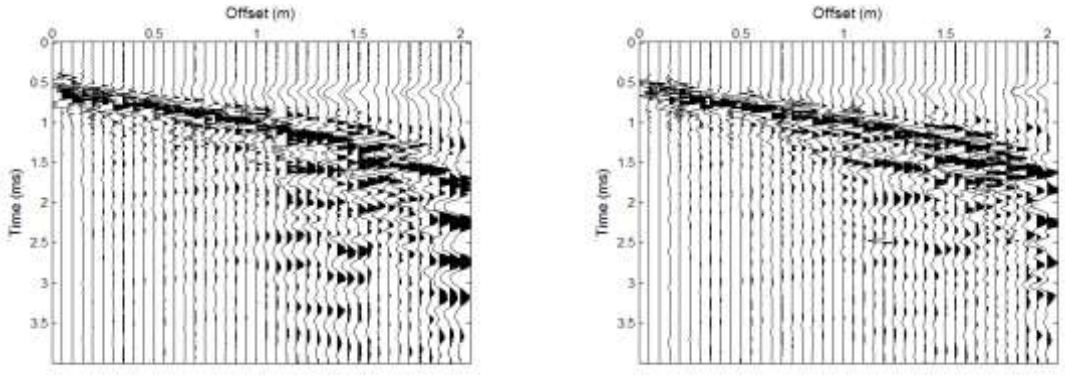
Geofysikaliska mätmetoder

Seismiska mätningar utfördes i två olika linjer inom det utvalda området, se figur 28. I Figur 28 visas uppmätta signaler från accelerometern efter hammarslag längs med linje 1 och 2. Alla signaler är normerade till en max amplitud på 1 och positiv amplitud är ifylld med svart för att tydligöra olika vågfronter.

Figur 29 kan ses som ett standard diagram av seismiska mätningar från vilka olika typer av vågor kan analyseras. Refraktionsseismik och ytvågsseismik bygger på att analysera kompressionsvågor respektive ytvågor längs mätsträckan från den här typen av rådata. Dessa seismiska metoder kan ge information om seismisk hastighet som funktion av djupet från bergväggen under antagande om homogena laterala förhållanden längs med mätsträckan. Vågformerna i Figur 29 varierar kraftigt längs med mätlinjerna vilket indikerar inhomogena förhållanden i berget med mycket reflektioner längs mätlinjerna. Det är därför väldigt svårt att utvärdera en traditionell hastighetsprofil på djupet från bergväggen. Resultatet överensstämmer med tidigare resultat från liknande mätningar, där man också haft svårt med tolkningen av data. (Luke et al. 1999; Malmgren et al. 2007; Enescu och Cosma, 2010; Silvast et al. 2010).



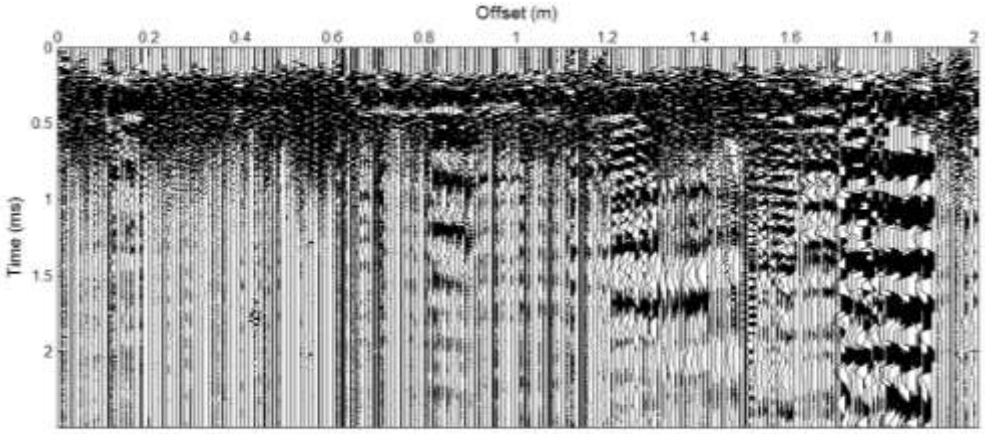
Figur 28. Seismiska mätningar i fält utfördes längs 2.0 m långa linjer



(a) **(b)**

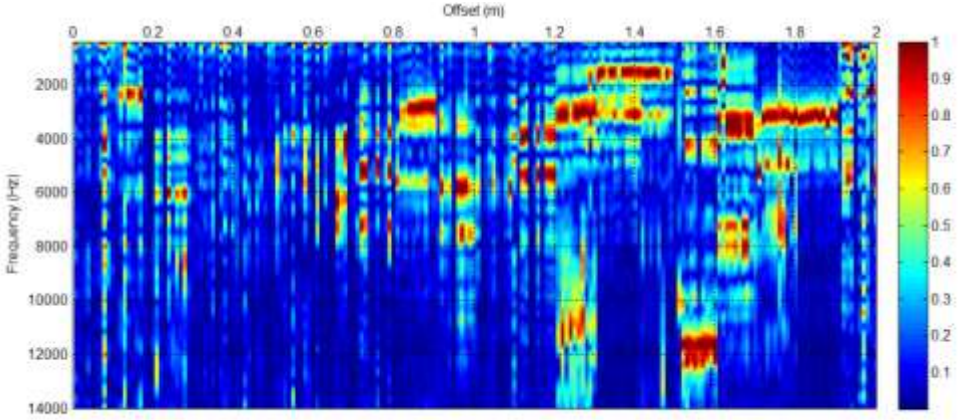
Figur 29. (a) Seismisk mätning i linje 1 i mitten på försöksområdet (y=0.3 m). (b) Seismisk mätning i linje 2 strax över mitten på försöksområdet (y=0.4 m)

Resultaten från de traditionella seismiska mätningarna ovan indikerar att det finns sprickor i bergväggen men det är svårt att skilja på reflektioner från ojämnheter på ytan och reflektioner från djupet in i bergväggen. Därför provades också en alternativ mätning där både hammare och accelerometer flyttas samtidigt längs med mätsträckan. Mätningen gjordes i linje 1 i Figur 28 med 10 slag i varje mätpunkt och 0.05 m mellan accelerometer och hammare. Figur 30 visar rådata från alla 200 slag längs mätsträckan. Efter huvudpulsen (vid ca 0.5 ms) från slaget ska teoretiskt ingen energi komma tillbaka till accelerometern om det inte finns något som vågorna kan reflekteras mot. Om det finns många sprickor på djupet kommer de seismiska vågorna att reflekteras tillbaka mot ytan och sedan åter reflekteras i sprickor osv. Teoretiskt kommer då en del av energin från hammarslaget inte att fortplanta sig in i berget utan stanna kvar nära ytan. Till exempel avtar amplituden i signalerna tidigare mellan x=0,3 m till x=0,6 m jämfört med signaler mellan 1,2 och 1,9 m i mätlinjen.



Figur 30. Rådata från seismisk mätning längs linje 1 med konstant avstånd (0.05 m) mellan slagpunkt och accelerometer

Figur 31 visar relativ energi 0.5 ms efter hammarslaget som funktion av frekvens och läge längs seismikprofilen. I homogent berg utan sprickor förväntas ingen reflekterad energi vilket motsvarar låg amplitud och blå färg. Figuren visar band med reflekterad energi (resonans) vid olika frekvenser.



Figur 31. Relativ energi 0.5 ms efter hammarslaget som funktion av frekvens och läge längs seismikprofilen från fält. I homogent berg utan sprickor förväntas ingen reflekterad energi (blått)

Sprickkartering med penetranter

Figur 32 visar en översiktlig bild av sprickutbredningen i botten på den utsågade slitsen. Här syns tydligt en långsträckt subparallell naturlig spricka 10-30 cm från pallkanten.

Sprickbilden från hål 1 och 2 framgår av Figur 33. Hål nr 1 i slitsbotten hade en stor andel krosssprickor, max spricklängd ca 5 cm, och endast några radiella sprickor med en maximal spricklängd på 12 cm. Innanför hålet, ca 15 cm, syns den subparallella sprickan. Från hål 2 fanns ett antal radiella sprickor varav den längsta sprickan hade en spricklängd på ca 50 cm men denna spricka är troligen en naturlig spricka då den till största delen är fylld. En ca 20 cm lång radiell spricka fanns också samt några krosssprickor. Innanför hålet syns den subparallella sprickan.



Figur 32. Sprickbild i slitsen



Figur 33. Sprickbildning från Hål 1 och Hål 2

Hål nr 3, se Figur 34, visar en liknande sprickbild som hål nr 2 med ett antal krossprickor samt ett par längre sprickor varav den ena är en sprängspricka och den andra troligen en spränginducerad spricka. Den spränginducerade sprickan har ursprungligen varit en naturlig fylld spricka som påverkats av sprängningen. Innanför hålet i bakre kant finns öppna naturliga sprickor. Från dessa finns ett antal spränginducerade sprickor som pekar mot pallkanten. I Figur 35 visas sprickbilden från en av de utsågade skivorna.



Figur 34. Sprickutbredning från hål 3


Figur 35. Sprickutbredning från hål 2 och 3

Sammanfattning

En sammanställning av sprickläng derna för de olika hålen visas i Tabell 7. Samtliga hål har krossprickor (definierade som sprickor ≤ 10 cm). Borrhål 1 har få radiella sprickor men ett stort antal krossprickor. Krossprickor har uppkommit pga. av att det valda sprängämnet, Riogur F CD, har en hög detonationshastighet. Sprängämnen med hög detonationshastighet får mycket krossprickor (bergets tryckhållfasthet överskrids). Eftersom borrhålstrycket ökar med kvadraten på detonationshastigheten erhålls ett högt borrhålstryck. Riogur F CD är ett vattengelsprängämne bestående av ett antal laddningar sammanbundna med detonerande stubin. Den angivna detonationshastigheten är 7300 m/s friliggande vilket är mycket högt (ungefär i klass med detonerande stubin).

Det är inte helt klart om de längsta sprickorna verkligen är sprängsprickor eller spränginducerade sprickor. Oavsett vilken typ av sprickor de är så har de med stor sannolikhet orsakats av sprängningen och det höga borrhålstrycket. Det har varit klokt att välja en grov håldimension (ca 70 mm med slitna kronor) då man på så sätt frikopplat laddningen.

Tabell 7. Uppmätta sprickläng der för slitsen i Tanum

Sprängämne	Hål nr	Sprickläng der (cm)	Max.sprickläng d (cm)
Riogur F CD	1	5,12	12
Riogur F CD	2	7,12,20,6,18[1],50[2]	20
Riogur F CD	3	6,4,30[1],5,5,15	15

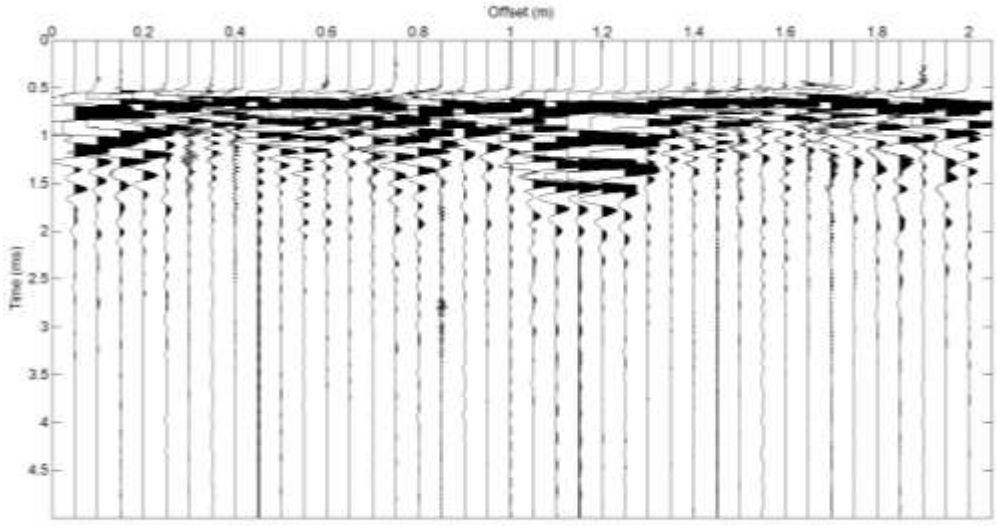
1)Spräng inducerade sprickor
2)Naturliga sprickor

6.2. Resultat försök 2

Geofysikaliska mätmetoder

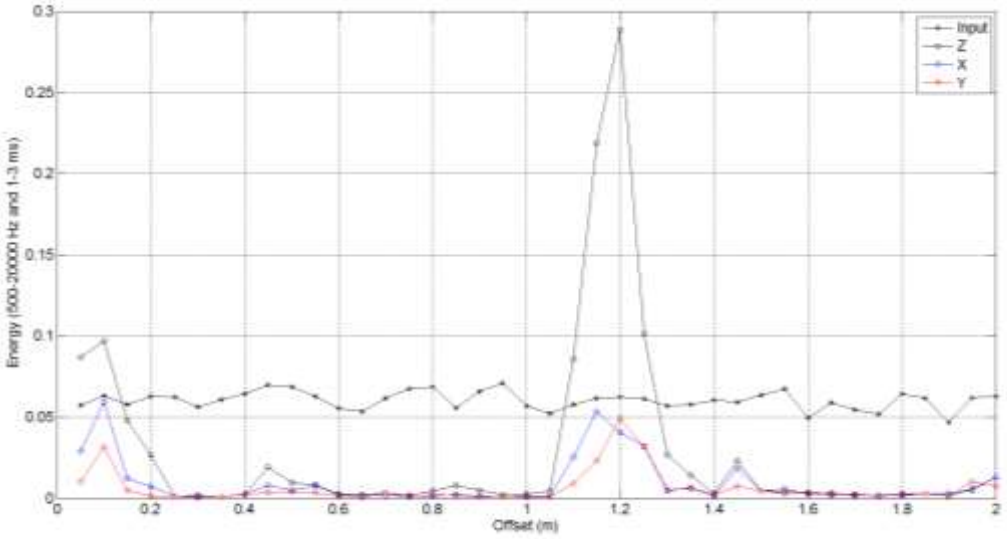
Förspräckning med cord 80 g/m

Figur 36 visar uppmätta signaler i sektionen. Alla signaler är normerade till en max amplitud på 1 och positiv amplitud är ifylld med svart för att markera tydliga amplituder i signalerna. Den direkta vågen från hammaren syns i figuren vid t=0.5 ms och är ungefär den samma längs hela linjen.

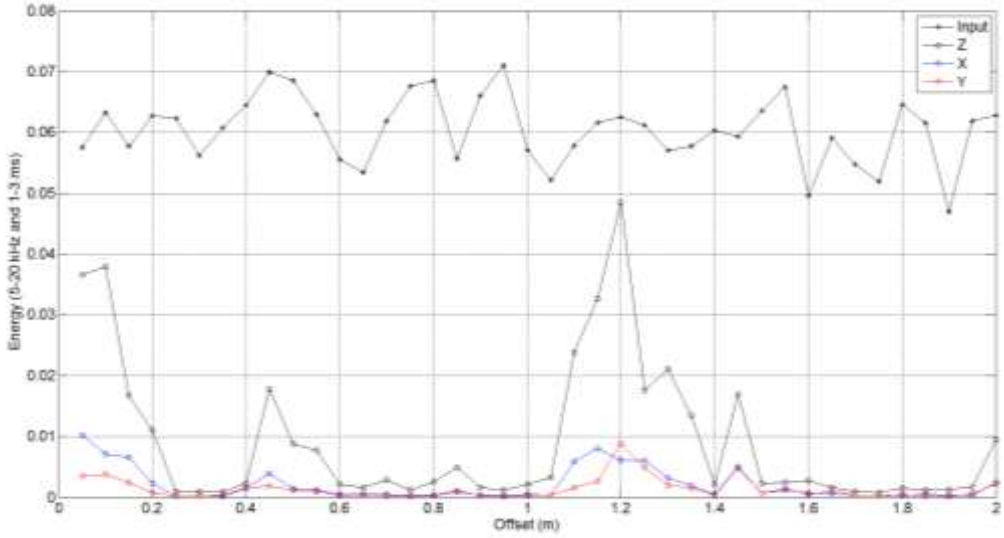


Figur 36. Uppmätta signaler (z-komponent) längs förspräckningssektion vid Lilla Edet

Figur 37 visar summerad energi över tiden 1-3 ms och frekvenser 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje som referens (input) och är relativt konstant över mätsträckan. En tydlig pik med hög reflekterad energi syns runt 1.2 m. Från avståndet 0.4 m syns reflekterad energi åt både höger och vänster vilket skulle kunna komma från en vertikal spricka vid 0.4 m. För att zooma in på mer ytliga sprickor har motsvarande figur plottats med bara höga frekvenser (> XX Hz) i Figur 38.



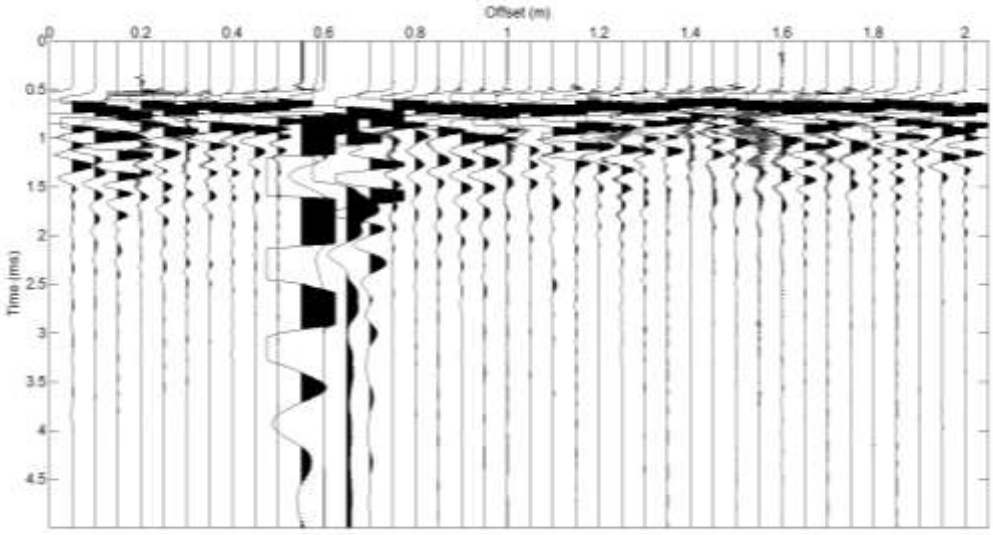
Figur 37. Sektion Förspräckning summerad energi mellan 1-3 ms och 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)



Figur 38. Sektion Förspräckning summerad energi mellan 1-3 ms och 5-20 kHz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)

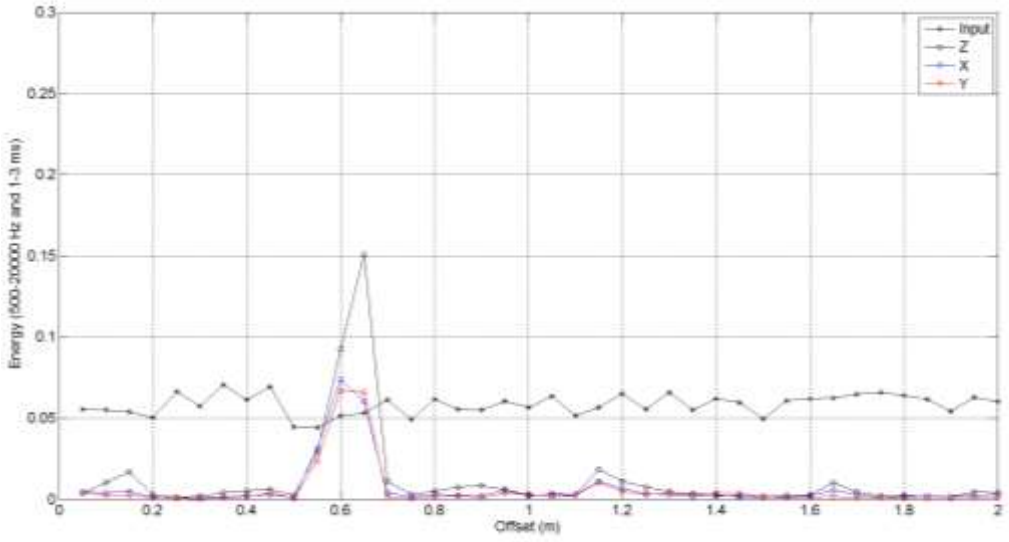
Slätsprängning med 80g cord

Figur 39 visar uppmätta signaler i sektion 80. Höga lågfrekventa amplituder runt 0.6-0.7 m motsvarar sannolikt löst material i ytan.

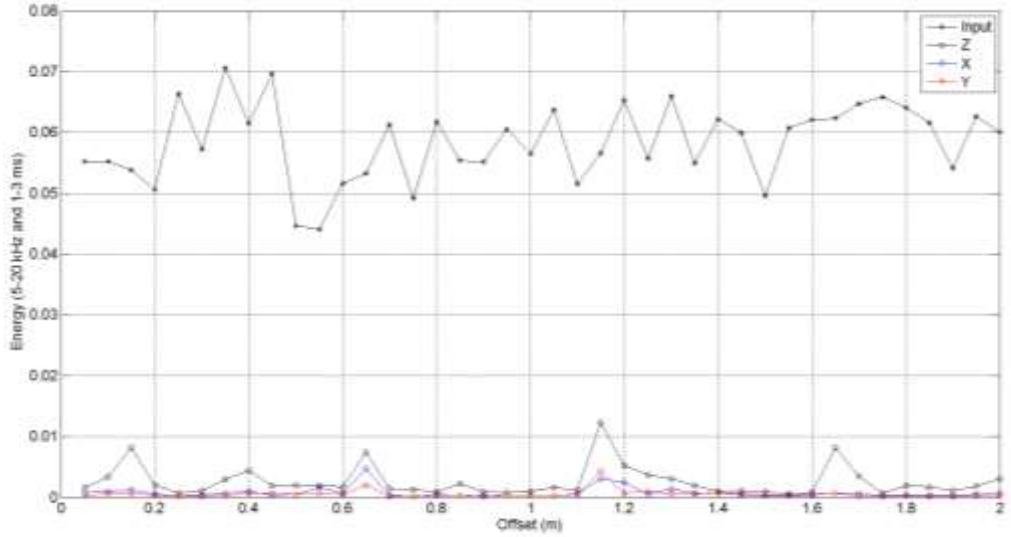


Figur 39. Uppmätta signaler (z-komponent) längs sektion 80 vid Lilla Edet

Figur 40 visar summerad energi över tiden 1-3 ms och frekvenser 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). En tydlig pik med hög reflekterad energi syns runt 0.6 m precis som i tidsdomän i figuren ovan. För att zooma in på mer ytliga sprickor har motsvarande figur plottats med bara höga frekvenser (5-20 kHz) i Figur 41.



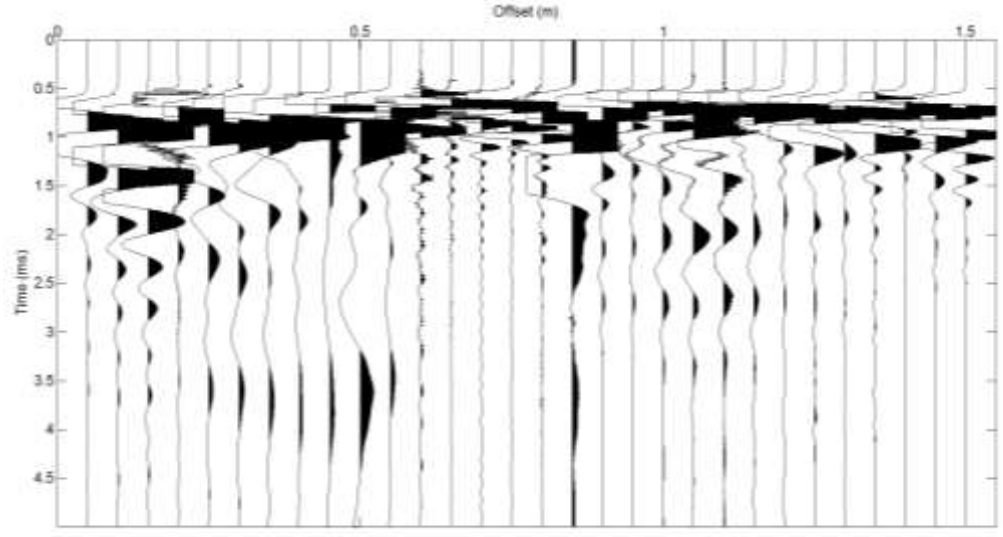
Figur 40. Sektion 80 g cord summerad energi mellan 1-3 ms och 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)



Figur 41. Sektion 80 g cord summerad energi mellan 1-3 ms och 5-20 kHz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)

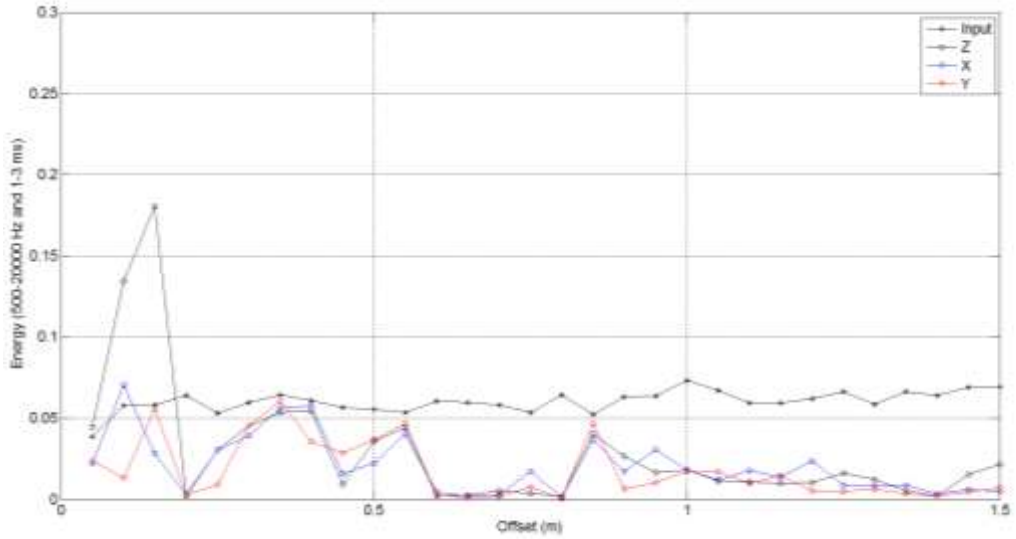
Slätsprängning med 150 g cord

Figur 42 visar uppmätta signaler i sektion 150.

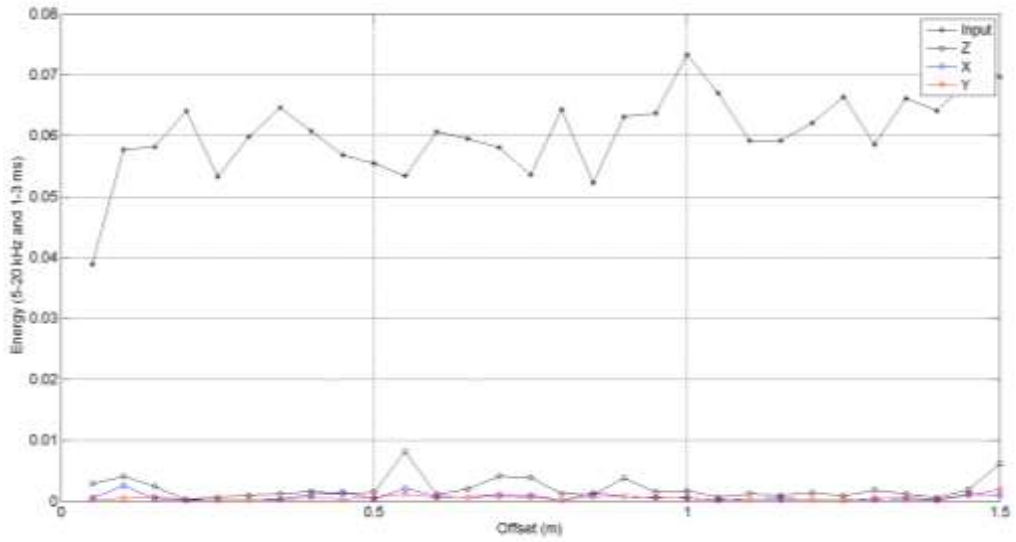


Figur 42. Uppmätta signaler (z-komponent) längs sektion 150 vid Lilla Edet

Figur 43 visar summerad energi över tiden 1-3 ms och frekvenser 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). För att zooma in på mer ytliga sprickor har motsvarande figur plottats med bara höga frekvenser (5-20 kHz) i Figur 44.



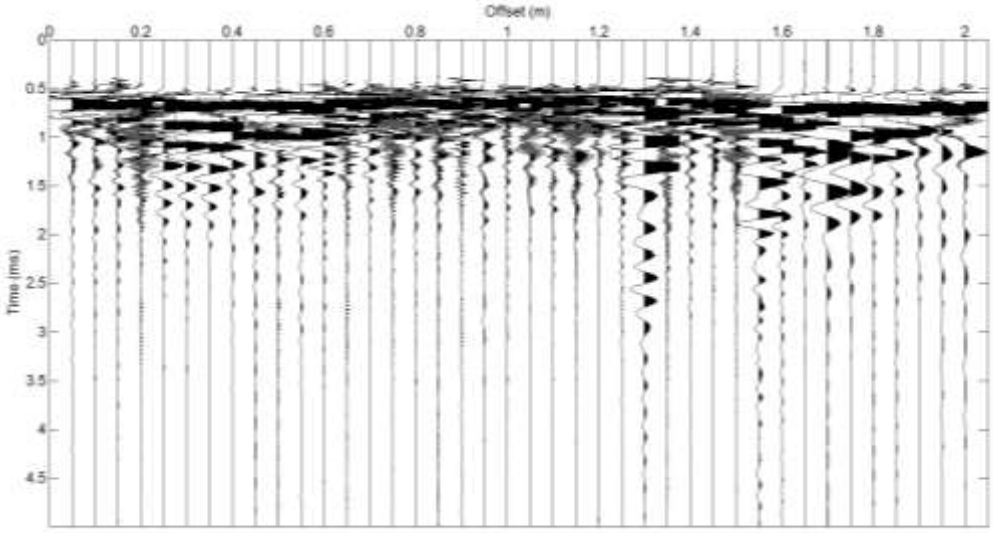
Figur 43. Sektion 150 g cord summerad energi mellan 1-3 ms och 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)



Figur 44. Sektion 150 g cord summerad energi mellan 1-3 ms och 5-20 kHz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)

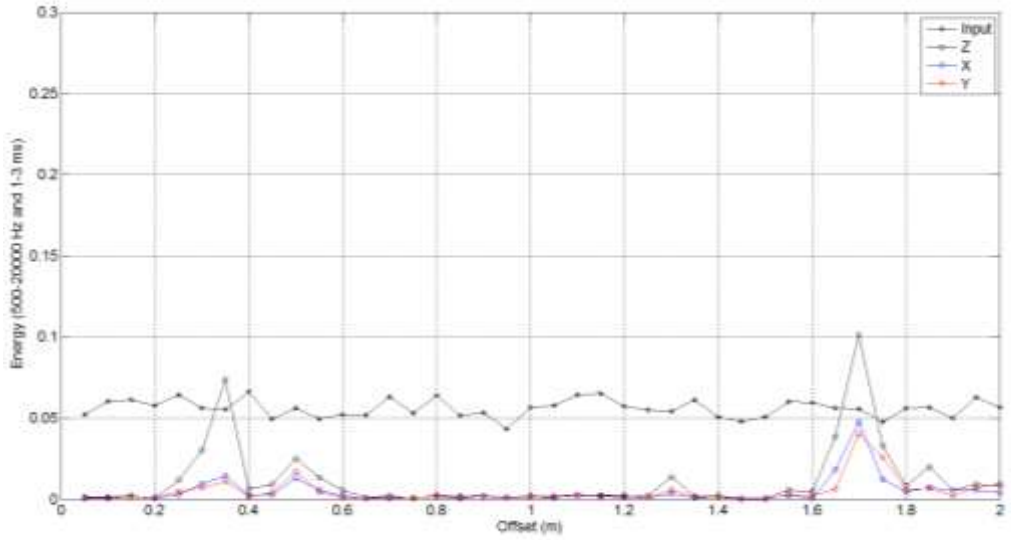
Slätsprängning med Dynotex 17 mm

Figur 45 visar uppmätta signaler i denna sektion. Höga amplituder syns runt 0.7 m vilka troligtvis kommer från en lös bit som lossnat vid sågning.

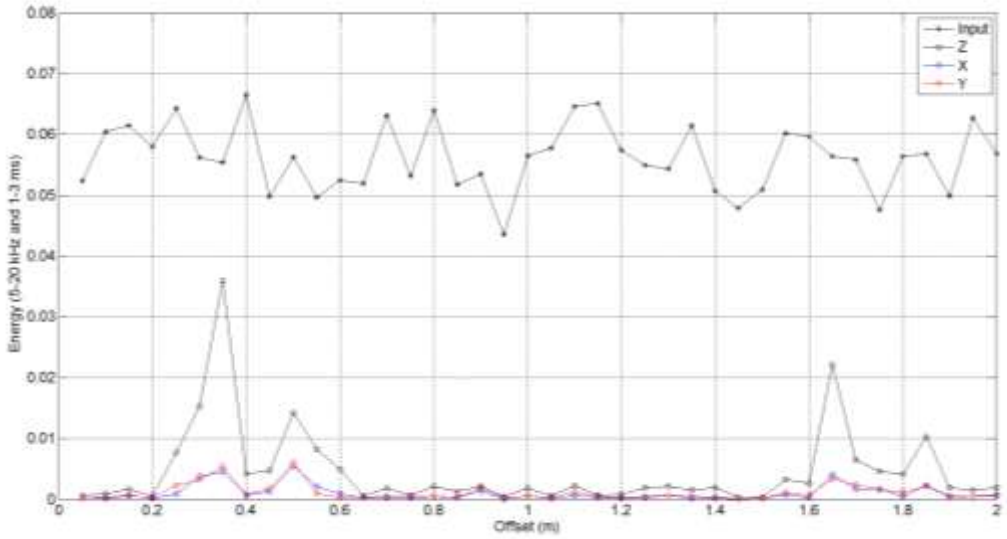


Figur 45. Uppmätta signaler (z-komponent) längs sektion Dynotex vid Lilla Edet

Figur 46 visar summerad energi över tiden 1-3 ms och frekvenser 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Två tydliga pikar syns vid 0.35 m respektive 0.7 m. För att zooma in på mer ytliga sprickor har motsvarande figur plottats med bara höga frekvenser (5-20 kHz) i Figur 47.



Figur 46. Sektion Dynotex summerad energi mellan 1-3 ms och 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)



Figur 47. Sektion Dynotex summerad energi mellan 1-3 ms och 5-20 kHz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)

Sprickkartering med penetranter

Undersökningen omfattade två sektioner med förspräckning och 3 sektioner med slätsprängning.

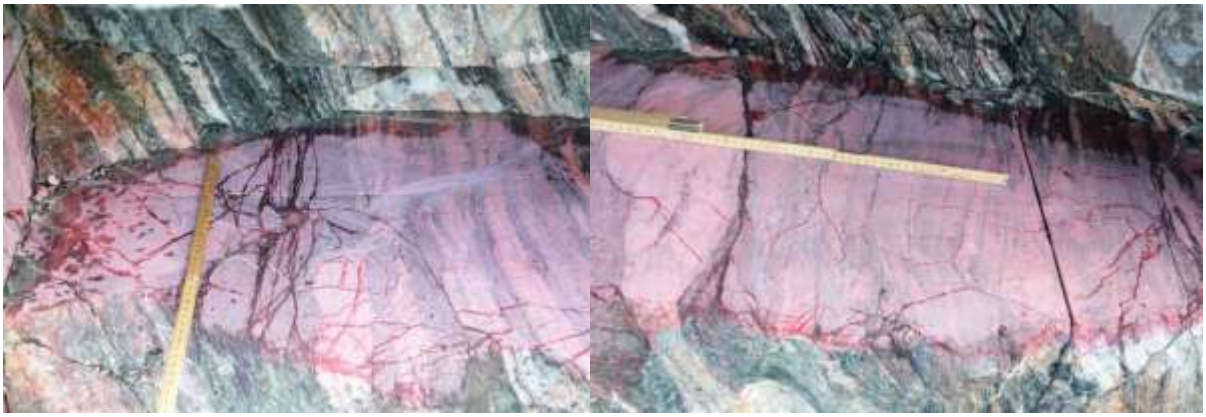
Förspräckning med cord 80 g/m

Vid förspräckning, där konturhålen sprängs först i salvan, är det meningen att de momentant initierade hålen skall samverka och bilda en spricka mellan hålen. Denna spricka ska sedan verka som en barriär och hindra sprickor från omgivande spränghål att passera. Tekniken brukar fungera bra men innebär ofta att hålen bör borras tätare än vid normal slätsprängning.

Den första sektionen omfattade 2 hål med hålavståndet 0,83 m. Berget i detta snitt var mycket gnejsigt, vilket framgår av Figur 48. I sektionen hittades endast några kortare sprickor orsakade av sprängningen. Figur 49 visar några närbilder av sprickutbredningen.



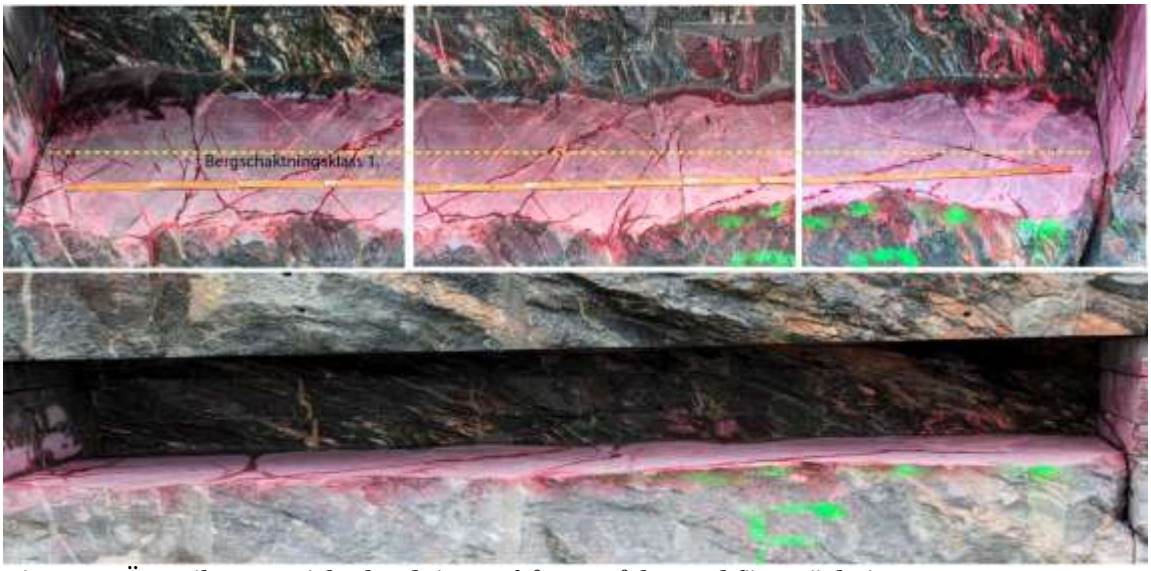
Figur 48. Översikt av sprickutbredning från förspräckning sektion 1



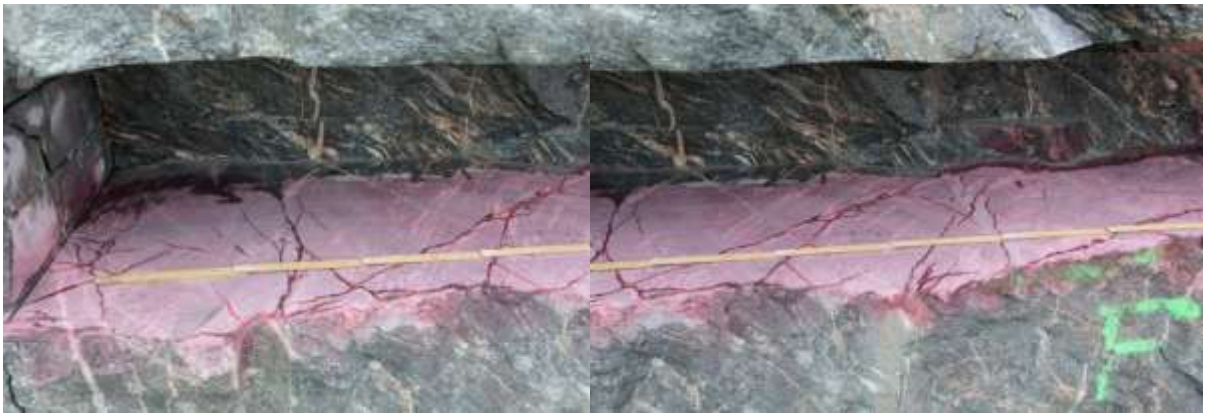
Figur 49. Sprickutbredning från förspräckning i sektion 1, hål 1 och hål 2

Den andra sektionen med förspräckning omfattade 3 hål. Hålavståndet hål 1-2 var 0,6 m och hålavståndet hål 2-3 var 0,9 m.

Sprickutbredningen i denna sektion blev begränsad och de längsta sprickorna var naturliga sprickor som tvärade sågsnitten, se Figur 50. Närmast borrhålen fanns ett antal korta < 5 cm sprickor. Det fanns också ett fåtal längre sprickor där den längsta sprickan var ca 20 cm. Utvärderingen av dessa längre sprickor är dock osäker då sprickorna troligen är naturliga sprickor eftersom de har sprickfyllnad. De kan dock delvis ha öppnat sig pga. sprängningen. Figur 51-52 visar sprickbildningen från de tre spränghålen i detta snitt.



Figur 50. Översikt av sprickutbredningen från området med förspräckning (bergschaktningsklass 1 markerad)



Figur 51. Hål 1 och Hål 2 i sektion Förspräckning



Figur 52. Hål 3 i sektion Förspräckning

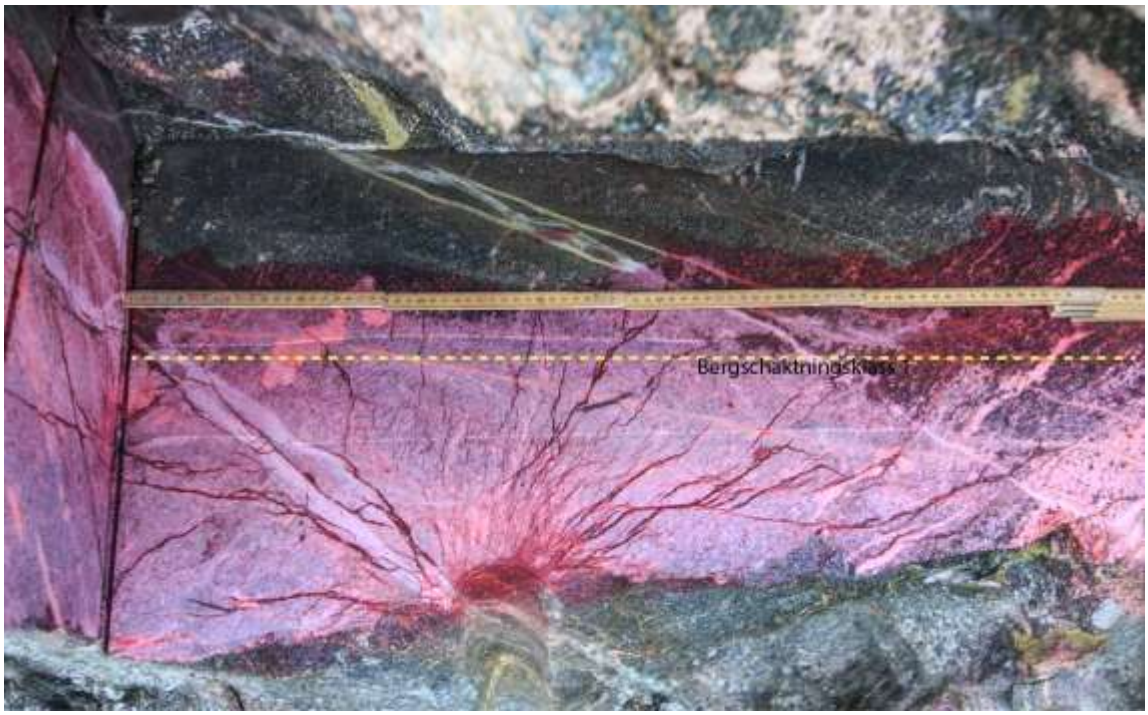
Slätsprängning med 80 g cord

Sektionen omfattade två hål och hålavståndet var 0,72 m. Hålen sprängdes momentant och hade laddats med 80 g cord som är en detonerande cord med en laddningskoncentration på 80 g/m.

Figur 53 visar en översiktsbild av sprickutbredningen och Figur 54 en detaljerad bild av hål 1. Området närmast hålen fick en ros av fina sprickor som är typisk för ett sprängämne med hög detonationshastighet (6000-7000 m/s). Dessa sprickor, krossprickor, var ca 10 cm långa och det fanns mer än 20 st. tunna sprickor runt borrhålen. Sprickorna uppstår pga. av det höga borrhålstrycket då bergets tryckhållfasthet överskrids. Det fanns även ett antal längre radiella sprickor runt ett av borrhålen. Maximal spricklängd från detta var 20-25 cm. Tidigare utförda undersökningar av spricklängder för 80 g cord i 51 mm hål har givit spricklängder på ca 20 cm (Olsson & Bergqvist, 1995).



Figur 53. Översiktsbild av slätsprängning med 80 g cord



Figur 54. Sprickbildning från 80 g cord i hål 1 och hål 2 (bergschaktningsklass 1 markerad)

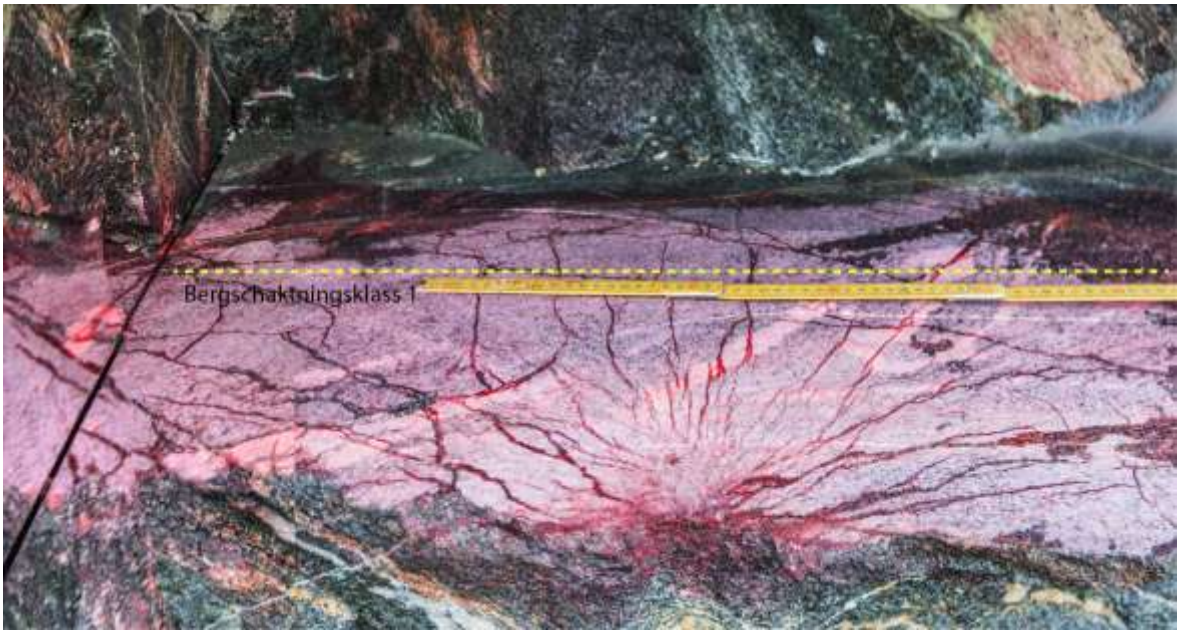
Slätsprängning med 150 g cord

Sektionen omfattade 3 hål. Hålavståndet hål 1-2 var 0,77 m och hålavståndet hål 2-3 var 0,59 m. Även i denna sektion sprängdes hålen momentant som slätsprängning. Sprängämnet 150 g cord är en detonerande cord på 150 g/m. Detonerande cord i denna dimension används inte speciellt ofta då man anser att laddningskoncentrationen är för hög.

Figur 55 visar en översiktsbild av sprickutbredningen. Området närmast hålen bestod av fina krossprickor som är typisk för ett sprängämne med hög detonationshastighet. Dessa sprickor var ca 10-15 cm långa och det fanns mer än 20 st av dessa tunna sprickor runt borrhålen. Det fanns även ett antal längre radiella sprickor med spricklängder på 30-40 cm. Även här är utvärderingen lite osäker då dessa sprickor kan vara naturliga sprickor som öppnat sig vid sprängningen. Figur 56-57 visar sprickbildningen från de tre spränghålen i detta snitt.



Figur 55. Översiktsbild av slätsprängning med 150 g cord



Figur 56. Sprickutbredning från 150 g cord i hål 1



Figur 57. Sprickutbredning från 150 g cord i hål 2 och hål 3

Slätsprängning med Dynotex 17 mm

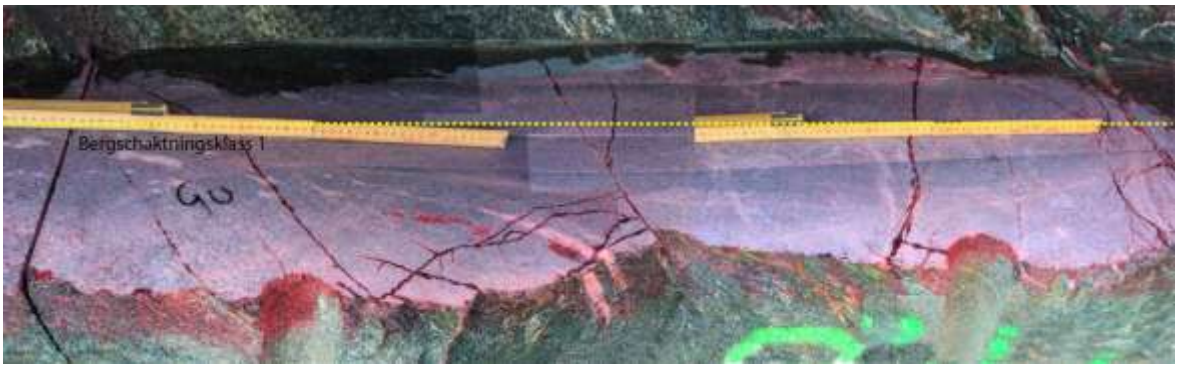
Sektionen omfattade 3 hål. Hålavståndet hål 1-2 var 0,77 m och hålavståndet hål 2-3 var 0,88 m. Även i denna sektion sprängdes hålen momentant som slätsprängning. Sprängämnet Gurit eller Dynotex, som det numera heter hos Orica, är ett mycket vanligt sprängämne för skonsam sprängning. De vanligaste dimensionerna på dessa rörladdningar är 17 mm och 22 mm. I denna sektion användes 17 mm Dynotex i 70 mm hål. Denna kombination får anses som ovanlig då 17 mm laddningen vanligvis brukar användas i betydligt klenare hål.

Figur 58 visar en översiktsbild av sprickutbredningen. Sprickbilden i denna sektion gav en obetydlig sprickbildning med några enstaka sprickor på ca 5 cm. Området närmast borrhålet saknar det fina mönstret av krossprickor som sektionerna med cord hade. Sprängämnet Dynotex detonerar med låg hastighet (ca 2300 m/s) och utsätter därmed borrhålsväggarna för ett betydligt mindre tryck än för cord.

Figur 59-60 visar närbilder av sprickutbredningen från de tre spränghålen i detta snitt.



Figur 58. Översiktsbild av slätsprängning med 17 mm Dynotex



Figur 59. Sprickutbredning från 17 mm Dynotex i hål 1 och hål 2 (bergschaktningsklass 1 markerad)



Figur 60. Sprickutbredning från 17 mm Dynotex i hål 3

Sammanfattning

En sammanställning av spricklängderna för de olika hålen visas i Tabell 8. Sprickutbredningen från sektionerna där förspräckning användes blev mycket begränsad med en maximal spricklängd på 20 cm. Slätsprängning med motsvarande sprängämne gav ungefär liknande spricklängder. Slätsprängning med högre laddningskoncentration, 150 g/m cord, gav spricklängder på 30-40 cm. De kortaste spricklängderna uppmättes vid sprängning med 17 mm Dynotex.

Tabell 8. Sammanställning av spricklängder

Sprängämne	Metod	Hål nr	Spricklängder (cm)	Max.spricklängd (cm)	Antal sprickor	
					Radiella	Kross
Cord 80 g/m	Försp.	1	9,15	15	2	-
”	”	2	10,20,12	20	3	-
”	”	3	4	4	-	1
”	”	1	-	-	-	-
”	”	2	2	2		2
Cord 80 g/m	Slätsp.	1	15,20,25	20-25	>25	>20
”	”	2	-	-	-	-
Cord 150 g/m	”	1	15,20,30,40	Ca 40	>25	10-15
”	”	2	15,20,30	Ca 30	Ca 5	>20
”	”	3	20,20,30,40	Ca 40	5-10	10-15
Dynotex 17	”	1	6	6	1	Ca 5
”	”	2	5	5	1	Ca 5
”	”	3	-	-	-	-

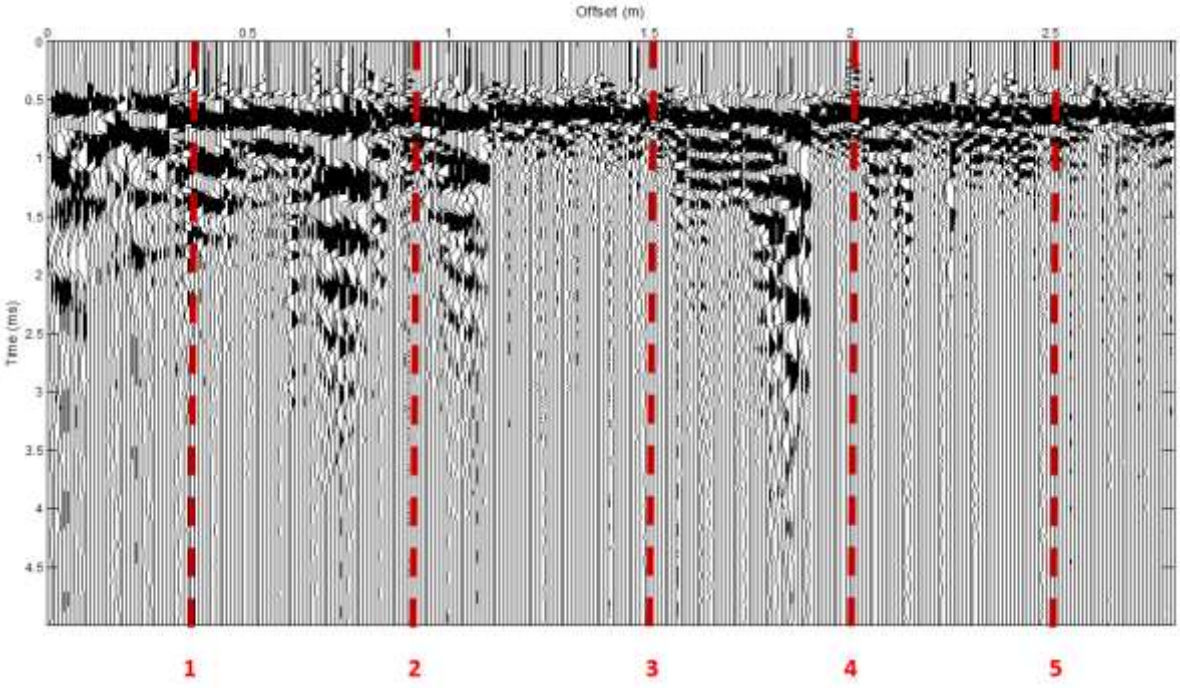
6.3. Resultat försök 3

Geofysikaliska mätmetoder

I Tanum utfördes seismiska mätningar i tre olika linjer. Linjerna motsvarar de sågade snitten i berget genom piporna 1-5, 6-8, och 12-14. Accelerometern trycktes mot ytan med lite fönsterkitt för som koppling mellan berg och givare. Givaren orienterades så att x-komponenten motsvarar riktningen i bergytans plan vinkelrätt mätlinjen, y-riktningen motsvarar bergytans plan längs med mätlinjen, och z-riktningen motsvara normalen till bergytans plan.

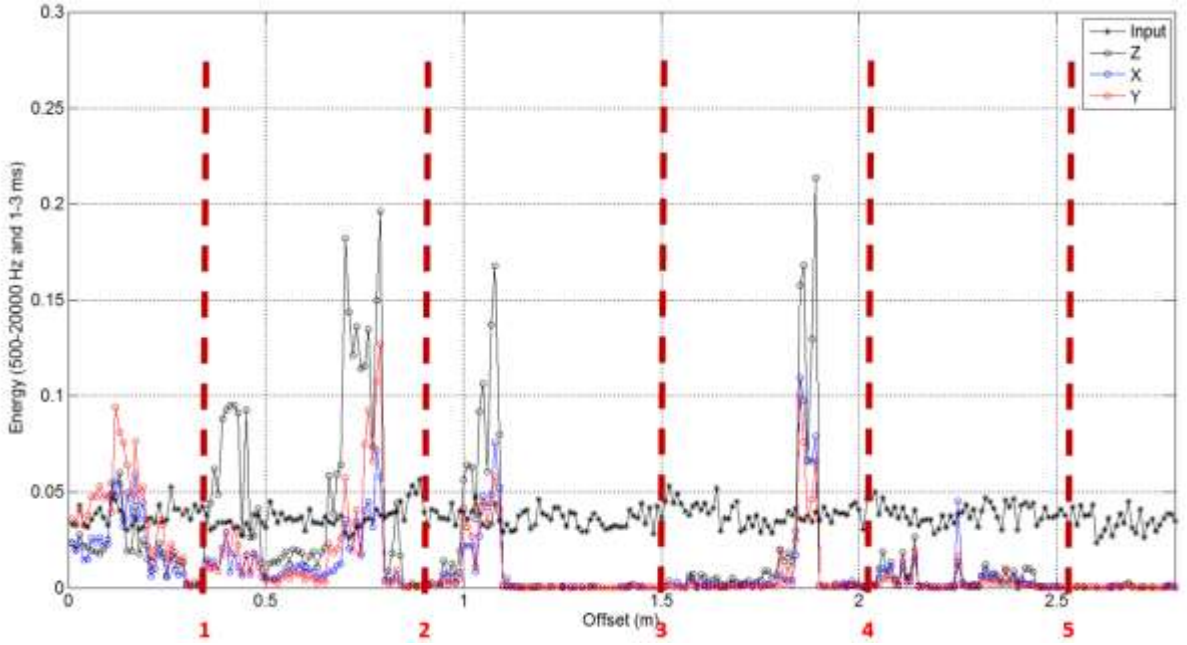
Resultat från Riogur 17 mm i pegmatit, gnejs och granit

Figur 61 visar uppmätta signaler längs linjen genom piporna 1-5 (z-komponenten). Alla signaler är normerade till en max amplitud på 1 och positiv amplitud är ifylld med svart för att markera tydliga amplituder i signalerna. Läget på piporna längs linjen är 0.35 m, 0.90 m, 1.50 m, 2.05 m, och 2.55 m (röda streck i figuren). Den direkta vågen från hammaren syns i figuren vid t=0.5 ms och är ungefär den samma längs hela linjen. De tydligaste områdena med höga amplituder efter ca 1 ms motsvarar lösa partier (boom) i bergytan och eller reflektion från större sprickor i berget.

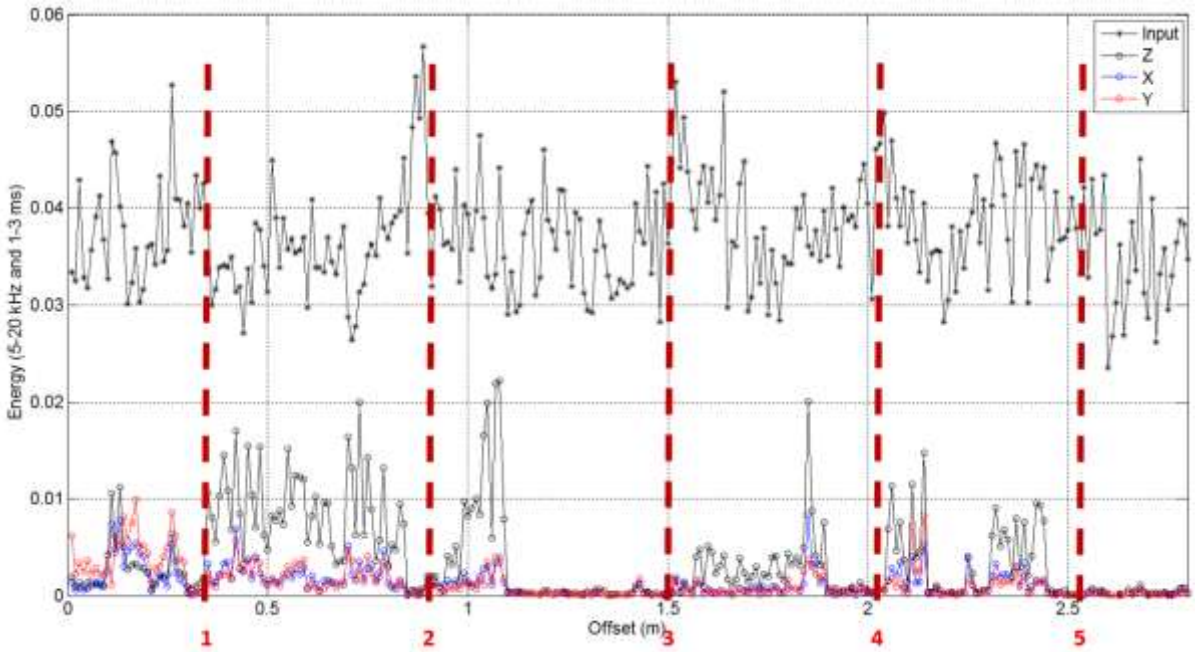


Figur 61. Uppmätta signaler (z-komponent) längs linjen genom piporna 1-5

Figur 62 visar summerad energi över tiden 1-3 ms och frekvenser 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje som referens (input) och är relativt konstant över mätsträckan. Flera tydliga pikar med hög reflekterad energi syns mellan 0.0-1.1 m och precis runt 1.8 m. Den reflekterade energin domineras här av relativt låga frekvenser vilka troligtvis motsvarar större sprickor i berget. För att zooma in på mer ytliga sprickor har motsvarande figur plottats med bara höga frekvenser (5-20 kHz) i Figur 63.

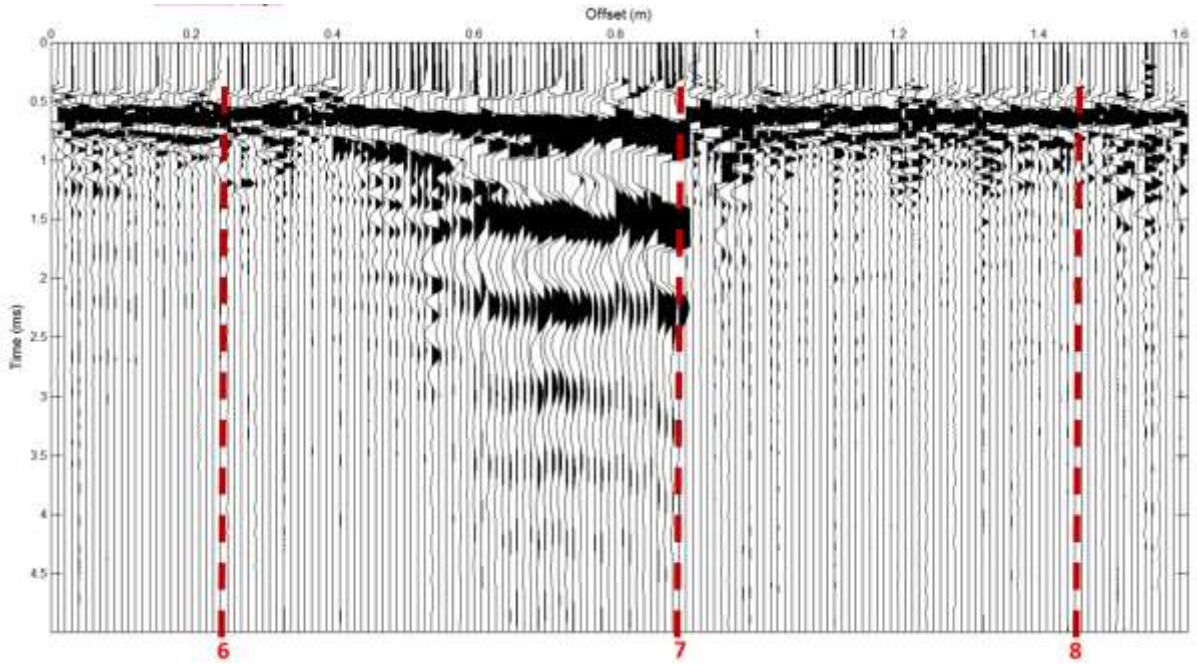


Figur 62. Summerad energi mellan 1-3 ms och 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)



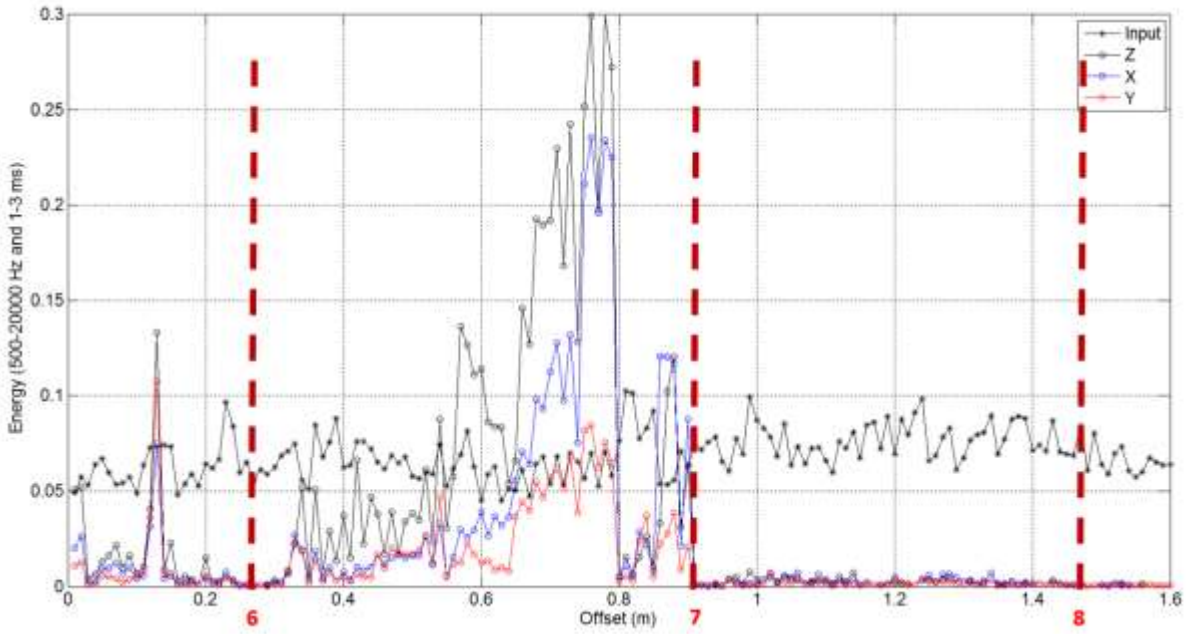
Figur 63. Summerad energi mellan 1-3 ms och 5-20 kHz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Energin från hammarslaget är plottat med svart linje (input)

Figur 64 visar uppmätta signaler längs linjen genom piporna 6-8 (z-komponenten) till höger om piporna 1-5 ovan. Läget på piporna längs linjen är 0.25 m, 0.90 m, och 1.45 m (röda streck i figuren). Området innan pipa 7 utmärker sig med mycket reflekterad energi.

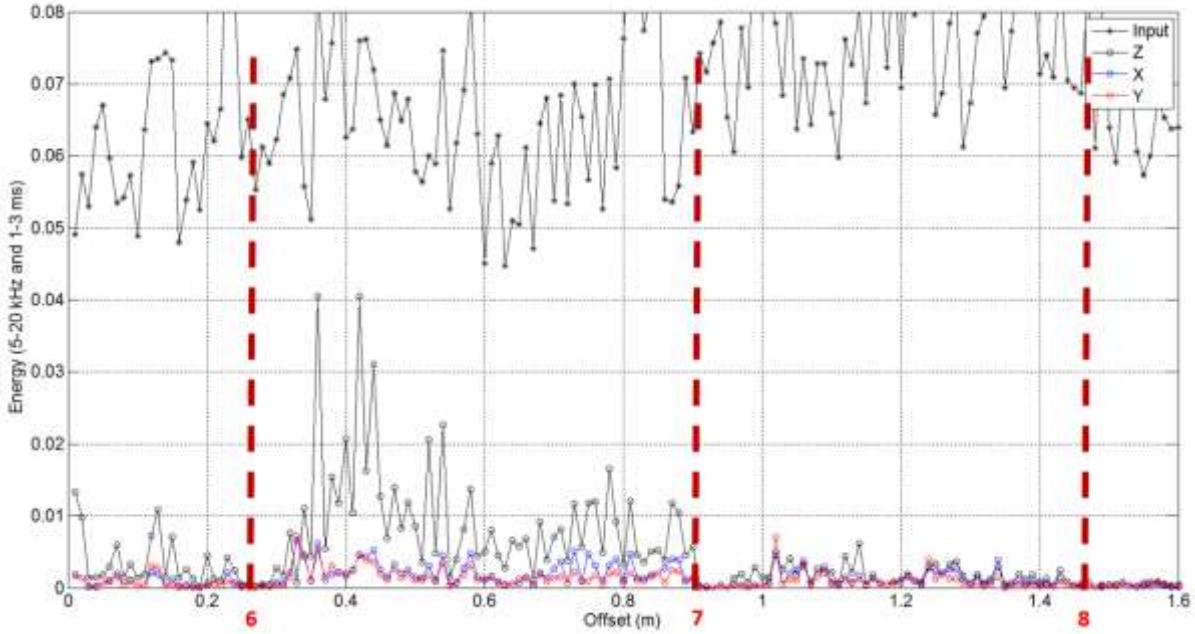


Figur 64. Uppmätta signaler (z-komponent) längs linjen genom piporna 6-8

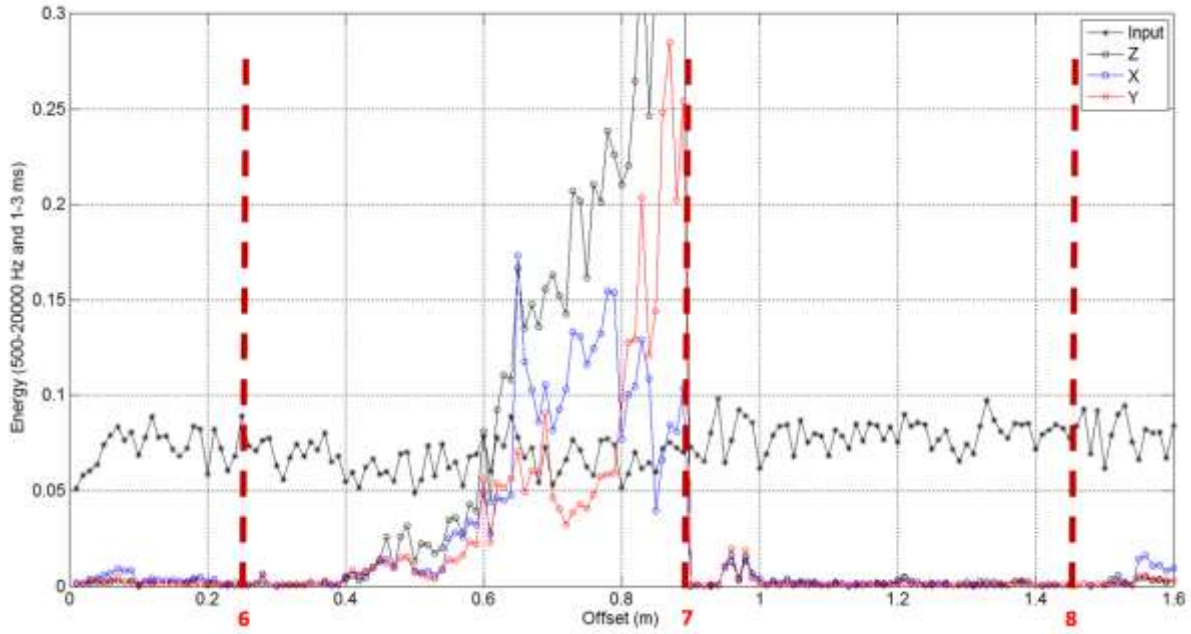
Figur 65 visar summerad energi över tiden 1-3 ms och frekvenser 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Området mellan pipa 6 och 7 utmärker sig med mycket reflekterad energi. För att zooma in på mer ytliga sprickor har motsvarande figur plottats med bara höga frekvenser (5-20 kHz) i Figur 66. Här syns en skillnad jämfört med lägre frekvenser med högst reflekterad energi närmre pipa 6. Denna skillnad är dock inte lika tydlig i Figur 67 och 68 som visar motsvarande linje mätt 5 cm ovanför linjen ovan. Denna extra mätning gjordes för att studera hur känsliga resultaten är för det exakta läget på linjen. För låga frekvenser som antas motsvara en större påverkad volym förväntas ingen skillnad i resultat för linjen 5 cm ovanför den ursprungliga linjen. För höga frekvenser som antas motsvara en mindre mer lokal volym av berget när slagpunkten är det rimligt att anta lite större skillnader i resultat.



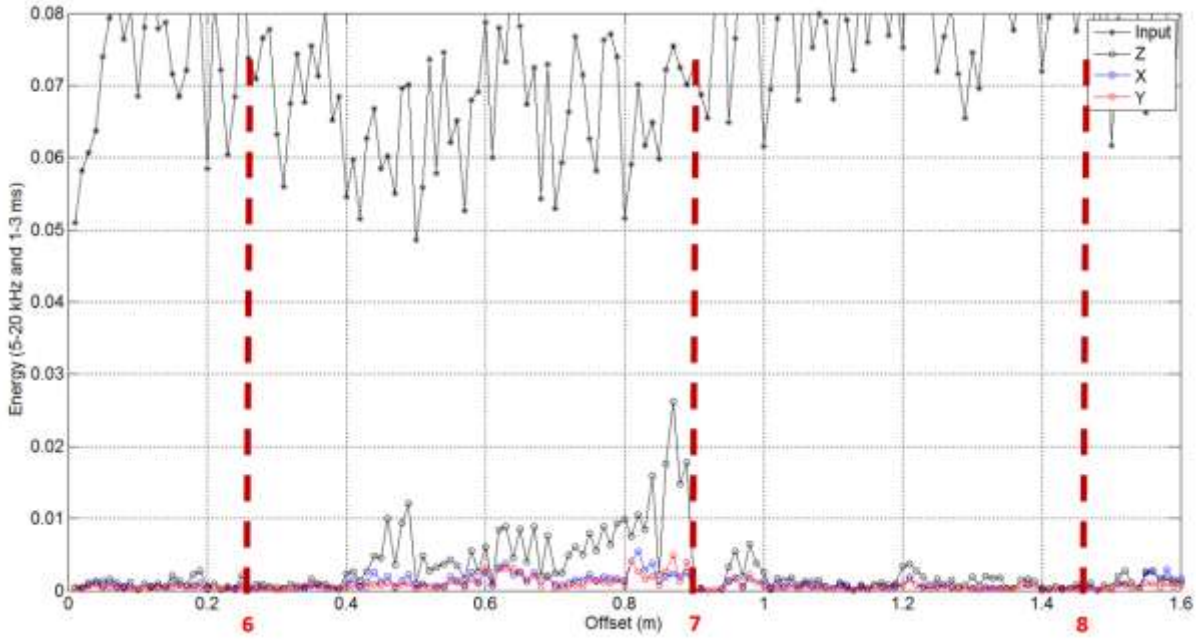
Figur 65. Summerad energi mellan 1-3 ms och 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z) från linjen genom pipa 6-8



Figur 66. Summerad energi mellan 1-3 ms och 5-20 kHz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z) från linjen genom pipa 6-8



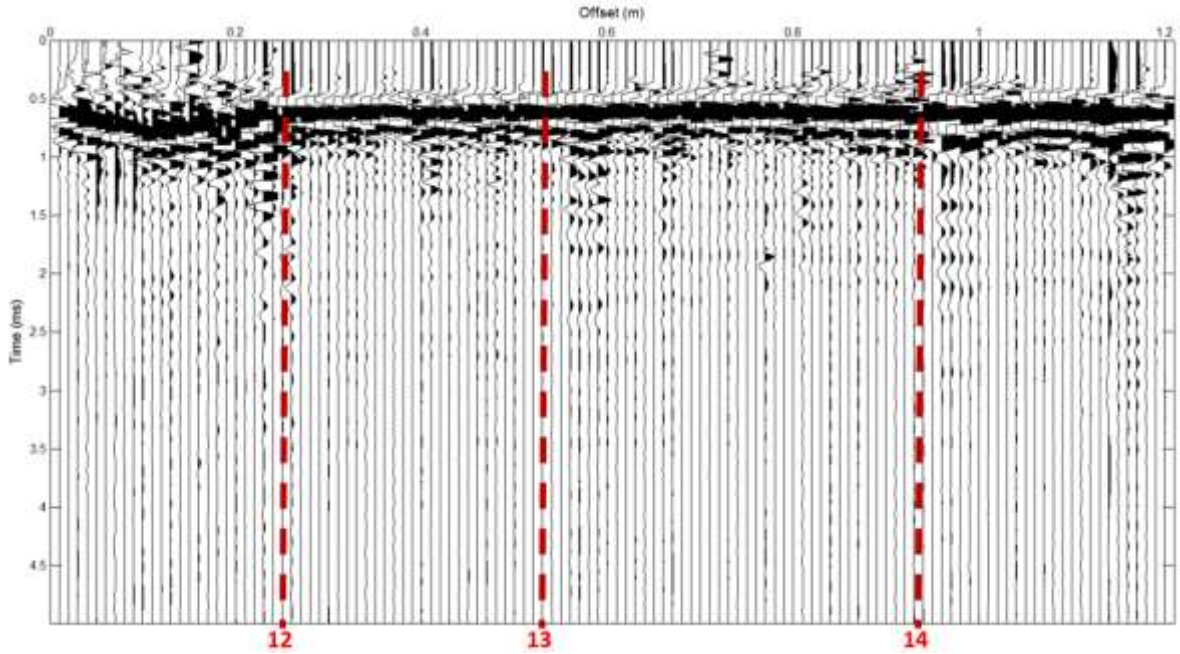
Figur 67. Extra mätning 5 cm ovanför den sågade linjen genom pipa 6-8. Summerad energi mellan 1-3 ms och 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z)



Figur 68. Extra mätning 5 cm ovanför den sågade linjen genom pipa 6-8. Summerad energi mellan 1-3 ms och 5-20 kHz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z).

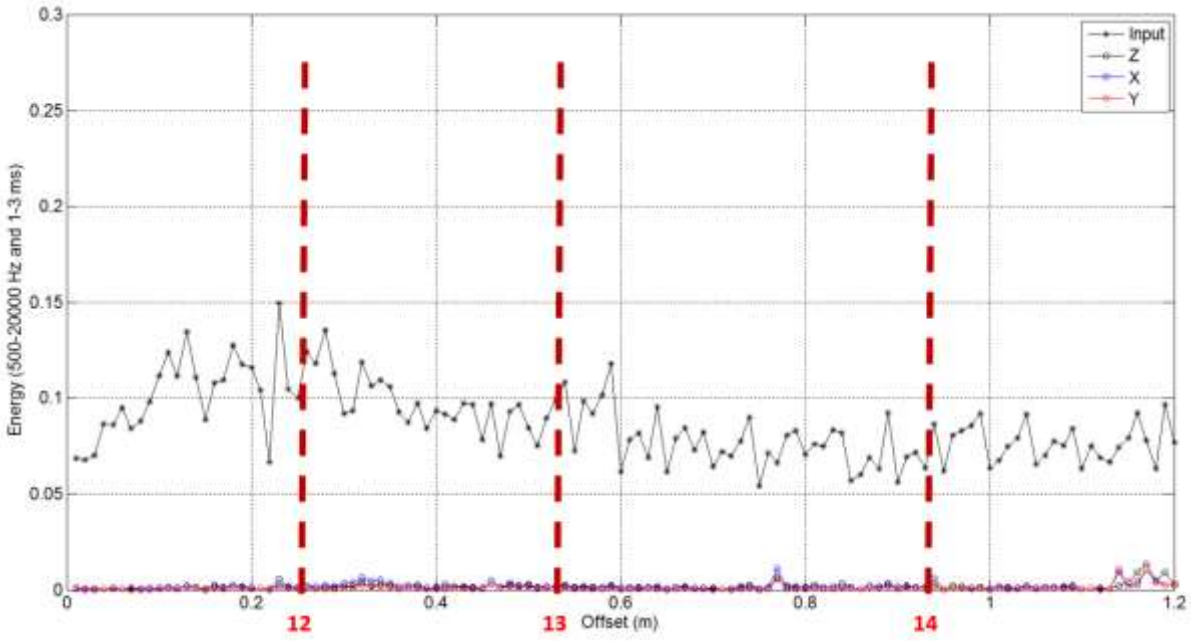
Sprickutbredning från 40 g cord i granit

Figur 69 visar uppmätta signaler längs linjen genom piporna 12-14 (z-komponenten) vid den andra testpunkten nära tunneln. Läget på piporna längs linjen är 0.25 m, 0.55 m, och 0.95 m (röda streck i figuren). I dessa mätningar syns inga tydliga lågfrekventa reflektioner. Mätningarna utfördes samtidigt som skrotning av berg i den närliggande tunneln vilket gjorde att brusnivån i dessa mätningar är något högre. Brusnivån verkar dock inte ha någon betydande påverkan på resultaten från denna mätlinje.

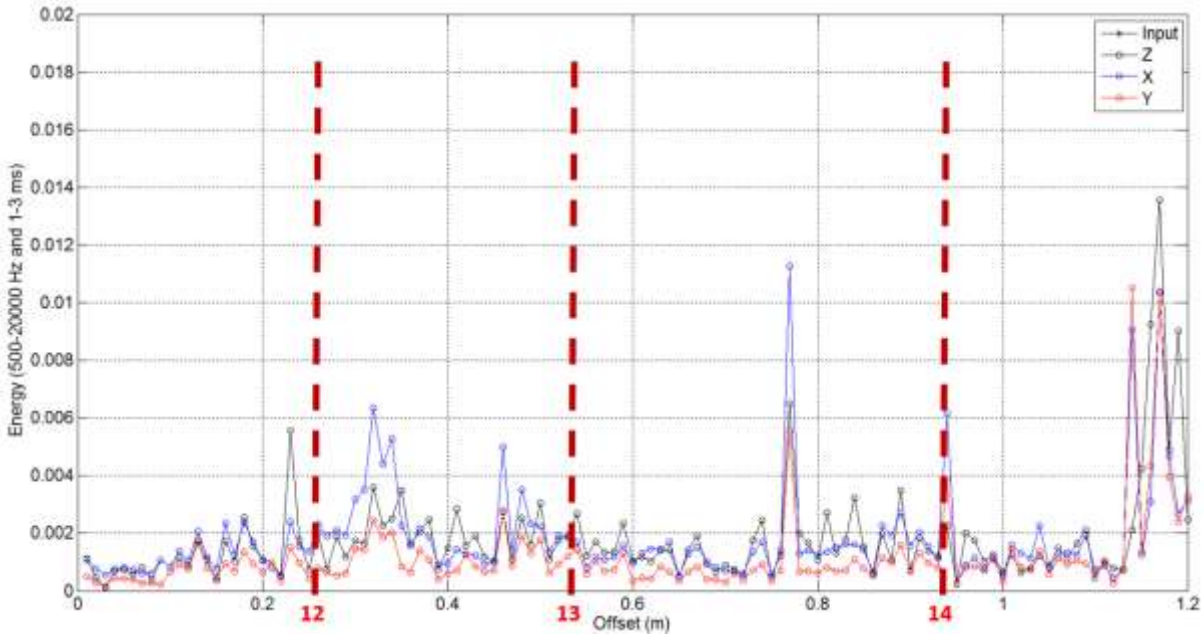


Figur 69. Uppmätta signaler (z-komponent) längs linjen genom piporna 12-14

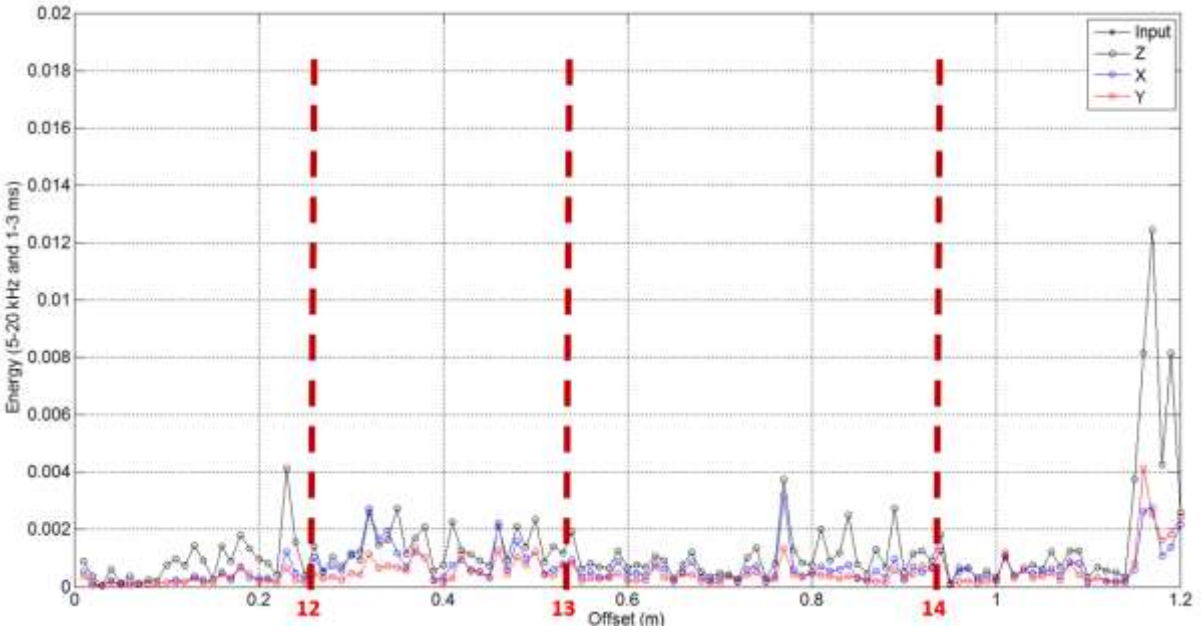
Figur 70 visar summerad energi över tiden 1-3 ms och frekvenser 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z). Resultaten är plottade i samma skala som ovan och visar att betydligt mindre energi kommer tillbaka till accelerometern i denna mätning trotts att energin från hammaren är något högre jämfört med mätningarna ovan. Den höga energin i hammarslagen respektive låga energin till accelerometern kan delvis bero på att bergytan är hårdare och jämnare i denna testlinje. Resultaten har plottats med lägre skala och högre frekvenser i Figur 71 respektive Figur 72. Inga höga amplituder från denna mätning, förutom en enstaka hög amplitud innan pipa 14.



Figur 70. Summerad energi mellan 1-3 ms och 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z) från linjen genom pipa 12-14



Figur 71. Summerad energi mellan 1-3 ms och 500-20 000 Hz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z) från linjen genom pipa 12-14



Figur 72. Summerad energi mellan 1-3 ms och 5-20 kHz för accelerometerns tre olika riktningar (x, y, z) från linjen genom pipa 12-14

Sprickkartering med penetranter

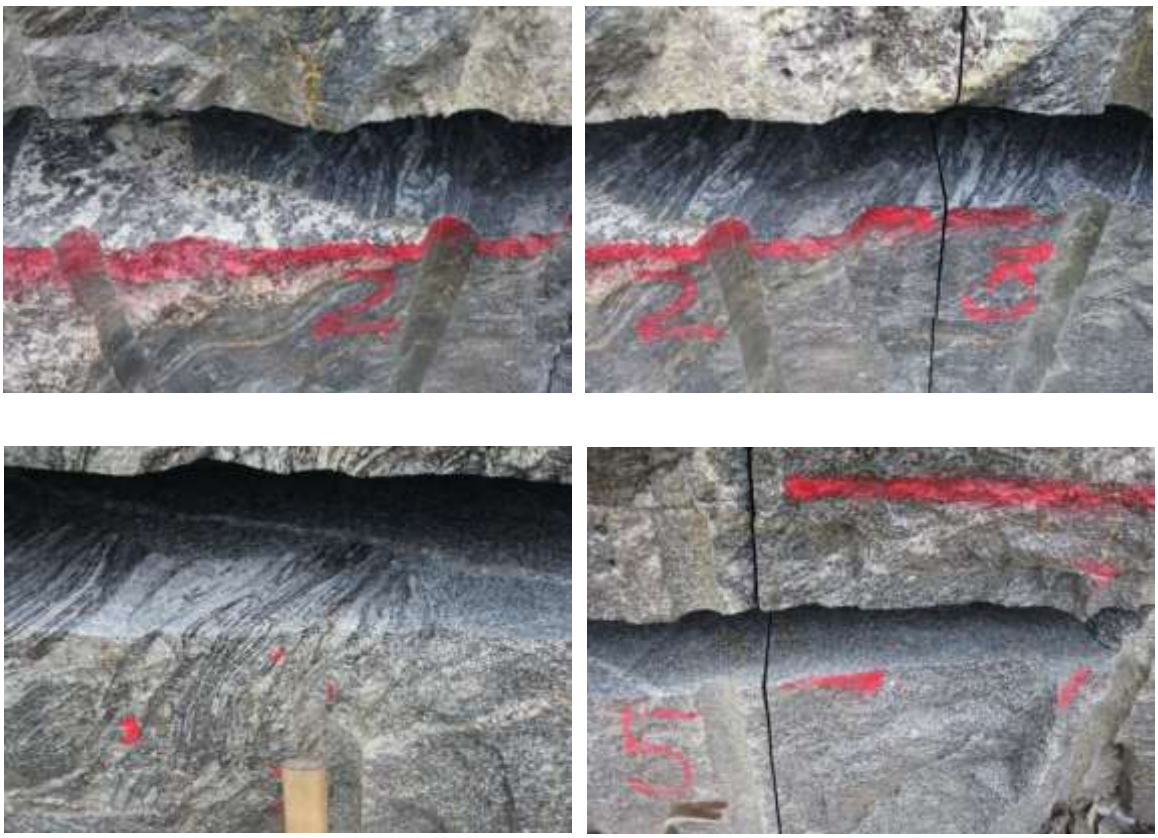
Sprickutbredning från Riogur 17 mm i pegmatit, gnejs och granit

Figur 73 visar slitsen vid utsågning av området mellan hål 1 och 5. Efter utsågningen framträdde geologin mycket tydligt, vilket framgår av Figur 74. Berget bestod av



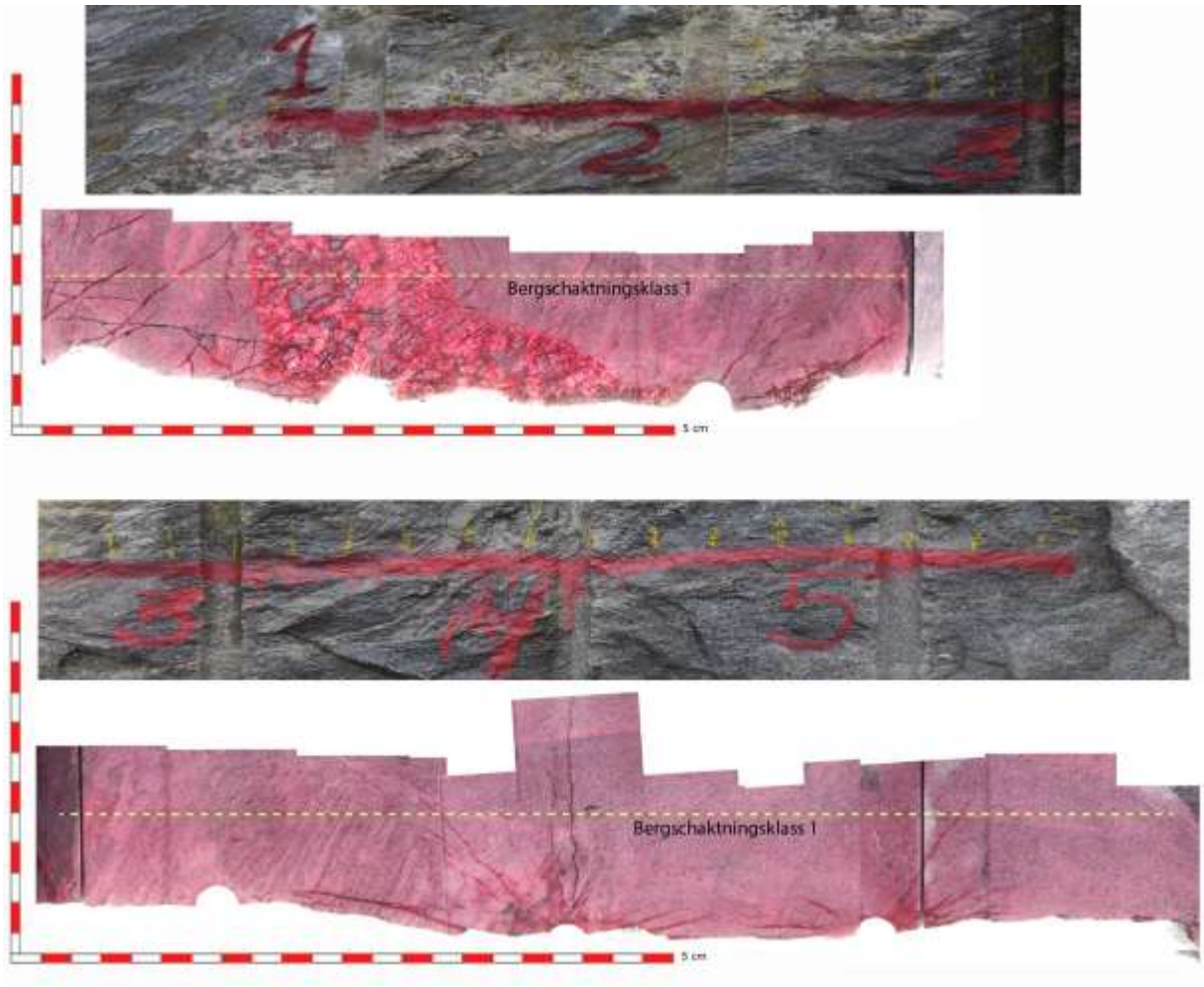
Figur 73. Den frilagda slitsen mellan hål 1-5

pegmatit vid hål 1-2, gnejs vid hål 2-4 och granit i hål 5-8. Från detta

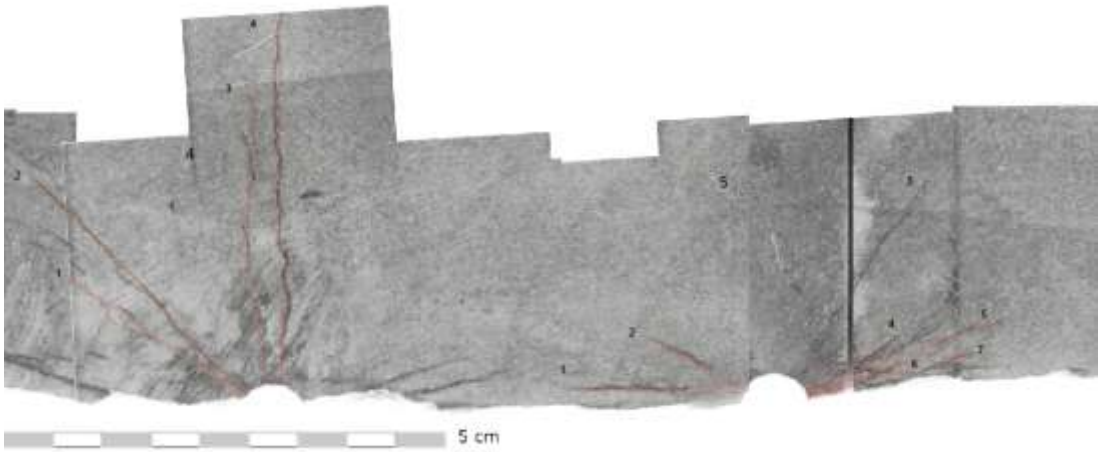


Figur 74. Geologin vid borrhålen (pegmatit, gnejs och granit)

Efter skanning och fotografering har materialet sammanställts, se Figur 75. Därefter har bilderna från skanningen gjorts svartvita för att underlätta identifieringen av enskilda sprickor. För identifiering och utvärdering av sprickorna har programmet Adobe Illustrator CS6 använts. Varje betydande spricka har fått ett eget ID-nummer och spricklängden har därefter bestämts, se ett exempel för hål 4-5 i Figur 76. Alla identifierade sprickor och längder har sammanställts i Tabell 3-4.

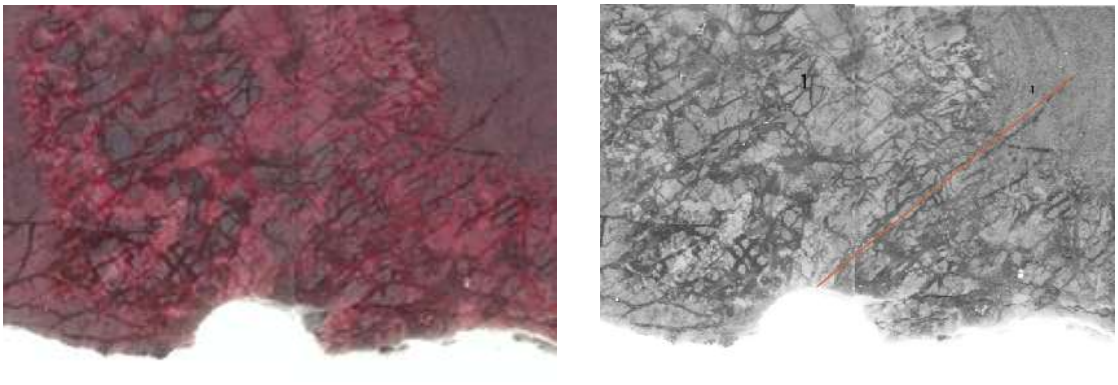


Figur 75. Skannad bottenyta vid hål 1-5



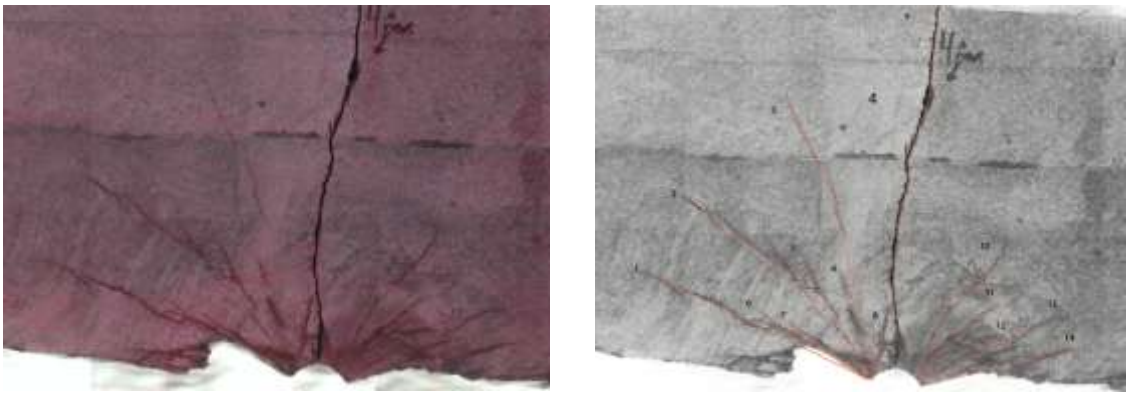
*Figur 76. Sprickidentifikation och bestämning av sprickl*ängder för hål 4-5

Området med pegmatit, dvs. runt hål 1, består av massor med korngränser från pegmatiten vilket innebär att det är svårt att identifiera enskilda eventuella sprängsprickor, se Figur 77. Här kunde endast en sprängspricka identifieras.



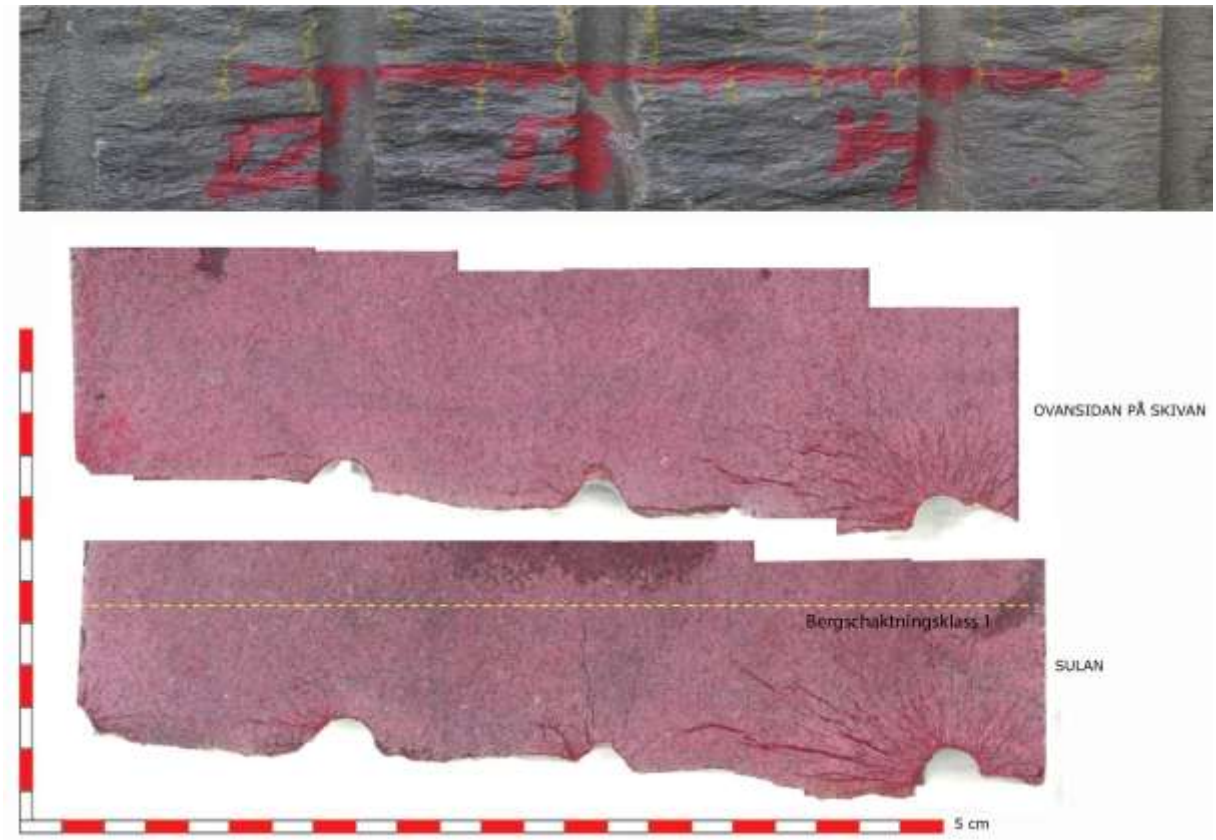
Figur 77. Sprickutbredning i pegmatit (hål 1)

Området med gnejs, här kring hål 4, bestod av ett antal sprickor runt spränghålet, se Figur 78. Överraskande var att dessa sprickor inte följde foliationsriktningen utan tvärade densamma.



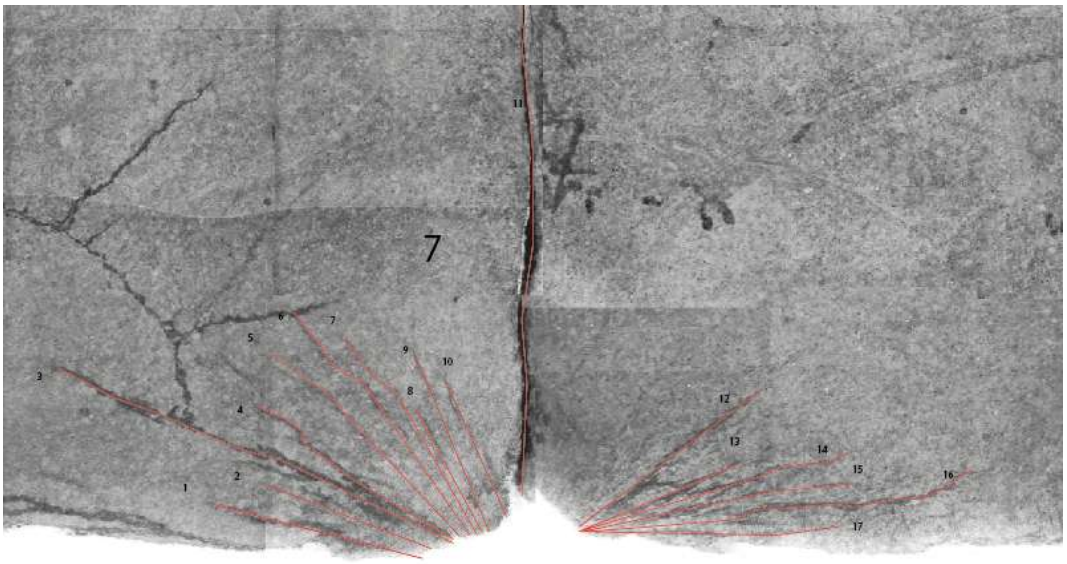
Figur 78. Sprickutbredning i gnejs (hål 4)

I Figur 79 visas på motsvarande sätt resultaten för hål 7-8 där geologin var granit. Hål 6 och 8 har inte så många sprickor medan hål 7 uppvisar ett mer typiskt sprickmönster. Sprickan kl. 12 vid hål 7 är en naturlig spricka som delvis öppnats upp vid sprängningen.



Figur 79. Skannad bottenyta vid hål 6-8.

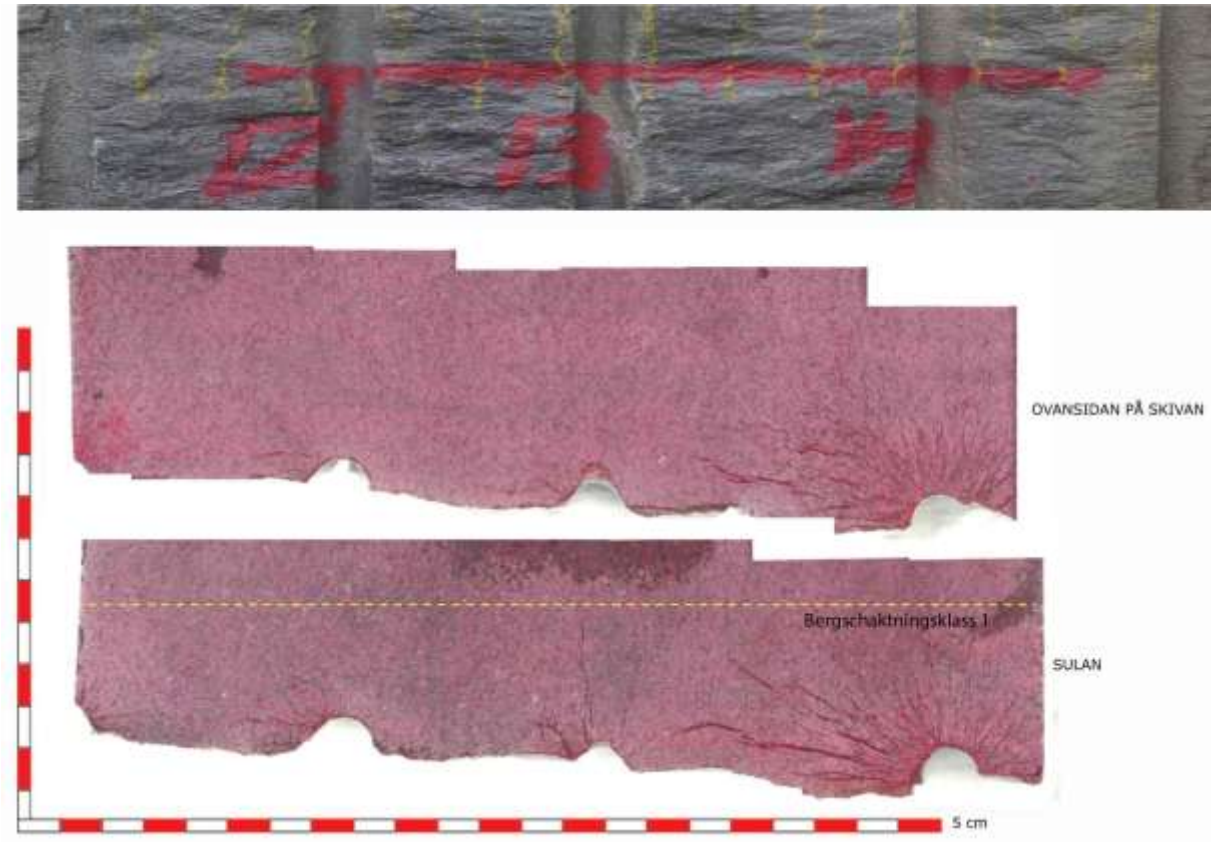
Resultatet av sprickidentifiering och spricklängdsmätningen från hål 7 visas i Figur 80. Här syns tydligt den typiska sprickrosen med här ca 20 st. sprickor och med en genomsnittlig spricklängd på ca 20 cm.



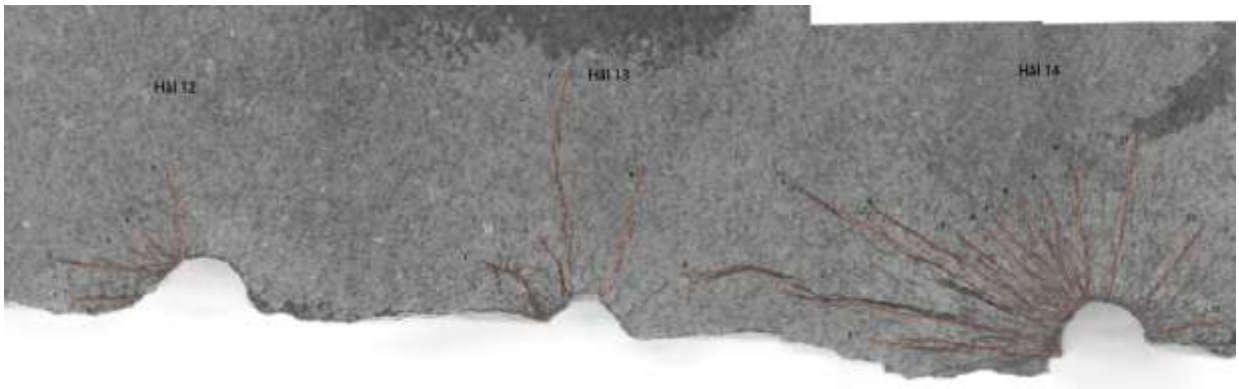
Figur 80. Sprickidentifiering och spricklängdsregistrering från hål 7 (övre skivan)

Sprickutbredning från 40 g cord i granit

Sprickutbredningen från hål 12-14, dvs. hålen sprängda med 40 g cord vid tunnelpåslaget, visas i Figur 81 (Bergschaktningsklass 1 inlagd i figuren). Hål 12-13 har få sprickor medan hål 14 har ett mer typiskt sprickmönster från cord, dvs. många fina sprickor nära hålet. Detta beror på att corden har en hög detonationshastighet och därför ger ett högt borrhålstryck.



Figur 81. Sprickutbredning från hål 12-14



Figur 82. Sprickutbredning från hål 13-14

Sammanfattning

Spricklängderna för de olika hålen har sammanställts och visas i Tabell 9-10. Här framgår antal sprickor, spricklängd, genomsnittlig längd samt maximal spricklängd för de två testområdena.

Tabell 9. Spricklängdssammanställning för hål 1-8 (pegmatit, gnejs och granit) och Riogur 17

Hål nr	Bergart	Antal sprickor Skivor	Slits	Spricklängd (cm)	Medellängd (cm)	Maximal längd (cm)
1	Pegmatit	3	1	13,8 till 26	18,1	26
2	Pegmatit/gnejs	1	3	11,2 till 28,5	17,7	28,5
3	Gnejs	0	0	0	0	0
4	Gnejs/granit	14	3	8 till 47,8	22,4	37[1)]
5	Granit	3	7	10 till 35	18,3	24[2)]
6	Granit	2	2	15 till 21,8	18	21,8
7	Granit	17	11	11 till 42	20,9	38,9[3)]
8	Granit	3	3	8 till 44,5	20	23[4)]

1) Naturlig spricka i slitsbotten som vid uttag av skivan öppnade sig helt
2) Naturlig spricka i en skiva som öppnades
3) ”Bananspricka” mellan hål 6 och hål 7
4) Naturlig spricka som vid uttag av skivan öppnade sig helt

Tabell 10. Spricklängdssammanställning för hål 11-14 (granit) och 40 g cord

Hål nr	Bergart	Antal sprickor i skivor	Spricklängd (cm)	Medellängd (cm)	Maximal längd (cm)
11	Granit	2	4 till 7	5,7	7
12	Granit	5	4 till 8,2	19,4	8
13	Granit	4	4,3 till 21	15,5	21
14	Granit	13	6,3 till 30,6	13,2	30,6

Den genomsnittliga spricklängden för hål sprängda med 17 mm Riogur var 19 cm i granit, 18 cm i pegmatit och 0-22 cm i gnejs, men spricklängden i gnejs var svårbestämd eftersom bergarten var blandad och gnejsen folierad. För de hål som sprängdes med 40 g cord i granit och med tätare hålsättning var den genomsnittliga spricklängden 13,5 cm.

Detta betyder att det i detta försök inte var någon större skillnad i spricklängder trots skillnad i geologi, hålavstånd och sprängämne. Resultatet beror troligen på att frikopplingen är så stor i samtliga fall. För 40 g cord är laddningsdiametern ca 8 mm och för Riogur 17 mm och hålen hade en borrhålsdiameter av 70 mm. Samtliga hål har också initierats momentant vilket innebär en minimering av spricklängderna.

Genom att borra grova och raka hål som laddas med frikopplade laddningar har man här lyckats uppnå Bergklass 1 fast kravet var Bergklass 2.

6.4. Resultat försök 4

Geofysikaliska mätmetoder

Inga geofysikaliska undersökningar utfördes i detta delförsök.

Sprickkartering med penetranter

Efter skanning och fotografering har materialet sammanställts. Figur 83 visar sprickbilden för de två snitten. Båda ytorna i slitsen karterades. Den vänstra bilden visar sprickbilden i pipladdningen och den högra bilden visar sprickbilden vid bottenladdningen. Förutom fotografering så skannades också ytorna i slitsarna. Alla identifierade sprickor och längder har sammanställts i Tabell 11.



Figur 83. Sprickutbredning i Norsborgstunneln. Vänster bild visar sprickbilden i pipladdningen och höger bild visar sprickbilden vid bottenladdningen

Tabell 11. Sprickutbredning av pip-och bottenladdning i Norsborg

Laddningstyp	Hål nr	Spricklängder (cm)	Antal sprickor	Max Spricklängd (cm)
Pipladdning	1	10-28	4	28
”	2	3-39	6	39
”	3	21-30	2	30
Bottenladdning	1	2-17	4	17
”	2	7-47	37	47
”	3	7-16	6	16

En sammanfattning av spricklängder från Norsborg visas i Tabell 12. Medelspricklängden var densamma från pipan som från bottenladdningen medan den maximala spricklängden var störst från bottenladdningen.

Tabell 12. Sammanfattande tabell för spricklängder i Norsborg(cm)

Laddningstyp	Medelspricklängd	Maximal spricklängd
Pipladdning	19	39
Bottenladdning	19	47

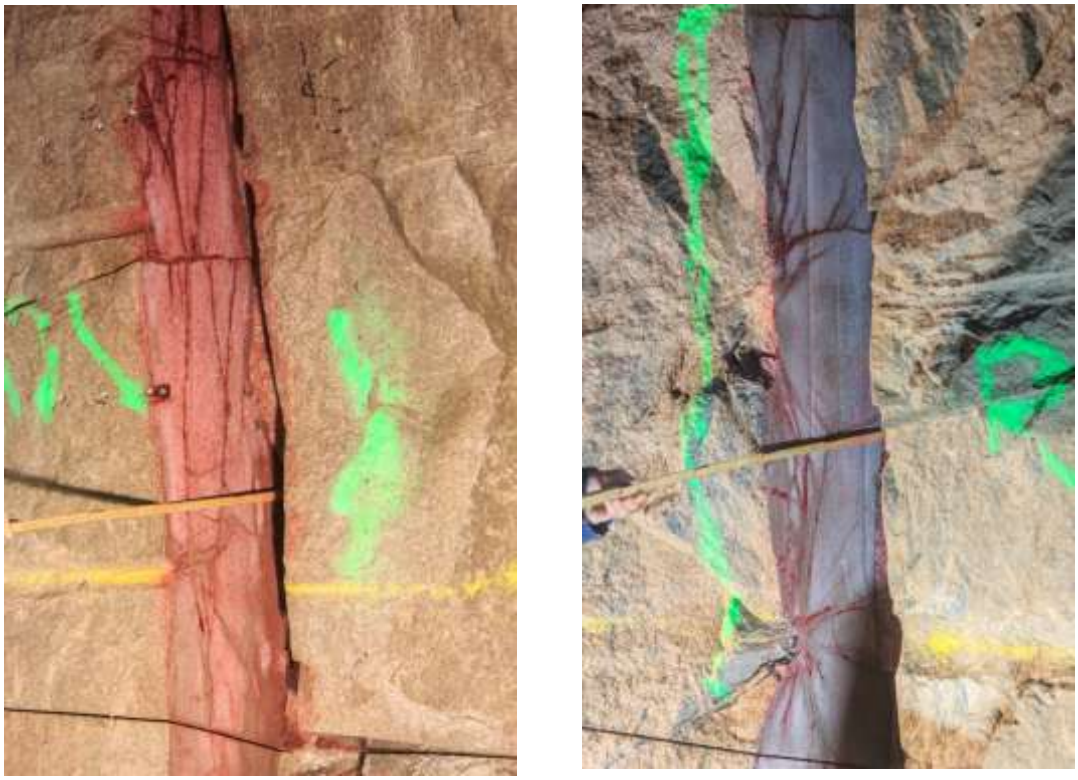
6.5. Resultat försök 5

Geofysikaliska mätmetoder

Inga geofysikaliska undersökningar utfördes i detta delförsök.

Sprickkartering med penetranter

Efter skanning och fotografering har materialet sammanställts. Figur 84 visar sprickbilden för de två snitten. Båda ytorna i slitsen karterades. Den vänstra bilden visar sprickbilden i pipladdningen och den högra bilden visar sprickbilden vid bottenladdningen. Förutom fotografering så skannades också ytorna i slitsarna. Alla identifierade sprickor och längder har sammanställts i Tabell 13.



Figur 84. Sprickbilden från pipladdning (vänster foto) resp. bottenladdning (höger foto)

Det fanns, föga överraskande, betydligt fler och längre sprickor från bottenladdningen än från pipladdningen. En mycket intressant observation är att det, i ett av hålen från bottenladdningen, bildats en kon i området närmast botten, se Figur 85. Detta är i överenstämmelse med bergsprängningsteori men är mycket sällsynt att kunna observera i praktiken/Olsson et.al; 2009/. Det framgår också att hålet expanderat, också detta enligt teorin men en ytterst sällsynt observation.

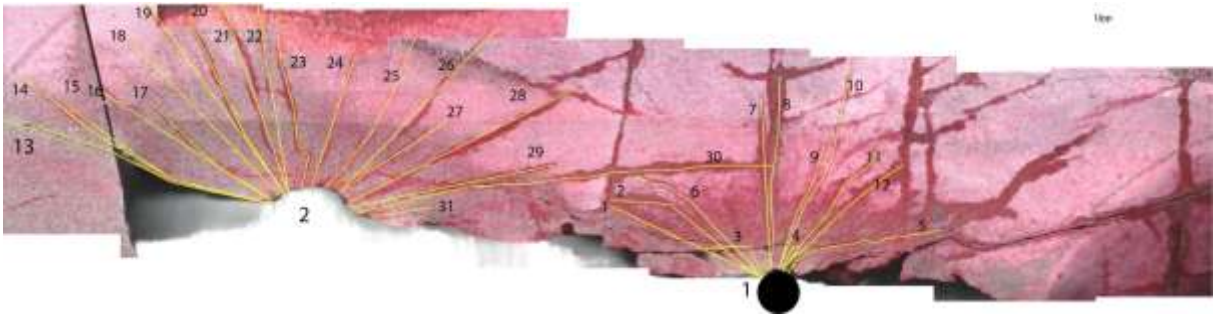


Figur 85. Kon under bottenladdningen samt expanderat hål

Figur 86 och 87 visar några exempel på sprickutvärderingen med inlagda gulmarkerade sprängsprickor.



Figur 86. Karterade sprängsprickor från pipladdningen



Figur 87. Karterade sprängsprickor från bottenladdningen

Tabell 13. *Sprickutbredning av pip-och bottenladdning i Tanum*

Laddningstyp	Hål nr	Spricklängder (cm)	Antal sprickor	Max Spricklängd (cm)
Pipladdning	1	7-10	2	10
	2	6-16	7	16
Bottenladdning	1	6-58	12	58
	2	7-55	19	55

En sammanfattning av spricklängder från Tanum visas i Tabell 14.

Tabell 14. Sammanfattande tabell för spricklängder i Tanum (cm)

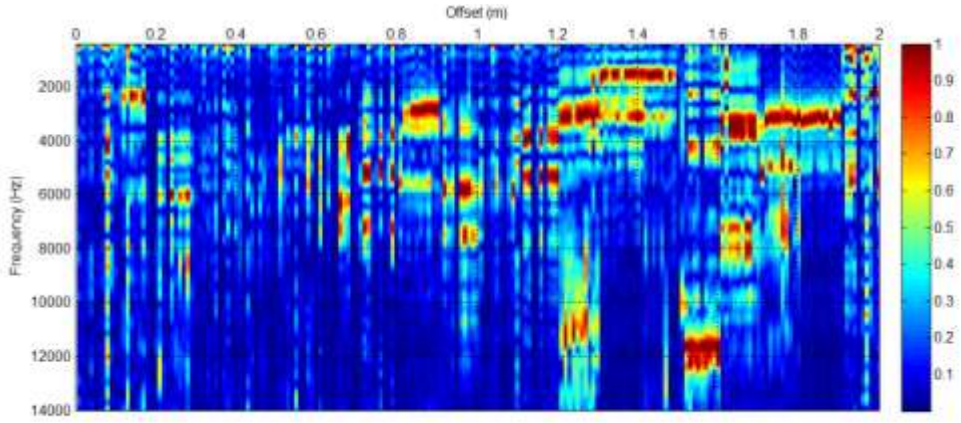
Laddningstyp	Medelspricklängd	Maximal spricklängd
Pipladdning	10	16
Bottenladdning	28	58

7. Diskussion

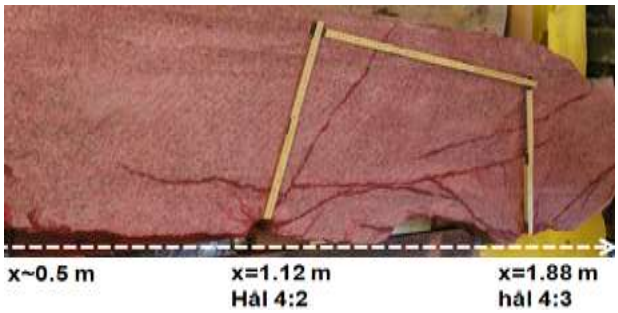
En jämförelse av resultaten från några av de seismiska mätningarna med resultatet från sprickkarteringen har gjorts.

Exempel 1

I Figur 88 visas ett exempel på resultat från de seismiska mätningarna. Här syns band med reflekterad energi (resonans) vid olika frekvenser vilka som till viss del sammanfaller med de synliga sprickorna i Figur 89. Resultatet är dock svårtolkat och visar inte på något tydligt sätt den verkliga sprickbildningen.



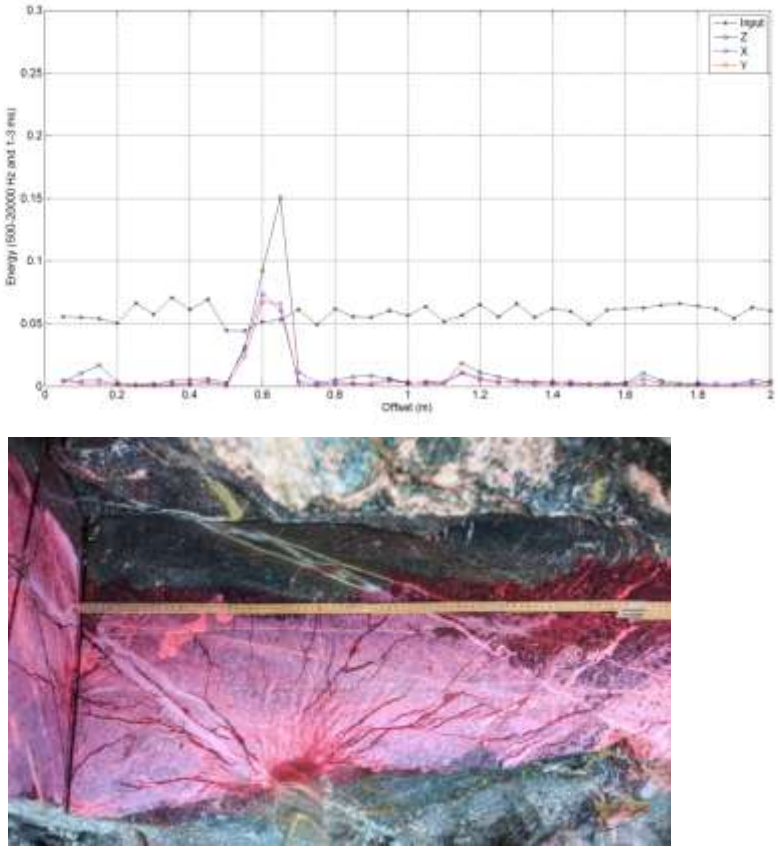
Figur 88. Resultat från seismisk mätning. I homogent berg utan sprickor förväntas ingen reflekterad energi (blått)



Figur 89. Resultat från sprickkarteringen

Exempel 2

Detta exempel, se Figur 90, visar bilden från undersökningarna med 80 g/m cord. Från de seismiska mätningarna finns en förhöjd amplitud vid 0,6 m. I denna region ligger också ett borrhål och från detta finns många sprickor. Sprickarteringen visade på många radiella sprickor runt borrhålet. Dessa kraftiga sprickor har inte identifierats med den seismiska mätningen.

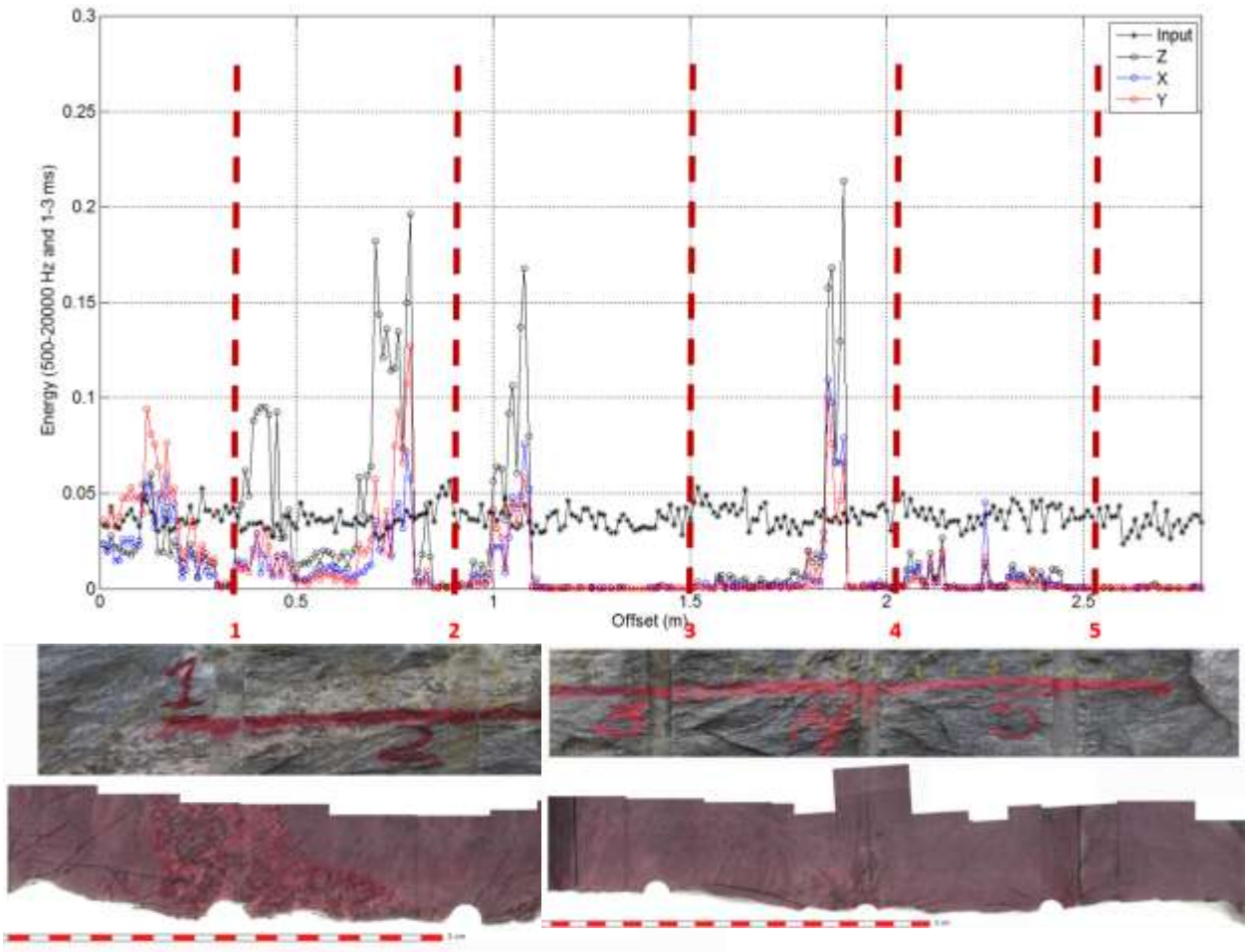


Figur 90. Seismik undersökning jämfört med sprickkartering

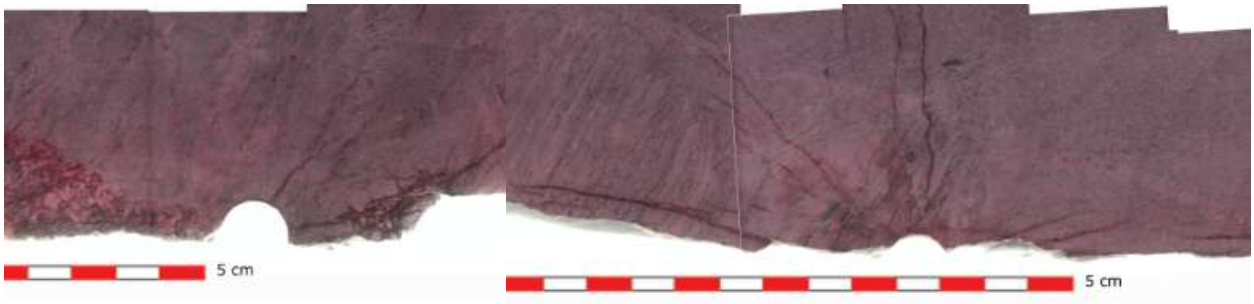
Exempel 3

Exempel nr 3, se Figur 91, visar bilden från undersökningarna med Riogur 17 mm i några olika geologier (pegmatit, gnejs och granit). Den seismiska mätningen gav höga amplituder vid 0,8 m, 1,1 m samt vid 1,8 m. Resultatet från sprickkarteringen visar huvudsakligen sprickbildning från hål 2 och 4, se Figur 92, samt från hål 5. Den kraftigaste sprickbildningen hade hål 4.

Den höga amplituden vid 0,8 m stämmer dåligt jämfört med sprickkarteringen. Vid 1,1 m finns en sprickbildning från hål 2. Vid 1,8 m finns sprickbildning men den fortsätter radiellt runt hål 4. Rakt in i berget vid hål 4 finns en kraftig spricka som inte registrerats av den seismiska undersökningen.



Figur 91. Seismik undersökning jämfört med sprickkartering

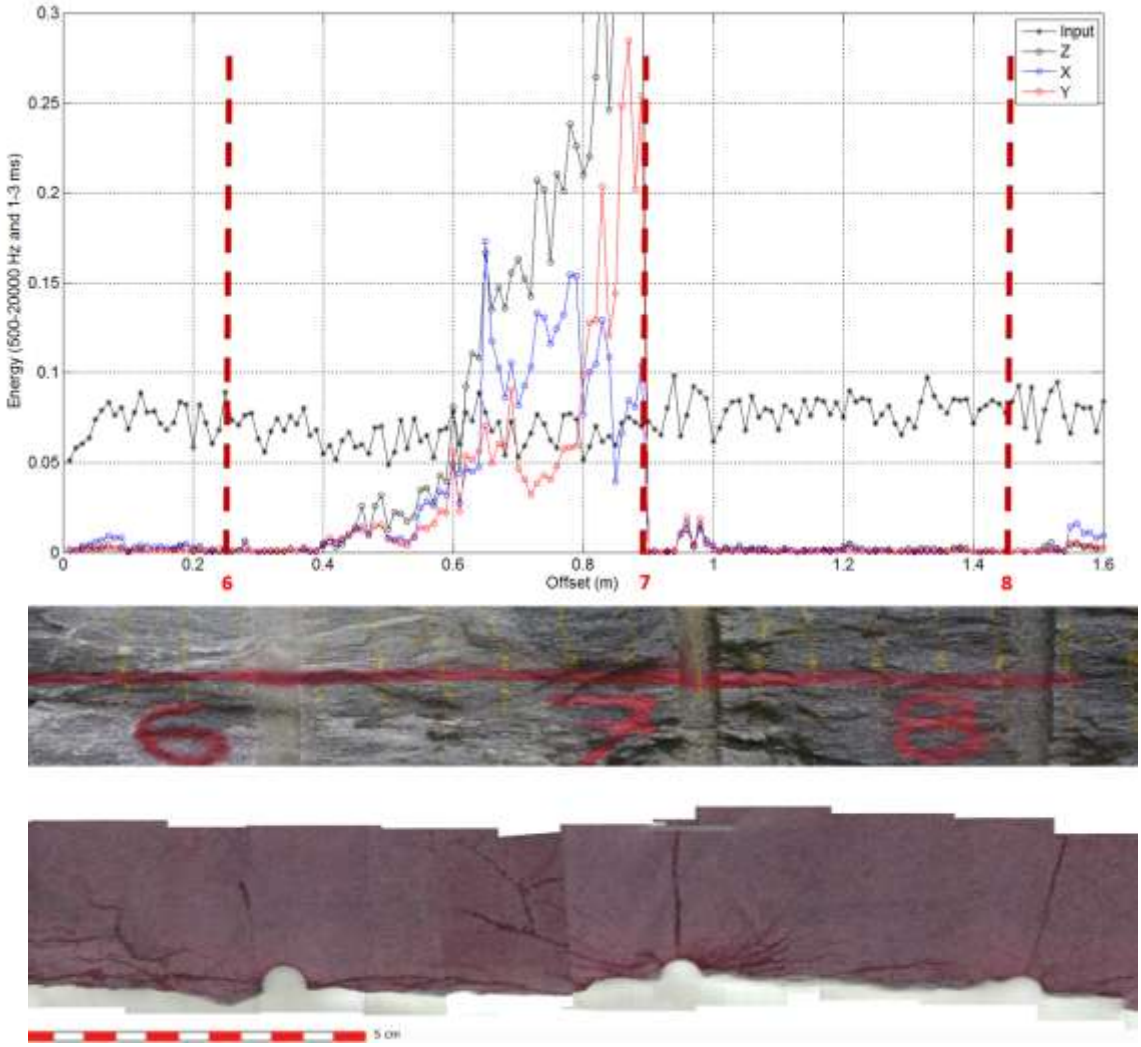


Figur 92. Sprickutbredning runt hål 2 (vänster) och hål 4 (höger)

Exempel 4

Detta exempel, se Figur 93, visar bilden från undersökningarna med Riogur 17 mm i granit. Från den seismiska mätningen utmärker sig området mellan pipa 6 och 7 med mycket reflekterad energi medan området vid hål 6 och hål 8 har låga energinivåer. Resultatet från sprickkarteringen visar subparallell sprickbildning på båda sidor om hål 6 samt många radiella sprickor runt om hål 7 varav en kraftig spricka rakt in i berget. Från hål 8 finns en kraftig spricka snett in i berget.

Den seismiska undersökningen stämmer någorlunda till vänster om hål 7 men har dålig överenstämmelse i övrigt.



Figur 93. Seismik undersökning jämfört med sprickkartering

Tabell 15 visar en sammanställning av fördelar och nackdelar med metoderna

Tabell 15. För-och nackdelar med undersökningsmetoderna

Undersökningsmetod	Fördelar	Nackdelar
Geofysikaliska	Enkel Skadar inte berget	Utvärderingstid Svårtolkat Inte möjligt att kvantifiera sprickor
Sprickkartering	Resultat direkt Enkel utvärdering Tydliga sprickbilder Mängd, längd och sprickfyllnad kan bestämmas	Lokal skada på berget Mer tidskrävande i fält än seismik

8. Slutsatser

Resultaten från sågning och sprickkartering har gett tydliga bilder av sprickbildningen från sprängning i olika bergarter och med olika sprängämnen. Mängden sprickor, längden på sprickor och sprickfyllnad kan enkelt bestämmas. Försöken har visat att sprängskadezonens utbredning inte är bergartsberoende utan frikopplingen, initieringen och sprängämnet har störst betydelse. Har berget en stor frekvens av naturliga sprickor blir resultatet av kontursprängning sämre, jämfört med sprickfattigt berg. Denna undersökning visar att även om sprickorna från sprängningen är begränsade så integreras de med det befintliga spricksystemet, vilket kan resultera i en sämre slutkontur.

Resultaten från de geofysikaliska mätningarna har inte gett några tydliga samband med verklig sprickutbredning. Resultaten är svårtolkade. Förhöjda amplituder har ibland observerats vid borrhålen. Dock är det inte möjligt att från enbart seismiska metoder bedöma hur uppsprucket berget är. Det går inte att kvantifiera antal sprickor och vidare är det inte möjligt att bestämma sprickors tjocklek, riktning eller eventuell sprickfyllnad. Tydliga sprickmönster som hos t.ex. cord går inte att se med seismik.

Karteringen av sprickor visar att man genom att borra grova och raka hål som laddas med frikopplade laddningar kan uppnå Bergschaktningsklass 1 fastän kraven egentligen är Bergschaktningsklass 2 enligt AMA.

8.1. Fortsatta undersökningar och krav

- Noggrann kalibrering av seismiska metoder mot kända sprickor behövs om man vill gå vidare med denna typ av geofysikaliska undersökningar
- Hjälparhålens betydelse för utsträckning av skadezonen bör undersökas
- Felborrningens påverkan på skadezonen bör undersökas
- Formulering av ev. kommande krav på kontroll av skadezonen bör diskuteras

9. Referenser

Appelquist K, Lindqvist J-E, Loorents K-J, Olsson M, Rydén N, Åkesson U. Bergschaktningstoleranser, skadezonsutbredning- delrapport. CBI Öppen Uppdragsrapport PX10297, 2012.

Cosma C, Enescu N. Characterization of fractured rock in the vicinity of tunnels by swept impact seismic technique. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol.38, pp. 815-821, 2001.

Enescu N, Cosma C. EDZ Seismic Investigations in ONKALO 2009. Factual Report. Posiva Working Report 2010-26.

Heikkinen E, Kantia P, Lehtimäki T, Silvast M, Wiljanen B. EDZ Assessments in various geological enviroments using GPR method. Posiva Working Report 2010-04.

Hildyard M.W, Young R.P, Collins D.S, Pettitt W. Seismic wave propagation to diagnose the state of fracturing. Journal of the south African institute of mining and metallurgy. Vol 105, no 6, pp 437-446, 2005.

Holmberg R, Persson P-A. Design of tunnel perimeter blasthole pattern to prevent rock damage. Proc. 2nd Int. Symp. On Tunneling, Inst Mining&Metallurgy, London, 1979.

Kwon S, Lee C.S, Cho S.J, Jeon S.W, Cho W.J. An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel. Tunneling and Underground Space Technology. Vol 24, pp 1-13, 2009.

Luke B.A, Stokoe K.H, Bay J.A, Lee N.J, Nelson P.P. Seismic measurements to investigate disturbed rock zones. American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication. No 90 pp 303-314, 1999.

Malmgren L, Saiang D, Töyrä J, Bodare A. The excavation disturbed zone (EDZ) at Kiirunavaara mine by seismic measurements. Journal of Applied Geophysics. Vol 61, pp 1-15, 2007.

Maxwell S.C, Young R.P, Read R.S. A Micro-velocity Tool to Assess the Excavation Damaded Zone. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 35, no 2, pp 235-247, 1998.

Olsson M, Bergqvist I. Sprickutbredning vid flerhålssprängning. SveBeFo Rapport 18, 1995.

Olsson M, Ouchterlony F. Ny skadezonsformel för skonsam sprängning. SveBeFo Rapport 65, 2003.

Ouchterlony F, Olsson M, Båvik S.O. Perimeter blasting in a 130 m road cut in gneiss with holes with radial bottom slots. Proceeding of the 1st world conf. on explosives & blasting technique, Munich Germany, 2000.

Olsson M, Markström I, Pettersson A, Sträng Malin. Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. SKB R-09-39, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2009.

Olsson M, Åkeson, U. Trafikverkets handbok för ovanjordssprängning, Trafikverket Dokument 2014:044, 2014.

Schuster K, Alheid H-J, Böddener D. Seismic investigation of the Excavation damaged zone in Opalinus Clay. Engineering Geology. Vol 61, no 2-3, pp 189-197, 2001.

Sjöberg, Conny. Sprickutbredningszoner kring smala borrhålsladdningar. Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte BK-79, sid. 53-98, 1979.

TRAFIKVERKET

Trafikverket, XXX XX Ort. Besöksadress: Gata XX.
Telefon: 0771-921 921, Texttelefon: 0243- 750 90

www.trafikverket.se