

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN OSASTO
Kalliorakentamisen laboratorio

Visa-Matti Taneli Myllymäki

**EMULSIO- JA PUTKIPANOSTUKSEN AIHEUTTAMA
RIKKOUTUMISVYÖHYKE TUNNELILOUHINNASSA**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Espoossa 9.11.2006

Valvoja:



Professori Pekka Särkkä

Ohjaaja:



Tekniikan lisensiaatti Tuomo Tahvanainen

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on YIT Rakennus Oy:n ja Oy Forcit Ab:n yhteinen hanke, jonka tarkoitus on tutkia rikkoutumisvyöhykkeen syvyyttä Vuosaaren sataman liikenne radan tunnelilouhinnassa.

Kiitän diplomityötäni valvonutta kalliorakentamisen professori Pekka Särkkää Teknillisestä korkeakoulusta ja ohjaaja Tuomo Tahvanaista YIT Rakennus Oy:ltä tärkeistä neuvoista. Kiitän myös diplomityön ohjausryhmään kuuluneita Pentti Vihantoa Oy Forcit Ab:sta ja tekniikan tohtori Raimo Vuoliota räjähteiden ja räjähdystekniikan oppien valaisemisessa. Kiitokset kuuluvat lisäksi työn aloitushetkellä YIT Rakennus Oy:llä työtä ohjanneelle Janne Lehdolle, sekä koko Vuosaaren sataman tunneliurakka viiden ja Oy Forcit Ab:lla työhön osallistuneelle henkilöstölle.

Haluan kiittää myös viereisen työhuoneen diplomi-insinööri Aleksis Lehtosta tietotekniikan toimintaan ja lähinnä ei-toimintaan liittyvistä asioista. Erityiset kiitokset osoitan perheelleni tutkimusten kenttävaiheen aikana saamasta avusta. Lopuksi sydämelliset kiitokset tyttöystävälleni Iiris Lestelälle tuesta ja useista oikoluvuista!

Espoossa 9.11.2006


Visa-Matti Myllymäki

Tekijä:	Visa-Matti Myllymäki		
Diplomityö:	Emulsio- ja putkipanostuksen aiheuttama rikkoutumisvyöhyke tunnelilouhinnassa		
Päivämäärä:	9.11.2006	Sivumäärä:	77
Professuuri:	Kalliorakentaminen	Koodi:	Rak-32
Valvoja:	Professori Pekka Särkkä		
Ohjaaja:	Tekniikan lisensiaatti Tuomo Tahvanainen		
<p>Tavoitteena on määrittää tunnelilouhinnan seinälinjassa käytetyn 17 mm F-putkipanoksen ja emulsioräjähde Kemiitti 810:n 350 g/m rannun aiheuttamat rikkoutumisvyöhykkeet. Kummallakin räjäytysaineella tehdyn tunneliosuuden seinään sahatuista poikkileikkauksista mitataan rakojen pituudet, joista määritetään rikkoutumisvyöhykkeen syvyys. Rikkoutumisvyöhykkeen syvyyteen vaikuttavaa räjähdysnopeutta porareissä mitataan edellisten räjähdysaineiden lisäksi Kemiitti 810:n 600 g/m rannusta.</p> <p>Vuosaaren sataman tunneliurakassa 5 (YIT Rakennus Oy) tehdyissä tutkimuksissa Kemiitti 810:n 350 g/m rantu aiheutti keskimäärin 25 cm ja 17 mm F-putkipanos keskimäärin 34 cm syvän rikkoutumisvyöhykkeen. Valmistaja (Oy Forcit Ab) ilmoittaa F-putkipanokselle laskennalliseksi teoreettiseksi rikkoutumisvyöhykkeen syvyydeksi 40 cm. Rikkoutumisvyöhykkeen syvyyttä tunnelin seinästä ei ole mitattu Kemiitti 810:llä aikaisemmin. Rakojen mittaus tunkeumanesteellä sahatuista pinnoista ei jätä mitään arvailujen varaan ja on siten suositeltava menetelmä jatkotutkimuksissa selvittää eri räjähdysaineiden rikkoutumisvyöhyke.</p> <p>Tutkimus osoittaa lisäksi, että räjähdysaineen panostusasteen (kg/m) ohella räjähdysnopeudella (m/s tai km/s) on suuri merkitys räjäytyksessä kallioon kohdistuvaan paineeseen ja rakoilun muodostumiseen, vertailtaessa rakoilun ulottuvuutta eri räjähdys-aineilla. Voima/painoyksikkö s-arvon merkitys ns.</p>			

silolouhinta räjähdysaineilla lienee usein rakojen syntyä tarkasteltaessa vähäinen.

s-arvo on 1980–1990 -luvun tutkimuksissa ollut yleinen ”rakoiluvyöhyke” kriteeri ja se on (ollut) käytössä vertailtaessa eri räjähdysaineiden tehoa massalouhinnassa ja massiivisessa kiven irrotuksessa. s-arvon merkitystä tulisi tutkia edelleen.

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS
DEPARTMENT OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Author:	Visa-Matti Myllymäki		
Thesis:	Damage zone induced by site sensitized emulsion and pipecharge		
Date:	9.11.2006	Number of pages:	77
Professorship:	Rock engineering	Code:	Rak-32
Supervisor:	Professor Pekka Särkkä		
Instructor:	Lic. Sc. (Tech.) Tuomo Tahvanainen		
<p>The objective is to determine damage zones of explosives which are used in the contour line of tunnel excavation. Studied explosives are Kemiitti 810 350 g/m site sensitized emulsion and 17 mm F-pipecharge. Extension of damage zone is defined by lengths of the cracks in rock. Crack lengths from both explosives are measured from cross-sections sawed in to tunnel wall. Velocity of detonation (VOD) affects to the depth of damage zone, and it is measured for Kemiitti 810 600 g/m too, along with both explosives mentioned above.</p> <p>The study was conducted in the Vuosaari harbour tunnel contract 5 (YIT Construction Ltd). Depth of damage zone with Kemiitti 810 350 g/m was measured on average to 25 cm and with 17 mm F-pipecharge on average to 34 cm. Manufacturer (Oy Forcic Ab) reports the depth of damage zone with F-pipecharge to theoretical 40 cm. Comparable depth for Kemiitti 810 has never been measured from a cross section in tunnel wall. Measuring crack lengths from cross-sections is the only method that gives reliable results and thereby it is the recommended method to define the damage zones of various explosives.</p> <p>The study indicates that the VOD (m/s or km/s) too, along with the degree of packing (kg/m), has a substantial magnitude to the pressure applying to the rock mass and to the development of cracks, when comparing the extent of crack lengths with dissimilar explosives. The meaning of strength per unit weight s-value seems to have only a little significance in crack generation with explosives used in smooth blasting.</p>			

s-value has been a common damage zone criterion in studies during 1980-1990 and it is used when comparing the power of different explosives used in massive scale quarrying. s-value status should be further examined.

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	1
Lyhenteet, merkit ja termit	3
1. Johdanto	5
1.1 Tutkimuksen taustaa.....	5
1.2 Tutkimusongelma.....	6
1.3 Tutkimuksen tavoitteet	6
2. Kirjallisuusaineisto	7
2.1 Räjähdyspaineen leviäminen	7
2.2 Kallion särkyminen	8
2.3 Rikkoutumisvyöhyke ja keskimääräinen maksimirakopituus	10
2.4 Räjähdyksineen teho.....	12
2.4.1 s-luku	12
2.4.2 Paine porareian seinämässä.....	14
2.4.3 Panostusaste ja s-arvo	18
2.5 Kallion rakoilu	19
2.5.1 Tangentiaalisen jännityksen aiheuttaman raon pituus.....	19
2.5.2 Luonnollisen ja räjähdysten aiheuttaman rakoilun yhdistyminen.....	20
2.5.3 Reikävälin ja edun vaikutus rakojen syntyyn	21
2.5.4 Sytytyksen vaikutus rakoiluun	25
2.5.5 Porareian ja räjähdysaineen halkaisijan suhteen, coupling ratio:n, merkitys rakoilussa.....	28
2.5.6 Olssonin ja Ouchterlonyn rikkoutumisvyöhykkeen laskentamenetelmä	30
3. Kenttätutkimukset	32
3.1 Tutkimuskohteen yleinen geologia	32
3.2 Räjähdyksnopeuksien mittaaminen.....	33
3.2.1 Mittausmenetelmä	33
3.2.2 Emulsiopanostus räjähdysnopeusmittauksissa.....	36
3.3 Rikkoutumisvyöhykkeen rakojen mittaaminen	38
3.3.1 Testikatkojen louhinta	38
3.3.2 Kalliolohkojen sahaus.....	40

3.3.3 Sahattujen kalliolohkojen irrotus	42
3.3.4 Rakojen mittaus tunkeumanesteen avulla.....	43
4. Tulokset.....	47
4.1 Räjähdysnopeudet	47
4.1.1 F-putkipanos 17 mm.....	47
4.1.2 Kemiitti 810 350 g/m.....	48
4.1.3 Kemiitti 810 600 g/m.....	50
4.1.4 Aniitti paperipatruuna 28 mm	52
4.2 Paine porareian seinässä	53
4.3 Rikkoutumisvyöhyke.....	54
4.3.1 Rakomittaukset.....	54
4.3.2 Visuaaliset havainnot sahatuista pinnoista	57
4.4 Paine porareian seinässä ja rakopituus	58
4.5 Rakoluokkien pituussuhteet.....	59
5 Tulosten tarkastelu	60
5.1 Räjähdysnopeudet	60
5.1.1 F-putkipanos 17 mm.....	60
5.1.2 Kemiitti 810 350 g/m.....	61
5.1.3 Kemiitti 810 600 g/m.....	63
5.1.4 Yhdistetty varsipanos-räjähdysnopeus 350 g/m ja 600 g/m rannuista .	64
5.2 Paine porareian seinässä	65
5.3 Kallion rakoilu	67
5.3.1 Tangentiaalisen jännityksen aiheuttamat minimirakopituudet mitatuilla räjähdysnopeuksilla.....	67
5.3.2 Rakomittaukset sahatuista pinnoista.....	68
5.4 Paineen vaikutus rakopituuteen	71
5.5 Rakoluokkien pituussuhteet.....	71
5.6 Suosituksia rakoilu- ja räjähdysnopeusmittausten tekemiseen.....	71
5.7 Jatkotutkimusehdotukset	72
6. Yhteenveto.....	73
Lähdeluettelo	75
Liiteluettelo	77

Lyhenteet, merkit ja termit

CR	coupling ratio, porareian täyttöaste
D	räjähdysopeus [m/s]
D_e	räjähdyksineen halkaisija [mm]
D_h	porareian halkaisija [mm]
E	reikäväli [m]
f	CR-luku
F_h	reikävälin korjauskerroin
F_t	sytytysmenetelmän korjauskerroin
F_v	veden korjauskerroin
F_b	kallion ominaisuuksien korjauskerroin.
L_d	tiheään levinneiden rakojen pituus [cm]
L_{max}	pisimmän raon pituus [cm]
L_w	laajalle levinneiden rakojen pituus [cm]
P_{DET}	räjähdysoaineen paine [MPa]
P_e	paine räjähdysaineen pinnalle [MPa]
P_h	paine porareian seinämässä [MPa]
q	panostusaste [kg/m]
Q	käytettävän räjähdysaineen räjähdyslämpö [MJ / kg]
Q_0	vertailuräjähdysoaineen räjähdyslämpö [MJ / kg]
R_c	maksimirakojen muodostama rikkoutumisvyöhyke [m]
R_{co}	laskennallinen rakopituus tietyllä räjähdysainetyypillä [m]
S_{ANFO}	voima / painoyksikkö (vertailulukuna Anfoon)
V	etu [m]
V_g	käytettävän räjähdysaineen kaasutilavuus [l / kg]
V_{g0}	vertailukaasutilavuus [l / kg]
VOD	velocity of detonation, räjähdysnopeus [km/s]
γ	dimensioton laajenemisvakio
\varnothing_e	räjähdyksineen halkaisija [m]
\varnothing_h	porareian halkaisija [m]

ρ	tiheys [kg/m ³]
σ_c	puristusjännitys [MPa]
σ_t	vetojännitys [MPa]

1. Johdanto

1.1 Tutkimuksen taustaa

Perinteinen ja edelleen yleisin käytössä oleva panostustapa tunnelin louhinnassa on panostus, jossa kenttäreiät täytetään jauhe-, geeli-, tai patruunoidulla räjähdysaineella. Reunareivät on täytetty perinteisessä louhinnassa joko tavallisella patruunoiduilla tai putkiin pakatuilla räjähdysaineella. Patruunoita voi panostaja tiivistää, putkilla saadaan tarkka panostusaste. Tämä panostusmenetelmä on fyysisesti raskas panostajalle, sillä hänen täytyy siirtää jopa kymmeniä räjähdysainelaatikoita (eli satoja kiloja) nallien lisäksi räjähdysainevarastosta panostusalustalle. Panostuksen jätteeksi jää lukuisia tyhjiä pahvisia räjähdelaatikoita, jotka pitää hävittää asiallisesti.

Emulsiopanostusmenetelmässä jokainen reikä täytetään emulsioräjähdysaineella, joka pumpataan reikiin automaattisesti takaisinkelautuvaa putkea pitkin. Näin muodostunutta räjähdysainevanaa reiässä kutsutaan rannuksi. Räjähdysaineen voimakkuutta eri rei'issä säädetään vaihtelemalla emulsiorannun paksuutta, pääasiassa takaisinvetonopeudella ja emulsion syöttöpumpulla. Tässä menetelmässä emulsiomatriisiaines (vasta reikään pumpatessa tuotteesta muodostuu räjähdysaine) nostetaan kuormajalla panostusalustaan, jolloin panostajien tehtäväksi jää vain aloitepanosten ja nallien käsittely. Jätettä syntyy myös vähemmän verrattuna perinteiseen panostustapaan, sillä tyhjä emulsiomatriisisäiliöt palautetaan takaisin uudelleentäytettäväksi.

YIT Rakennus Oy on käyttänyt Oy Forcit Ab:n patruunoimatonta emulsioräjähdysainetta, Kemiitti 810:tä, kahdessa VUOLI-projektin rautatietunneliurakassa vuosina 2005–2006. Kemiitti 810 on aikaisemmin ollut käytössä Suomessa kaivoksilla vuodesta 2002 (Kemi)- 2003 (Pyhäsalmi) alkaen.

Aikaisemmin tarkka panostusaste porareikään on saatu vain patruunoiduilla räjähdysaineilla, joten jauhe- ja geelimäisiä räjähdysaineita ei ole voitu käyttää

tunnelilouhinnassa reuna- ja apulinjassa. Emulsioräjähdyksainetta Kemiitti 810:tä käytettäessä panostusaste on voitu säätää halutunlaiseksi varta vasten kehitetyllä panostusmenetelmällä.

1.2 Tutkimusongelma

Räjähdyksaineen aiheuttaman rikkoontumisvyöhykkeen sallitaan maanalaisessa louhinnassa yleensä ulottuvan tunnelin seinään 40 senttimetrin syvyyteen tunnelin reunalinjasta. Yleisin reunalinjassa käytettävä räjähdysaine Suomessa on Oy Forcit Ab:n valmistama 17 millimetrin F-putkipanos. Tämän putkipanoksen aiheuttaman rikkoutumisvyöhykkeen syvyydeksi räjähdysaineen valmistaja ilmoittaa 40 senttimetriä. (Oy Forcit Ab 2006, 20).

Kemiitti 810:tä vastaavilla räjähdysaineilla on Ruotsissa keveillä räjähdysainerannuilla todettu rikkoutumisvyöhykkeen jäävän enimmillään 30 senttimetriä syväksi. Laskennallisten painetulosten ja ruotsalaisten käytännön kokemusten perusteella Kemiitti 810:n uskotaan pysyvän sallitussa 40 senttimetrin rikkoutumisvyöhykkeen rajoissa myös Suomen vastaavanlaisessa kovassa kivessä. Kemiitti 810:n aiheuttamasta rikkoutumisvyöhykkeen syvyydestä ei ole ollut kuitenkaan käytännön tutkimuksin Suomessa todettua tietoa.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

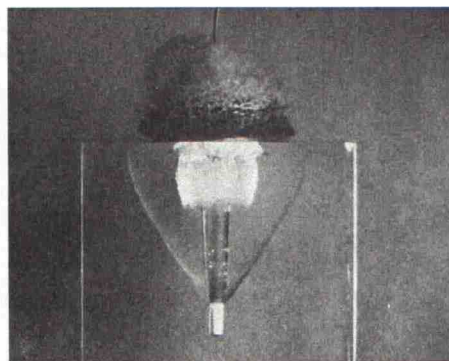
Työn tavoitteena on selvittää Kemiitti 810 aiheuttaman rikkoutumisvyöhykkeen syvyys reunalinjassa käytettävällä 350 grammaa per metri rannulla, sekä verrata sitä 17 millimetrin F-putkipanoksen aiheuttamaan rikkoutumisvyöhykkeeseen. Syvyys mitataan tunnelin seinään sahatuista poikkileikkauksista. Tavoitteena on arvioida rikkoutumisvyöhykkeen syvyyteen vaikuttava paine porareian seinässä, mittaamalla räjähteiden räjähdysnopeuksia. Työssä esitetään rikkoutumisvyöhykkeen syvyyteen vaikuttavia tekijöitä. Käytännön tutkimukset tehdään VUOLI-projektin tunneliurakassa numero 5 (TU5). Mahdollisuuksien mukaan tavoitteena on myös mitata 17 millimetrin Kemix A-putkipanoksen rikkoutumisvyöhyke sekä 17 ja 29 millimetrin Kemix A-putkipanoksen ja Anfon räjähdysnopeudet.

2. Kirjallisuusaineisto

2.1 Räjähdyspaineen leviäminen

Persson et al. (1994, 234) mukaan räjähdysaineen räjähtäessä porareissä, etenee sen muodostama iskuaalto 3000 - 6000 metriä sekunnissa. Iskuaallon nopeus riippuu räjähdysaineesta ja sen halkaisijasta sekä porareian halkaisijasta. Iskuaallon aiheuttama paine on tyypillisesti 5 - 10 gigapascalia. Mikäli porareikä on täynnä räjähdysainetta, paineesta noin puolet vaikuttaa porareian seinämään. Porareian jäljelle jäävään seinämään vaikuttava paine on pienempi kuin paine porareikien välissä, koska seinämä on tällöin kiihtyvässä liikkeessä kohtisuorasti porareistä pois päin paineen vaikutuksesta. Tällöin myös osa paineesta purkautuu porareian suuntaisesti. Mikäli räjähdysaine ei täytä porareikää kokonaan, räjähdyskaasut laajenevat ensin säteittäisesti täyttäen porareian, jolloin paine seinämässä on vieläkin pienempi.

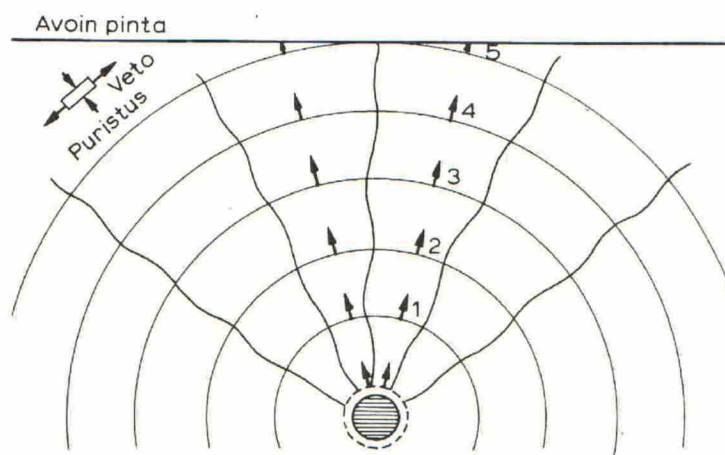
Paine etenee porareistä ympäröivään kallioon kartion muotoisena iskuaaltorintamana. Iskuaaltorintama laajenee säteittäisesti edetessään porareian suuntaisesti. Samaan aikaan myös sekä porareian suuntaisesti, että säteittäisesti laajenevien räjähdyskaasujen aiheuttama paine porareian seinämässä laskee melko nopeasti. Tämän seurauksena myös paine ehjässä kalliassa kulkevassa iskuaaltorintamassa pienenee. Iskuaallon eteneminen pleksilasissa on valokuvattu kuvassa 1.



Kuva 1. Pentriittipanoksen aiheuttaman iskuaaltorintaman eteneminen pleksilasissa ylhäältä alaspäin. (Persson et al. 1994, 235).

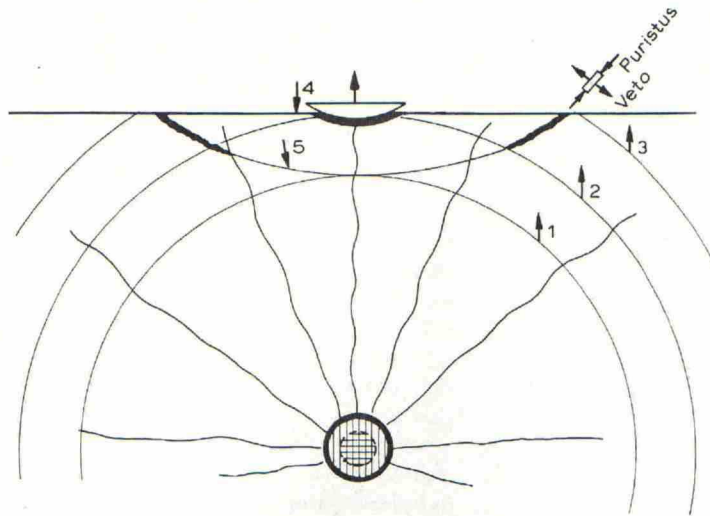
2.2 Kallion särkyminen

Räjähdyksen aiheuttaman paineen johdosta syntyy reiän reunoihin tangentiaalinen vetojännitystila, joka aiheuttaa säteittäisten halkeamien muodostumisen. Ympäristöön lähtee samanaikaisesti leviämään räjähdysimpulssin aiheuttama jännityspulssi jonka etenemisnopeus on kallion rakenteesta riippuen 3000 - 7000 metriä sekunnissa ja paljon suurempi kuin halkeamien muodostumisnopeus, (Vuolio 1991, 54). Tilanne on esitetty kuvassa 2.



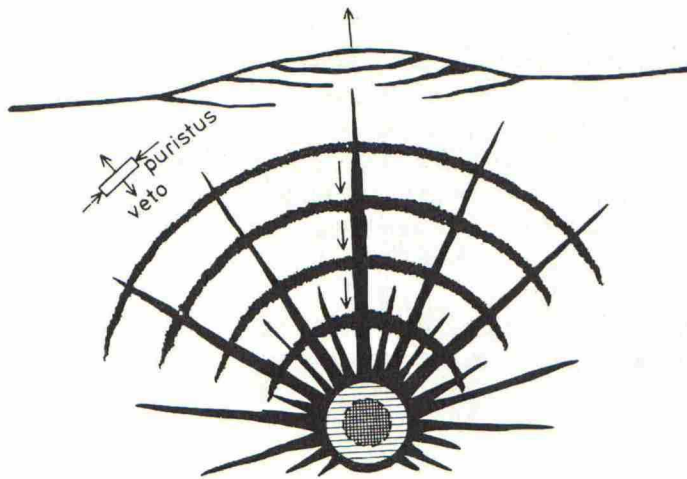
Kuva 2. Iskuaaltorintamien eteneminen porareiästä. (Vuolio 1991,54).

Kun jännityspulssi saavuttaa vapaan kalliopinnan, heijastuu se takaisin muuttuen puristusjännitysaallon vetojännitysaalloksi. Koska kiven puristuslujuus σ_c on yleensä kertaluokkaa suurempi kuin vetolujuus σ_t , vetolujuus ylittyy ja kallio rikkoontuu kuvan 3 mukaisesti. (Vuolio 1991, 54).



Kuva 3. Iskuaallot heijastuvat vapaasta pinnasta ja muuttuvat vetoaalloksi.
(Vuolio 1991, 54).

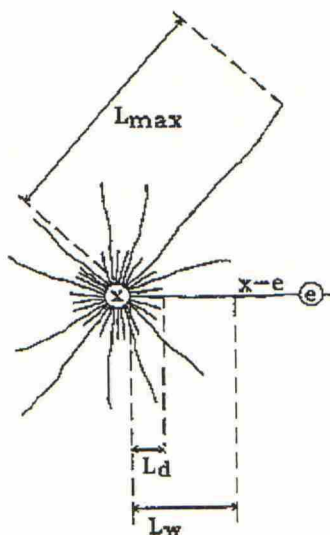
Varsinaisen kiven irrottamisen saa aikaan jännitysaallon muodostamissa raoissa leviävät räjähdyskaasut. Räjähdyksessä lämmenneet ja sitä myötä laajenneet kaasut levittävät rakoja, jolloin kallio myötää vapaata tilaa kohti. Räjähdyskaasut leviävät myös kallion omaa, luontaista rakoilua pitkin. Kun raot yltävät vapaaseen tilaan asti, kallio irtoaa kuvan 4 mukaisesti. (Vuolio 1991, 54).



Kuva 4. Kallion irtoaminen paineen vaikutuksesta. (Vuolio 1991, 55).

2.3 Rikkoutumisvyöhyke ja keskimääräinen maksimirakopituus

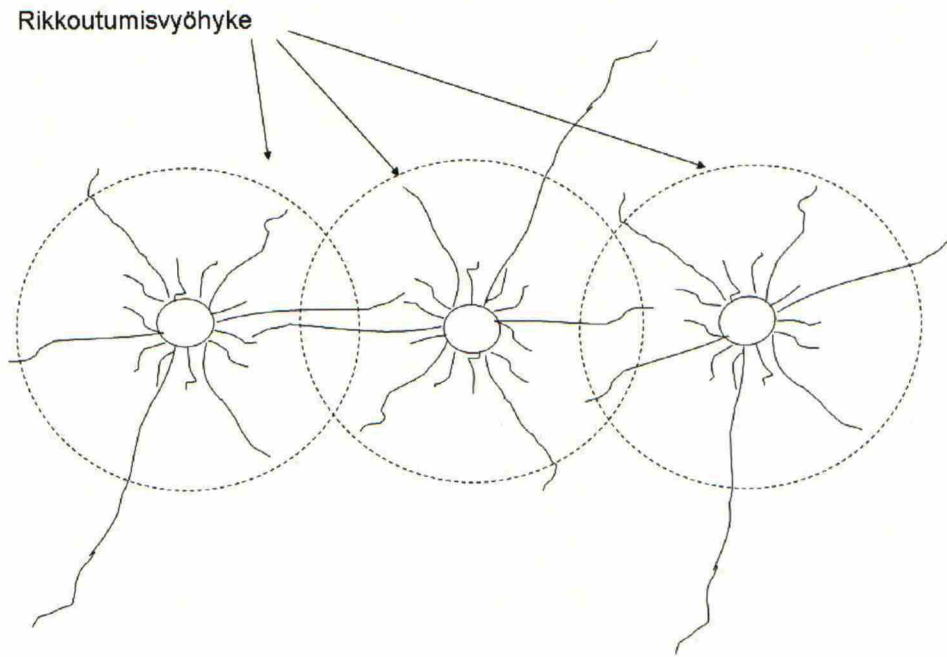
Räjähdyksen aiheuttama säteittäinen rakoilu porareian ympärillä on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Rakoilun kolme pituusluokkaa. (Jokinen ja Ylätaalo 1995, 9).

Porareistä lähtevä rakoilu voidaan jakaa kolmeen pituusluokkaan: tiheään levinneisiin L_d (<10 cm), laajalle levinneisiin L_w (>10 cm) ja pisimpään ragoon L_{max} . Porareikää lähestyessä rakojen pituus lyhenee ja niiden määrä tihenee.

Rakopituusjakaumasta voidaan erottaa merkitsevät maksimirakopituudet. Merkitsevät rakopituudet ovat yli kymmenen senttimetriä pitkät raot (L_w). Merkitsevistä rakopituuksista voidaan määrittellä keskimääräinen, odotettavissa oleva, maksimirakopituus. Keskimääräisten maksimirakojen muodostama vyöhyke muodostaa rikkoutumisvyöhykkeen kuvan 6 mukaisesti.



Kuva 6. Kolmen reiän aiheuttama rikkoutumisvyöhyke.

Rakoluokkien pituussuhteiden L_{\max}/L_d , L_{\max}/L_w ja L_w/L_d avulla voidaan arvioida kunkin räjähdysaineen raonmuodostamismuotoisuutta. Suhdelukujen pieni arvo merkitsee vähäistä ylimääräisten ja haitallisten rakojen muodostumista. Tärkein suhdeluku on pisimmän raon suhde laajalle levinneisiin rakoihin, L_{\max}/L_w . (Jokinen ja Ylätaalo 1995, 16). Toisaalta liian pieni L_{\max}/L_w luku tarkoittaa sitä, että pisin rako ei erotu, jolloin reikien väliset raot eivät pääse muodostumaan louhinnan kannalta edullisesti.

2.4 Räjähdyksaineen teho

2.4.1 s-luku

Oy Forcit Ab kuvaa räjähdysaineen tehokkuutta, eli kiven irrotuskykyä, vertaamalla sitä yleisesti käytössä olevan Anfo-räjähdysaineeseen Langeforsin kaavalla, (Persson et al. 1994, 128)

$$s_{ANFO} = \frac{1}{0,84} \left(\frac{5e}{6} + \frac{v_g}{6} \right) \quad (1)$$

jossa s_{ANFO} = voima / painoyksikkö

$$e = \frac{Q}{Q_0} \quad (2)$$

Q = käytettävän räjähdysaineen räjähdyslämpö [MJ / kg]

Q_0 = vertailuräjähdyslämpö = 5,0 MJ / kg

$$v_g = \frac{V_g}{V_{g0}} \quad (3)$$

V_g = käytettävän räjähdysaineen kaasutilavuus [l / kg]

V_{g0} = vertailukaasutilavuus = 965 l / kg.

Anfon s-luku on siten yksi. Räjähdyksaineen s-luvun kasvu kuvaa sen kiven irrotustehon kasvua.

Perssonin et al. (1994, 129) mukaan Langeforsin kaava luokittelee hyvin teholtaan erilaiset nitroglyseriinipohjaiset räjähdysaineet suhteessa toisiinsa. On havaittu, että s-luku liioittelee räjähdysaineen tehoa, mikäli käytettävän räjähdysaineen tiheys on suuri ja se täyttää koko porareian.

s-luku ei ota huomioon räjähdysaineen palamisnopeutta ja tiheyttä. s-luvulla ei voida myöskään täysin, vaikka näin on perinteisesti ainakin osittain tehty

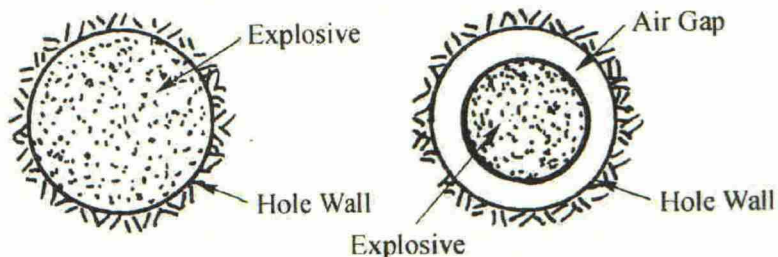
(ruotsalaiset ja Vuolio 1980, 1985, 1991), arvioida jäljellä jäävän kallion rakoilua. Eri räjähdysaineiden s-arvoja esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. Oy Forcit Ab:n reuna- ja apulinjassa käytettävien räjähdysaineiden ominaisuuksia. (Oy Forcit Ab 2006, 21).

Räjähdysaine Ø * pituus [mm]	Räjähdyslämpö [MJ/kg]	Kaasutilavuus [l/kg]	s-arvo (ANFO)
Fordyn 24*200	4,5	850	1,06
Aniitti 28*400	4,3	880	1,08
Anfo	4,0	965	1,00
Kemiitti 810	2,9	985	0,78
F-putkipanos 17*460	2,4	406	0,58
Kemix A-pp 17*1000	2,9	946	0,77

2.4.2 Paine porareiän seinämässä

Hustrulid (1999, vol. 1. 297) esittää räjähdysaineen tehon kuvaamisella painetta porareiän seinämässä. Reuna- ja apulinjassa porareikää ei yleensä täytetä räjähdysaineella kokonaan, koska niissä käytetään kevennettyä panostusta rikkoutumisvyöhykkeen pienentämiseksi, kuva 7.



Kuva 7. Täyteen panostettu ja kevennetty porareikä. Oikean puoleisessa (kevennetyssä) reiässä CR luku <1. (Hustrulid 1999, 297).

Suhdeluvusta, joka kuvaa räjähdysaineen täyttöastetta porareiässä, käytetään lyhennettä CR ”coupling ratio”

$$CR = \frac{D_e}{D_h} \quad (4)$$

jossa D_e = räjähdysaineen halkaisija [mm]
 D_h = porareiän halkaisija [mm].

Hustrulid (1999, vol. 1. 63) toteaa, että useimmille räjähdysaineille pätee

$$P_{DET} = 0,25\rho(VOD)^2 \quad (5)$$

jossa P_{DET} = räjähdysaineen aiheuttaman iskuaallon paine [MPa]
 ρ = räjähdysaineen tiheys [kg/m³]
VOD = räjähdysnopeus [km/s].

Porareiässä vaikuttava paine heti iskuaallon jälkeen, räjähdyspaine P_e , on noin puolet iskuaallon paineesta

$$P_e = 0,125 \rho (VOD)^2. \quad (6)$$

Kun huomioidaan räjähdysaineen täyttöaste porareiässä yhtälöstä (4), saadaan

$$P_{h1} = P_e (CR)^{2\gamma} \quad (7)$$

jossa P_{h1} = paine porareiän seinämässä [MPa]
 γ = kokeellinen kerroin 1,2.

CR-luvun pieneneminen vaikuttaa eksponentiaalisesti paineeseen porareiän seinämässä. Suomessa yleisesti reuna- ja apulinjassa käytettävien räjähdysaineiden räjähdyspaineeseen vaikuttavat tekijät ovat luetteloitu taulukossa 2.

Olsson ja Ouchterlony (2003, 17) esittävät paineen laskemiseksi porareiän seinässä seuraavanlaista

$$P_{h2} = \frac{\gamma^\gamma}{(\gamma + 1)^{(\gamma+1)}} \rho_e D^2 \left(\frac{\phi_e}{\phi_h} \right)^{2,2} \quad (8)$$

jossa γ = dimensioton laajenemisvakio

$$\gamma = \sqrt{\left(1 + \frac{D^2}{Q} \right)} \quad (9)$$

D = VOD [m/s]

Q = räjähdysaineen räjähdyslämpö [J/kg]

ϕ_e = räjähdysaineen halkaisija [m]

ϕ_h = porareiän halkaisija [m]

$\rho_e = \rho$ = räjähdysaineen tiheys [kg/m³]

Taulukko 2. Panosten räjähdysnopeudet, tiheydet ja lämpömäärät. (Oy Forcit Ab 2006, 20). * = ei ilmoitettu tuoteluettelossa, mitattu 45 mm porareiässä.

Räjähdysaine Ø * pituus [mm]	Räjähdysnopeus [km/s]	Tiheys [kg/m ³]	Räjähdyslämpö [MJ/kg]
F-putkipanos 17*460	2,4	1100	2,4
Kemix A-pp 17*1000	4,5	1000	2,9
Kemiitti 810 300g/m rantu	1,8*	1000	2,9
Kemiitti 810 600 g/m rantu	2,6*	1000	2,9
Fordyn 24*200	2,7	1500	4,5
Aniitti 28*400	2,5	1100	4,3

Kaavoilla 4,6,7,8 ja 9 saadut tulokset ovat luetteloitu taulukossa 3.

Taulukko 3. Hustrulidin sekä Olssonin ja Ouchterlonyn mukaan lasketut paineet porareiän seinässä.

Räjähdysaine Ø * pituus [mm]	CR 51 mm porareiässä	Räj.pain e P _e [MPa]	Porareiän seinämä P _{h1} [MPa] (Hustrulid).	Porareiän seinämä P _{h2} [MPa] (Olsson ja Ouchterlony).
F-putkipanos 17*460	0,33	792	57	88
Kemix A-pp 17*1000	0,33	2531	181	196
Kemiitti 810 300g/m rantu	0,38	405	41	73
Kemiitti 810 600 g/m rantu	0,54	845	194	278
Fordyn 24*200	0,47	1367	224	360
Aniitti 28*400	0,55	859	204	365

Hustrulidin mukaan reunalinjassa käytettävistä räjähdysaineista pienimmän paineen porareiän seinään aiheuttaa Kemiitti 810 300 g/m rantu ja apulinjassa käytettävistä Kemiitti 810 600 g/m rantu. Olssonin ja Ouchterlonyn kaavoilla laskettaessa päädytään samaan tulokseen. On huomioitava, että Olssonin ja Ouchterlonyn laskentamenetelmä tuottaa merkittävästi suuremmat paineet

porareiän seinään. Täyteen panostetun porareiän halkaisijan kaksinkertaistuessa pisimpien rakojen pituus kasvaa noin kaksinkertaiseksi (Hustrulid 1999, vol. 1. 97). Rakojen pituuden kasvu kaksinkertaiseksi perustuu merkittävästi tyhjän tilan vaimentavaan vaikutukseen porareiässä.

2.4.3 Panostusaste ja s-arvo

Räjähdyksaineen tehoa on arvioitu yleisesti räjähdysainemäärä per metri (kg/m) tai räjähdysainemäärä dynamiittina per metri (kg dyn/m). Koska dynamiittien koostumus on vuosikymmenten kuluessa muuttunut erittäin paljon, on käsitteestä panostusaste kg dyn./m luovuttu (Vuolio 2006, 30). Suomessa yleisesti reuna- ja apulinjassa käytettävien räjähdysaineiden panostusasteet ja rikkoutumisvyöhykkeet ovat esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Sekä reuna-, että apulinjassa käytettävät räjähdysaineet muodostavat yhtä suuren rikkoutumisvyöhykkeen. (Oy Forcit Ab 2006, 20) ja (Vuolio 1991).

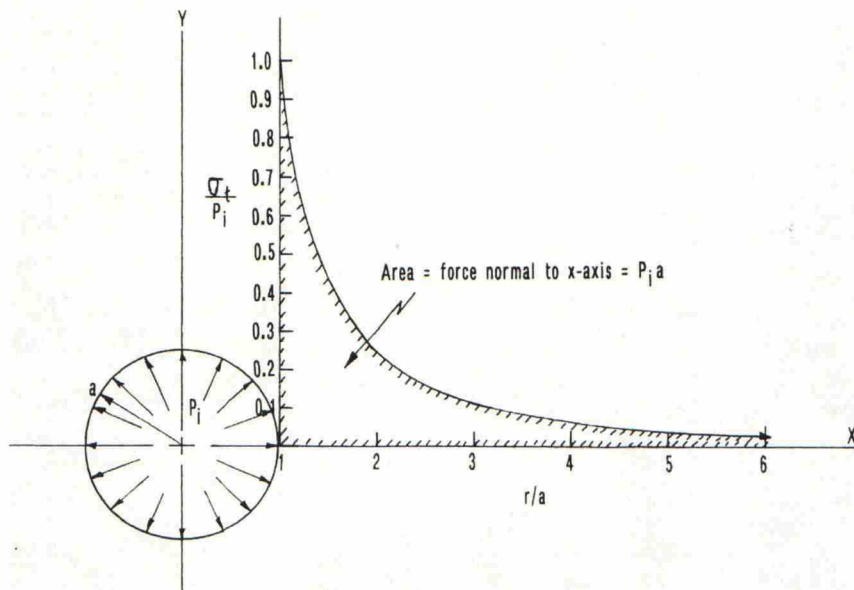
Räjähdyksaine Ø * pituus [mm]	Paino [g]	Panostus [kg/m]	kg dyn/m (muutettu s-arvon avulla)	Teoreettinen rikkoutumis- vyöhyke [m]
F-putkipanos 17*460	90	0,21	0,13	0,4
Kemix A-pp 17*1000	220	0,22	0,17	0,4
Kemiitti 810 300 g/m rantu	-	0,30	-	-
Kemiitti 810 600 g/m rantu	-	0,60	-	-
Fordyn 24*200	130	0,67	1,00	1,4
Aniitti 28*400	275	0,67	0,99	1,4

Panostusasteen vaikutusta tarkasteltaessa vertailua dynamiitin s-arvon ja muiden räjähdysaineiden s-arvojen välillä ei, uusimman kirjallisuuden ja tutkimusten mukaan (Hustrulid 1999), syntyvää uutta rakoilua tarkasteltaessa tulisi tehdä. Nykyisin tulisi s-arvoa tarkastella lähinnä kallion irrotusta tutkittaessa, sillä se (räjähdyslämpö ja syntyvät kaasut) vaikuttaa ensisijaisesti jo kalliassa olevien rakojen laajenemiseen.

2.5 Kallion rakoilu

2.5.1 Tangentiaalisen jännityksen aiheuttaman raon pituus

Räjähdyksen synnyttämä iskuaalto porareiässä aiheuttaa tangentiaalisen jännityksen ympäröivään kallioon, joka aukaisee kallioon rakoja. Näiden rakojen pituutta voidaan arvioida kuvan 8 avulla. Näihin avautuneisiin rakoihin kulkeutuneet räjähdyskaasut pidentävät ja avaavat lisää rakoja paineellaan.

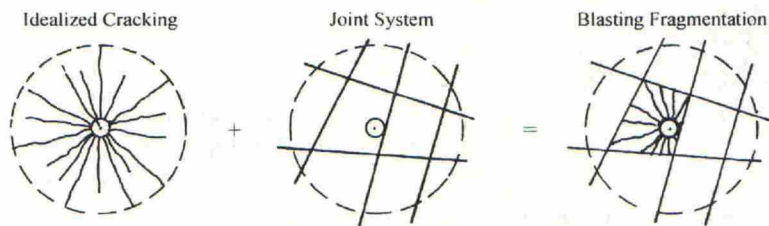


Kuva 8. Tangentiaalisen jännityksen jakauma. P_i = paine porareiän seinässä, σ_t = vetolujuus, r = avauman pituus porareiän seinästä ja a = reiän säde. (Hustrulid 2006, 13).

Paine porareiän seinässä (P_i) Kemiitti 810 300 g/m rannulla on taulukon 3 mukaan 41 megapascalialia. Käytettäessä vetolujuutena (σ_t) suomalaisen graniitin tyypillistä arvoa 10 megapascalialia ja porareiän säteen (a) ollessa 25,5 millimetriä, saadaan kuvan 8 mukaisesti suhdeluvuksi (r/a) kaksi. Tangentiaalisen jännityksen aiheuttaman avauman eli raon pituudeksi (r) tulee siten 51 millimetriä. 17 millimetrin F-putkelle raon pituudeksi saadaan samalla menetelmällä 60 millimetriä.

2.5.2 Luonnollisen ja räjähdysen aiheuttaman rakoilun yhdistyminen

Räjähdyksen synnyttämän säteittäisen raon kohdatessa kallion luontaisen raon iskuaalto heijastuu takaisin ja raon eteneminen katkeaa. Tällöin räjähdyskaasut pääsevät purkautumaan kallion rakosysteemeihin ja räjähdysteho jää pienemmäksi kuin ehjässä kalliassa. Säteittäisten ja luontaisten rakojen yhteisvaikutus on esitetty kuvassa 9.

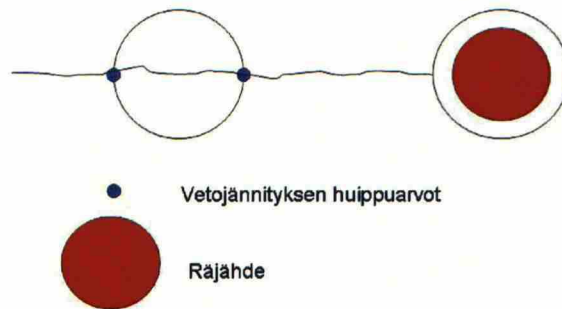


Kuva 9. Kallion rakoilu katkaisee räjähdysen aiheuttaman rakoilun leviämiseen.
(Hustrulid 1999, 99).

Räjäytettävän kalliomassan homogeenisuutta, kerroksellisuutta, kivilajia, rakoilu, ruhjeita ja suuntautuneisuutta, eli yleisesti ottaen kallion laatua ei kuitenkaan huomioida laajemmin rikkoutumisvyöhykkeen laajuuden arvioinnissa tämän työn puitteissa.

2.5.3 Reikävälin ja edun vaikutus rakojen syntyyn

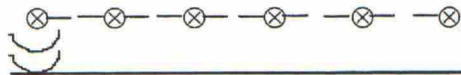
Kun elastiseen materiaaliin, jossa on tyhjä pyöreä reikä, kohdistuu vetojännitys, esimerkiksi räjähdyksestä viereisessä reiässä, voidaan osoittaa laskelmin, että tyhjän reiän lähimpään ja kaukaisimpaan pisteeseen panostetusta reiästä kohdistuu kolminkertainen jännityksen kasvu (Jaeger ja Cook 1969, 236). Tämä ilmiö aiheuttaa rakojen yhtymisen reiästä toiseen, kuva 10.



Kuva 10. Reikien välinen rakojen yhtyminen.

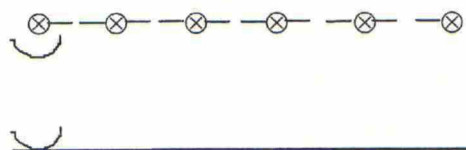
Reikävälin ja edun suhteella on selvä vaikutus rakojen muodostumiseen porareikien välissä. Vuolio (1991, 149) suosittelee edun (V) ja reikävälin (E) suhteeksi 0,8. Tunnelilouhinnassa tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi reunalinjassa reikävälin ollessa esim. 0,6 metriä on edun (etäisyyden apulinjaan) oltava 0,75 metriä.

Kun reikäväli on lyhyt ja etu samanmittainen ($E=V$), raot muodostuvat reikien väliin ennen kuin vapaasta pinnasta heijastunut vetoaalto ehtii takaisin, kuva 11.



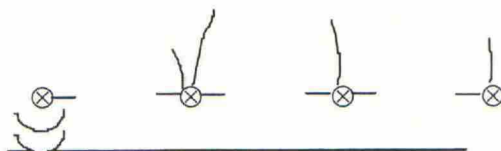
Kuva 11. Reikien väliin muodostuneet raot ehkäisevät lisärakojen muodostumisen syvemmälle kallioon, edun ja reikävälin ollessa samanmittaiset. (Olsson 1999, 9).

Reikävälin ollessa lyhyempi kuin edun ($E < V$), raot ehtivät muodostua reikien välille ennen kuin heijastunut vetoaalto palaa takaisin vapaasta pinnasta. Tilanne on hahmotettu kuvassa 12.



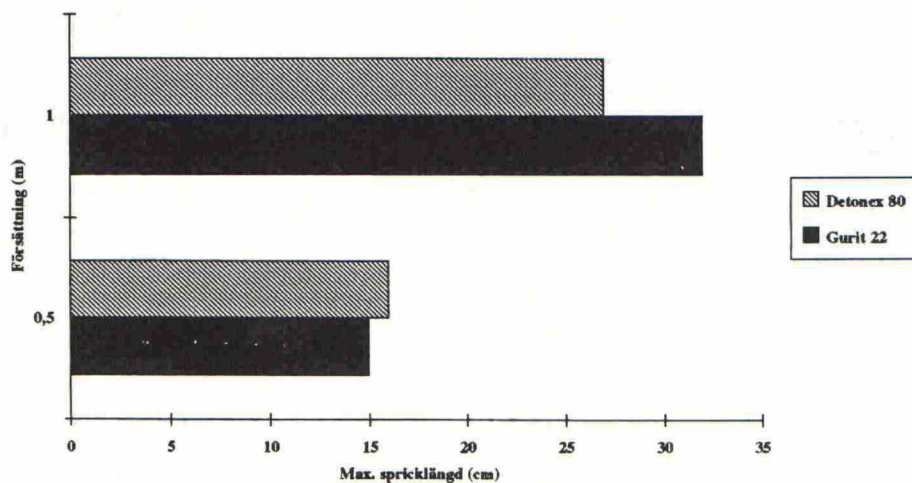
Kuva 12. Reikien väliin ehtii muodostua raot ennen kuin vetoaalto heijastuu vapaasta pinnasta, reikävälin ollessa pienempi kuin etu. (Olsson 1999, 9).

Reikävälin ollessa niin suuri, että raot eivät kerkeä yhdistyä reikien välillä ennen kuin vetoaalto heijastuu takaisin, raot kasvavat satunnaisiin suuntiin reiästä. Porareiät eivät toimi tällöin yhteistyössä vaan yksinäisinä reikinä, kuva 13.



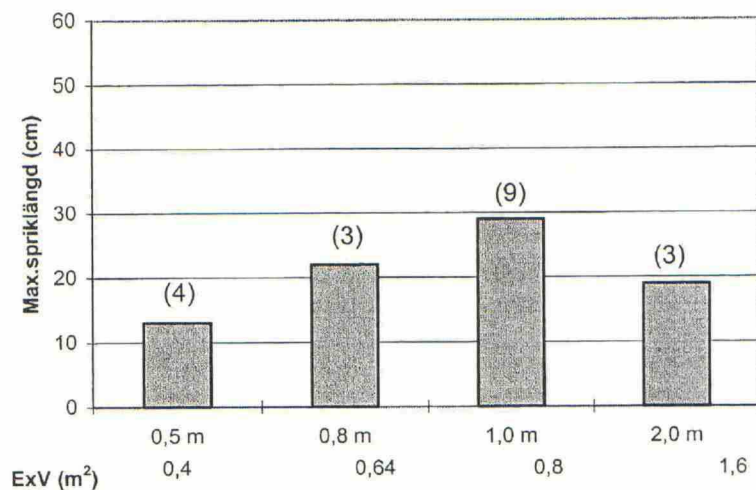
Kuva 13. Reikien välinen etäisyys suurempi kuin etu, kasvattaa räjähdysen aiheuttamaa rakoilua. (Olsson 1999, 9).

Edun ja reikävälin suuruudella on vaikutus jäljelle jäävän kallion rikkoutumisvyöhykkeeseen. Olsson ja Bergqvist (1995, 25) osoittivat, että tietyillä räjähdysaineilla jäljelle jäävään kallioon muodostuu pidempiä rakoja edun ja reikävälin kasvaessa samassa suhteessa. Edun ja reikävälin vaikutus todettiin Detonex 80 ja Gurit 22 räjähdysaineilla, kuva 14.

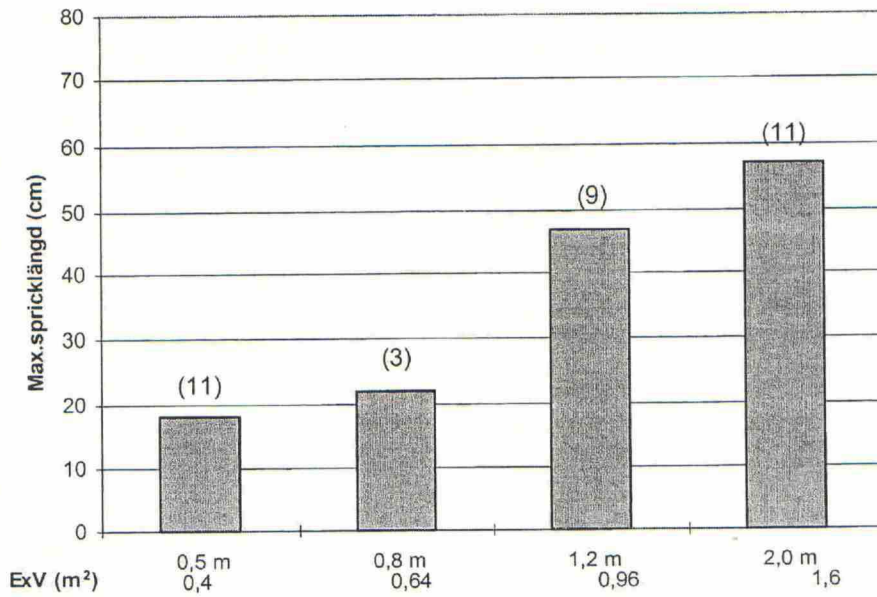


Kuva 14. Edun kasvu puolesta metristä metriin kasvattaa rakopituuden noin kaksinkertaiseksi. (Olsson ja Bergqvist 1995, 26).

Olsson (1999, 5) tutkimuksessa todettiin erikseen sekä edun, että reikävälin vaikutusta pisimmän raon pituuteen, kuvat 15 ja 16. Reikävälin vaikutus on selkeämmin tulkittavissa kuin edun.



Kuva 15. Edun vaikutus pisimmän raon pituuteen, kun reikäväli pysyy vakiona, $E=0,8$ m. Suluissa mitattujen rakojen lukumäärä. (Olsson 1999, 8).



Kuva 16. Reikävälin vaikutus pisimmän raon pituuteen, kun etu pysyy vakiona, $V=0,8$ m. Suluissa mitattujen rakojen lukumäärä. (Olsson 1999, 8).

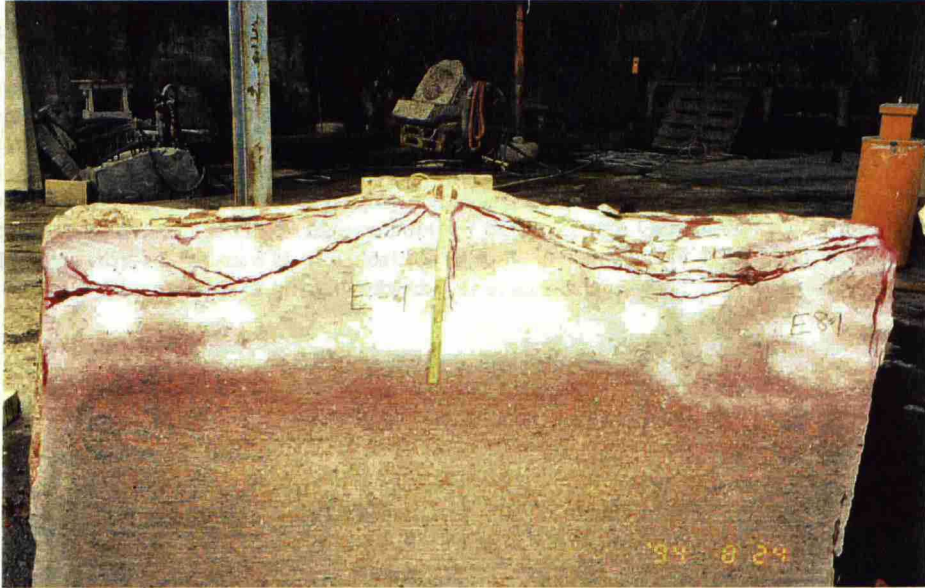
2.5.4 Sytytyksen vaikutus rakoiluun

Tarkasti louhittaessa paras sytytysmenetelmä on sellainen, jossa räjähdysaine reunareissä räjähtää mahdollisimman yhdenaikaisesti (Vuolio 1991, 153). Tunnelilouhinnassa käytettäessä Nonel LP -nalleja saattaa samalla numeroilla tapahtua eriaikaista räjähtämistä. Syynä on nallien hidastekappaleiden paloaikojen hajonta, joka kasvaa hidasteen paloajan kasvaessa (Vuolio 1991, 154). Tunnelin seinälle jää katkon räjäytyksen jälkeen porareian puolikkaita näkyviin, kuva 17, mikä merkitsee yhdenaikaista syttymistä ja yleensä siten hyvää louhintalaatua, pienentäen siten lujituksen kustannuksia.



Kuva 17. Porareian puolikkaita Vuosaaren junaratatunnelin seinämässä.

Porareikien puolikkaiden suuri määrä tunnelin seinässä ei silti takaa tilan pysyvyyttä tai pienennä lujituksen kustannuksia, kuva 18.



Kuva 18. Porareian puolikkaiden väliset raot jäävät huomaamatta, vaikka louhintajälki näyttäisi muuten hyvältä. (Olsson ja Bergqvist 1995, 27).

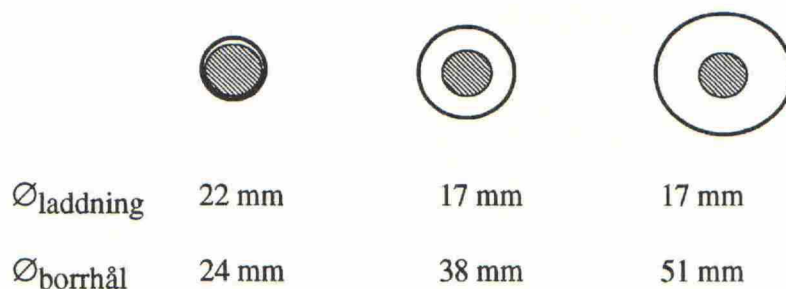
Olsson ja Bergqvist (1995, 26) huomauttavat, että kallion sisään jäävät, reiästä toiseen yhtyvät raot, voivat aiheuttaa kiven tippumista seinästä tai katosta, vaikka louhittu pinta näyttäisikin hyvälaatuiselta. Huolellinen rusnaus on syytä tehdä suhteellisen siloisesta pinnasta huolimatta. Kiven lujitustarvetta arvioidessa ei pidä myöskään hämääntyä hyvännäköisestä louhintajäljestä.

Tukholmassa, Södra Länkenin tutkimuskohteessa näkyvien reikien puolikkaiden määrä tunnelissa nousi 15 prosentista 70:een, kun kokeiltiin yleisesti käytössä olevan Nonel sytytyksen sijasta elektronisia nalleja (Olsson 1999, 14). Tutkimus tehtiin käyttäen Kemiitti 810 verrattavaa räjähdysainetta Site Sensitized Emulsion (SSE). Käytettäessä reunalinjassa 17 millimetrin F-putkeen verrattavaa 17 millimetrin Gurit-putkea ja sytyttimenä elektronisia nalleja, näkyvien reiän puolikkaiden määrä oli noin 75 prosenttia.

Samassa tutkimuksessa todettiin, että rakojen keskipituus testikatkoissa lyheni 30 senttimetristä 18 senttimetriin käytettäessä Nonel sytytyksen sijasta elektronista sytytystä, räjähdysaineen ollessa SSE. 17 millimetrin Gurit-putki nallitettuna elektronisilla nalleilla aiheutti 10 senttimetrin raon keskipituuden. Aikaisemmassa tutkimuskohteessa Skånessa, Vångan tunnelissa, käytettäessä elektronisia nalleja, SSE:n muodostamien rakojen pituus vaihteli 20–30 senttimetrin ja 17 millimetrin Gurit-putken aiheuttamien rakojen pituus 5-10 senttimetrin välillä.

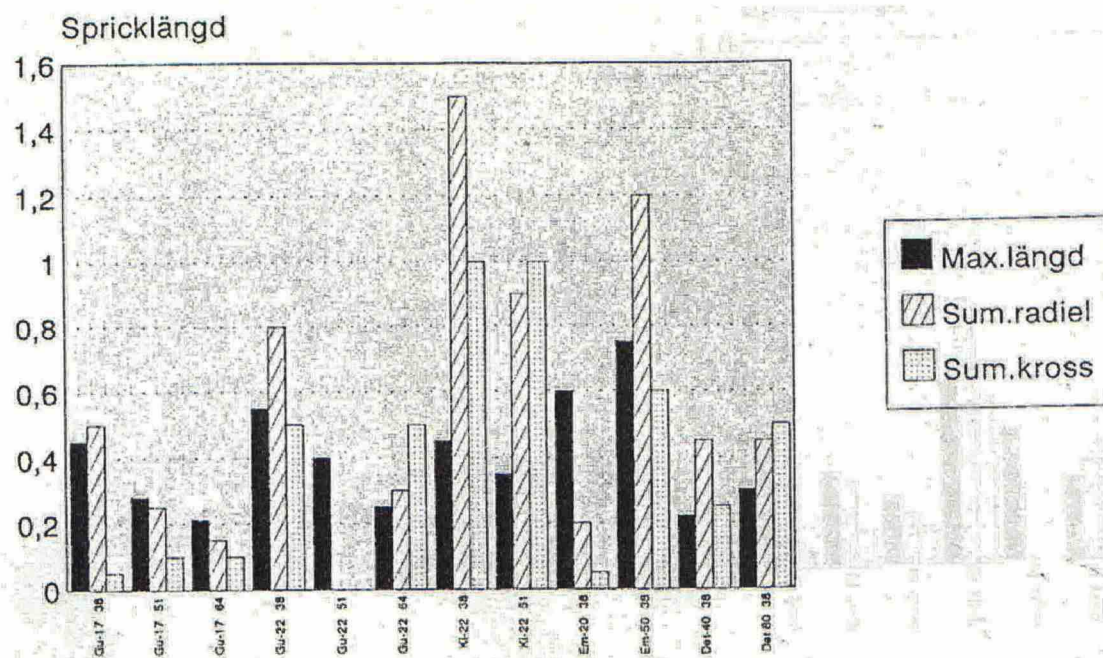
2.5.5 Porareiän ja räjähdysaineen halkaisijan suhteen, coupling ratio:n, merkitys rakoilussa

Olsson ja Bergqvist (1995, 28) tutkivat porareiän ja räjähdysaineen halkaisijan suhdetta, coupling ratio:ta, 17 millimetrin F-putkea vastaavalla 17 millimetrin Gurit-putkella. Porareiän halkaisijan ollessa 38 millimetriä pisimmäksi rakopituudeksi mitattiin 15 senttimetriä. Halkaisijan kasvu 51 millimetriin lyhensi rakojen pituuden alle viiden senttimetriin. Räjähdysaineen täyttöastetta porareiässä kuvaa kaava 4. Coupling ratio:ta (CR) on havainnollistettu kuvassa 19.



Kuva 19. Täyttöaste, eli coupling ratio (CR), on vasemmalta oikealle: 0,92, 0,45 ja 0,33. (Olsson ja Bergqvist 1995, 28).

CR-luvun kasvu lisää rakojen pituuden kasvun lisäksi myös porareiästä lähtevien säteittäisten rakojen määrää (Olsson ja Bergqvist 1993, 38). 17 ja 22 millimetrin Gurit-putkella rakojen yhteenlaskettu pituus kasvaa noin kaksinkertaiseksi CR:n kaksinkertaistuessa, kuva 20.



Kuva 20. Porareiän täyttöasteen pieneneminen vähentää rakojen määrää sekä lyhentää pituutta. (Olsson ja Bergqvist 1993, 39).

2.5.6 Olssonin ja Ouchterlonyn rikkoutumisvyöhykkeen laskentamenetelmä

Olssonin ja Ouchterlonyn (2003, 24) rikkoutumisvyöhykkeen laskentamenetelmällä voidaan arvioida muodostuvaa rakoilua seuraavasti

$$R_c = R_{co} F_h F_t F_v F_b \quad (10)$$

missä R_c = Maksimirakojen muodostama rikkoutumisvyöhyke [m]
 R_{co} = Laskennallinen rakopituus tietyllä räjähdysainetyypillä [m]
 F_h = Reikävälin korjauskerroin
 F_t = Sytytysmenetelmän korjauskerroin
 F_v = Veden vaikutuksen korjauskerroin
 F_b = Kallion ominaisuuksien korjauskerroin.

Gurit tyypisillä räjähdysaineilla kuivassa reiässä R_{co} lasketaan seuraavasti

$$R_{co} = 0,2 \left(\frac{f}{0,34} \right)^{1,05} \left(\frac{q}{0,38} \right)^{0,88} \quad (11)$$

missä f = CR-luku
 q = panostusaste [kg/m].

17 millimetrin F-putkipanokselle 51 millimetrin reiässä saadaan kaavalla 11 rikkoutumisvyöhykkeen syvyydeksi (R_{co}) 8 senttimetriä. 22 millimetrin Guritilla 64 millimetrin reiässä vastaava syvyys (R_{co}) on 20 senttimetrin.

Käytettäessä normaalia sytytysmenetelmää on kertoimien F_h ja F_t tulo kaksi (sähkö- tai nonel nallit $F_h * F_t = 2$). Kuivan reiän kerroin F_v on yksi. Kallion ominaisuuksien vaikutusta arvoon F_b ei ole vielä tutkittu, joten käytetään siinä arvo yksi.

Nyt ainoa tekijä rikkoutumisvyöhykkeen kasvuun on sytytysmenetelmän ja reikävälin vaikutus. Siten rikkoutumisvyöhykkeen maksimisyvydeksi (R_c) 17 millimetrin F-putkella 51 millimetrin reiässä lasketaan 15 senttimetriä. 22 millimetrin Gurit-putkella 64 millimetrin reiässä rikkoutumisvyöhykkeen maksimisyvydeksi (R_c) saadaan 40 senttimetriä.

Olssonin ja Ouchterlony'n tutkimuksessa (2003) on esitetty kaava jolla voidaan laskea rikkoutumisvyöhyke Kimulux-tyyppisille räjähdysaineille. Kemiitti 810 eroaa merkittävästi Kimuluxesta, joten sen rikkoutumisvyöhykkeen määrittäminen ei onnistu tällä hetkellä, vaan vaatii kaavassa käytettävien kertoimien määrittämistä Kemiitti 810 räjähdysaineelle.

3. Kenttätutkimukset

3.1 Tutkimuskohteen yleinen geologia

Tutkimuskohde sijaitsee Korsossa, Vantaalla. Tutkimukset tehtiin Vuosaaren sataman junaratatunnelin tunneliurakassa 5, VUOLI TU 5.

Tutkimuskohteessa on pääkivilajina keski-karkearakeinen graniitti, jossa esiintyy paikoin tummia kiillegneissiosueita. Graniitissa esiintyy hematiittitäyteisiä hiusrakoja (Harju 2006).

Rakomittausten mukaan tutkimusalueella esiintyy rakosuuntia seuraavasti (kaateen suunta ja suuruus asteissa): 315/80, 210–240/80, 280/60 ja 170/65–90. Esimerkiksi rakosuunta 315/80 tarkoittaa, että raon pinta on 80 astetta vaakatasosta alaspäin (lähes pystysuora) ja rakopinnan normaali on suuntaan 315 (luoteeseen). Tunneli tutkimuspaikalla kulkee pohjois-etelä suunnassa noin 30 metriä merenpinnan alapuolella.

3.2 Räjähdysnopeuksien mittaus

3.2.1 Mittausmenetelmä

Räjähdysnopeuksien mittauspaikkoina käytettiin palopostisyvennyksiä. Räjähdysnopeus porareiässä eri räjähdysaineilla mitattiin Microtrap VOD/Data Recorder -laitteella. Laite mittaa vastuksen muutosta ajan funktiona kahden megahertsin taajuudella. Mittalaite on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Microtrap VOD/Data Recorder -laite mittaa ja tallentaa vastuksen puolen mikrosekunnin välein.

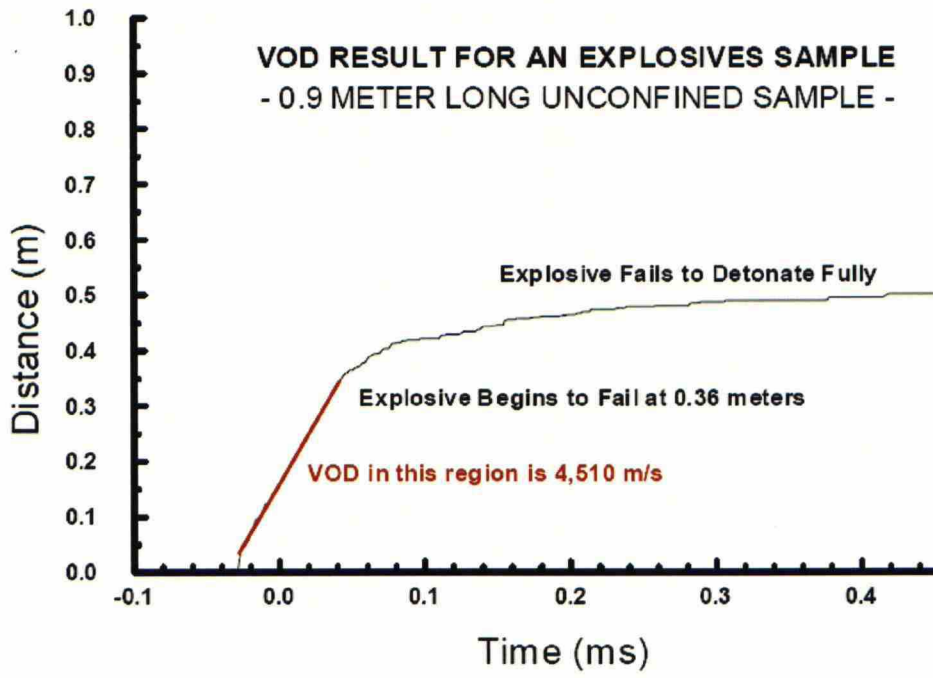
Koaksiaalikaapeli, jonka vastus on 3,38 ohmia per metri, oikosuljettiin ja kiinnitettiin pohjapanokseen tai nalliin teipillä tiukasti, kuva 22. Kemitti 810:tä käytettäessä koaksiaalikaapeli teipattiin kiinni Nobel Prime räjäyttimeen ja patruunoitua räjähdysainetta käytettäessä itse patruunaan.



Kuva 22. Sinistä, oikosuljettua koaksiaalikaapelia kiinnitetään Nobel Prime räjäyttimeen.

Koaksiaalikaapeli kulkeutui reiän pohjalle räjähteen mukana ja se johdettiin mittalaitteeseen, jonka jälkeen laite oli valmis mittaamaan. Mittaus käynnistyi räjähdys hetkellä. Räjähdyksen eteneminen porareian pohjalta suuta kohti, jolloin räjähdyksen edetessä mittalankana toimivan koaksiaalikaapelin vastus pienenee, räjähdyksen tuhotessa sitä. Räjähdyksenopeusmittauksien raportit kuvaajineen ovat liitteissä A.

Räjähdyksen jälkeen mittaustiedot siirrettiin tietokoneelle ja mittaustieto käsiteltiin Microtrap-ohjelmalla. Ohjelma muuntaa vastuksen muutoksen ajan funktiona nopeudeksi (metriä per sekunti), kun tiedetään koaksiaalikaapelin vastus. Tulos tutkitaan ohjelmalla graafisesti, valitsemalla aloituspiste ja lopetuspiste jonka välillä halutaan tietää räjähdyksenopeus, kuva 23.



Kuva 23. Räjähdysopeus on 4510 m/s välillä 0,05–0,35 m.
(MREL 2003, 59).

3.2.2 Emulsiopanostus räjähdysnopeusmittauksissa

Normaalisti emulsiolaitteella panostetaan ensimmäiseksi perän avausreiät, jotka laitetaan täyteen ja siitä lähdetään asteittaisesti pienentämään rantukokoa siirryttäessä seinälinjaa kohti. Tällöin laite lämpenee ja tuottaa oikean määrän räjähdysainetta reikään tasaisella syötteellä.

Räjähdysnopeusmittaukset suoritettiin viikonloppuisin, jolloin panostuslaite ja emulsion syöttösystemit eivät päässeet lämpenemään normaalille käyttötasolle. Mittauksissa panostettiin pieniä yksittäisiä rantuja noin tunnin välein. Tämä aiheutti sen, että pohja- ja varsipanokset eivät olleet täysin sitä mihin tähdättiin (350 g/m ja 600 g/m).

Reikään menevän räjähdysaineen määrän arvioiminen tapahtui seuraavasti. Aluksi mitattiin reiän pituus mittanauhalla. Seuraavaksi panostusletku työnnettiin porareian pohjalle ja kone alkoi syöttää emulsiota reikään. Siinä vaiheessa kun kone alkoi vetää panostusletkua, luettiin koneen näytöltä pohjapanos, kuva 24.



Kuva 24. Panoskoot luettiin emulsiopanostuslaitteen näytöltä 100 gramman tarkkuudella.

Kummallakin rantukoolla pohjapanoksen teoreettinen koko on 700 grammaa. Pohjapanos oletetaan leviävän puolen metrin matkalle reiän pohjasta alkaen. Kun letku lähtee kelautumaan takaisin, tulee pohjapanokseen mukaan myös varsipanos.

Emulsion syöttö lopetettiin reiän suulla ja näytöltä luettiin reikään mennyt reikäpanos. Pohjapanos lasketaan tässä työssä seuraavasti

$$p_{pohja} = pohjapanos + \left(\frac{reikäpanos}{reikäpituus} * 0,5m \right)$$

missä pohjapanos on grammoina ja reikäpituus metreinä.

Varsipanos lasketaan seuraavasti

$$p_{varsi} = \left(\frac{reikäpanos - pohjapanos}{reikäpituus} \right).$$

Pohja- ja reikäpanoksen tarkkuuden arviointi emulsiolaitteen näytöltä luettaessa oli testien aikana 100 grammaa.

3.3 Rikkoutumisvyöhykkeen rakojen mittaus

3.3.1 Testikatkojen louhinta

Rikkoutumisvyöhykkeen rakojen mittaukset suunniteltiin tehtävän tunnelin seinän poikkileikkauksesta. Tutkimuskatkoja oli kaksi kumpaakin tyyppiä (emulsio- ja patruunapanostus) ja ne olivat peräkkäisiä katkoja suhteellisen tasalaatuisessa kalliassa. Kaksi katkoista panostettiin käyttämällä kolmessa reunimmaisessa linjassa patruunoituja räjähdysaineita emulsioräjähteen sijaan. Kaksi muuta katkoa olivat täysin normaaleja emulsiopanostettuja katkoja. Panostusmenetelmät ovat nähtävissä kuvissa 25 ja 26.

Poraus- ja panostussuunnitelmat testikatkoille on esitetty liitteessä B. Teoreettinen reikäväli reunalinjassa oli 60 senttimetriä ja etu apulinjaan 80 senttimetriä. Apulinjan reikäväli oli 120 senttimetriä ja sen etu kolmanteen linjaan 80 senttimetriä. Kolmannessa linjassa reikäväli oli 120–150 senttimetrin välillä. Patruunakatkot poikkesivat emulsiokatkoista ainoastaan kolmen reunimmaisen rivin panostuksen osalta. Panostusraportit testikatkoista ovat liitteessä C. Liite C sisältää myös panostusraportit emulsiopanostuslaitteesta.

Measure while drilling (MWD) mahdollistaa porattujen reikien sijainnin toteamisen graafisesti. MWD mittaa muun muassa myös porausnopeutta, jolla voidaan arvioida kiven kovuutta. Teknisistä ongelmista johtuen MWD-tulokset saatiin vain patruunakatkoista, liite D.



Kuva 25. Nobel Prime sytytin ja nalli työntyy panostusputken edellä porareikään emulsiopanostusmenetelmässä.



Kuva 26. 17 millimetrin F-putkia panostetaan reunalinjaan.

3.3.2 Kalliolohkojen sahaus

Kalliolohkot irrotettiin tunnelin seinästä sahaamalla, jotta päästäisiin mittaamaan testikatkojen aiheuttamia rakoja seinän poikkileikkauksesta. Sahauspaikan valintaan vaikutti useampi tekijä. Lohkojen sahaukset tehtiin noin puolesta välistä katkoja, jottei voimakkaampi pohjapanos vääristänyt tuloksia. Sahauskohdiksi soveltuivat sellaiset kohdat tunnelia jossa oli porareian puolikkaita näkyvissä, jotta pystyttiin mittaamaan raon pituus porareistä alkaen. Sahauskorkeus oli oltava yli kaksi metriä tunnelin pohjalta, jotteivät voimakkaasti panostetut pohjareiat aiheuttaneet tutkittavaan poikkileikkauspintaan rakoilua. Emulsiolla panostetun testikatkon sahaus on esitetty kuvassa 27, patruunoilla panostetun kuvassa 28.



Kuva 27. Reunalinjat Kemiitti 810:llä panostetun testikatkon sahausen valmistelua, timanttiterän halkaisija on 600 mm.



Kuva 28. Patruunoilla panostetun testikatkon sahaus jatkuu halkaisijaltaan 1200 mm terällä.

Ensimmäiseksi tunnelin seinään sahattiin halkaisijaltaan 600 millimetrin timanttiterällä avaus, joka syvennyttiin 1200 millimetrin terällä. Maksimisahaussyvyudeksi jäi siten 600 millimetriä, riippuen kallion pinnan muodosta. Kummankin sahatun lohkon pystymitta oli noin kaksi metriä vaakamitan ollessa noin 60 senttimetriä.

3.3.3 Sahattujen kalliolohkojen irrotus

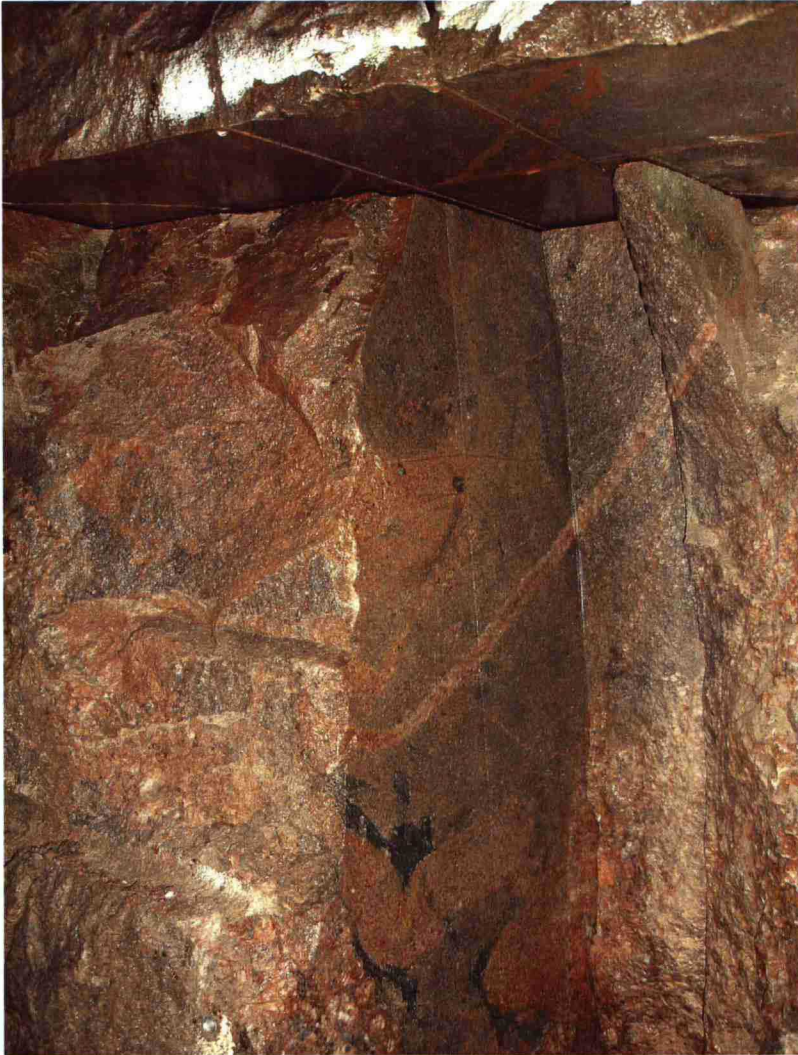
Kalliolohkot irrotettiin piikkaamalla, jotta eri räjähdysainetyyppien aiheuttamaa rakoilua pääsi mittaamaan sahatuista poikkileikkauksista. Piikkaus tehtiin varovaisesti koneellisesti, tulos nähtävissä kuvassa 29. Tämän jälkeen pintaa puhdistettiin esiin tarkemmin rusnauskangella ja käsin lohkareita irrottamalla.



Kuva 29. Räjähdysaineen aiheuttamia rakoja on jo nähtävillä patruunakatkon kohdalla suoritetusta sahauksesta.

3.3.4 Rakojen mittaus tunkeumanesteen avulla

Kalliolohkojen irrotuksen jälkeen tutkittavat pinnat harjattiin puhtaaksi suuremmista partikkeleista. Seuraavaksi pinnat pyyhittiin kostealla puuvillaliinalla tarkasti puhtaaksi lopusta pölystä ja liasta, ja annettiin kuivua, kuva 30.



Kuva 30. Sahattu kalliopinta on valmiina tunkeumanesteen levitystä varten.

Tunkeumanesteenä käytettiin Magnaflux Spotchek SKL-WP Penetrant -spraysuihkettä, jota suihkutettiin tutkittavalle pinnalle ohuelti. Suihkeen annettiin tunkeutua rakoihin noin 20 minuuttia, kuva 31.



Kuva 31. Tunkeumaneste on suihkutettu sahatulle poikkileikkauspinnalle.

Vaikutusajan jälkeen pinta pyyhittiin puhtaalla, kuivalla puuvillaliinalla. Rakoihin kulkeutunut tunkeumaneste jäi näin paikalleen ja ylimääräinen neste pyyhittiin pois.

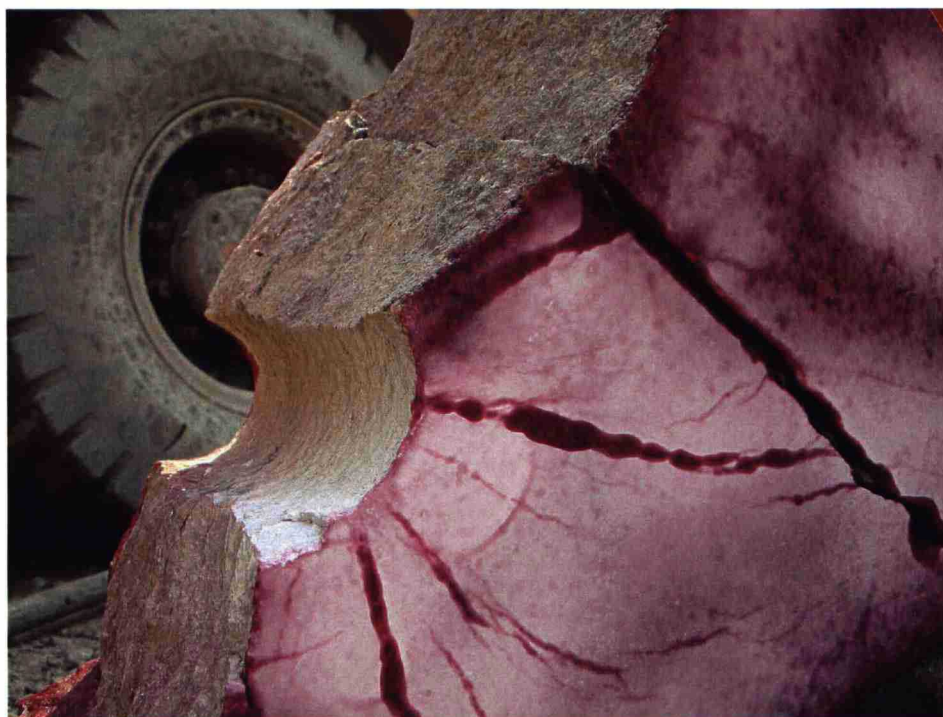
Seuraavaksi tutkittavaan pintaan suihkutettiin Magnaflux Spotcheck SKD-S2 Developer -spraysuihketta ja annettiin vaikuttaa muutaman minuutin. Tämä suihke toimii kehittimenä joka paljastaa raot punaisina vaalealla taustalla, kuva 32.



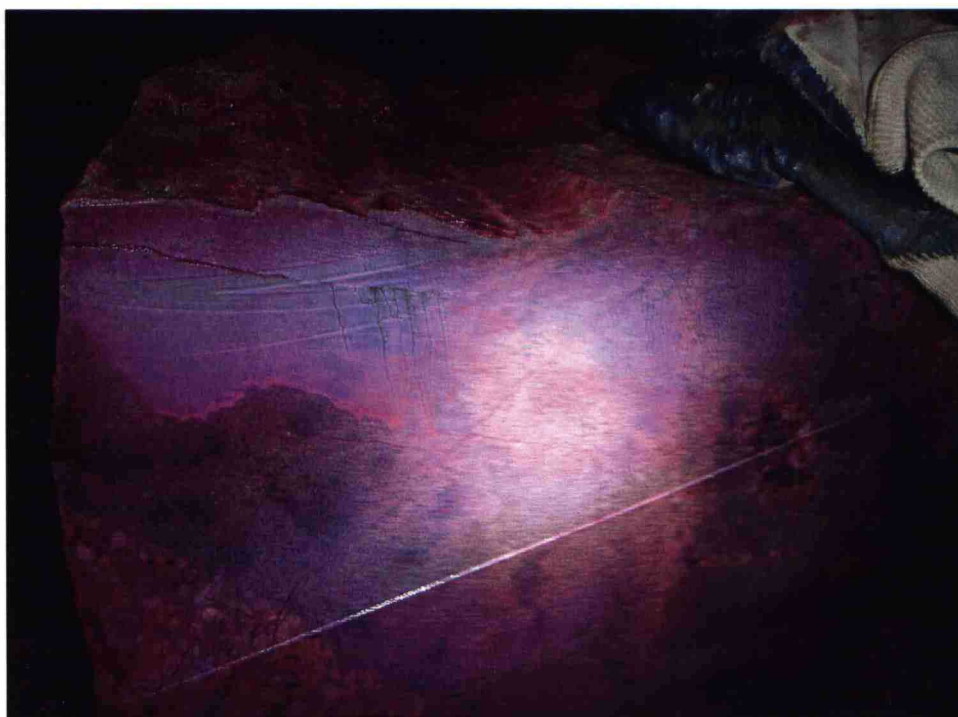
Kuva 32. Porareiän puolikkaasta lähtevä rako paljastuu selkeästi tunkeumanesteen ja kehittimen avulla.

Lopuksi porarei'istä lähtevien rakojen pituudet mitattiin yhden senttimetrin tarkkuudella ja kirjattiin. Rakojen mittausta suoritettiin sahattu tutkimuspinta kerrallaan, jolloin nesteiden vaikutusaika pysyi niiden käyttöohjeiden mukaisena.

Sahauksen ja piikkauksen yhteydessä tunnelin seinästä irtosi lohkoja, joista myös mitattiin rakojen pituudet. Niistä lohkareista, joita jaksoi käsin nostaa, mitattiin rakoilu maanpinnalla, kuva 33. Raskaammista lohkareista mittaukset tehtiin tunnelissa, kuva 34.



Kuva 33. Raot näkyvät paremmin valossa maanpäällä, kuin pimeässä tunnelissa.



Kuva 34. Raskaammat lohkaarit tutkittiin tunnelissa.

4. Tulokset

4.1 Räjähdysnopeudet

Räjähdysnopeusmittauksia tehtiin yhteensä 26 kappaletta seuraavilla räjähdysaineilla: 17 millimetrin F-putkipanos, 28 millimetrin Aniittipaperipatruuna sekä Kemiitti 810 (350 ja 600 grammaa per metri). Kaikki räjähdysnopeuskuvaajat, jotka mittalaitteisto tallensi, ovat liitteessä A.

Epäonnistuneissa testeissä mittalaitteisto ei saanut tallennettua mitään, jolloin syynä voi olla esimerkiksi ongelma mittauslaitteiston herkkyydessä. Epäonnistuneet testit ovat numeroiltaan 6 (Kemiitti 810 350 g/m), 19 (Kemiitti 810 600 g/m) ja 22 (Kemiitti 810 350 g/m).

4.1.1 F-putkipanos 17 mm

Reunalinjassa käytettävällä 17 millimetrin F-putkipanoksella kaikki kolme mittausta onnistui täydellisesti. Oy Forcit Ab ilmoittaa räjähdysnopeudeksi noin 2400 metriä sekunnissa, joten mitattujen tulosten keskiarvo 2518 metriä sekunnissa täsmää hyvin valmistajan kanssa. Taulukkoon 5 on koottu räjähdysnopeudet. 17 millimetrin F-putkipanoksen räjähdysnopeuskuvaajat ovat liitteessä A.

Taulukko 5. 17 mm F-putkipanoksen räjähdysnopeus 51 mm porareiässä.

Räjähdysaine	Pohja-panos	Varsi-panos	Reiän pituus [m]	Panostusaste [g/m]	Räjähdysnopeus [m/s]
17 mm F-putkipanos	28 mm Aniitti	9 putkea	4,30	210	2453
17 mm F-putkipanos	28 mm Aniitti	9 putkea	4,30	210	2516
17 mm F-putkipanos	28 mm Aniitti	7 putkea	3,50	210	2585
Keskiarvo					2518

4.1.2 Kemiitti 810 350 g/m

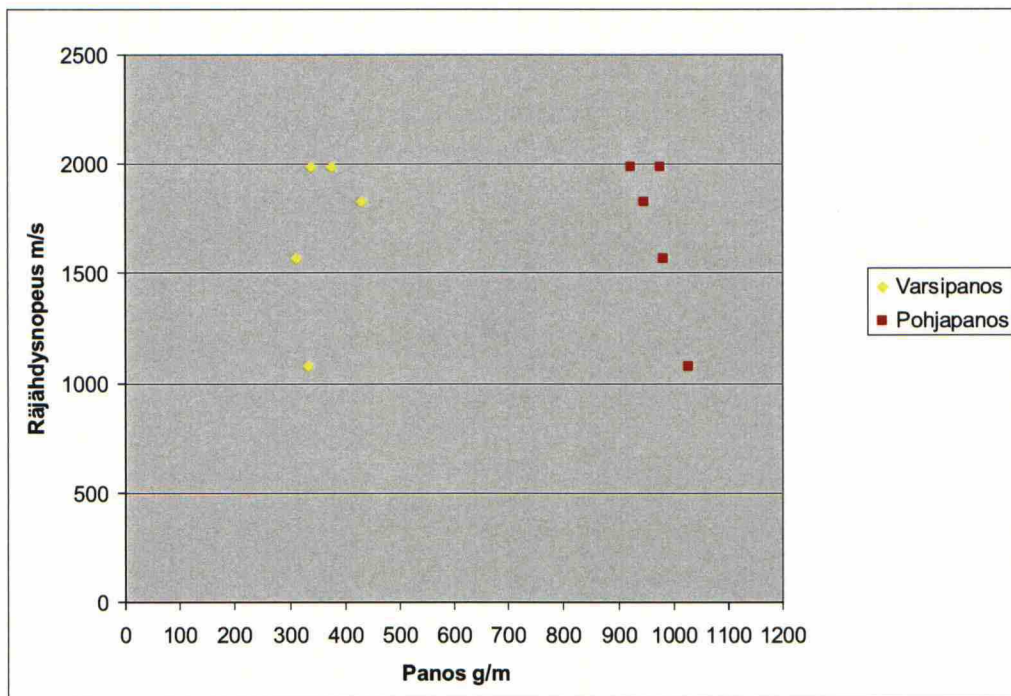
Reunalinjassa käytettävällä Kemiitti 810 350 grammaa per metri rannuilla saatiin kymmenen onnistunutta mittausta. Kolmessa mittauksessa kymmenestä kuitenkin joko pohja- ja/tai varsipanokset olivat liian suuria, jotta ne voisi luokitella 350 grammaa per metri rantuun. Suurilla panoksilla räjähdysnopeudet kasvoivat enimmillään melkein 4000 metriä sekunnissa nopeuteen. Syy liian suuriin panoksiin oli panostuslaitteen käyttäminen tilanteessa jossa panostetaan yksi reikä kerran tunnissa pienellä rannulla, jolloin kone ei pääse lämpenemään ja syöttämään emulsiota tasaisesti ja oikein. Teoreettisesti pohjapanoksen suuruus pitäisi olla tällä rantukoolla 700 grammaa per metri.

Kahdessa mittauksessa kymmenestä mittalaite laski räjähdysnopeuden äärettömän suureksi. Syynä saattaa olla esimerkiksi ohuen 350 grammaa per metri rannun epätasainen palaminen tai rannun räjähtämisen katkeilu kallion rakoilussa. Aivan yhtä mahdollista on myös se, että mittalaite ei vain onnistunut tallentamaan räjähdystapahtumia.

Räjähdysnopeuden keskiarvoksi saatiin 1692 metriä sekunnissa, taulukko 6. Korrelaatio pohja- ja varsipanoksella räjähdysnopeuden kanssa on esitetty kuvassa 35. 350 grammaa per metri rannun räjähdysnopeuskuvaajat ovat liitteessä A.

Taulukko 6. Räjähdysnopeus vaihteli 350 g/m teoreettisella rannulla 1000 ja 2000 m/s välillä.

Reiän pituus [m]	Pohjapanos [g]	Varsipanos [g/m]	Räjähdysnopeus [m/s]
3,4	924	375	1989
3,6	947	431	1830
3,9	982	312	1572
4,5	978	338	1990
3,2	1028	335	1077
Keskiarvo	972	358	1692



Kuva 35. Pohja- ja varsipanosen suuruuden vaikutus räjähdysopeuteen 350 g/m rannalla ei ole yksiselitteinen.

4.1.3 Kemiitti 810 600 g/m

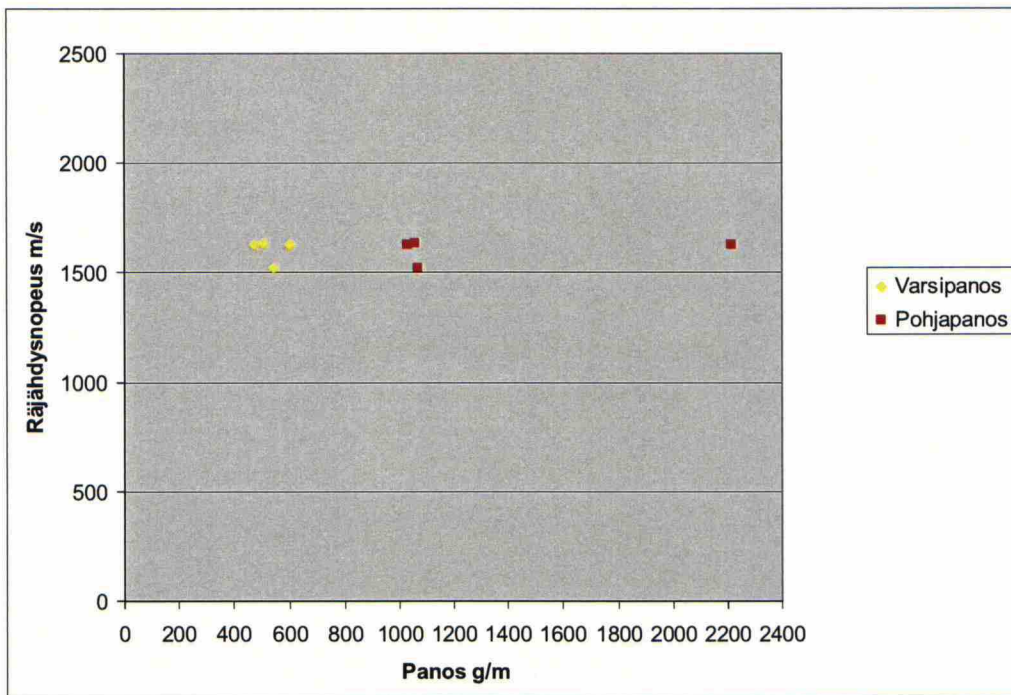
Apulinjassa käytettävällä Kemiitti 810:n 600 grammaa per metri rannuilla saatiin seitsemän onnistunutta mittausta. Kahdessa mittauksessa seitsemässä joko pohja- ja/tai varsipanokset olivat liian suuria, jotta ne voisi luokitella 600 grammaa per metri rantuun. Palonopeus kasvoi tällöin yli 4000 metriä sekunnissa nopeuteen. Syy liian suuriin panoksiin oli panostuslaitteen käyttäminen tilanteessa jossa panostetaan yksi reikä kerran tunnissa pienellä rannulla, jolloin kone ei pääse lämpenemään ja syöttämään emulsiota tasaisesti ja oikein. Teoreettisesti pohjapanoksen suuruus pitäisi olla tällä rantukoolla 700 grammaa per metri.

Yhdessä mittauksessa mittalaite antoi räjähdysnopeuden äärettömän suureksi. Syynä saattaa olla esimerkiksi rannun epätasainen palaminen tai rannun huono räjähdysvälitys rakoilleessa kalliossa. Mahdollista on mittalaitteen toimintahäiriö.

Räjähdysnopeuden keskiarvoksi saatiin 1606 metriä sekunnissa, taulukko 7. Pohja- ja varsipanoksen suuruuden vaikutus räjähdysnopeuteen on esitetty kuvassa 36. 600 grammaa per metri rannun räjähdysnopeuskuvaajat ovat liitteessä A.

Taulukko 7. Räjähdysnopeus vaihteli 600 g/m teoreettisella rannulla vähemmän kuin 350 g/m rannulla.

Reiän pituus [m]	Pohjapanos [g]	Varsipanos [g/m]	Räjähdysnopeus [m/s]
4,6	2217	600	1631
5,4	1070	543	1525
5,0	1060	508	1637
5,4	1033	475	1629
Keskiarvo	1345	531	1606



Kuva 36. Räjähdysopeus on 600 g/m rannulla noin 1600 m/s pohja- tai varsipanoksen suuruudesta riippumatta.

4.1.4 Aniitti paperipatruuna 28 mm

28 millimetrin Aniitti paperipatruunaa käytetään apulinjassa. Aniitti tiivistettiin panostuskepillä kolmen patruunan välein, panostusohjeiden mukaisesti. Kaikki kolme mittausta epäonnistui. Kahdessa niistä saatiin äärettömän suuri tulos ja yhdessä räjähdysnopeudeksi mitattiin 1133 metriä sekunnissa. Tulos on nähtävissä taulukossa 8. 28 millimetrin Aniitin räjähdysnopeuskuvaajat ovat liitteessä A.

Taulukko 8. Mitattu Aniitin räjähdysnopeus on noin puolet pienempi, mitä Oy Forcit Ab ilmoittaa. * = tiivistyminen patruuna-aineilla voi olla jopa 30 %. (Oy Forcit Ab 2006, 21).

Räjähdysaine	Pohja-panos	Varsi-panos	Reiän pituus [m]	Panostusaste [g/m]	Räjähdysnopeus [m/s]
28 mm Aniitti	28 mm Aniitti	9 patruunaa	4,00	670 *	1133

Syynä hitaaseen räjähdysnopeuteen ja äärettömän suurin nopeuksiin saattaa olla patruunoiden tiivistämisen aiheuttamat panostusasteen vaihtelut porareiässä ja/tai samalla mahdollisesti mutkalle menevän mittauskaapeli.

4.2 Paine porareiän seinässä

Mitatuista räjähdysnopeuksista (VOD) voidaan laskea räjähdysaineen aiheuttama paine porareiän seinään kaavoilla 4,6,7,8 ja 9. Tutkittujen räjähdysaineiden paineet porareiän seinässä on ilmoitettu taulukossa 9. Mukaan ei ole otettu 28 millimetrin Aniitti paperipatruunaa, koska sillä saatiin ainoastaan yksi räjähdysnopeus mitattua.

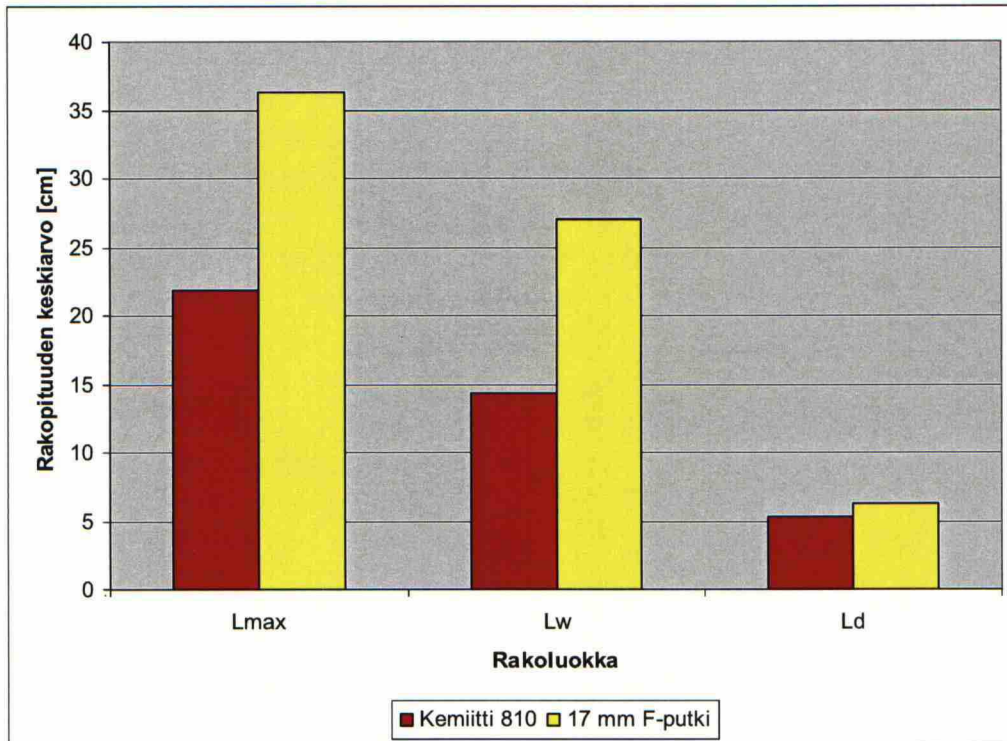
Taulukko 9. 350 g/m rannun aiheuttama paine porareiän seinässä on 60 % F-putkipanoksen aiheuttamasta paineesta. * = mitattujen rantujen keskiarvo 358 g/m. ** = mitattujen rantujen keskiarvo 531 g/m.

Räjähdysaine Ø * pituus [mm]	CR 51 mm porareiässä	VOD [km/s]	Laskennallinen paine porareiän seinässä (Hustrulid) P _{h1} [MPa]	Laskennallinen paine porareiän seinässä (Olsson ja Ouchterlony) P _{h2} [MPa]
F-putkipanos 17*460	0,33	2,52	62	102
Kemiitti 810 350 g/m rantu *	0,39	1,69	37	78
Kemiitti 810 600 g/m rantu **	0,54	1,61	73	160

4.3 Rikkoutumisvyöhyke

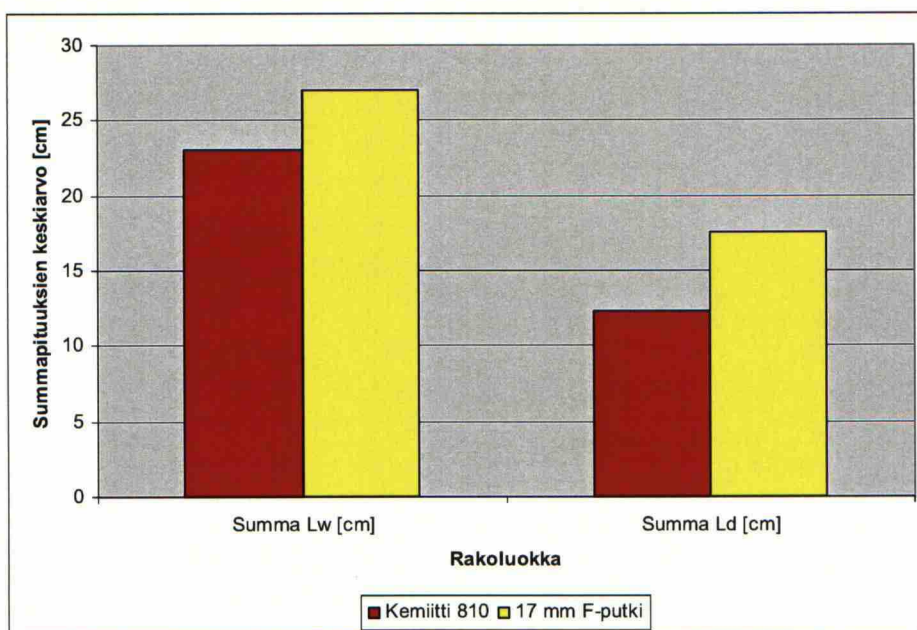
4.3.1 Rakomittaukset

Porareian puolikkaista mitatut rakopituudet ovat esitetty liitteessä E. Pituusluokittain lasketut keskiarvot ovat esitetty kuvassa 37.



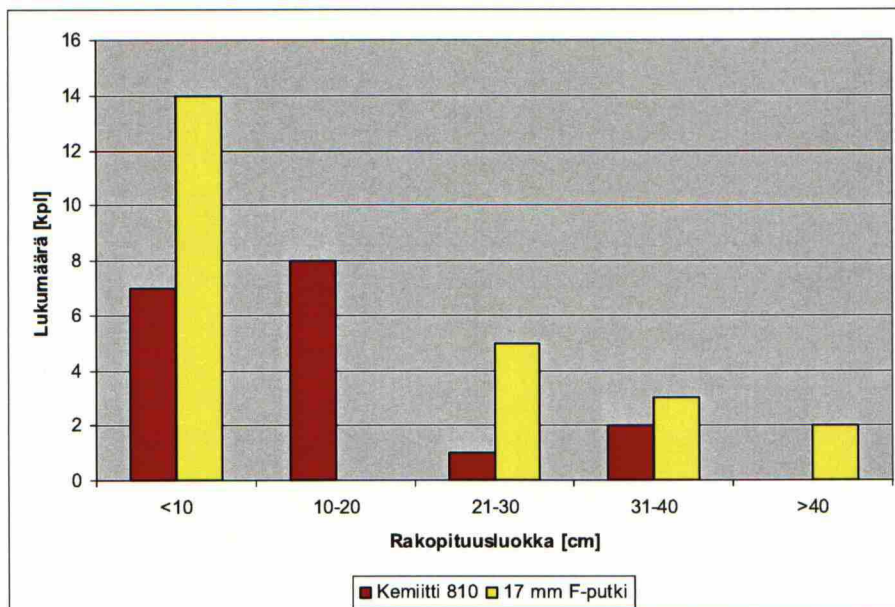
Kuva 37. Kemiitti 810 350 g/m rannun aiheuttamat keskimääräiset rakopituudet pituusluokittain ovat lyhyempiä kuin 17 mm F-putkipanoksen.

Kustakin reiästä lähtevien rakojen pituudet ovat laskettu yhteen (summa Lw ja Ld) rakopituusluokittain liitteessä E. Summa Lw:stä ja Ld:stä lasketut keskiarvot ovat esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Kemiitti 810:n summatut rakopituudet pituusluokittain 350 g/m rannulla ovat lyhyempiä kuin 17 mm F-putkipanoksella.

Rakojen lukumäärä 10 senttimetrin pituusluokittain on esitetty kuvassa 39.



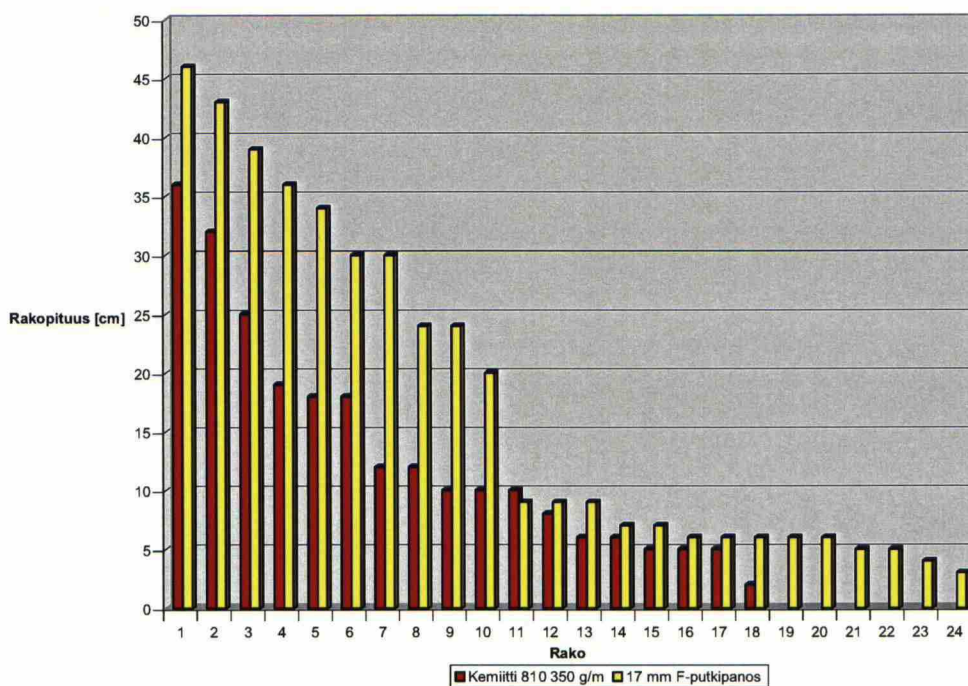
Kuva 39. Kemiitti 810:llä on vähemmän pitempiä rakoja 350 g/m rannulla kuin F-putkella.

Rakomittauksien tuloksia (liite E) on käsitelty tilastollisesti taulukossa 10.

Taulukko 10. Koko aineiston tilastollisen tarkastelun perusteella 17 mm F-putkipanos aiheuttaa 4 cm pidemmän raon kuin Kemiitti 810:n 350 g/m rantu..

	Kemiitti 810	F-putki
Yhteispituus [cm]	239	414
Keskiarvo [cm]	13	17
Keskihajonta [cm]	10	14
Mediaani [cm]	10	9

Kuvassa 40 on rakojen pituusjakauma, jonka perusteella voidaan todeta kummankin räjähdysainetyypin merkitsevät maksimirakopituudet (>10 cm) ja niiden keskipituudet. Havainnot kuvasta 40 on koottu taulukkoon 11.



Kuva 40. Kemiitti 810:lle voidaan todeta, että sen merkitsevät maksimirakopituudet 350 g/m rannulla ovat lyhyempiä kuin 17 mm F-putkella.

Taulukko 11. 17 mm F-putkipanos aiheuttaa 9 cm pidemmän keskimääräisen maksimiraon kuin Kemiitti 810:n 350 g/m rantu.

	Kemiitti 810	F-putki
Merkitsevät maksimirakopituudet [cm]	10–36	20–46
Keskimääräinen maksimirakopituus [cm]	25	34

4.3.2 Visuaaliset havainnot sahatuista pinnoista

Patruunakatkoon sahatuista pinnoista silmämääräisesti tutkimalla havainnoitiin seuraavia asioita:

- räjäytyksen muodostamat raot ovat lähteneet selkeästi vaakatasossa jäljelle jäävää kalliota kohti
- vähän porareikien välisiä, pystysuuntaisia, rakoja.

Syynä tähän on luultavimmin 17 millimetrin F-putkipanoksen jarrupalat, jotka toimivat samalla keskittiminä porareissä. Tällöin räjähdys tapahtuu ideaalisesti keskellä porareikää ja kallio leikkaantuu siististi reikien välissä.

Emulsiokatkon tutkimuspinnasta havainnoitiin seuraavat seikat:

- räjäytyksen muodostamat raot ovat suuntautuneet suhteellisen satunnaisesti
- selkeitä porareikien välisiä, pystysuuntaisia, rakoja.

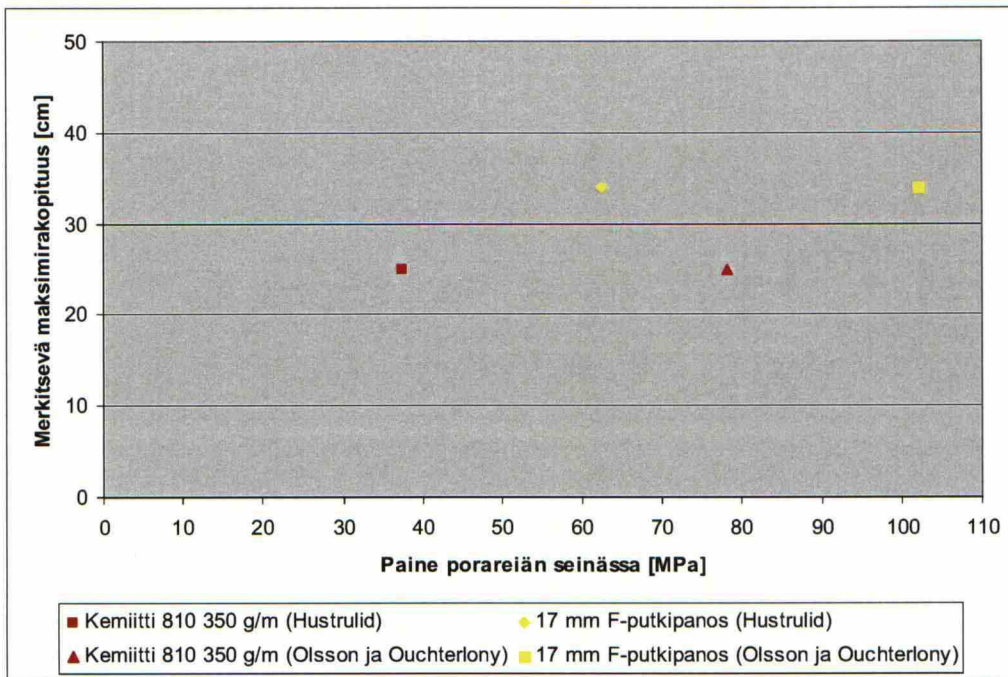
Rakojen satunnainen suuntautuminen johtunee seuraavista seikoista:

- emulsiopanoksen ohuen rannun sijainti reiän pohjalla
- Kemiitti 810 350 g/m rannun suhteellisen hidas räjähdysnopeus, jolloin hitaampi räjähdysnopeus saattaa aiheuttaa enemmän kallion repimistä räjähdysten aikana.

Sahatuista pinnoista tutkittiin myös muuta rakoilua. Merkittävää apulinjan tai kenttäreikien muodostamaa rakoilua ei löytynyt emulsio- ja patruunanapanostuskatkoihin sahatuista tutkimuspinnosta. Voidaan siten todeta, että panokset apulinjassa tai kentässä eivät olleet liian voimakkaita.

4.4 Paine porareiän seinässä ja rakopitus

Reunalinjassa käytettävien räjähdysaineiden paineet porareiän seinässä (taulukko 9) ja merkitsevät maksimirakopituudet (taulukko 11) ovat yhdistetty kuvaan 41. Kuvasta 41 on havaittavissa, että eri laskentamenetelmät paineelle aiheuttavat merkittävästi erilaiset paineet porareiän seinään.



Kuva 41. Suurempi paine aiheuttaa pidemmän raon.

4.5 Rakoluokkien pituussuhteet

Räjähdysaineiden raonmuodostamisominaisuuksia kuvaavat suhdeluvut L_{\max}/L_w , L_{\max}/L_d ja L_w/L_d ovat laskettu liitteen E rakopituuksista. Suhdeluvut ovat esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Kemiitti 810:llä on pienemmät suhdeluvut 350 g/m rannulla L_{\max}/L_d ja L_w/L_d kuin F-putkella. Suhdeluku L_{\max}/L_w on pieni kummallakin räjähdysaineella.

	L_{\max}/L_w	L_{\max}/L_d	L_w/L_d
Kemiitti 810	1,5	4,1	2,7
F-putki	1,3	5,8	4,3

Suhdeluvut osoittavat taulukon 12 mukaan, että Kemiitti 810:llä on hieman pidemmät maksimiraot suhteessa laajalle levinneisiin rakoihin kuin F-putkella. Taulukosta 12 havaitaan myös, että laajalle levinneiden ja lyhyiden rakojen suhde on F-putkella suurempi kuin Kemiitti 810:llä.

5 Tulosten tarkastelu

5.1 Räjähdysnopeudet

5.1.1 F-putkipanos 17 mm

Räjähdysainevalmistaja Oy Forcit Ab ilmoittaa 17 millimetrin F-putkipanokselle räjähdysnopeudeksi noin 2400 metriä sekunnissa (Oy Forcit Ab 2006, 20). Tässä tutkimuksesta mitattu keskiarvo F-putkelle 2518 metriä sekunnissa, 51 millimetrin porareiässä, täsmää hyvin räjähdysainevalmistajan ilmoittamaan nopeuteen. Voidaan todeta, että tässä käytetty mittausten menetelmä on tarpeeksi tarkka.

Ero mitatussa räjähdysnopeudessa voi selittyä esimerkiksi sillä, minkä kokoisessa porareiässä räjähdysainevalmistaja on mitannut räjähdysnopeuden. Eron räjähdysnopeuteen voinee aiheuttaa myös räjähdysaineen valmistuserä ja kuinka kauan se on ollut varastoituna. Onnistuneiden mittausten keskihajonta oli pieni, noin 2,5 prosenttia. Valmistajan ilmoittama räjähdysnopeus on noin viisi prosenttia pienempi kuin tässä tutkimuksessa mitattu.

5.1.2 Kemiitti 810 350 g/m

Räjähdysainevalmistaja Oy Forcit Ab ilmoittaa Kemiitti 810 300 grammaa per metri rannun räjähdysnopeudeksi 1800 metriä sekunnissa, halkaisijaltaan 45 millimetrin porareiässä (Oy Forcit Ab 2005, 1). Kokeellisesti mitattuna 350 grammaa per metri rannulla, 51 millimetrin reiässä, saatiin tässä tutkimuksessa räjähdysnopeuden keskiarvoksi 1692 metriä sekunnissa.

Mahdollisia syitä, miksi 350 grammaa per metri rantupanoksella räjähdysnopeus on pienempi kuin 300 grammaa per metri rantupanoksella, on useita:

- CR-luku on 10 prosenttia suurempi valmistajan ilmoittamassa (45 millimetrin reikä) räjähdysnopeudessa kuin tämän työn mittauksissa (51 millimetrin reikä).
- Ohut 350 grammaa per metri rantu saattaa palaa epätasaisesti (noin 2 senttimetriä halkaisijaltaan).
- Panostuslaitteen käyttö kylmänä. Panostettiin yksittäisiä reikiä tunnin välein pienillä rannuilla, jolloin emulsion syöttö ei pääse tasoittumaan.
- Kemiitti 810:n eri valmistuserä ja eri panostuslaite.
- Tilastollisesti räjähdysnopeustestien pieni lukumäärä (viisi onnistunutta mittausta), joissa räjähdysnopeuksien ero oli suurimmillaan noin 900 metriä sekunnissa. Keskihajonta oli noin 380 metriä sekunnissa eli noin 23 prosenttia.
- Pohja- ja varsipanosten keskihajonta, joka oli enimmillään 47 grammaa metrille eli 13 prosenttia.

Toisaalta jokaisessa mittauksessa, taulukon 6 mukaisesti, pohjapanos oli noin 200 - 300 grammaa metrille suurempi kuin teoreettinen pohjapanos (700 grammaa). Varsipanoksen keskiarvo 358 grammaa per metri oli mittaustarkkuuden puitteissa erittäin hyvä tulos.

..

Kuvan 35 panos-räjähdysopeus -kuvaajasta ei ole havaittavissa selvää johdonmukaisuutta panoksen suuruuden vaikutuksesta räjähdysnopeuteen. Suurimmaksi syyksi räjähdysnopeuksien suureen hajontaan erottuvat mittausten vähäinen lukumäärä sekä hajonta pohjapanoksissa. Mittaustuloksista on havaittavissa, että lisämittaukset todennäköisesti pienentäisivät 350 grammaa per metrin rannun räjähdysnopeuden keskiarvoa.

5.1.3 Kemiitti 810 600 g/m

Oy Forcit Ab ilmoittaa 600 grammaa per metri rannulle räjähdysnopeudeksi 2600 metriä sekunnissa halkaisijaltaan 45 millimetrin porareiässä (Oy Forcit Ab 2005, 1). Tämän tutkimuksen mittauksissa räjähdysnopeuden keskiarvoksi saatiin 1606 metriä sekunnissa 51 millimetrin reiässä. Valmistajan ilmoittama räjähdysnopeus on noin puolitoistakertainen verrattuna tutkimuksessa saatuun tulokseen.

Vaikuttavia tekijöitä suureen eroon räjähdysnopeudessa saattaa olla:

- CR-luvun merkitys. CR-luku on 13 prosenttia suurempi valmistajan ilmoittamassa räjähdysnopeudessa (mitattu 45 millimetrin reiässä) kuin tässä työssä mitatuissa räjähdysnopeuksissa (mitattu 51 millimetrin reiässä).
- Panostuslaitteen käyttö kylmänä. Panostettiin yksittäisiä reikiä tunnin välein pienillä rannuilla, jolloin emulsion syöttö ei pääse tasoittumaan
- Kemiitti 810:n eri valmistuserä ja eri panostuslaite.
- Tilastollisesti vähäinen mittausten lukumäärä, neljä onnistunutta mittausta. Testien keskihajonta oli 54 metriä sekunnissa eli noin 3 prosenttia.

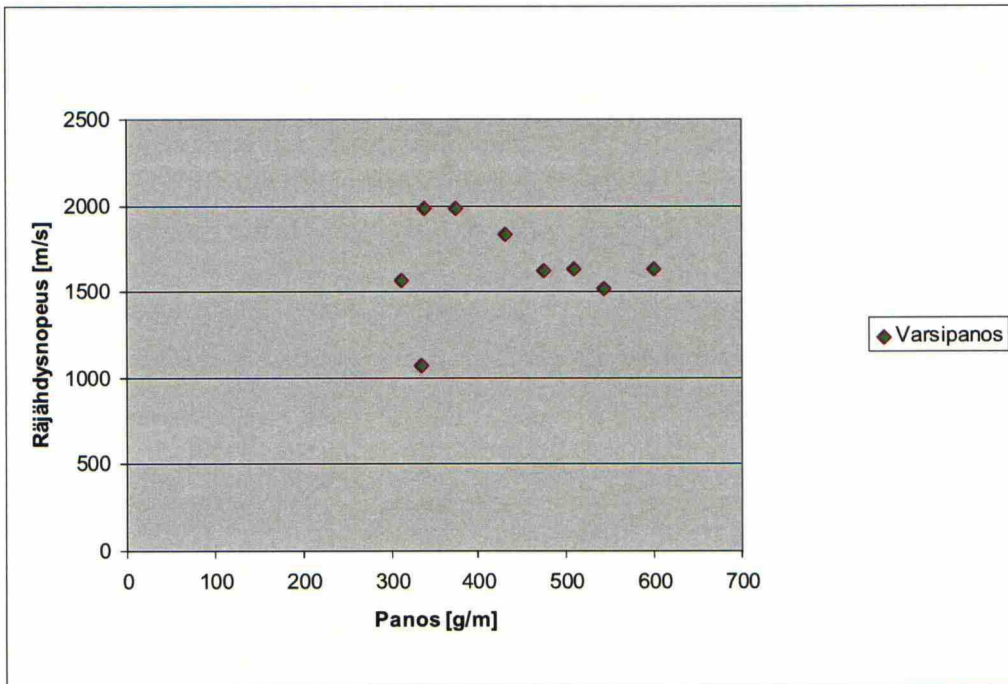
On huomioitava taulukon 7 mukaisesti, että pohjapanos oli kaikissa mittauksissa noin 350 grammaa metrille suurempi kuin teoreettinen pohjapanos (700 grammaa). Yhdessä mittauksessa pohjapanos oli jopa 1500 grammaa metrille suurempi kuin tavoiteltu. Toisaalta varsipanos oli aina sama tai pienimmillään 125 grammaa vähemmän metrille. Varsipanoksen keskiarvo 531 grammaa per metri oli mittaustarkkuuden puitteissa hyvä tulos. Hajonnat pohjapanosten vahvuuksissa oli yhden prosentin luokkaa, jos ei huomioida yhtä ylisuurta pohjapanosta. Varsipanoksien vahvuuksien hajonta oli noin kymmenen prosenttia.

Kuvan 36 panos-räjähdysnopeus -kuvaajasta on havaittavissa, että räjähdysnopeus pysyi samoissa lukemissa rannun vahvuuden hieman vaihdellessa. Suurimmaksi syyksi valmistajan ilmoittamaan ja tässä työssä saatuun räjähdysnopeuden eroon osoittautuu yllä olevan perusteella CR-luvun vaikutus. Vaikka testejä on pieni

määrä, voidaan tehdä seuraava toteamus: Räjähdysnopeus pienenee porareian halkaisijan kasvaessa, kun rannun vahvuus pysyy vakiona.

5.1.4 Yhdistetty varsipanos-räjähdysnopeus 350 g/m ja 600 g/m rannuista

Yhdistetty Kemiitti 810 350 ja 600 grammaa per metri rantujen varsipanos-räjähdysnopeus kuvaaja on esitetty kuvassa 42. Kuvasta 42 on havaittavissa, että räjähdysnopeus vaihtelee selvästi varsipanoksen ollessa alle 500 grammaa per metri. Tämä voi selittyä esimerkiksi ohuen rannun epätasaisuudesta porareiässä, jolloin räjähdysnopeudessa on huomattavia vaihteluja.



Kuva 42. Räjähdysnopeus vaihtelee enemmän pienemmällä varsipanoksella.

5.2 Paine porareiän seinässä

Oy Forcit Ab:n ilmoittamat laskennalliset paineet halkaisijaltaan 51 millimetrin porareiän seinässä ovat ilmoitettu taulukossa 3. Taulukon 3 painetta (porareiän seinään) laskettaessa on käytetty räjähdysnopeutena Kemiitti 810:lle 45 millimetrin porareiässä mitattuja nopeuksia. Tämän työn 51 millimetrin reiässä tehtyjen räjähdysnopeusmittausten perusteella lasketut paineet ovat esitetty taulukossa 9. Taulukoiden 3 ja 9 tulokset ovat koottu taulukkoon 13.

Taulukko 13. Kemiitti 810:llä, 51 millimetrin porareiässä mitattuja räjähdysnopeuksia käytettäessä, paineet porareiän seiiniin, ovat pienempiä kuin 45 millimetrin reiässä mitattuja Hustrulidin mukaan.

Räjähdysaine	Paine 51 mm porareiän seinässä [MPa]	
	Taulukko 3, valmistaja Oy Forcit Ab:n ilmoittama. Perustuu Hustrulidin kaavaan.	Tässä tutkimuksessa saadut tulokset, taulukosta 9. Hustrulid/Olsson ja Ouchterlony
F-putkipanos 17*460 mm	57	62/102
Kemiitti 810 300 g/m	41	-
Kemiitti 810 350 g/m rantu	-	37/78
Kemiitti 810 600 g/m rantu	194	73/160

350 grammaa per metri rantu aiheuttaa neljä megapascalia pienemmän paineen porareiän seinään kuin 300 grammaa per metri rantu Hustrulidin mukaan. Tämä pätee, kun jälkimmäisessä on paineen laskemiseen käytetty 45 millimetrin reiässä mitattu räjähdysnopeutta. Olssonin ja Ouchterlonyn mukaan paine on lähes kaksinkertainen 50 grammaa per metri suuremmalla rannulla. Syy paine-eroihin on räjähdysnopeudessa ja laskentakaavassa.

51 millimetrin reiässä mitattua räjähdysnopeutta käytettäessä, 600 grammaa per metri rannulla Kemiitti 810 aiheuttaa noin kolmanneksen siitä paineesta, minkä se aiheuttaa 45 millimetrin reiässä mitattua räjähdysnopeutta käytettäessä

Husrtrulidin kaavaa käyttäen. Olssonin ja Ouchterlonyn kaavalla paine on lähes sama kuin valmistajan ilmoittama. Tässä tulee selkeästi esiin räjähdysnopeuden ja CR-luvun eron vaikutus paineeseen, sekä eri kaavojen välisten tulosten ero.

F-putkipanos aiheuttaa viisi megapascalia tai lähes kaksi kertaa suuremman paineen 51 millimetrin reiässä kuin 45 millimetrin reiässä, laskentakaavasta riippuen. Teoriassa, kaavojen 4-9 mukaan, 17 millimetrin F-putkipanoksen pitäisi aiheuttaa pienempi paine porareiän koon kasvaessa. Tässä työssä paine on suurempi isommalla reiällä, koska räjähdysnopeus mitattiin suuremmaksi mitä valmistaja ilmoittaa.

Taulukko 13 osoittaa, että eri laskentamenetelmillä saadaan huomattavan erilaisia tuloksia paineeksi porareiän seinään. Tämän perusteella rakojen mittaaminen toteutuneesta rakoilusta kallion seinässä on ainoa oikea tapa tehdä johtopäätökset rikkoutumisvyöhykkeen syvyydestä.

5.3 Kallion rakoilu

5.3.1 Tangentiaalisen jännityksen aiheuttamat minimirakopituudet mitatuilla räjähdysnopeuksilla

Kappaleessa 2.5.1 todettiin tangentiaalisen jännityksen avaaman raon olevan, olemassa olevan tiedon mukaan, 17 millimetrin F-putkella kuusi senttimetriä ja 300 grammaa per metri rannulla (Kemiitti 810) viisi senttimetriä. Paineen arviointi porareiän seinämässä perustui Kemiitti 810:llä 45 millimetrin porareiässä mitattuun räjähdysnopeuteen.

Tämän tutkimuksen räjähdysnopeuksia käytettäessä paineen laskemiseen (kaavoilla 4-7 ja kuva 8) saadaan tangentiaalisen jännityksen avaamiksi rakopituuksiksi uudet arvot. Uudet ja vanhat laskemat rakoavaumiksi ovat esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Tangentiaalisen jännityksen aiheuttamat teoreettiset minimirakopituuksille.

Räjähdysaine	Avauman pituus [cm]	
	Valmistajan ilmoittaman räjähdysnopeuksien perusteella laskettu	Uusien mitattujen räjähdysnopeuksien perusteella laskettu
F-putkipanos 17*460 mm	6	6,2
Kemiitti 810 300 g/m rantu	5,1	-
Kemiitti 810 350 g/m rantu	-	4,9
Kemiitti 810 600 g/m rantu	10,8	6,9

Silmiinpistävää taulukossa 14 on se, että tangentiaalinen jännitys aiheuttaa kolmanneksen lyhyemmän raon 600 grammaa per metri rannulla uuden räjähdysnopeustiedon valossa. Taulukon 14 tulokset osoittavat sen, minkä pituiset raot vähintään pitäisi löytyä tutkittavista pinnoista.

5.3.2 Rakomittaukset sahatuista pinnoista

Liitteen E ja kuvan 37 perusteella voidaan todeta, että tutkimuskohteessa reunalinjassa Kemiitti 810:llä käytettävä 350 grammaa per metri rantu aiheuttaa jokaisessa rakopituusluokassa (L_{\max} , L_w ja L_d) lyhyemmät raot kuin 17 millimetrin F-putkipanos. Pituusluokassa L_{\max} ja L_w Kemiitti 810 rakopituuksien keskiarvo on noin puolet F-putken pituuksista. Kemiitti 810 maksimiraot ovat pituudeltaan tämän perusteella puolet F-putken raoista. Lyhyen ja tiheän rakoilun pituus on F-putkella vain sentin pidempää kuin Kemiitti 810:llä.

Kustakin reiästä lähtevien rakojen pituuksista lasketut summa L_w ja L_d ovat esitetty kuvassa 38. Kun rakopituudet summataan yhteen luokittain (L_w ja L_d), ja lasketaan niiden keskiarvo, ovat Kemiitti 810:n raot lyhyempiä kuin F-putkella.

Rakopituudet ovat jaettuna kuvassa 39 kymmenen senttimetrin pituusluokkiin. Tässä tutkimuksessa F-putki ei aiheuttanut yhtään 10–20 senttimetrin rakoja, kun Kemiitti 810 aiheutti eniten rakoja kyseisessä pituusluokassa. Pituusluokissa <10 cm, 21–30 cm ja 31–40 cm Kemiitti 810 aiheutti enintään puolet siitä rakomäärästä minkä F-putki aiheutti. Yli 40 senttimetriä pitkiä rakoja Kemiitti 810 ei aiheuttanut yhtään, kun F-putki aukaisi kaksi rakoja.

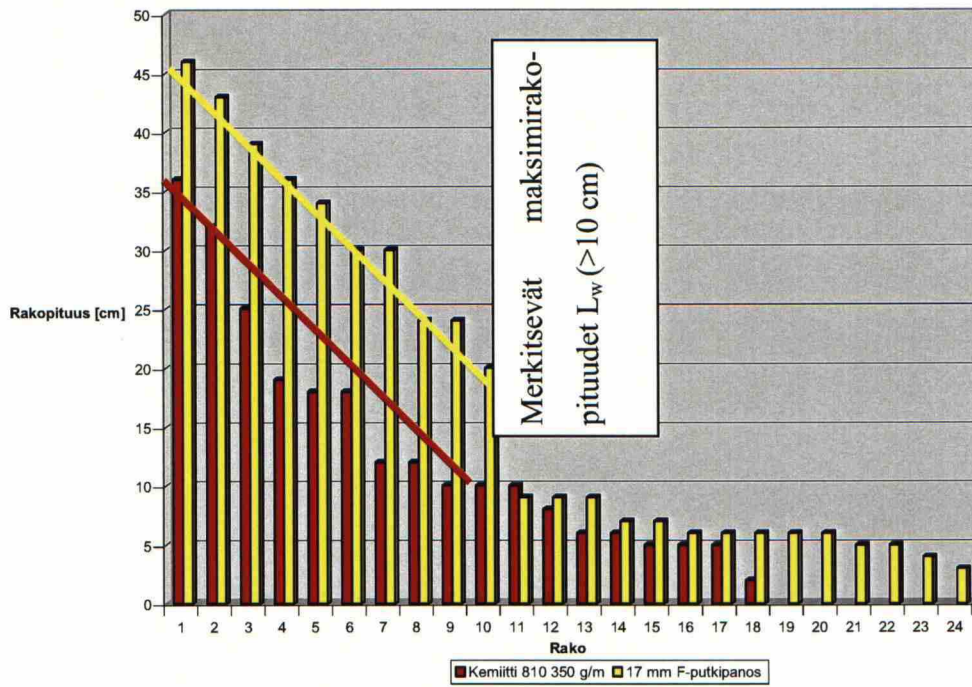
Tutkimuskohteessa muutamat raot katkesivat kallion luonnolliseen rakoiluun kuvan 9 ja 43 mukaisesti. Tällöin todelliset rakopituudet olisivat olleet pidempiä. Raon katkeamista luonnolliseen rakoiluun tapahtui tasavertaisesti kummankin räjähdysaineen sahatuissa tutkimuspinoissa.



Kuva 43. Porareistä lähtevä rakoilu katkesi luonnolliseen rakoiluun.

Taulukossa 10 on käsitelty rakomittausaineistoa tilastollisesti. On huomioitava, että porareikiä joista F-putken aiheuttama rakoilu mitattiin, oli kymmenen kappaletta Kemiitti 810:n kuutta vastaan. Tämä on osasy siihen, miksi F-putken rakopituuksien summa oli melkein kaksinkertainen Kemiitti 810:en nähden. Tilastoa vääristää myös lyhyiden ja keskipitkien rakojen suurempi frekvenssi pituusjakaumassa, kuva 40.

Kuvassa 40 on nähtävissä rakojen pituusjakauma. Kun kuvaan 40 piirretään apuviivat, auttavat ne erottamaan merkitsevät maksimirakopituudet (L_w), kuva 44. Lopuksi voidaan todeta, että Kemiitti 810:n merkitsevät rakopituudet ovat selvästi lyhyempiä kuin F-putken, kuva 44. Tässä työssä Kemiitti 810 rikkoutumisvyöhykkeen syvyydeksi voidaan todeta 25 senttimetriä ja F-putken 34 senttimetriä.



Kuva 44. Kemiitti 810:llä merkitsevät maksimirakopituudet $L_w (>10 \text{ cm})$ ovat lyhyempiä kuin F-putkella.

5.4 Paineen vaikutus rakopituuteen

Kuva 41 osoittaa olettamuksen, että paineen kasvaessa porareian seinässä rakopituus kasvaa, todeksi tässä työssä. Olisi mielenkiintoista mitata lisää räjähdysnopeuksia eri räjähdysaineilla erikokoisissa porareissa, jolloin saataisiin paineet porareikien seinämissä laskettua, ja mitata niiden aiheuttamat rakoilut. Tämä aihe antaisi paljon mahdollisuuksia jatkaa tutkimuksia.

5.5 Rakoluokkien pituussuhteet

Raonmuodostamisominaisuuksia kuvaavat suhdeluvut L_{\max}/L_w , L_{\max}/L_d ja L_w/L_d . Suhdeluvut osoittavat taulukon 12 mukaan, että Kemiitti 810:llä on hieman pidemmät maksimiraot suhteessa laajalle levinneisiin rakoihin kuin F-putkella. Tämä edistää (kappaleen 2.5.3 teorian mukaisesti) rakolinjan muodostumista reikien väliin, jolloin kallio leikkautuu siististi irti linjaa pitkin.

Taulukosta 12 havaitaan, että laajalle levinneiden ja lyhyiden rakojen suhde on F-putkella suurempi kuin Kemiitti 810:llä. Tämä tarkoittaa ylimääräisten ja haitallisten rakojen muodostumista porareian ympärille. Reunalinjassa olisi ideaalista, jos porareistä lähtisi pitkä rako, joka tavoittaa viereisen reiän pitkän raon reikien puolella välissä. Kaikki muu rakoilu on ylimääräistä reunalinjassa. Tätä ominaisuutta kuvaa suhdeluku L_{\max}/L_w .

5.6 Suosituksia rakoilu- ja räjähdysnopeusmittausten tekemiseen

Rakoilumittauksia tehdessä kannattaa huomioida ainakin seuraavat asiat:

- Tunkeumanesteen ja kehittimen käyttöä kannattaa harjoitella etukäteen sahatuissa lohkeissa, mikäli mahdollista.
- Kuivassa kivessä tai kalliolla on helpompi tehdä rakomittaukset. Jos kivi tai kallio on märkää, tunkeumaneste ja kehitin valuvat herkästi pois sekä sotkevat tutkittavan pinnan. Mikäli mahdollista, kannattaa valita mahdollisimman vähän vettä vuotava kohta tunnelista.

- Kaksi mittaajaa rakoja mitattaessa helpottaa rakomittauksia pimeässä tunnelissa.
- Valokuvia kannattaa ottaa runsaasti rakomittauksien aikana käyttäen apuna mahdollisimman paljon valoa esim. työvalaisimista.
-

Räjähdysnopeuksia mitattaessa kannattaa huomioida ainakin seuraavat seikat:

- Räjähdysnopeuksia mitattaessa on suositeltavaa mitata yksi reikä kerrallaan. Testin onnistumisessa auttaa mitattavan reiän räjähtäminen ensimmäisenä kentässä.
- Vastuslanka on pidettävä mahdollisimman kaukana aloitenallista. Nallin räjähdys saattaa aiheuttaa mittauksen epäonnistumisen.

Räjähdysnopeuksia on todella työlästä mitata tunnelissa, jossa on tuotanto käynnissä. Mittaukset on helpointa suorittaa esim. viikonloppuna rauhassa kun tunnelissa ei ole ketään muita.

5.7 Jatkotutkimusehdotukset

Tämän työn aikataulun puitteissa ei ehditty tutkia yleisesti räjäytystöissä seinä- tai apulinjassa käytettävien 17 ja 29 millimetrin Kemix A-putkipanoksen sekä 24 ja 29 millimetrin Fordynin rikkoutumisvyöhykkeitä. Edellä mainittujen lisäksi tässä työssä tutkitun 17 millimetrin F-putkipanoksen, 28 millimetrin Aniitin sekä Kemiitti 810 350 ja 600 grammaa per metri rannun rikkoutumisvyöhykettä voisi tutkia toisessa kivilajiltaan suhteellisen samanlaisessa tunnelikohteessa.

Kemiitti 810 450 grammaa per metri rannun rikkoutumisvyöhyke voisi olla kiinnostava tutkia. Sen rikkoutumisvyöhyke saattaisi olla samaa mittaluokkaa kuin 17 millimetrin F-putkipanoksen.

Rikkoutumisvyöhykkeen tutkiminen antaa kiistatonta tietoa eri räjähdysaineiden tehosta sekä kyvystä muodostaa rakoja. Menetelmä, jolla paineen porareian seinässä voi laskea luotettavasti, olisi toki hyvä kehitellä.

6. Yhteenveto

Työn tavoitteena oli selvittää Oy Forcit Ab:n Kemiitti 810 rannun aiheuttaman rikkoutumisvyöhykkeen syvyys reunalinjassa ja määrittellä se. Reunalinjassa käytetty rantupanoksen vahvuus oli tutkimuskohteessa (VUOLI TU5) 350 grammaa per metri. Vertailun vuoksi tavoitteeksi asetettiin yleisesti käytössä olevan 17 millimetrin F-putkipanoksen rikkoutumisvyöhykkeen syvyyden mittaaminen. Työn aloitusvaiheessa mietittiin myös 17 millimetrin Kemix A-putkipanoksen rikkoutumisvyöhykkeen syvyyden mittaamista, mutta siitä luovuttiin, koska näissä kahdessa oli jo tarpeeksi työtä.

Rikkoutumisvyöhykkeen syvyyteen vaikuttavia tekijöitä oli tarkoitus etsiä kirjallisuudesta. Eräs syvyyteen vaikuttava tekijä on paine porareian seinämässä. Räjähdyksen aiheuttamaa painetta porareian seinään tavoiteltiin räjähdysnopeusmittauksilla. Tärkeimmiksi mitattaviksi räjähdysaineiksi päätettiin Kemiitti 810:n 350 ja 600 grammaa per metri rannut (emulsiopanostusmenetelmä), 17 millimetrin F-putkipanos ja 28 millimetrin Aniittipatruuna (patruunapanostusmenetelmä). Työn alussa tavoiteltiin myös 17 ja 29 millimetrin Kemix A-putkipanoksen ja Anfon nopeuden mittaamista, mutta niistä luovuttiin mittausten vaatiman suuren työmäärän vuoksi.

Mittaukset oli tarkoitus suorittaa YIT Rakennus Oy:llä yleisesti käytössä olevalla porareikäkoolla 51 millimetriä. Räjähdysainevalmistaja Oy Forcit Ab oli mitannut Kemiitti 810:n räjähdysnopeudet 45 millimetrin reiässä.

F-putkipanoksen räjähdysnopeudeksi mitattiin 2518 metriä sekunnissa hyvin pienellä hajonnalla. Luku on lähellä valmistajan ilmoittamaa 2400 metriä sekunnissa, joten mittausmenetelmä voitiin todeta kelvolliseksi.

Keskiarvolta 358 grammaa per metri rannun räjähdysnopeuden keskiarvoksi mitattiin 1692 metriä sekunnissa. Keskiarvolta 531 grammaa per metri rannulla nopeudeksi saatiin 1606 metriä. Kemiitti 810:llä 358 grammaa per metri rannun

suurempi keskiarvo kuin 531 grammaa per metri rannun räjähdysnopeudeksi johtunee tilastollisesti pienestä aineistosta sekä panostuslaitteen käytöstä kylmänä. Panostuslaite ei päässyt lämpenemään normaalin toimintalämpöön kun sillä syötettiin porareikiin pieniä rantuja harvakseltaan.

Sekä perinteistä panostusta edustavan patruunapanoskatkoon, että uutta panostusmenetelmää edustavan emulsiopanostuskatkoon sahattiin tutkimuspinnat. Kummankin menetelmän aiheuttamat rikkoutumisvyöhykkeiden syvyydet mitattiin sahatuista pinnoista tunkeumanesteen avulla. Keskimääräiseksi rikkoutumisvyöhykkeen syvyydeksi reunalinjassa mitattiin 350 grammaa per metri rannulla 25 senttimetriä ja F-putkella 34 senttimetriä.

Rakojen mittaus tunkeumanesteellä sahatuista pinnoista ei jätä mitään arvailujen varaan ja on siten suositeltavampi menetelmä selvittää eri räjähdysaineiden rikkoutumisvyöhyke erilaisten laskelmien sijaan, jotka saattavat pohjautua liikaa tietynlaisiin oletuksiin.

Vertailtaessa eri räjähdysaineita, on räjähdysnopeudella panostusasteen ohella suuri vaikutus uuden rakoilun laajuuteen. s-arvoa tulisi nykyään käyttää lähinnä tarkasteltaessa kallion irrotusta.

Tässä tutkimuksessa mitatut rakojen pituudet sahatuista pinnoista tunnelin seinässä ovat tietävästi tällä hetkellä ensimmäiset Suomessa. Lisätutkimusten määrä kasvattaisi luotettavuutta rikkoutumisvyöhykkeen syvyyden arvioon. Olisi myös mielenkiintoista mitata syvyyksiä eri tunnelirakennuskohteissa eri räjähdysaineilla.

Lähdeluettelo

Oy Forcit Ab. 2005. K810 rantupanoksen vertailu putkipanoksiin - Timo Halmeen muistio. 2 s.

Oy Forcit Ab. 2006. Tuoteluettelo - Louhintaräjähdyksineet, huhtikuu 2006. 39 s.

Harju, Piri. 2006. TU5 geologisia havaintoja [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Visa-Matti Myllymäki. Lähetetty 3.4.2006 klo 14.21 (GMT +0200).

Heikkilä, Pertti & Jokinen, Juha & Ylätaalo, Kalle. 1992. The effect of explosive charge on the extent of blast-induced damage in rock. Otaniemi. Research report TKK-KAL A3. 21 s. ISBN 951-22-11-1138-6.

Hustrulid, William. 1999. Blasting principles for open pit mining volume 1 - General design concepts. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers. 382 s. ISBN 90 5410 459 7.

Hustrulid, William. 2006. A practical, yet technically sound, design procedure for pre-split blasts. Utah. 120 s.

Jaeger, John & Cook, Neville. 1969. Fundamentals of rock mechanics. Great Britain: Richard Clay (The Chaucer Press), Ltd. 513 s.

Jokinen, Juha & Ylätaalo, Kalle. 1995. The effect of loosening techniques on the product quality in the dimensional stone quarrying industry - Part 1, blasting tests, gabbro of Oulainen. Espoo. Research report TKK-KAL-A-17. 25 s. ISBN 951-22-2862-9.

Langefors, Ulf & Kihlström, Björn. 1978. The modern technique of rock blasting. New York: Halsted Press. 438 s. ISBN 91-20-06104-8.

MREL, Blasting instrumentation team. 2003. Microtrap VOD/data recorder - VOD operations manual. Edition 4.0. Kingston. 74 s.

Olsson, Mats. 1999. Sprickutbredning i kvarstående berg - Arbetsrapport från försöksperiod 1997-1999. Stiftelsen svensk bergteknisk forskning. SveBeFo Rapport K11. 22 s.

Olsson, Mats & Bergqvist, Ingvar. 1993. Sprickutbredning i berg vid skonsam sprängning. Stockholm. Stiftelsen svensk bergteknisk forskning. SveBeFo Rapport 3. 43 s.

Olsson, Mats & Bergqvist, Ingvar. 1995. Sprickutbredning vid flerhållsprängning - Delrapport. Stockholm. Stiftelsen svensk bergteknisk forskning. SveBeFo Rapport 18. 38 s.

Olsson, Mats & Ouchterlony, Finn. 2003. Ny skadezonsformel för skonsam sprängning. Stockholm. Stiftelsen svensk bergteknisk forskning. SveBeFo Rapport 65. 31 s.

Persson, Per-Anders & Holmberg, Roger & Lee, Jaimin. 1994. Rock blasting and explosives engineering. Florida: CRC Press, Inc. 540 s. ISBN 0-8493-8978-X.

Vuolio, Raimo. 1991. Räjätystyöt. 3. painos. Suomen maarakentajien keskusliitto ry. Forssa: Forssan kirjapaino Oy. 318 s. ISBN 952-90-2761-3.

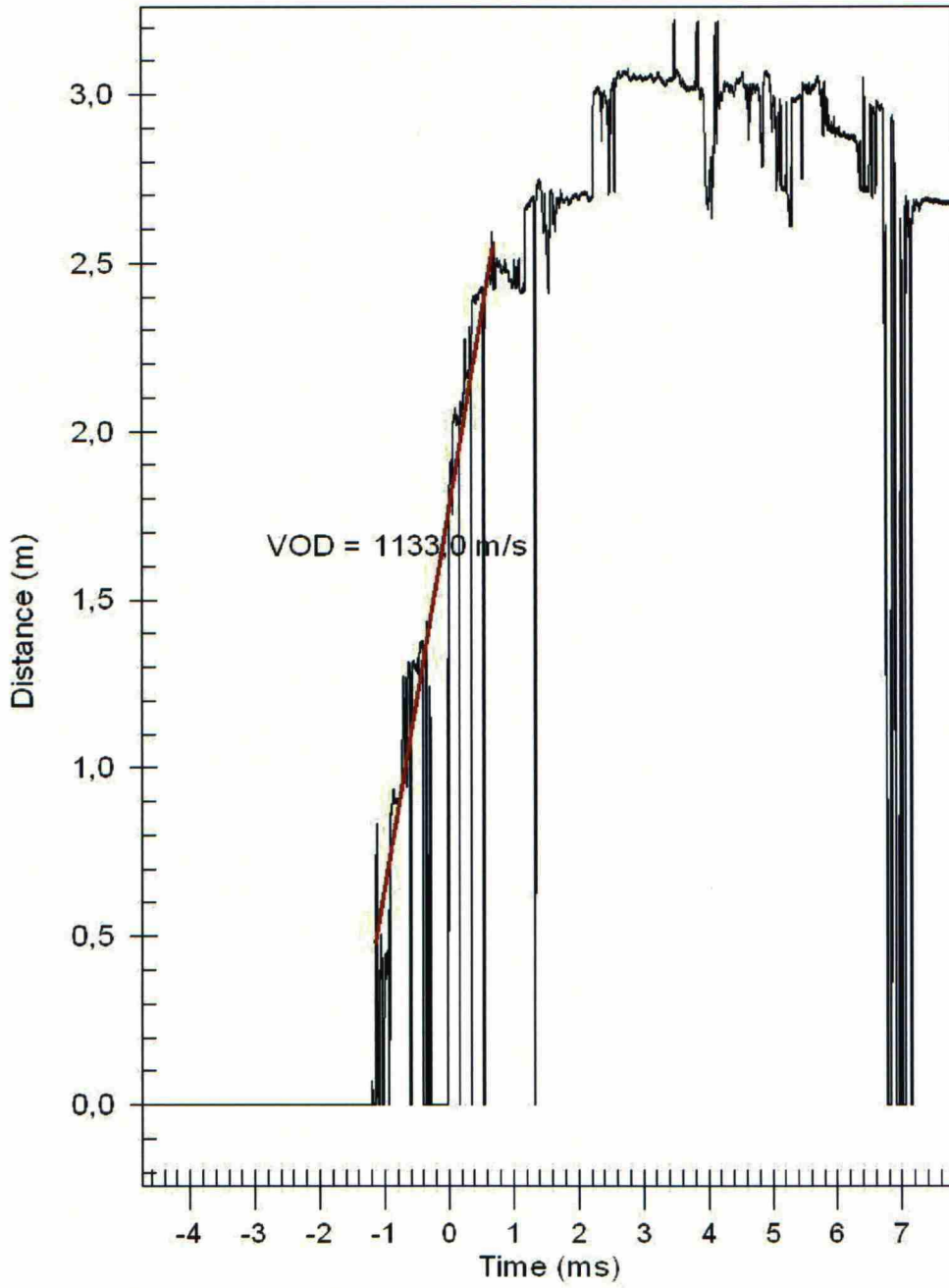
Vuolio, Raimo. 2006. Räjätysopas luonnos.

Liiteluettelo

- Liite A. Räjähdysnopeusraportit ja -kuvaajat. 49 s.
- Liite B. Poraus- ja panostussuunnitelmat testikatkoille. 2 s.
- Liite C. Testikatkojen panostusraportit ja raportit emulsiopanostuslaitteesta emulsiolla panostetuista katkoista. 10 s.
- Liite D. Porauslogit MWD-data. 2 s.
- Liite E. Rakomittaustulokset. 1 s.

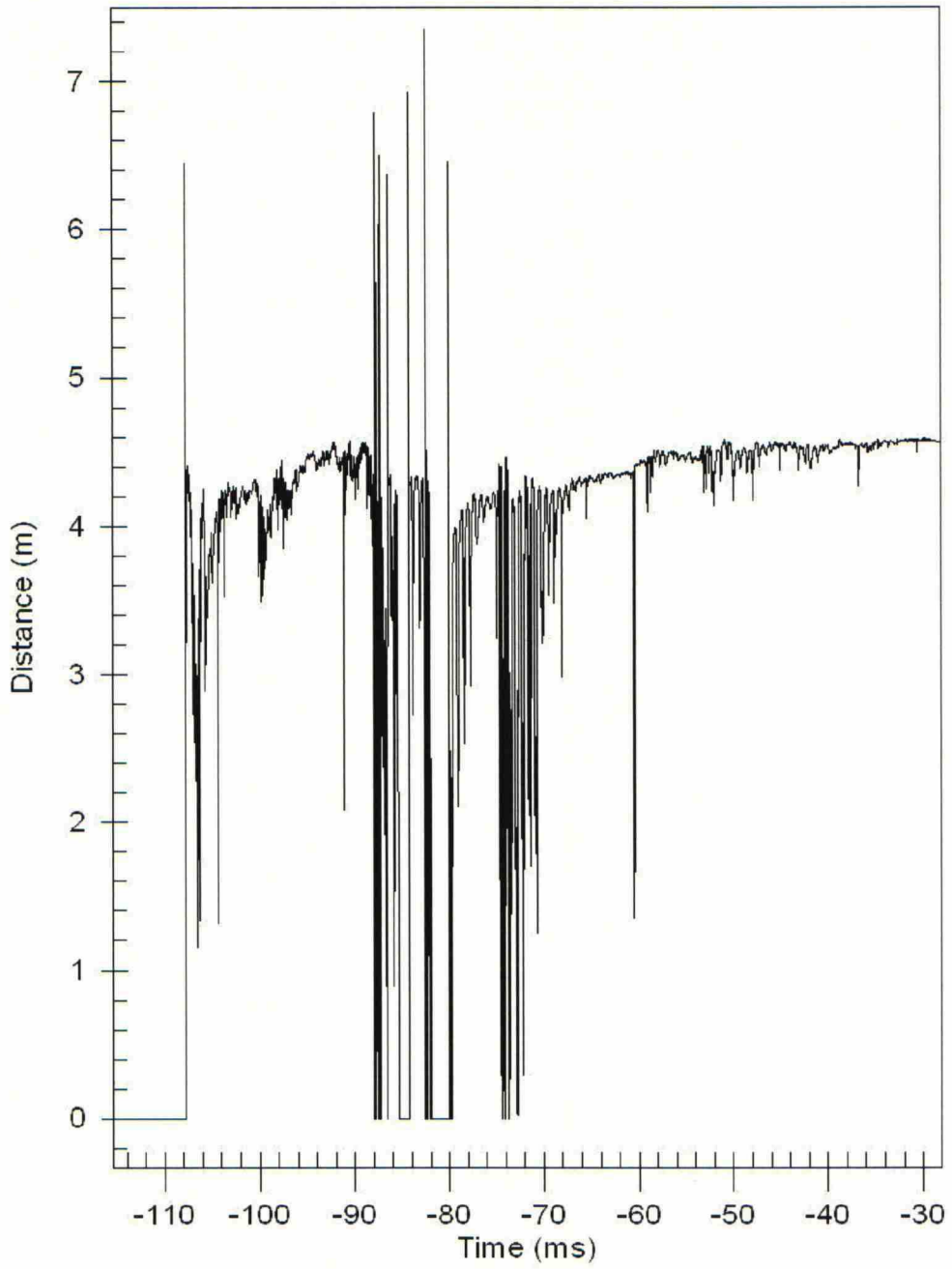
Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 1
Päivämäärä:	25.2.2006
Testipaikka ja paalulukku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4
Räjähdysaine:	Aniitti paperipatruuna 28 mm
Rantu [g/m]:	-
Panostus alkoi:	09.50
Räjätysaika:	10.03
Kaasuuntumisaika [min]:	-
Lämpötila, tunneli [°C]:	7,5
Pohjapanos [kg tai kpl]:	1 kpl Aniitti paperipatruuna 28 mm
Varsipanos [kg tai kpl]:	9 kpl Aniitti paperipatruuna 28 mm
Reseptinumero:	-
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	-
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

Aniitti 28 mm paperipatruuna



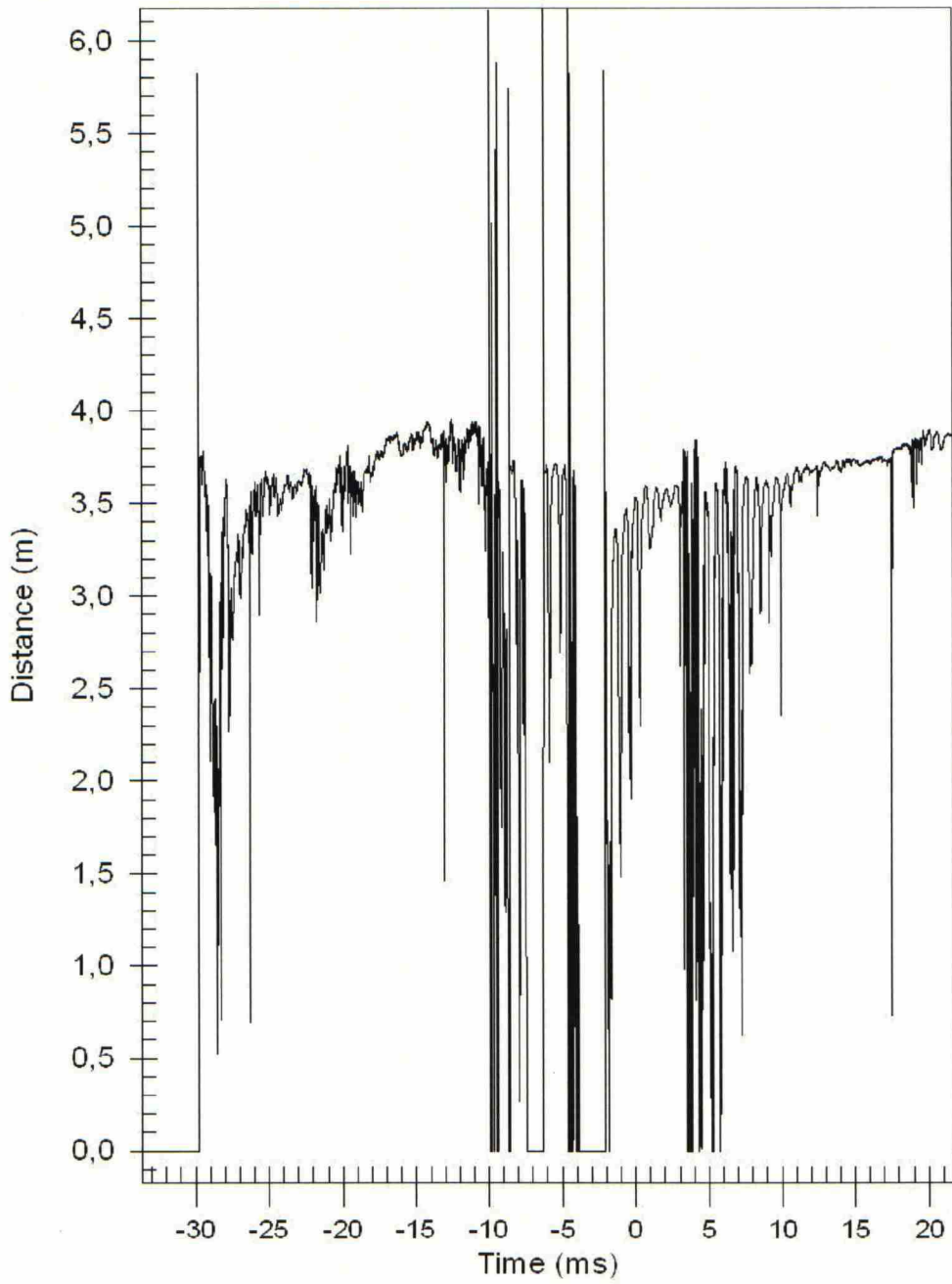
Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 2
Päivämäärä:	25.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4
Räjähdyssaine:	Aniitti paperipatruuna 28 mm
Rantu [g/m]:	-
Panostus alkoi:	11.20
Räjätysaika:	11.30
Kaasuuntumisaika [min]:	-
Lämpötila, tunneli [°C]:	7,6
Pohjapanos [kg tai kpl]:	1 kpl Aniitti paperipatruuna 28 mm
Varsipanos [kg tai kpl]:	9 kpl Aniitti paperipatruuna 28 mm
Reseptinumero:	-
Nallinumero:	18
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	-
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	Palonopeus ei tulkittavissa kuvaajasta

Aniitti 28 mm paperipatruuna



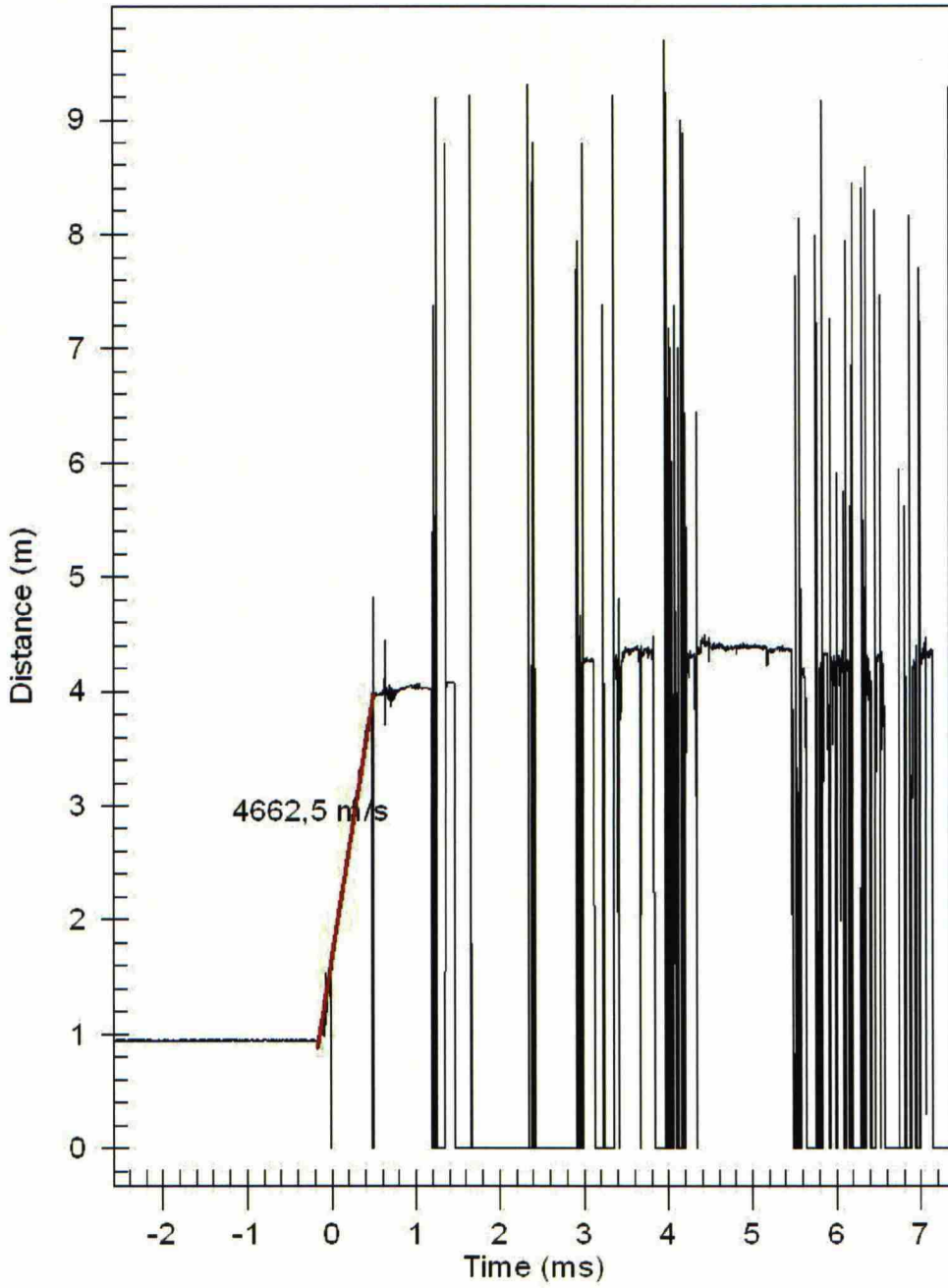
Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 3
Päivämäärä:	25.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,4
Räjähdysaine:	Aniitti paperipatruuna 28 mm
Rantu [g/m]:	-
Panostus alkoi:	12.01
Räjätysaika:	12.17
Kaasuuntumisaika [min]:	-
Lämpötila, tunneli [°C]:	8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	1 kpl Aniitti paperipatruuna 28 mm
Varsipanos [kg tai kpl]:	7 kpl Aniitti paperipatruuna 28 mm
Reseptinumero:	-
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	-
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	Palonopeus ei tulkittavissa kuvaajasta

Aniitti 28 mm paperipatruuna



Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 4
Päivämäärä:	25.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,3
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	600
Panostus alkoi:	13.14
Räjätysaika:	13.50
Kaasuuntumisaika [min]:	36
Lämpötila, tunneli [°C]:	7,5
Pohjapanos [kg tai kpl]:	1,3
Varsipanos [kg tai kpl]:	5,3
Reseptinumero:	7
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

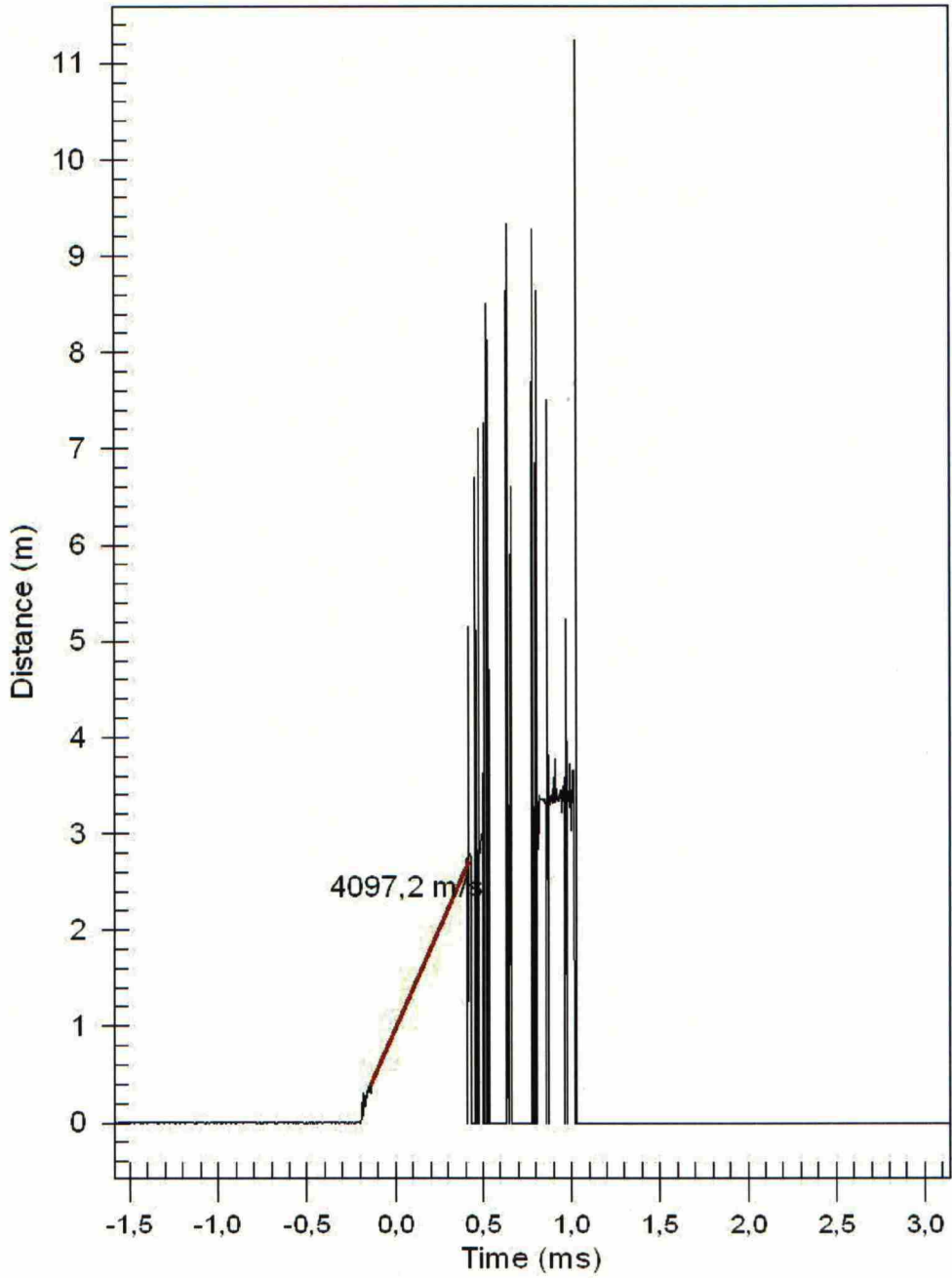
Kemiitti 810 600 g/m



Liite A. 9/49

Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 5
Päivämäärä:	25.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,35
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	600
Panostus alkoi:	14.09
Räjätysaika:	14.45
Kaasuuntumisaika [min]:	36
Lämpötila, tunneli [°C]:	8,9
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,7
Reseptinumero:	7
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

Kemiitti 810 600 g/m

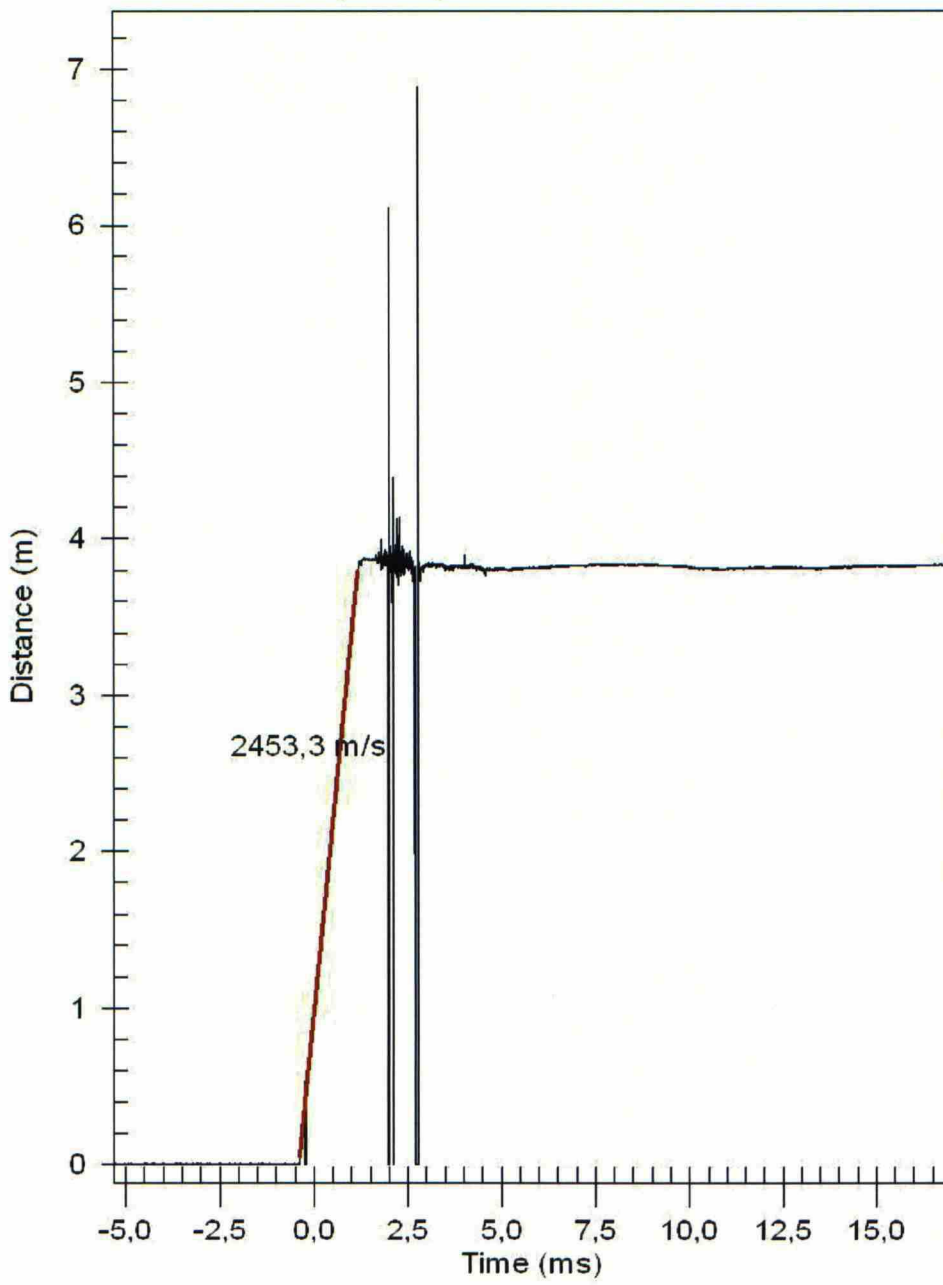


Liite A. 11/49

Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 6
Päivämäärä:	25.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4,3
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	15.26
Räjätysaika:	15.56
Kaasuuntumisaika [min]:	30
Lämpötila, tunneli [°C]:	7,8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,6
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,5
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	Mittaus epäonnistui, ei tulosta

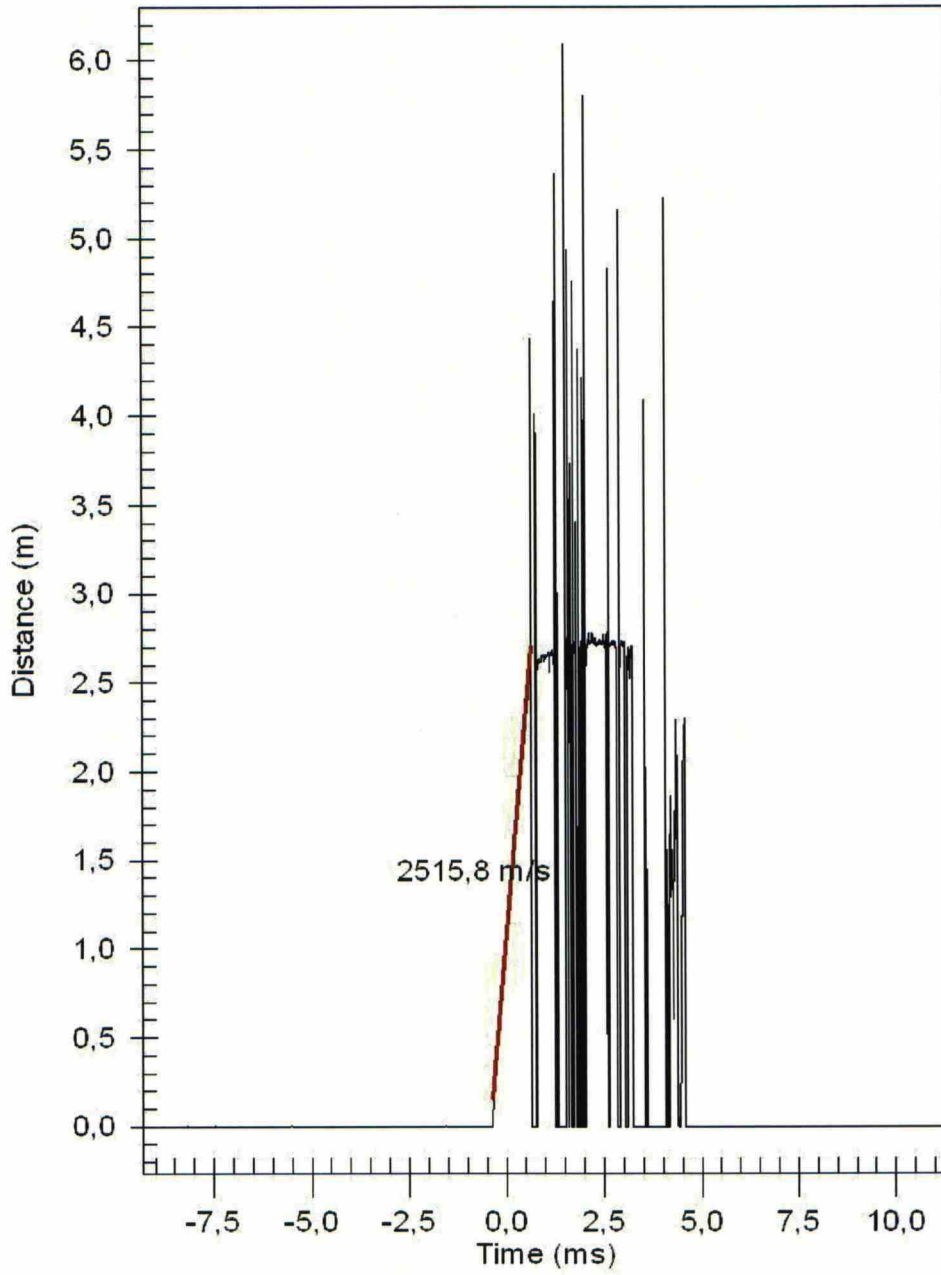
Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 7
Päivämäärä:	26.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4,3
Räjähdysaine:	F-putkipanos 17 mm
Rantu [g/m]:	-
Panostus alkoi:	8.00
Räjätysaika:	8.20
Kaasuuntumisaika [min]:	-
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,5
Pohjapanos [kg tai kpl]:	1 kpl Aniitti paperipatruuna 28 mm
Varsipanos [kg tai kpl]:	9 kpl F-putkipanos 17 mm
Reseptinumero:	-
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	-
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

F-putkipanos 17 mm



Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 8
Päivämäärä:	26.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4,3
Räjähdyssaine:	F-putkipanos 17 mm
Rantu [g/m]:	-
Panostus alkoi:	8.30
Räjätysaika:	8.41
Kaasuuntumisaika [min]:	-
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,5
Pohjapanos [kg tai kpl]:	1 kpl Aniitti paperipatruuna 28 mm
Varsipanos [kg tai kpl]:	9 kpl F-putkipanos 17 mm
Reseptinumero:	-
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjäytin:	-
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

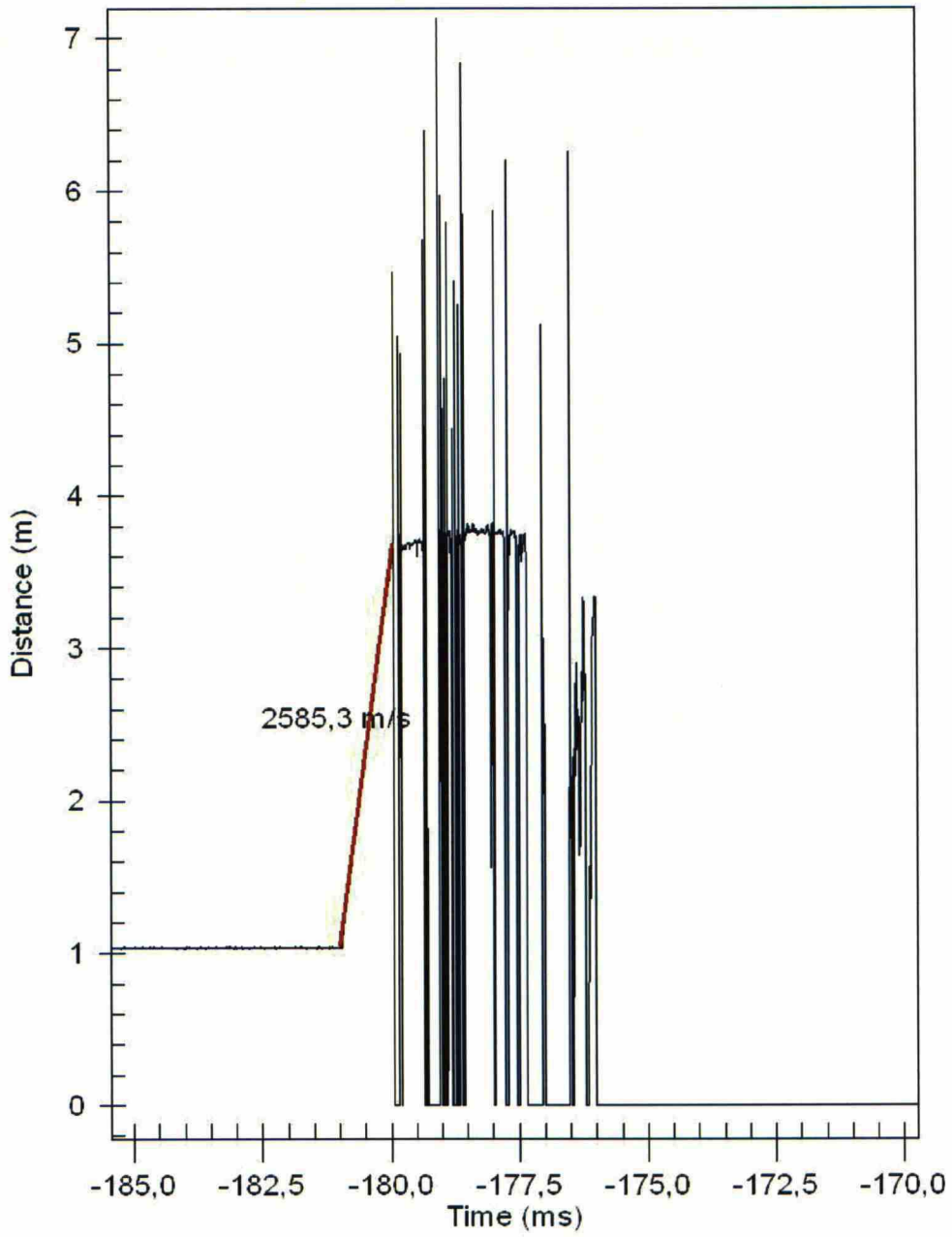
F-putkipatruuna 17 mm



Liite A. 16/49

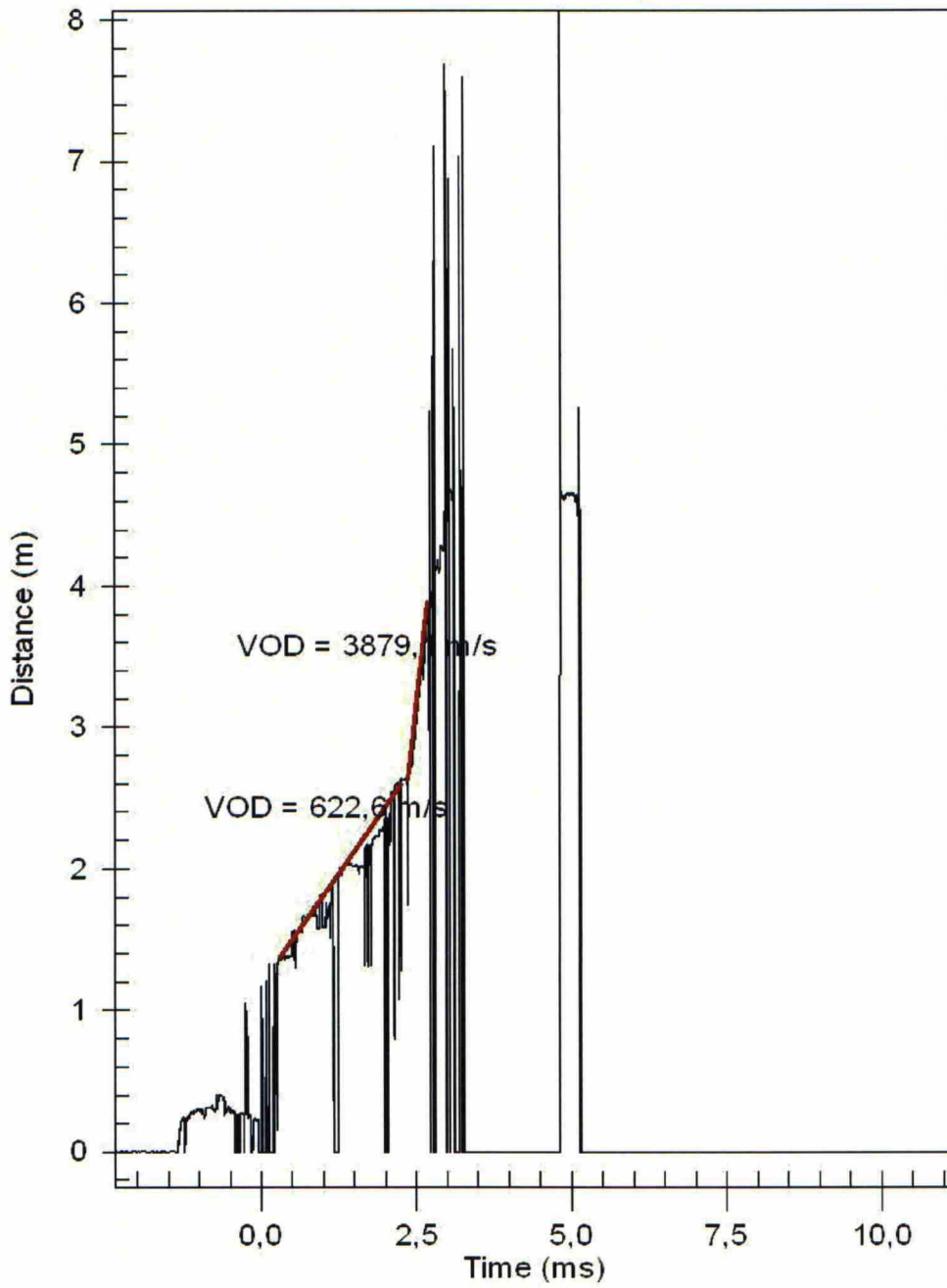
Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 9
Päivämäärä:	26.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,5
Räjähdysaine:	F-putkipanos 17 mm
Rantu [g/m]:	-
Panostus alkoi:	8.47
Räjätysaika:	8.55
Kaasuuntumisaika [min]:	-
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,5
Pohjapanos [kg tai kpl]:	1 kpl Aniitti paperipatruuna 28 mm
Varsipanos [kg tai kpl]:	7 kpl F-putkipanos 17 mm
Reseptinumero:	-
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	-
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

F-putkipatruuna 17 mm



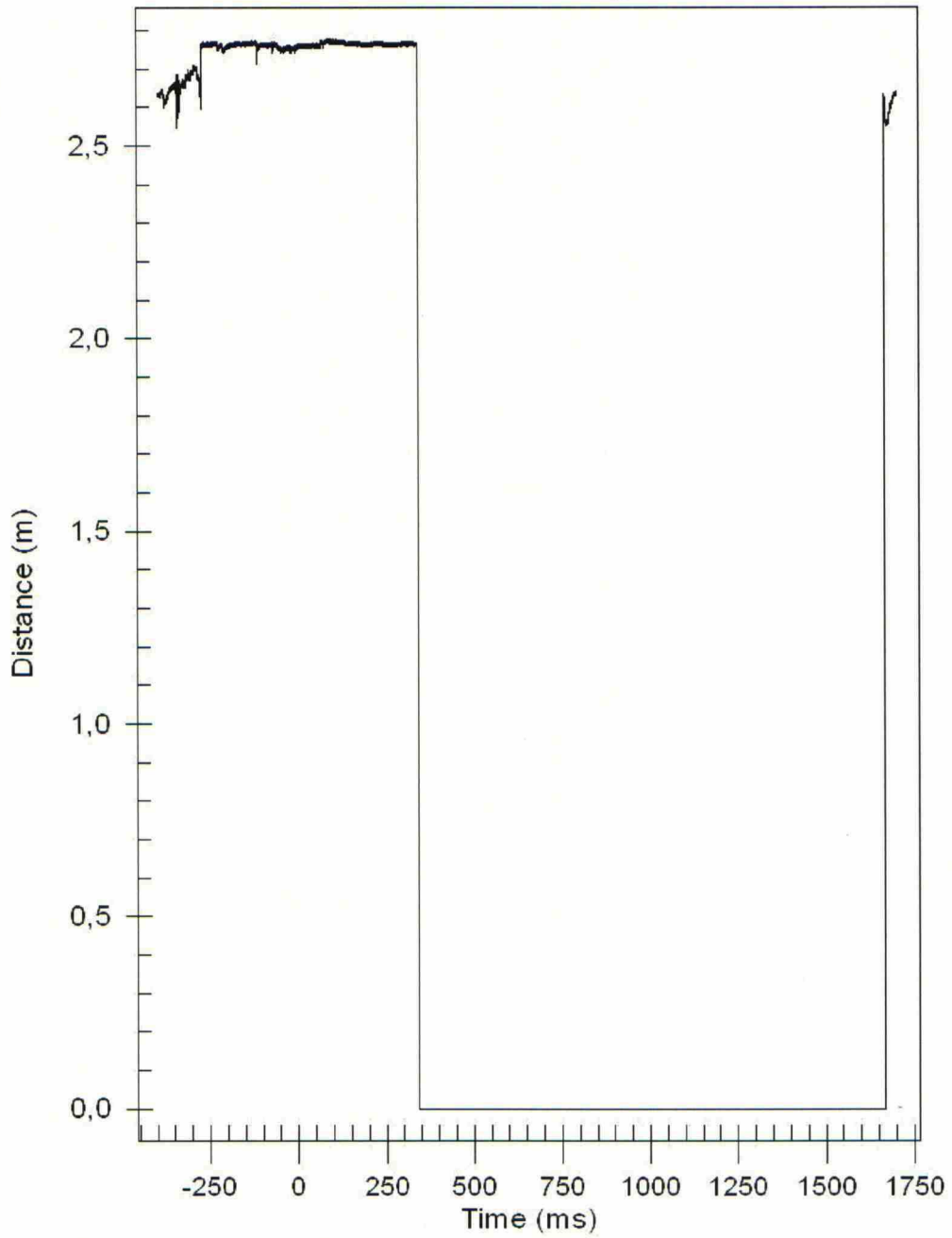
Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 10
Päivämäärä:	26.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4,7
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	10.30
Räjätysaika:	11.00
Kaasuuntumisaika [min]:	30
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,3
Pohjapanos [kg tai kpl]:	1,1
Varsipanos [kg tai kpl]:	4,1
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

Kemiitti 810 350 g/m



Räjähdynopeustesti -raportti	Testinumero: 11
Päivämäärä:	26.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4,7
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	11.05
Räjätysaika:	11.35
Kaasuuntumisaika [min]:	30
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,3
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,8
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,3
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	Ei tulkittavaa tulosta

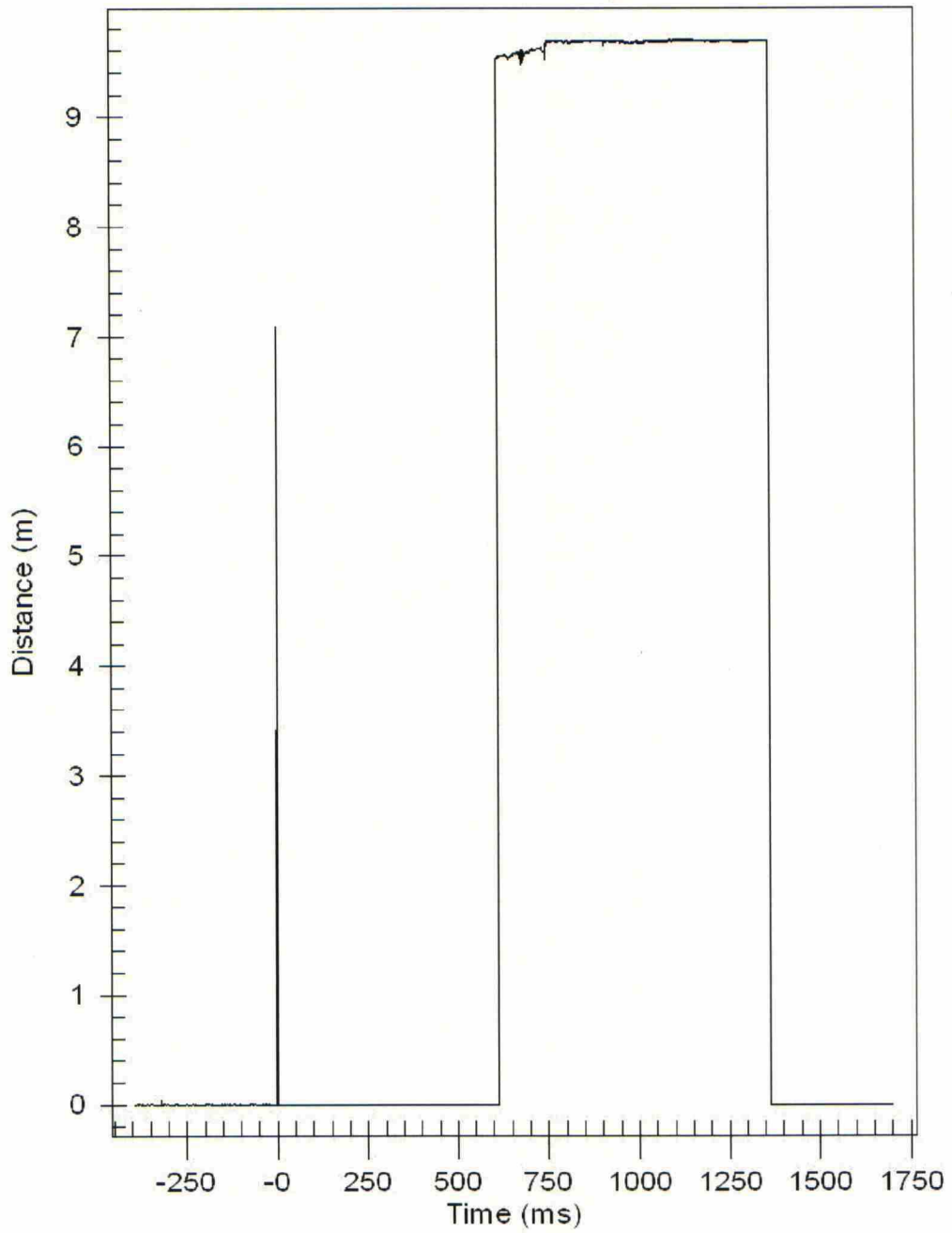
Kemiitti 810 350 g/m



Liite A. 22/49

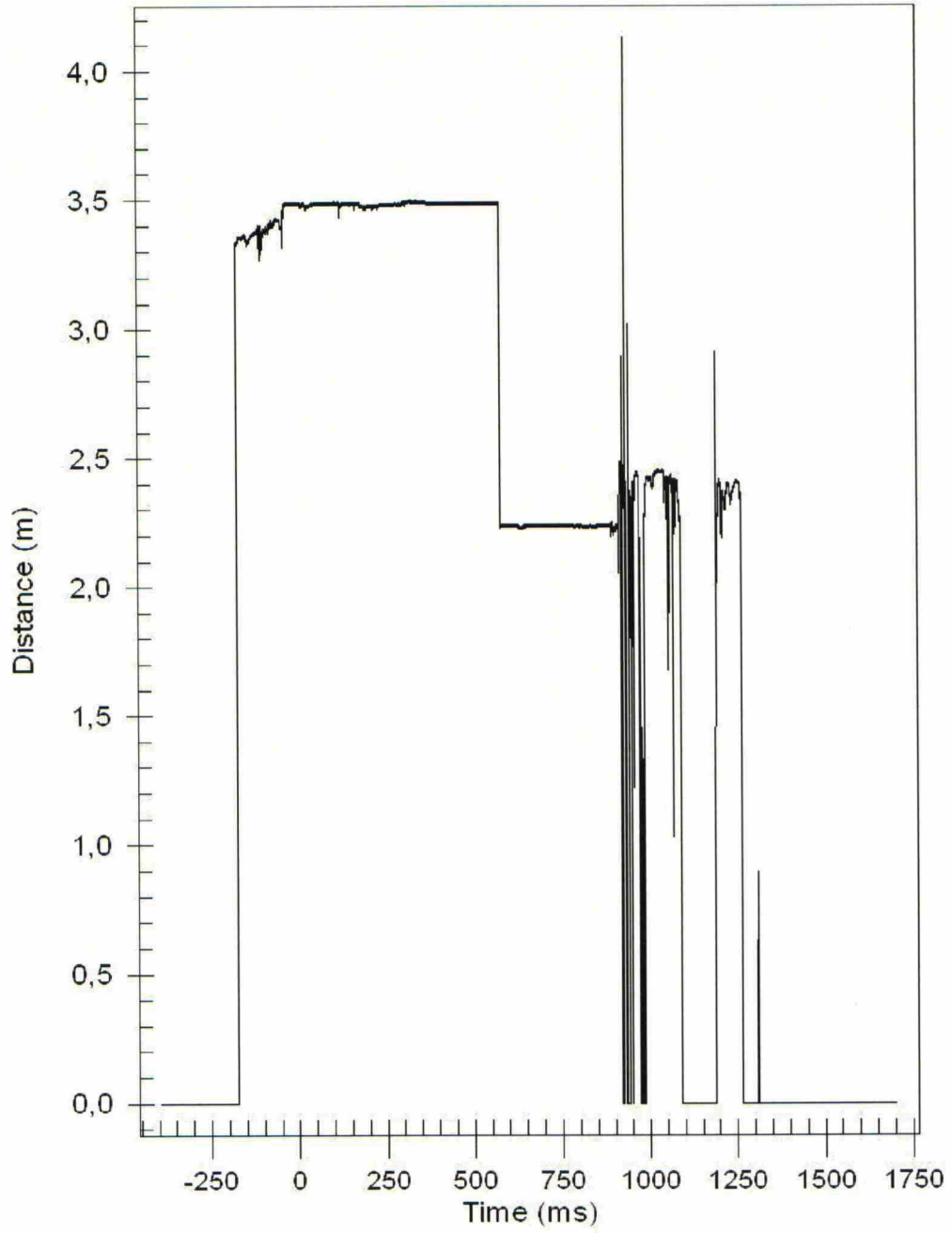
Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 12
Päivämäärä:	26.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,2
Räjähdyssaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	11.40
Räjätysaika:	12.10
Kaasuuntumisaika [min]:	30
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,3
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,8
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,4
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	18
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	Ei tulkittavaa tulosta

Kemiitti 810 350 g/m



Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 13
Päivämäärä:	26.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,2
Räjähdyssaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	600
Panostus alkoi:	9.00
Räjäytysaika:	9.30
Kaasuuntumisaika [min]:	30
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,3
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,8
Varsipanos [kg tai kpl]:	4,4
Reseptinumero:	7
Nallinumero:	12
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjäytin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	Ei tulkittavaa tulosta

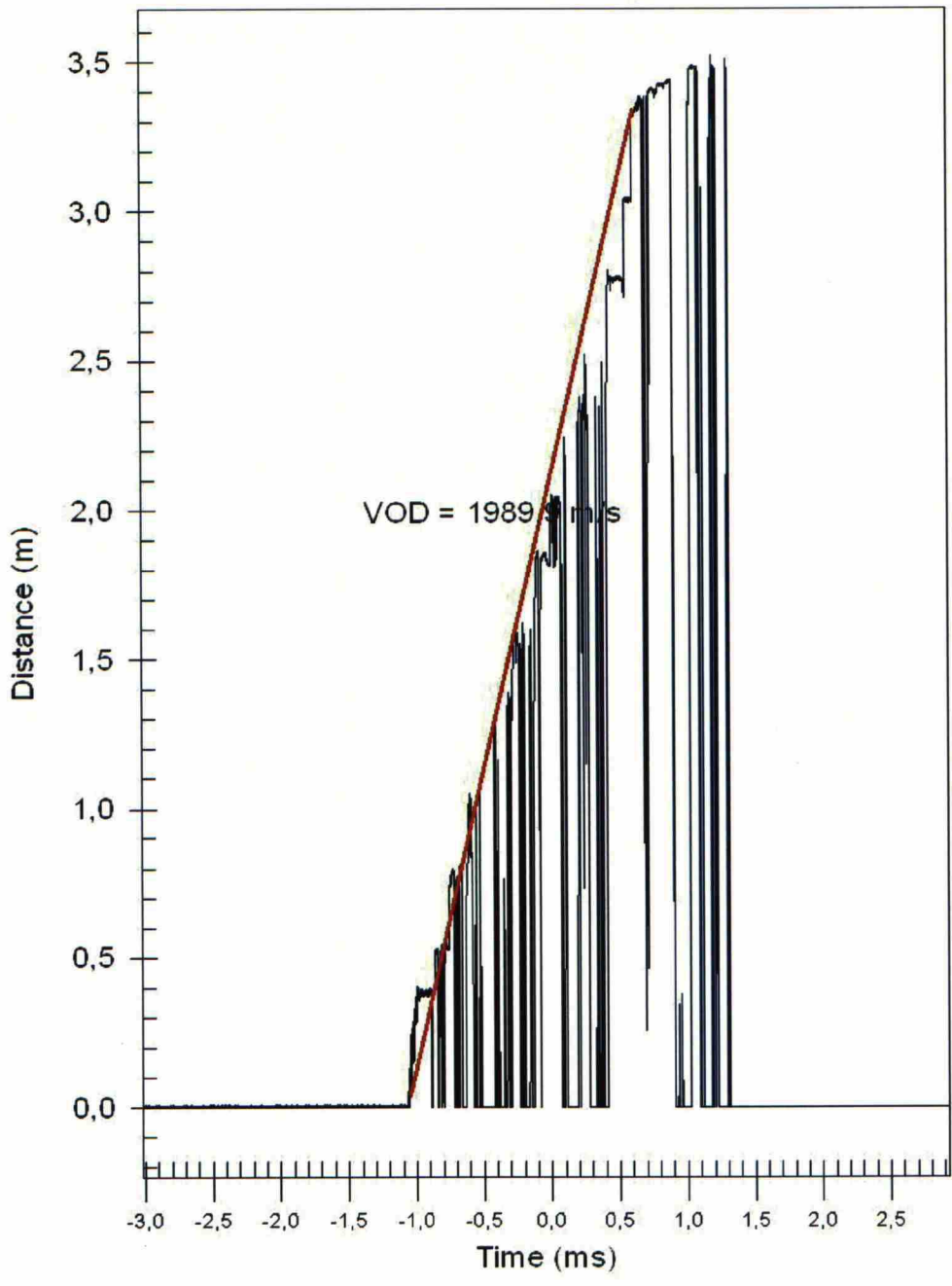
Kemiitti 810 600 g/m



Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 14
Päivämäärä:	26.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,4
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	12.50
Räjätysaika:	13.20
Kaasuuntumisaika [min]:	30
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,3
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,6
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,2
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	1
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen

Lisätietoja:

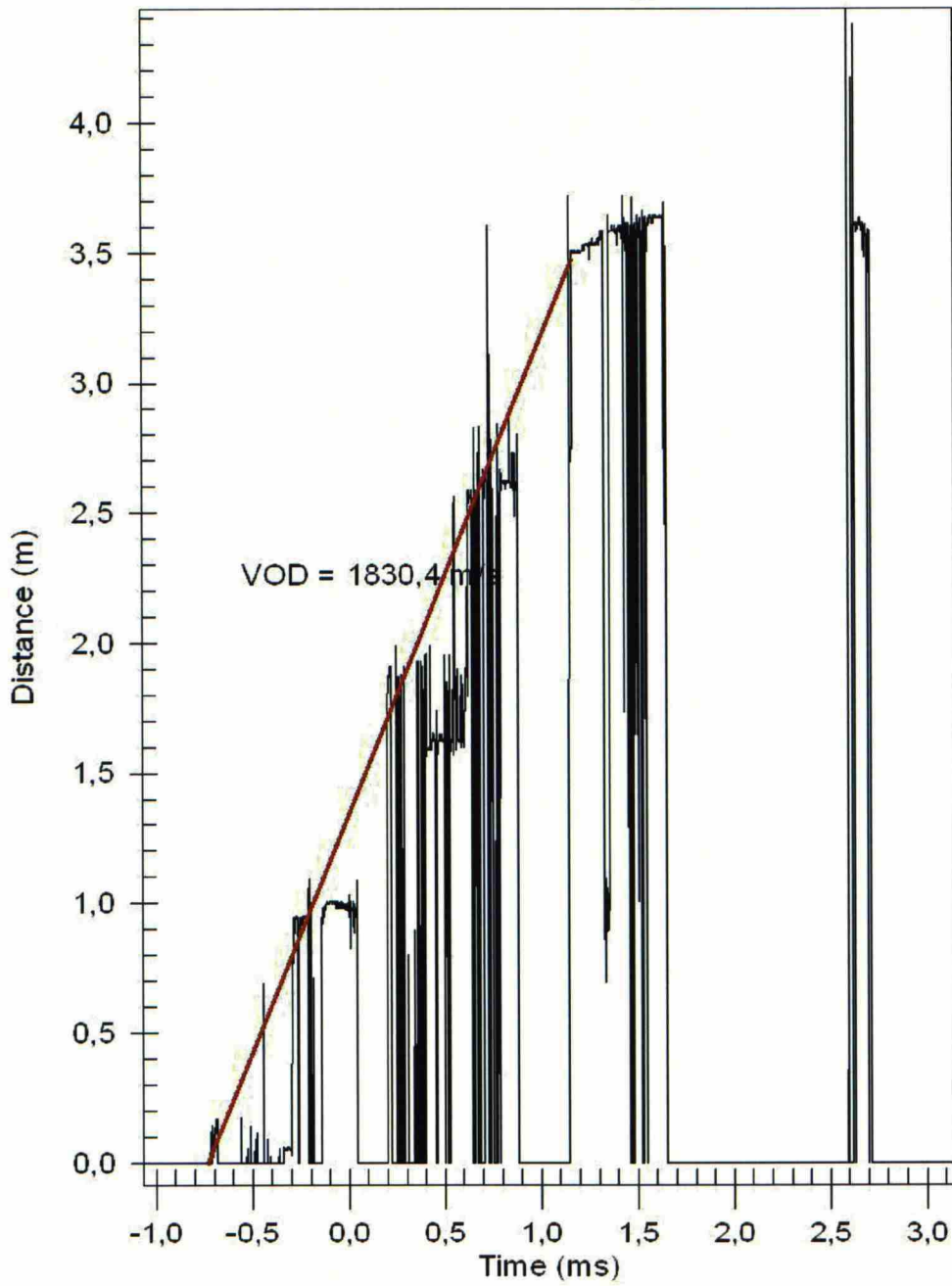
Kemiitti 810 350 g/m



Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 15
Päivämäärä:	26.2.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 34405
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,6
Räjähdyssaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	13.25
Räjätysaika:	13.55
Kaasuuntumisaika [min]:	30
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,3
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,6
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,5
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	1
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen

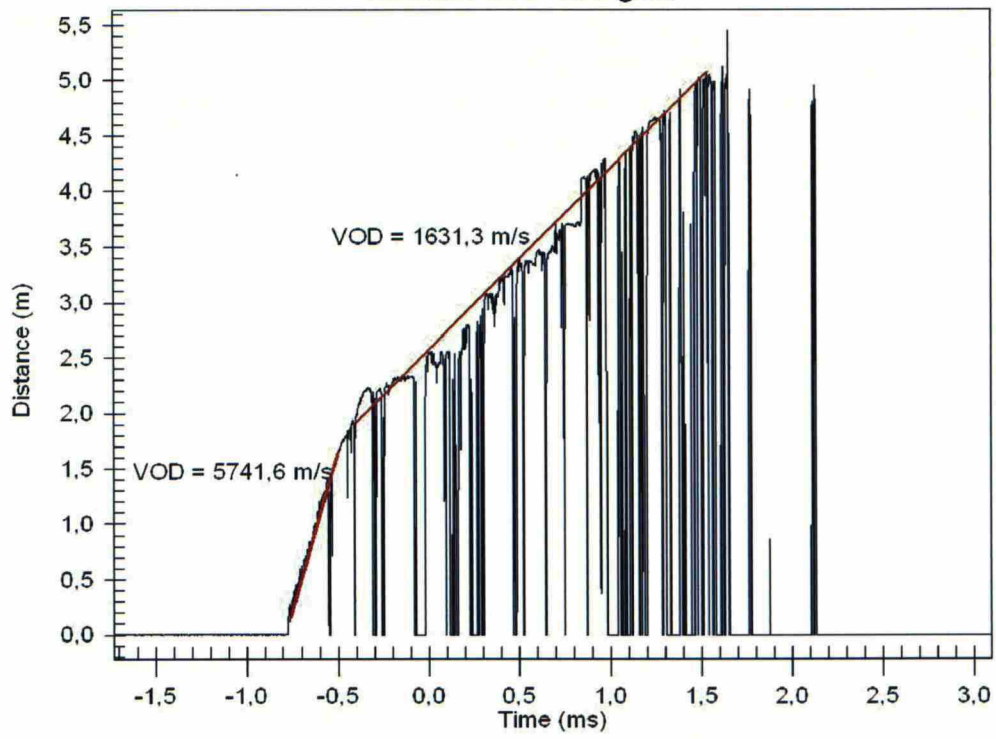
Lisätietoja:

Kemiitti 810 350 g/m

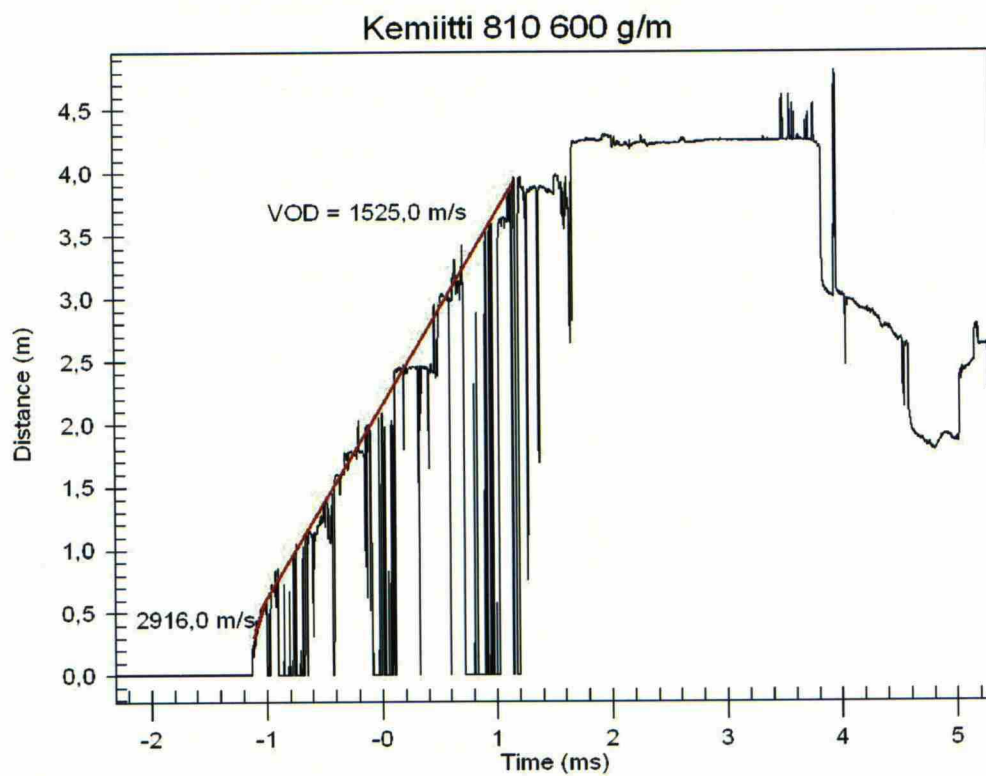


Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 16
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4,6
Räjähdyssaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	600
Panostus alkoi:	8.18
Räjätysaika:	8.38
Kaasuuntumisaika [min]:	20
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,7
Pohjapanos [kg tai kpl]:	1,5
Varsipanos [kg tai kpl]:	6,6
Reseptinumero:	7
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

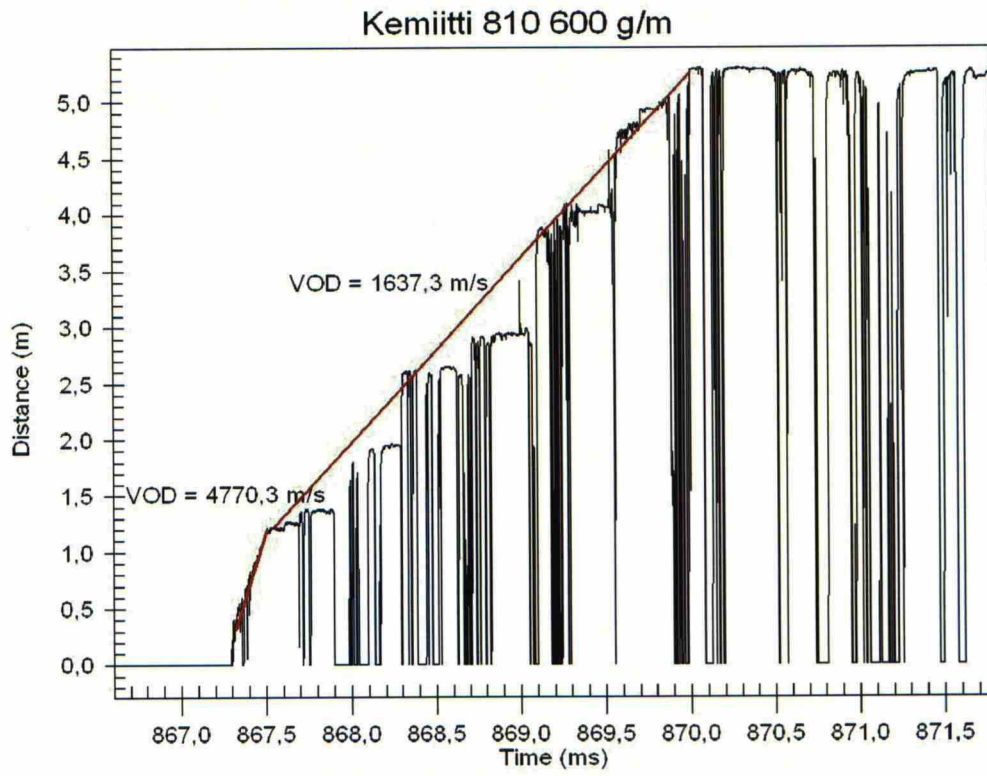
Kemiitti 810 600 g/m



Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 17
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	5,4
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	600
Panostus alkoi:	9.16
Räjätysaika:	9.35
Kaasuuntumisaika [min]:	19
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,7
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	4,0
Reseptinumero:	7
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	



Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 18
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	5,0
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	600
Panostus alkoi:	10.07
Räjätysaika:	10.22
Kaasuuntumisaika [min]:	15
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,7
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	3,6
Reseptinumero:	7
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

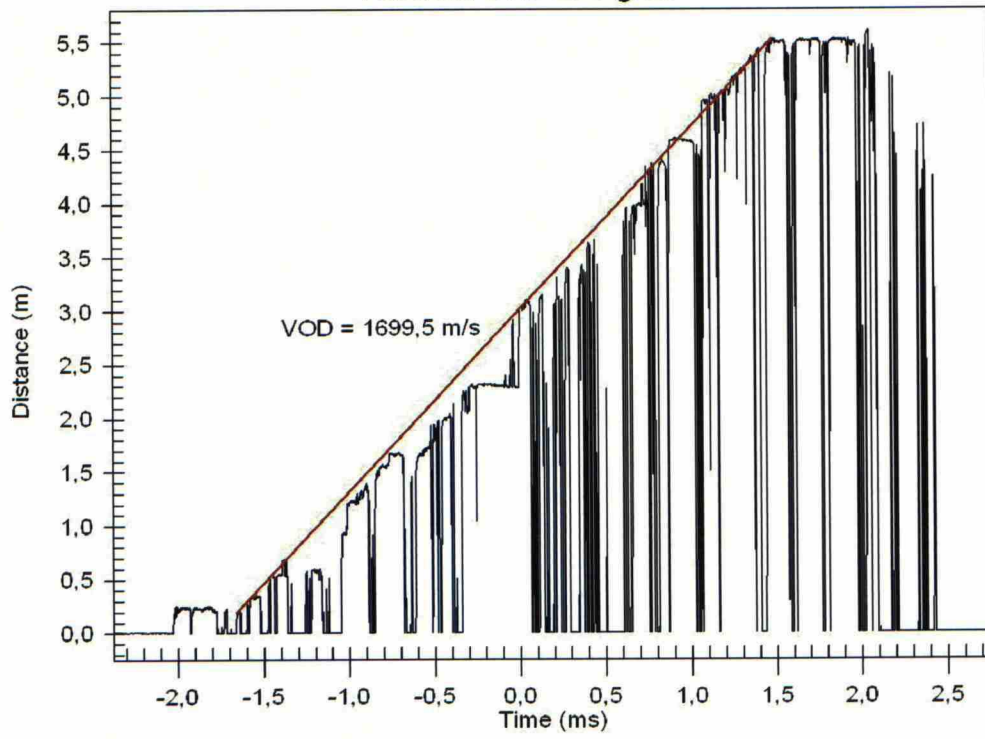


Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 19
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4,7
Räjähdyssaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	600
Panostus alkoi:	10.33
Räjätysaika:	10.48
Kaasuuntumisaika [min]:	15
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	3,5
Reseptinumero:	7
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	Mittaus epäonnistui, ei tulosta

Liite A. 37/49

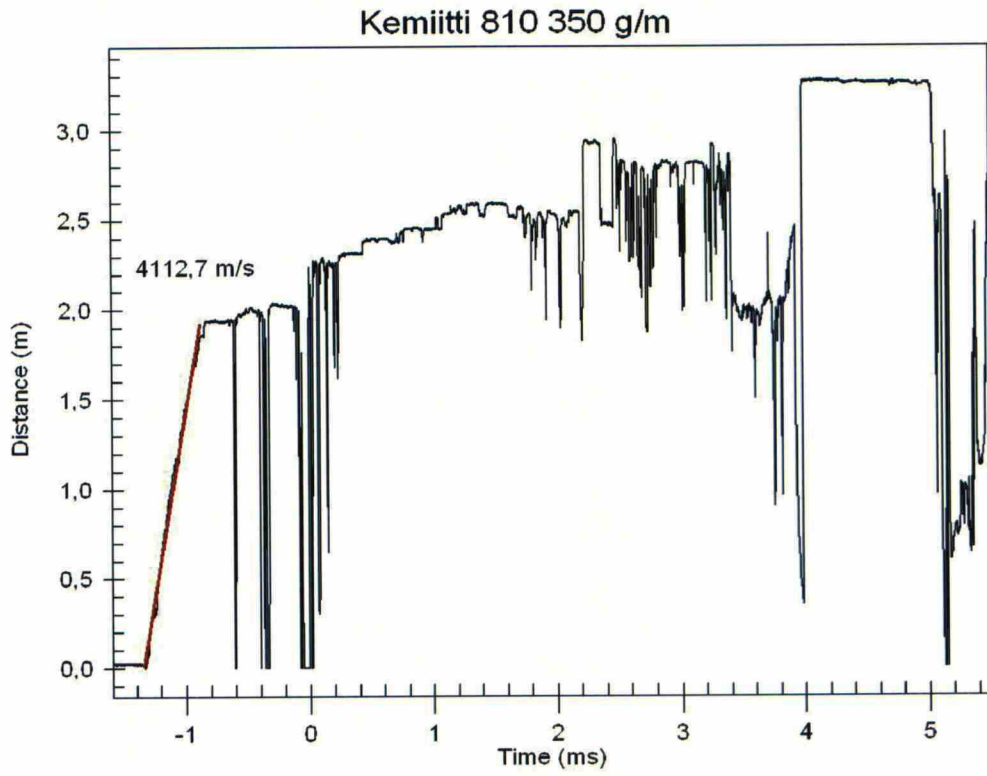
Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 20
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	5,4
Räjähdyssaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	600
Panostus alkoi:	11.55
Räjätysaika:	12.11
Kaasuuntumisaika [min]:	16
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	3,6
Reseptinumero:	7
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

Kemiitti 810 600 g/m



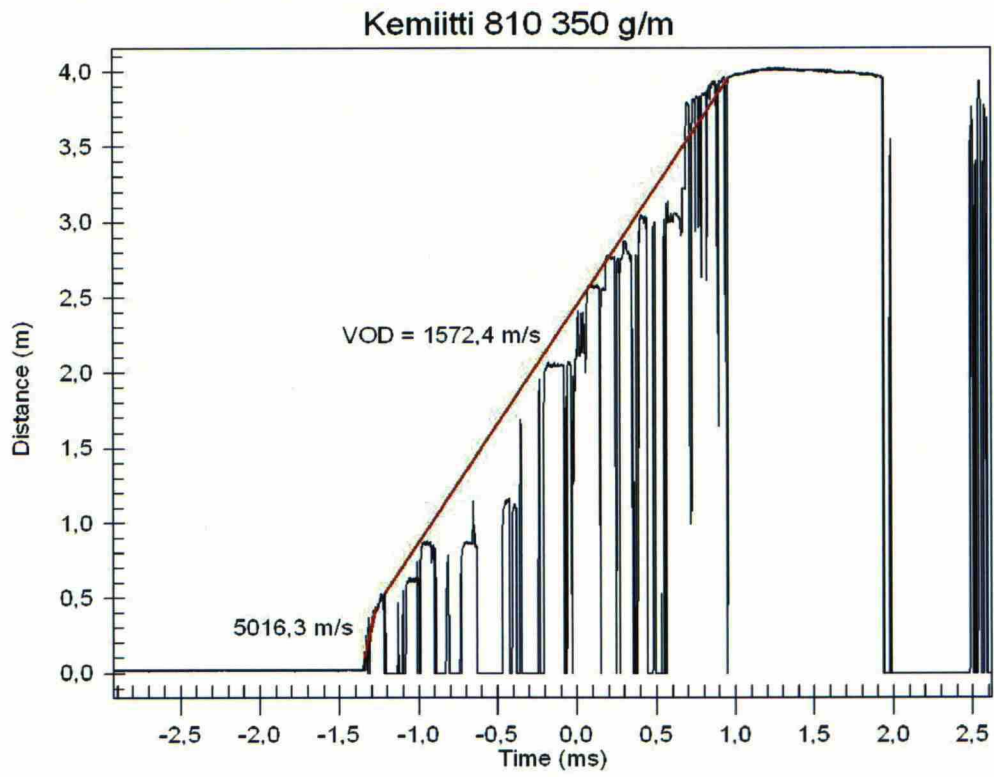
Liite A. 39/49

Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 21
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareian halkaisija [mm]:	51
Porareian pituus [m]:	3,9
Räjähdyssaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	12.23
Räjätysaika:	12.40
Kaasuuntumisaika [min]:	17
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,3
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	



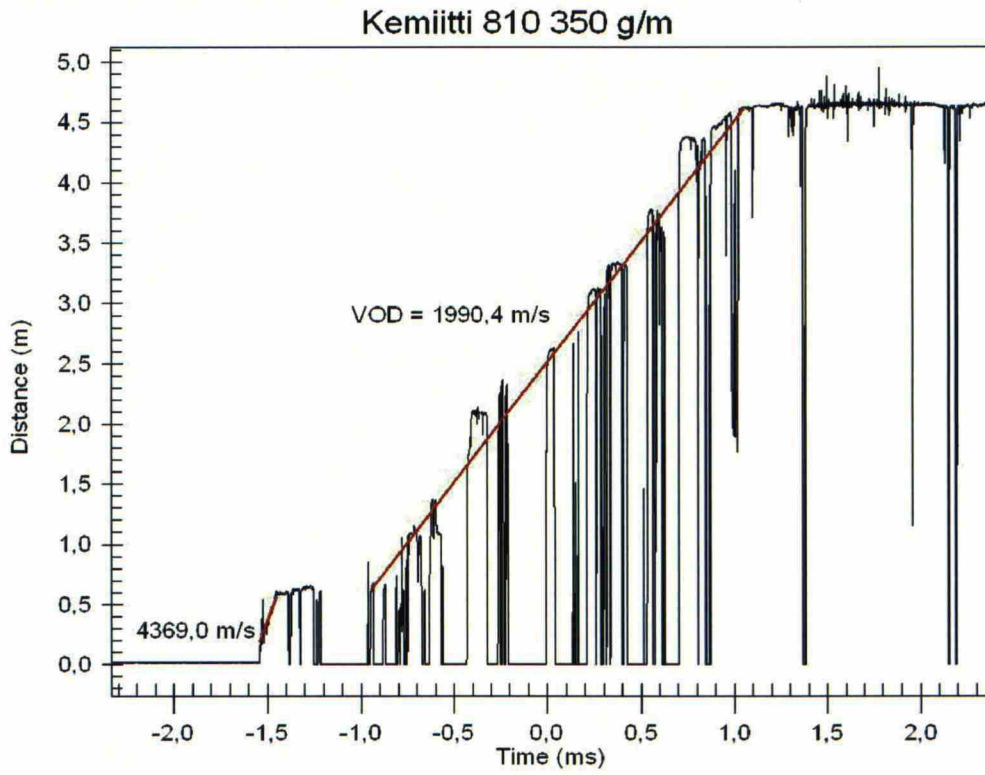
Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 22
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,2
Räjähdyssaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	12.58
Räjäytysaika:	13.15
Kaasuuntumisaika [min]:	17
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,6
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,0
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjäytin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	Mittaus epäonnistui, ei tulosta

Räjähdysopeustesti -raportti	Testinumero: 23
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,9
Räjähdyssaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	13.53
Räjätysaika:	14.11
Kaasuuntumisaika [min]:	18
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,2
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	

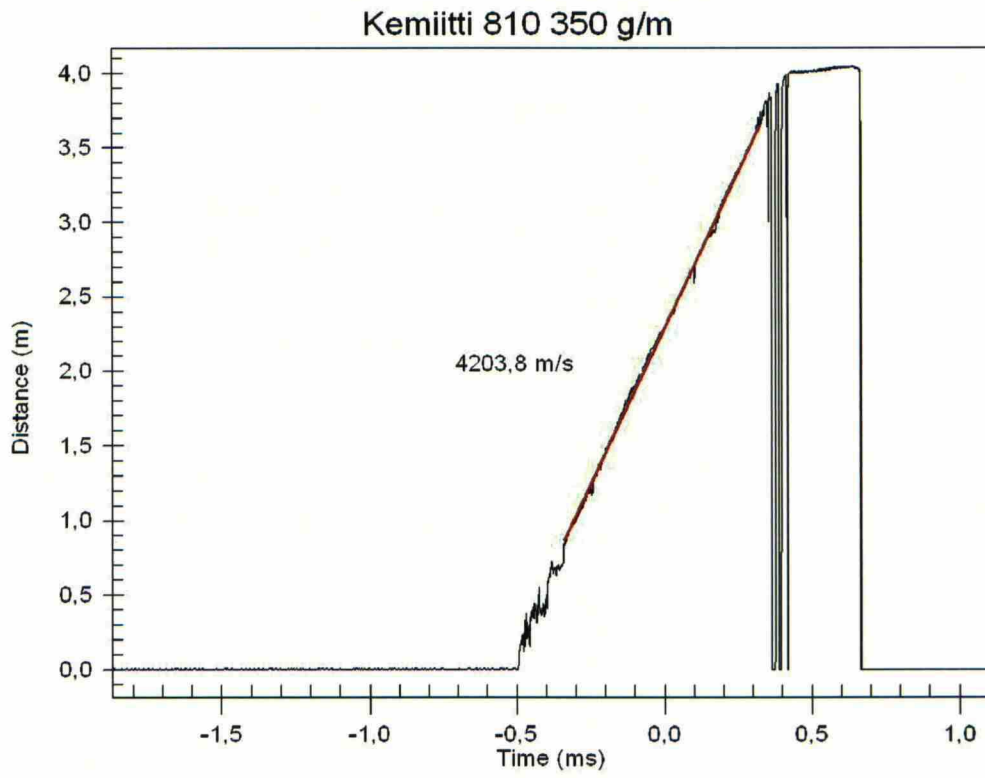


Liite A. 44/49

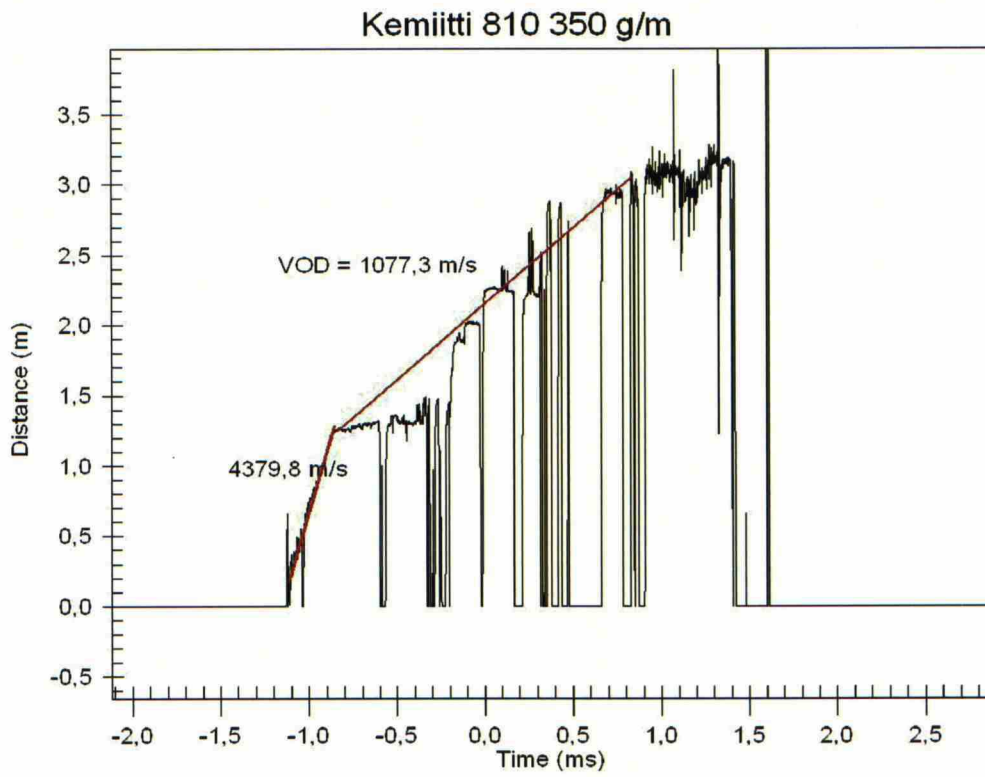
Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 24
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	4,5
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	14.25
Räjätysaika:	14.40
Kaasuuntumisaika [min]:	15
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,5
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	



Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 25
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,6
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	14.54
Räjätysaika:	15.09
Kaasuuntumisaika [min]:	15
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,2
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	



Räjähdysnopeustesti -raportti	Testinumero: 26
Päivämäärä:	1.7.2006
Testipaikka ja paaluluku:	T2:n toinen viuhka, PL 37698
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	3,2
Räjähdysaine:	Kemiitti 810
Rantu [g/m]:	350
Panostus alkoi:	15.37
Räjätysaika:	16.20
Kaasuuntumisaika [min]:	43
Lämpötila, tunneli [°C]:	6,8
Pohjapanos [kg tai kpl]:	0,7
Varsipanos [kg tai kpl]:	2,1
Reseptinumero:	9
Nallinumero:	8
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Terho Hirvonen
Lisätietoja:	



YIT		PORAUS- JA PANOSTUSKAAVIO																																																											
Urakka:		N13_5Raimo, N13_6Jussi		Pvm.																																																									
VUOLI-projekti, Tunneliurakka 5		Työnro	Kaavion laatija	21.3.2006																																																									
		31218	A-P. Manninen (J. Peltonen)																																																										
NALLITUS:			PORAUS:																																																										
			NALLIT:																																																										
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>n:o</th> <th>kpl</th> <th>n:o</th> <th>kpl</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>14</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>16</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>18</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>20</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1</td> <td>25</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1</td> <td>30</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>1</td> <td>35</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>1</td> <td>40</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>1</td> <td>45</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>2</td> <td>50</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>2</td> <td>55</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>2</td> <td>60</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Yhteensä</td> <td colspan="2">123</td> </tr> </tbody> </table>			n:o	kpl	n:o	kpl	0	1	14	4	1	1	16	5	2	1	18	4	3	1	20	4	4	1	25	7	5	1	30	2	6	1	35	4	7	1	40	7	8	1	45	18	9	2	50	10	10	2	55	15	11	2	60	24	Yhteensä		123	
n:o	kpl	n:o	kpl																																																										
0	1	14	4																																																										
1	1	16	5																																																										
2	1	18	4																																																										
3	1	20	4																																																										
4	1	25	7																																																										
5	1	30	2																																																										
6	1	35	4																																																										
7	1	40	7																																																										
8	1	45	18																																																										
9	2	50	10																																																										
10	2	55	15																																																										
11	2	60	24																																																										
Yhteensä		123																																																											
PANOSTUS:																																																													
räjähdysaine			reikiä	panos	pituus/kpl	reikäpanos	yht.																																																						
Pohjareiät			Kemix pp A 29	12	0,74 kg	6 kpl	4,44 kg	53,3 kg																																																					
Pohjan apulinja																																																													
pohjapanos			Kemitti 810	5	1500 g*																																																								
rantu			Kemitti 810		800 g/m	5,2 m	5,66 kg	28,3 kg																																																					
Aukaisu																																																													
pohjapanos			Kemitti 810	15	1500 g*																																																								
rantu			Kemitti 810		1800 g/m	5,2 m	10,86 kg	162,9 kg																																																					
Kenttäreiät																																																													
pohjapanos			Kemitti 810	30	1500 g*																																																								
rantu			Kemitti 810		1400 g/m	5,2 m	8,78 kg	263,4 kg																																																					
Reunan apulinja																																																													
pohjapanos			Kemitti 810	21	700 g**																																																								
rantu			Kemitti 810		600 g/m	5,2 m	3,82 kg	80,2 kg																																																					
Reunalinja																																																													
pohjapanos			Kemitti 810	40	700 g**																																																								
rantu			Kemitti 810		350 g/m	6,2 m	2,87 kg	114,8 kg																																																					
YHTEENSÄ:								123																																																					
								703 kg																																																					
						josta matriisia		650 kg																																																					
						kenttä		366 m3ktr																																																					
						ominaispanostus		1,92 kg/m3ktr																																																					
Räjähdyttimenä Kemitiissä Nobel Prime 15*150 (25 g)																																																													
*) tuotto 50 kg/min, 3 sek. vetoviive (kalibrointi 13.2.2006)																																																													
**) tuotto 20 kg/min, 2 sek. vetoviive (kalibrointi 13.2.2006)																																																													

YIT		PORAUS- JA PANOSTUSKAAVIO					
		N13 5Raimo, N13 6Jussi					
Urakka:	Työnro	Kaavion laatija	Pvm.				
VUOLI-projekti, Tunneliurakka 5	#	A-P. Manninen (J. Peltonen)	21.3.2006				
NALLITUS:			PORAUS:				
			NALLIT:				
			n:o	kpl	n:o	kpl	
			0	1	14	4	
			1	1	16	5	
			2	1	18	4	
			3	1	20	4	
			4	1	25	7	
			5	1	30	2	
			6	1	35	4	
			7	1	40	7	
			8	1	45	18	
			9	2	50	10	
			10	2	55	15	
			11	2	60	24	
			12	4			
			Yhteensä			123	
PANOSTUS:		räjähdysaine	reikiä	panos	pituus/kpl	reikäpanos	yht.
Pohjareivät		Kemix pp A 29	12	0,74 kg	6 kpl	4,44 kg	53,3 kg
Pohjan apulinja							
pohjapanos		Kemitti 810	5	1500 g*			
rantu		Kemitti 810		800 g/m	5,2 m	5,66 kg	28,3 kg
Aukaisu							
pohjapanos		Kemitti 810	15	1500 g*			
rantu		Kemitti 810		1800 g/m	5,2 m	10,86 kg	162,9 kg
Kenttäreivät							
pohjapanos		Kemitti 810	16	1500 g*			
rantu		Kemitti 810		1400 g/m	5,2 m	8,78 kg	140,5 kg
Kolmas linja							
pohjapanos		Aniitti 40	14	560 g			
varsipanos		Aniitti 36		1100 g/m	5,2 m	6,28 kg	87,9 kg
Reunan apulinja							
pohjapanos		Aniitti 32	21	370 g			
varsipanos		Aniitti 28		880 g/m	5,2 m	4,95 kg	103,9 kg
Reunalinja							
pohjapanos		Aniitti 28	40	275 g			
varsipanos		F-putki 17		210 g/m	6,2 m	1,58 kg	63,1 kg
YHTEENSÄ:			123				640 kg
							332 kg
Räjäytimenä Kemitiissä Nobel Prime 15*150 (25 g)							366 m3ktr
*) tuotto 50 kg/min, 3 sek. vetoviive (kalibrointi 13.2.2006)							1,75 kg/m3ktr
**) tuotto 20 kg/min, 2 sek. vetoviive (kalibrointi 13.2.2006)							

Testikatko -raportti	Testinumero: 1
Päivämäärä	1.3.2006
Testipaikka ja paaluluku:	Vuoli TU5, pohjoinen ratat. 34371,5
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	6,3
Poraus pvm ja klo:	1.3.2006, klo 0.15-2.45
Panostustapa:	Kemiitti 810 Reunarivi 350 g/m Apurivi 600 g/m Kenttäreikä 1400 g/m
Panostus pvm ja klo:	1.3.2006, 12.45–15.20
Räjätysaika klo:	16.10
Kaasuuntumisaika:	50 min
Lämpötila, tunneli [°C]:	4,85
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Tamminen & Hirvonen, Kortelainen
Lisätietoja:	Kenttä nro:624. Matriisimenekki 613,5 kg. Katkon pituus 5,5 m.

Liite C. 2/10

YIT
PANOSTUSRAPORTTI

20.3.2006 12:59

1 (3)

PVM JA KLO :	1.3.2006 klo 15:16
PERÄTUNNUS :	34371.5
PANOSTAJA :	4
MATRIISIERÄ :	90505
KAASUTUSAIN-%:	1,7
HAPPO-%:	1
VESI-%:	2,2
MATR. LÄMPÖTILA °C:	14,4
LISÄTIETOJA :	

REIKÄ NRO	MÄÄRÄ KG
1	18,3
2	10,5
3	9,0
4	6,4
5	1,3
6	2,7
7	6,3
8	6,0
9	6,6
10	7,1
11	7,0
12	7,1
13	7,0
14	7,3
15	7,4
16	7,2
17	7,0
18	6,9
19	6,9
20	7,1
21	6,6
22	6,5
23	6,8
24	6,8
25	7,1
26	7,8
27	2,7
28	2,7
29	2,9
30	4,1
31	7,8
32	7,1
33	9,9
34	9,4
35	9,8
36	9,8
37	10,1
38	11,4
39	10,3
40	9,1

Liite C. 3/10

YIT
PANOSTUSRAPORTTI

20.3.2006 12:59

2 (3)

REIKÄ NRO	MÄÄRÄ KG
41	10,0
42	9,5
43	9,5
44	10,5
45	9,3
46	9,6
47	9,4
48	10,4
49	11,1
50	4,3
51	4,3
52	2,8
53	2,7
54	2,8
55	2,8
56	7,3
57	7,5
58	7,1
59	7,1
60	4,4
61	2,9
62	2,8
63	2,8
64	4,4
65	4,5
66	2,8
67	2,8
68	7,6
69	7,2
70	6,8
71	6,8
72	7,4
73	6,9
74	6,9
75	7,3
76	7,4
77	4,3
78	4,2
79	2,8
80	2,7
81	2,6
82	2,8
83	2,4
84	1,1
85	4,1
86	4,1
87	4,1
88	4,2
89	2,8
90	2,7
91	2,7
92	2,7
93	2,8
94	2,7
95	2,7

Liite C. 4/10

YIT
PANOSTUSRAPORTTI

20.3.2006 12:59

3 (3)

REIKÄ NRO	MÄÄRÄ KG
96	2,8
97	2,7
98	2,8
99	4,3
100	4,2
101	2,9
102	2,7
103	7,5
104	4,2
105	2,8
106	2,7
107	2,8
108	4,2
109	0,0
110	0,0
111	0,0

Testikatko -raportti	Testinumero: 2
Päivämäärä	2.3.2006
Testipaikka ja paalulukku:	Vuoli TU5, pohjoinen ratat. 34366,5
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	6,3
Poraus pvm ja klo:	2.3.2006, klo 6.50-9.45
Panostustapa:	Kemiittii 810 Patruuna/putki Reunarivi 350 g/m Apurivi 600 g/m Kenttäreikä 1400 g/m
Panostus pvm ja klo:	2.3.2006 10.15–12.50
Räjätysaika klo:	14.12
Kaasuuntumisaika:	1h 22 min
Lämpötila, tunneli [°C]:	4,7
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime
Panostaja:	Tamminen
Lisätietoja:	Kenttä nro:625. Matriisimenekki 683,6 kg. PL-välillä 34366-34371,5: Itäpuoli punaisempaa graniittia ja murumaista. PL-välillä 34360-34366: Itäpuoli punaisempaa ja pehmeää, porausnopeus > 4 m/min. Katkon pituus 6 m.

Liite C. 6/10

YIT
PANOSTUSRAPORTTI

20.3.2006 12:59

1 (3)

PVM JA KLO :	2.3.2006 klo 12:49
PERÄTUNNUS :	34366.5
PANOSTAJA :	4
MATRIISIERÄ :	90505
KAASUTUSAINE-%:	1,7
HAPPO-%:	1,5
VESI-%:	2,2
MATR. LÄMPÖTILA °C:	16,5
LISÄTIETOJA :	

REIKÄ NRO	MÄÄRÄ KG
1	18,6
2	9,8
3	4,7
4	4,7
5	8,6
6	8,3
7	6,5
8	0,0
9	8,5
10	8,6
11	10,5
12	10,2
13	9,1
14	8,8
15	8,2
16	7,4
17	8,9
18	8,5
19	7,8
20	6,6
21	11,0
22	9,7
23	3,0
24	3,0
25	3,2
26	4,3
27	8,9
28	8,5
29	10,1
30	10,3
31	10,5
32	12,4
33	12,3
34	12,2
35	10,5
36	10,4
37	10,3
38	10,3
39	12,0
40	10,8

Liite C. 7/10

YIT
PANOSTUSRAPORTTI

20.3.2006 12:59

2 (3)

REIKÄ NRO	MAÄRÄ KG
41	10,1
42	10,2
43	8,3
44	8,5
45	9,2
46	4,3
47	3,0
48	2,8
49	2,9
50	2,9
51	4,4
52	8,2
53	3,0
54	2,9
55	4,3
56	8,9
57	9,5
58	15,5
59	10,1
60	5,6
61	8,7
62	4,3
63	3,0
64	3,2
65	2,9
66	4,8
67	2,6
68	4,7
69	2,8
70	9,3
71	7,9
72	11,0
73	9,0
74	9,2
75	4,4
76	4,0
77	2,8
78	2,9
79	2,8
80	2,8
81	4,0
82	1,0
83	2,9
84	10,0
85	6,1
86	8,8
87	9,9
88	10,3
89	9,1
90	0,0
91	5,0
92	4,3
93	1,2
94	2,6
95	1,3

Liite C. 8/10

YIT
PANOSTUSRAPORTTI

20.3.2006 12:59

3 (3)

REIKÄ NRO	MÄÄRÄ KG
96	3,4
97	3,0
98	3,2
99	2,8
100	4,4
101	2,8
102	2,8
103	2,8
104	3,0
105	3,0
106	3,0
107	2,9
108	2,9
109	0,0
110	0,0
111	0,0

Testikatko -raportti	Testinumero: 3
Päivämäärä	3.3.2006
Testipaikka ja paaluluku:	Vuoli TU5, pohjoinen ratat. 34360
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	6,3
Poraus pvm ja klo:	2.3.2006, klo 22.00 - 3.3.2006
Panostustapa:	Patruuna/putki Reunarivi F-putki 17 mm Apurivi Aniitti 28 mm Kenttäreikä Aniitti 36 mm
Panostus pvm ja klo:	3.3.2006, 2.45-4.55
Räjätysaika klo:	6.01
Kaasuuntumisaika:	1h 6 min
Lämpötila, tunneli [°C]:	7,1
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime (Kemiitissä)
Panostaja:	Keski-Ikkala
Lisätietoja:	Kenttä nro:626. Matriisimenekki 654,8 kg. PL-välillä 34360-34366: Peräseinä sekä itä- ja länsipuoli punaista graniittia joissa mustia juonia. PL-välillä 34360-34366: Kovaa ja pehmeää kalliota sekaisin, kohtuu hyvää kiveä (poratin kommentti). Katkon pituus 5,5 m. Paljon korventoja reunalinjoissa.

Liite C. 10/10

Testikatko -raportti	Testinumero:4
Päivämäärä	6.3.2006
Testipaikka ja paaluluku:	Vuoli TU5, pohjoinen ratat. 34354,5
Kivilaji:	Graniitti, keski-karkearakeinen
Porareiän halkaisija [mm]:	51
Porareiän pituus [m]:	6,3
Poraus pvm ja klo:	3.3.2006, klo 17.15 - 21.30
Panostustapa:	Patruuna/putki Reunarivi F-putki 17 mm Apurivi Aniitti 28 mm Kenttäreikä Aniitti 36 mm
Panostus pvm ja klo:	5.3.2006, 22.45 - 6.3.2006, 1.40
Räjätysaika klo:	6.01
Kaasuuntumisaika:	1h 6 min
Lämpötila, tunneli [°C]:	4,5
Nallityyppi:	NONEL LP
Räjätin:	Nobel Prime (Kemiitissä)
Panostaja:	Tamminen
Lisätietoja:	Kenttä nro:626 Matriisimenekki (panosturaporttiedosto vaillinainen). Katkon pituus 5,5 m.

Tunnel Manager - Round Log #4360.000 - [Round Log #4360.000]

File Edit View DPD Tunnel Browser Tree Window Help

Normal Horizontal Vertical 3D view

Log file:

Log #100,000 (

Log #1280,000

Log #1354,500

Log #1360,000

Log #1377,500

Log #1383,000

Log #1388,000

Log #1394,000

Log #1399,500

Log #4405,000

Log #4411,000

Log #4416,500

Log #4422,500

Log #4428,000

Log #4433,000

Log #4438,500

Log #4444,000

Log #4450,000

Log #4456,000

Log #4461,500

Log #4466,500

Log #4472,500

Log #4478,500

Log #4484,000

Log #4490,000

Log #4495,500

Log #4501,500

Log #4507,000

Log #4512,000

Log #4518,000

Log #4523,000

Log #4528,500

Log #4534,000

Log #4539,500

Log #4545,000

Log #4550,500

Log #4556,000

Log #4562,000

Log file:

Log file: @0301504.XML 3.3.2006 1:50:33

Laser: LAPOH_19LAS

Dillplan: N7236_11

Tunnel: Raufsteltunnel

Section: 4360.000

Rig ID: 8991327500

Hole info | Graph properties | Report

Avg pen. rate: m/min

Hole Depth: m

Lookout: m

Lookout angle: °

Lookout direction:

X: m

Y: m

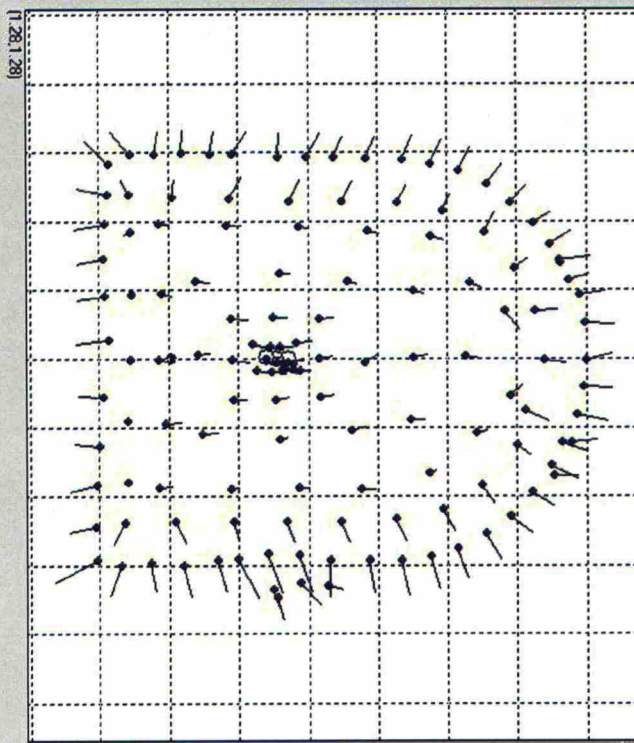
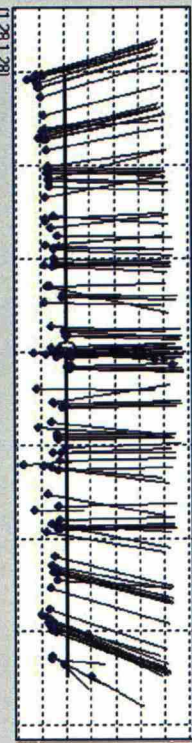
Z: m

Bit type:

Hole type:

Hole number:

Boom number:

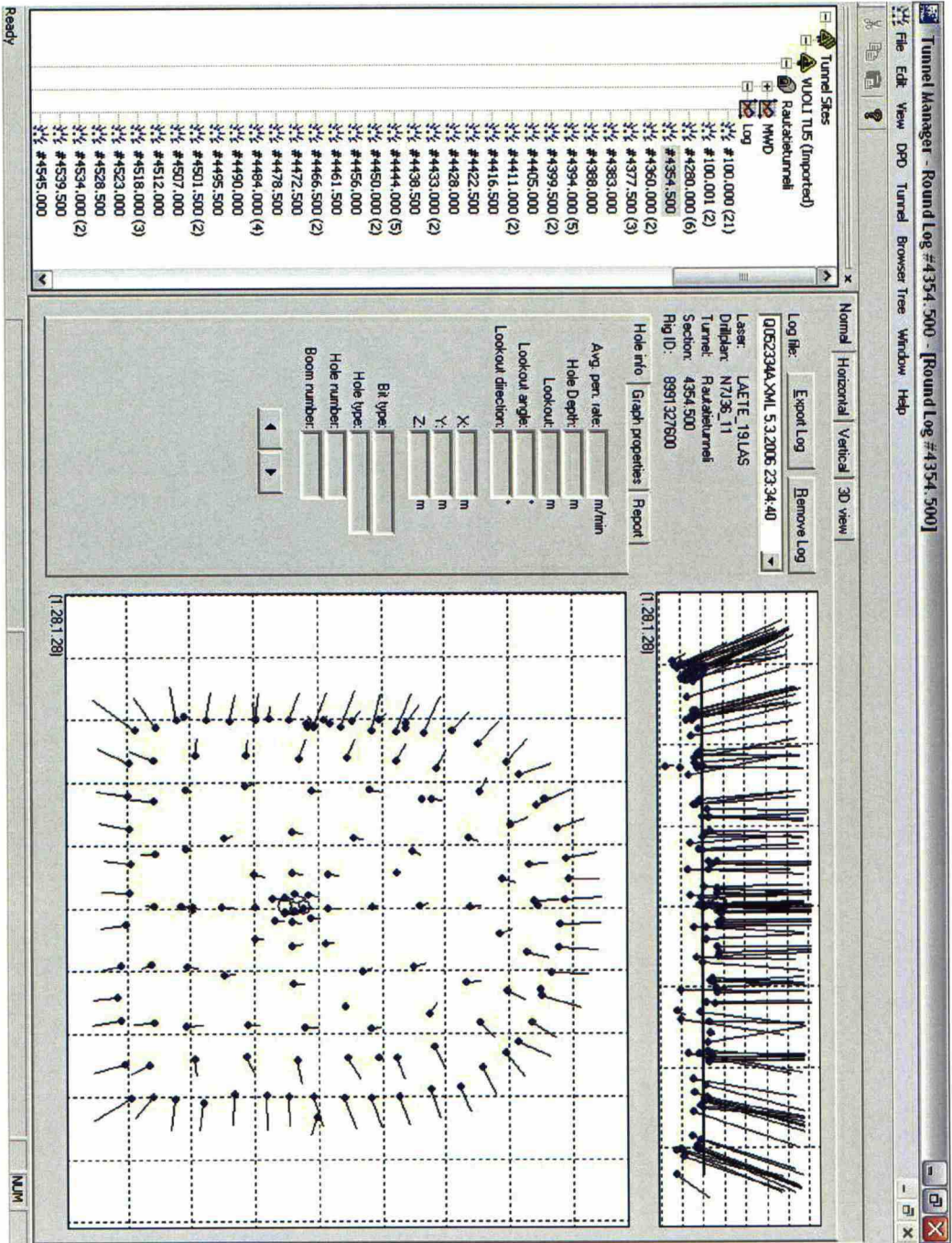


[1:281,281]

[1:281,281]

Ready

NUM



Katko	Pinta	Reikä	Lmax [cm]	Lw [cm]	Summa Lw [cm]	Ld [cm]	Summa Ld [cm]
Kemiitti 810	Eteläseinä	1	19	18	18		
Kemiitti 810	Pohj.seinä	2				8	8
Kemiitti 810	Pohj.seinä	3	36	18	18		
Kemiitti 810	Pohj.seinä	4	32	10,25	35		
Kemiitti 810	Lohkare	5	12	10,12,12	34	2,5,6	13
Kemiitti 810	Lohkare	6	10	10	10	5,6,5	16
Keskiarvo			22	14	23	5	12
F-putki	Eteläseinä	7	43	24	24	6	6
F-putki	Eteläseinä	8	46	24	24		
F-putki	Eteläseinä	9	36	30	30		
F-putki	Eteläseinä	10	39	30	30		
F-putki	Pohj.seinä	11				9,9	18
F-putki	Pohj.seinä	12	34	34	34		
F-putki	Pohj.seinä	13	20	20	20		
F-putki	Lohkare	14				4,6,6,6,7,5,9	43
F-putki	Lohkare	15				3,5	8
F-putki	Lohkare	16				7,6	13
Keskiarvo			36	27	27	6	18