

---

**KEMIITTI 810 PANOSTUSJÄRJESTELMÄN  
RAKOILUVYÖHYKKEET**



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Hämeenlinna, syksy 2014

Tomi Kouvonon



HÄMEENLINNA  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Rakennustuotanto

---

<b>Tekijä</b>	Tomi Kouvonon	<b>Vuosi</b> 2014
<b>Työn nimi</b>	Kemiitti 810 panostusjärjestelmän rakoiluvyöhykkeet	

---

## TIIVISTELMÄ

Tämä tutkimus on Oy Forcit Ab:n tilaama ja sen tuloksia käytetään dokumenttina viranomaisia ja suunnittelijoita varten sekä markkinointiin. Suomessa yleisenä sallittuna rikkoutumisvyöhykkeenä pidetään 400 mm:ä ja sen mukaisesti suunnittelijat pyrkivät suunnittelemaan louhintatyöt. Kalliotilan louhintojen suunnittelun lähtökohtana pidetään räjähdysainevalmistajien räjähteille ilmoittamia rakoiluarvoja.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää voidaanko louhinnan aiheuttamaa rakoilua mallintaa teoreettisesti sekä selvittää kenttäkokein Kemiitti 810 emulsioräjähteen aiheuttama rakoilu. Tutkimustuloksia voidaan hyödyntää kalliotilojen suunnittelussa, kun käytetään Kemiitti 810 emulsiopanostusta. Lisäksi tutkimuksessa selvitettiin GPR EDZ menetelmän eli maatulituksen soveltuvuutta louhinnan aiheuttaman rakoilun tutkimiseen.

Räjähdystapahtumaan ja kallion rikkoontumiseen liittyvä teoria on selvitetty asiakirjatutkimuksin. Lähdeaineistona on käytetty alan johtavien tutkijoiden julkaisuja ja kirjoja, aikaisempia tutkimuksia sekä väitöskirjoja. Räjähdyspaine -osuus sekä varsinaiset rakoilututkimukset tehtiin empiirisiin kenttäkokein.

GPR EDZ menetelmä soveltuu louhinnan aiheuttaman rakoilun tutkimusmenetelmäksi. Sitä pitää kuitenkin vielä kehittää, jotta se soveltuisi maanalaisten kalliotilojen laadunvalvontaan ilman geologin koulutusta.

K810 emulsioräjähteen rakoiluvyöhyke voidaan määrittää likimäärin oikein teoreettisella mallintamisella. Tutkimuksen yhteenvedossa esitetään kaava, jolla laskenta voidaan tehdä. Yhteenvedossa esitetään myös keskimääräiset rakopituudet, joiden avulla voidaan suunnitella kaari- ja apukaarireikien louhinnat.

Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää voidaanko louhintajäljen optimoinnilla saada kustannussäästöjä muista työvaiheista tunnelilouhinnassa.

**Avainsanat** Rikkoontumisvyöhyke, räjähdyspaine, räjähdysnopeus, rantupanos

**Sivut** 83 s. + liitteet 17 s.

Hämeenlinna  
Degree Programme in civil engineering  
Construction output

---

<b>Author</b>	Tomi Kouvonen	<b>Year</b> 2014
<b>Subject of Bachelor's thesis</b>	Fracture zones caused by Kemiitti 810 charging system	

---

ABSTRACT

This thesis is Oy Forcit Ab commissioned and its results will be used as a document for the authorities and for rock engineers as well as marketing purposes. In Finland, as a general allowed EDZ-zone is considered to be 400 mm. According to that limit, engineers tend to design the excavation works. The basis for the designing of rock spaces is fracture zones published by manufacturer of explosives.

The aim of this thesis was to determine would it be possible to model theoretically excavation-induced fracturing and with field tests clarify the fracture zone caused by Kemiitti 810. The research results can be used to design rock spaces, when using Kemiitti 810 emulsion charging system. In addition, the study explored EDZ GPR method, a.k.a. ground-penetrating radar, suitability for the fractures researching caused by excavation works.

Researched method for the theory of explosion event and the failure of the rock was document studies. Industry's leading researcher's publications and books, as well as previous studies and dissertations were used as a source material. Explosion pressure and the actual fracture investigations were made by empirical field tests.

EDZ GPR is suitable method for researching excavation-induced fractures. It still has to be developed that it would be suitable for the underground rock spaces quality control without a need for a geology degree.

K810 emulsion explosive fracture values can be calculated approximately correctly by theoretical modeling. Formula for the calculations is presented in this study's summary. The summary also shows fracture values for K810, which can be used when designing excavation of contours and helpers.

Further studies should investigate is it possible to achieve cost savings by optimization of low fracture zones in other phases of the tunnel excavation

**Keywords** Fracture zone, detonation pressure, velocity of detonation, string charge

**Pages** 83 p. + appendices 17 p.

## Lyhenteet, merkit ja termit

B	etu (m)
Bulk-räjähde	irtoräjähde
CR	coupling ratio, Räjähdysainepatruunan ja porareian halkaisijan suhde ( $D_e/D_r$ )
$D_e$	räjähdysaineen halkaisija (mm)
$D_h$	porareian halkaisija
EDZ	excavation damage zone, louhinnan aiheuttama rakoiluvyöhyke
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)
Lusta	kalliossa oleva luonnollinen rako
$L_w$	laajalle levinneiden rakojen pituus
PETN	pentriitti
$P_{DET}$	räjähdyspaine (MPa)
$P_e$	paine räjähdysaineen pinnalla (MPa)
$P_h$	paine porausreian seinämässä (MPa)
$q_l$	panostusaste (kg/m)
RDX	heksogeeni
Rusnaus	räjäytyksessä kallion pintaan jääneiden irtolohkareiden poistaminen
$R_c$	maksimirakojen muodostama rikkoutumisvyöhyke (m)
$R_{c0}$	laskennallinen rakopituus (m)
S	reikäväli (m)
TNT	trinitrotolueeni
$V_g$	kaasutilavuus (l/kg)
VOD	velocity of detonation, räjähdysnopeus (m/s)
$\gamma$	laajenemisvakio
$\rho$	tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma_c$	puristuslujuus (MPa)
$\sigma_t$	vetolujuus (MPa)

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkimusmenetelmät ja rajaukset.....	2
1.3	Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset .....	3
2	MAANALAISSISSA LOUHINNOISSA KÄYTETTÄVÄT RÄJÄHDYSAINEEET JA SYTYTYSVÄLINEET .....	3
2.1	Louhintaräjähdyksaineet .....	3
2.1.1	Louhintaräjähteiden ominaisuudet .....	3
2.1.2	Louhintaräjähteiden jaottelu .....	4
2.1.3	NG-räjähteet .....	5
2.1.4	Anfot.....	6
2.1.5	Emulsiot ja vesigeeliräjähteet.....	7
2.2	Kemiitti 810 panostusjärjestelmä .....	9
2.3	F-putkipanos.....	12
2.4	Sytytysvälineet ja sytytysjärjestys peränaajossa .....	13
2.4.1	Impulssiletkusytytys .....	13
2.4.2	Elektroninen nalli .....	16
2.4.3	Sytytysjärjestys peränaajossa .....	17
3	SUOMEN KALLIOPERÄ JA TYYPILLISET KIVILAJIT SUOMESSA SEKÄ NIIDEN RÄJÄYTETTÄVYYS .....	19
3.1	Suomen kallioperä ja kivilajit .....	19
3.2	Kivilajien tekniset ominaisuudet ja niiden tutkimusmenetelmät .....	20
3.3	Rakennusgeologinen kallioluokitus ja kallion räjäytettävyys .....	25
4	RÄJÄHDYS JA RÄJÄHDYSVAIKUTUKSET KALLIOSSA .....	27
4.1	Räjähdyksen eteneminen kalliossa .....	27
4.2	Kallion rikkoutuminen .....	28
4.3	Räjähdyksaineen teho.....	29
4.4	Räjähdyksnopeus (VOD) ja sen mittaaminen .....	31
4.4.1	Ideaali- ja epäideaalidetonaatio .....	31
4.4.2	Menetelmät räjähdysnopeuden mittaamiseen.....	33
4.4.3	K810 ja 17 x 500 F-pp VOD ja mittaustuloksia.....	35
5	RAKOILUN SYNTYMINEN.....	36
5.1	Rakoilun syntyminen.....	36
5.2	Räjähdyksen aiheuttama paine .....	37
5.3	Räjähdyksipainemittaukset Vihtavuorella porausreikäsimulaattorissa .....	41
5.3.1	Mittausjärjestelyt .....	41
5.3.2	Mitattavat räjähteet .....	42
5.3.3	Mittaustulokset ja niiden analysointi.....	43
5.4	Painemittaukset Sandvik Mining & Constructionin testikaivoksessa 9.9.2014 .....	46
5.4.1	Mittausjärjestelyt .....	46
5.4.2	Mittaustulokset ja niiden analysointi.....	48
5.5	Porauskaavion ja sytytysjärjestelyn vaikutus rakoiiluun .....	50

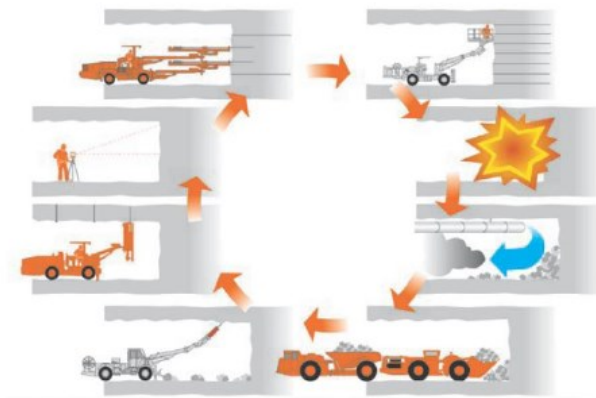
5.6	Louhinnan aiheuttaman rikkoutumisvyöhykkeen (EDZ) laskentamallit .....	51
5.7	Rikkoutumisvyöhykkeen ja rakoilun tutkimusmenetelmät ja aikaisemmat tutkimukset .....	54
5.7.1	Maatutka menetelmä (GPR EDZ menetelmä).....	54
5.7.2	Aikaisemmat tutkimukset GPR EDZ laitteistolla.....	56
5.7.3	Rakoilun tutkiminen tunkeumaliuoksilla .....	58
5.7.4	Aikaisempia EDZ tutkimuksia emulsioräjähteille.....	59
6	KENTTÄTUTKIMUKSET .....	62
6.1	Rakoilututkimukset Kurun kiven tarvekivilouhimolla.....	62
6.1.1	Tutkimuskohteen geologia .....	62
6.1.2	Panostusmenetelmät .....	63
6.1.3	Rakoilun ja rikkoutumisvyöhykkeen tutkiminen räjäytetyistä kohteista ja johtopäätöksiä.....	64
6.2	Rikkoutumisvyöhyke (EDZ) tutkimukset Sandvik Mining & Constructionin testikaivoksessa .....	67
6.2.1	Tutkimuskohteen geologinen kartoitus .....	68
6.2.2	Testikatkojen poraus.....	69
6.2.3	Testikatkojen louhinta .....	70
6.2.4	Räjätysten aiheuttaman rikkoutumisvyöhykkeen tutkiminen ja tutkimustulokset .....	72
6.2.5	Johtopäätökset Sandvikin testikaivoksen louhinnoista .....	75
7	YHTEENVETO .....	77
	LÄHTEET .....	80
Liite 1	Otteita impulssiletkunallien paloikatutkimuksesta	
Liite 2	Kivilajien lujuusominaisuuksia	
Liite 3	Painemittauskäyrät 9.9.2014	
Liite 4	Tutkimuksen räjähteiden laskennallisia EDZ vyöhykkeitä eri kivilajeille	
Liite 5	LOVA 2014 panostussuunnitelmat	
Liite 6	LOVA 2014 näytteiden sijainti tunnelissa	
Liite 7	LOVA 2014 petrofysiikan kokeiden tutkimustulokset	

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Tutkimuksen tausta

Tämä tutkimus on Oy Forcit Ab:n tilaama ja sen tuloksia käytetään dokumenttina viranomaisia ja suunnittelijoita varten sekä markkinointiin niin Suomessa kuin ulkomaillakin. Käytännön mittaukset toteutettiin yhteistyössä Tampereen Kovakiven, Sandvik Mining & Constructionin, Posivan, SKB:n, Geofconin sekä GTK:n kanssa.

Maanalaisten kalliotilojen rakentamisessa yksi kustannustehokkaimmista toteutustavoista on louhia tarvittavat tilat. Kalliotilojen louhinta tarkoittaa, että kallioon porataan reikiä tiettyyn haluttuun kaavioon ja ne panostetaan räjähdysainein ja räjäytetään. Tämän jälkeen räjähdyksessä syntynyt kiviaines lastataan ja kuljetetaan pois työmaalta. Louhitusta tilasta rusnataan irtolohkareet pois, jonka jälkeen se lujitetaan. Kuvassa 1 on esimerkkikuva tuotantocyklisestä tunnelilouhinnassa.



Kuva 1. Tuotantocykli tunnelilouhinnassa (Heiniö 1999)

Räjäytyksestä syntyvä iskuaalto ja kuumuudessa laajenevat räjähdyskaasut irrottavat louhittavan kiven, mutta samalla vaurioittavat myös jäljelle jäävää kalliopintaa. Tätä rikkonaista pintaa kutsutaan EDZ- vyöhykkeeksi (excavation damage zone) eli kallion rikkoutumisvyöhykkeeksi. Louhinnan vaurioittama kalliomassa voidaan Dinis da Gama:n ja Navarro Torres:n mukaan (Kantia 2014a) jakaa seuraaviin osiin: 1) murskautunut vyöhyke, 2) indusoituneiden radiaalisten rakojen vyöhyke, 3) laajentuneiden ja jatkuneiden luonnonrakojen vyöhyke ja 4) elastinen alue, missä rakoja ei muodostu. Louhinnan yhteydessä tapahtuvat jännityskentän suunnan ja voimakkuuden muutokset voivat myös osaltaan aiheuttaa kalliossa rakoilua. Lisäksi louhinnan on todettu aiheuttavan kivilajiriippuvaista mikrorakoilua kalliossa.

Suomessa yleisenä sallittuna rikkoutumisvyöhykkeenä käytetään 400 mm:ä ja sen mukaisesti suunnittelijat pyrkivät suunnittelemaan louhintatyöt. Raja-arvoa voidaan myös tapauskohtaisesti tiukentaa. Kalliotilan louhintojen suunnittelun lähtökohtana pidetään räjähdysainevalmistajien räjähteille ilmoittamia rakoiluvarvoja. Mitä tarkemmat rakoiluvarvot ja rä-

jähdyksen aiheuttamat rikkoutumisvyöhyketiedot suunnittelijalla on käytössä, sen tarkemmin louhinnat pystytään toteuttamaan ja saamaan kustannussäästöjä lujittamisessa ja sen tarkoituksenmukaisessa toteuttamisessa. Luotettavien lähtöarvojen lisäksi olisi tärkeätä pystyä todentamaan syntynyt rikkoutumisvyöhyke louhintojen edetessä.

Kemiitti 810 on Oy Forcit Ab:n markkinoima emulsiopanostusjärjestelmä maanalaisiin louhintatöihin. Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään Kemiitti 810 räjähdysaineen aiheuttamaa rakoilua yksittäisissä rei'issä ja rikkoutumisvyöhykettä tunnelin seinämillä sekä arvioimaan maatutkauksen hyödynnettävyyttä EDZ vyöhykkeen arvioinnissa. Emulsiopanostuksen aiheuttamasta rakoilusta ja louhinnassa syntyvästä EDZ vyöhykkeestä on tehty useita kansainvälisiä tutkimuksia, mutta Forcitin valmistaman Kemiitti 810 osalta ei näin perusteellisia tutkimuksia ole. Aiheeseen liittyen on tehty diplomityö Teknillisessä korkeakoulussa vuonna 2006 (Myllymäki 2006). Sen tulosten luotettavuus ei ole paras mahdollinen, koska otanta ei ole kovin suuri ja räjäytysnopeusmittaustulokset eivät ole onnistuneita. Lisäksi rakoilua tutkittiin vain louhitun kallion seinästä. Seinään sahattiin halkiot ja kiilattiin lohkot irti. Tämä mekaaninen lohkominen on voinut aiheuttaa tutkittaviin paloihin rakoja, jotka eivät ole louhinnan aiheuttamia. Pohjoismaissa suurin kokemus EDZ-vyöhykkeen tutkimisesta on Posivalla ja SKB:lla. Molemmat tutkivat louhinnan aiheuttamia vaurioita ydinjätteen loppusijoituspaikkoihin liittyen. Posiva rakennuttaa Suomessa Onkaloa, josta tulee ydinjätteen loppusijoituspaikka. SKB rakennuttaa Ruotsissa Äspölaboratorietta, joka on maanalainen tutkimuslaboratorio.

Tämän työn tutkimustuloksia voidaan hyödyntää kalliotilojen suunnittelussa, kun käytetään Kemiitti 810 emulsiopanostusta.

### 1.2 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Tutkimuksen teoriapohja on selvitetty asiakirjatutkimuksin sekä haastatteluin. Tohtori Aarne Lislerrudin kanssa on keskusteltu kivilajien ominaisuuksien vaikutuksista räjähdystapahtumaan sekä detonaatiofysiikan ilmiöistä. Tutkimustulosten ja johtopäätösten kommentointiin ovat osallistuneet Oy Forcit Ab:lta Timo Halme ja Tommi Halonen, Sandvik Mining & Construction Oy:stä Jouko Salonen sekä Aarne Lislerrud, Posivalta Sanna Mustonen ja SKB:lta Thomas Lehtimäki.

Käytännön kokeilla tutkittiin Kemiitti 810 emulsioräjähteen rakoiluarvoja 350 g/m, 400 g/m ja 500 g/m panostusasteille. Vertailukohteena tutkimuksessa on käytetty Forcitin valmistamaa 17 x 500 F-putkipanosta. Rakoilua mitattiin käytännönkokeissa sekä maatutkausmenetelmällä että tunkeumaliuksilla. Käytännönkokeet muodostuivat kolmesta eri tutkimusvaiheesta. Painemittaustutkimuksilla selvitettiin voimaa, jolla räjähdys vaikuttaa kivien porausreiässä ja valitun sytytysmenetelmän vaikutusta paineaallon käyttäytymiseen. Lohkotutkimuksessa selvitettiin maatutkan soveltuvuutta rakoilututkimukseen F-putkipanoksen avulla. Kolmannessa vaiheessa louhittiin Sandvik Mining & Constructionin Tampereen tehtaan testikaivokseen 25 metriä pitkä tutkimustunneli, josta tutkittiin K810 emulsioräjä-

teen aiheuttamaa rakoilua kiveen. Mitattuja rakoilu-arvoja verrattiin aikaisempiin tutkimuksiin ja teoriassa laskettuihin arvoihin.

### 1.3 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa käyttökelpoiset rakoilu-arvot Kemiitti 810 panostusjärjestelmälle kaarirei'illä ja apukaarilla tunnelilouhinnassa tyypillisesti käytettäville panostusasteille (g/m). Lisäksi työssä pyrittiin arvioimaan maatutkauksen soveltuvuutta EDZ-vyöhykkeen arviointiin emulsiopanostuksen yhteydessä käytettäessä Kemiitti 810:tä.

Tällä työllä pyrittiin saamaan vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Saadaanko teoreettisella laskennalla määritettyä todellisuutta vastaavat rakoilu-arvot Kemiitti 810 emulsioräjähteelle?
- Vastaako teoriassa laskettu räjähdyspaine porareian seinämässä todellista tilannetta käytettäessä Kemiitti 810 emulsioräjähdettä?
- Saadaanko maatutkauksella tutkittua louhinnan aiheuttamaa EDZ vyöhykettä riittävällä tarkkuudella?
- Mikä on EDZ-vyöhyke ja miten se syntyy?
- Mikä on geologian vaikutus rakoilun syntyyn?

## 2 MAANALAISISSA LOUHINNOISSA KÄYTETTÄVÄT RÄJÄHDYSAINHEET JA SYTYTYSVÄLINEET

### 2.1 Louhintaräjähdysaineet

#### 2.1.1 Louhintaräjähteiden ominaisuudet

Louhintaräjähteitä käytetään pääsääntöisesti kiven rikkomiseen. Tämän vuoksi niillä on tyypillisesti suuri energiasisältö ja ne tuottavat räjähtäessään paljon kaasuja. Räjähdysnopeus (VOD) on louhintaräjähteillä (< 6000 m/s) tavallisesti pienempi kuin sotilasräjähteillä (RDX:n VOD > 8400 m/s). Louhintaräjähteet ovat yleensä kahden tai useamman komponentin muodostamia seoksia. Seos sisältää vähintään hapettimen ja polttoaineen. Seos voi sisältää myös räjähdysainekomponentin kuten nitroglykolin (NG), trinitrotolueenin (TNT) tai pentriitin (PETN). Seoksessa voi olla mukana myös muita lisäaineita (esimerkiksi alumiini), joilla säädetään räjähdyskaasujen määrää tai lämpöä. (Räjähdikirja 2005, 124 – 126.)

Räjähdyksessä muodostuu 400 - 1000 litraa kaasuja räjähdysainekiloa kohden. Pääosa kaasuista on vesihöyryä, hiilidioksidia ja typpeä. Pieni osa kaasuista on myrkyllisiä kaasuja, kuten hiilimonoksidia (CO) ja typen oksideja (NO + NO<sub>2</sub>). Räjähdysaineiden valmistuksessa pyritään saamaan happitasapaino mahdollisimman lähelle nollaa tai hieman positiiviseksi, jolloin hapetin ja polttoaine kuluisivat räjähdystapahtumassa lähes kokonaan ja syntyisi vain vähän myrkyllisiä kaasuja. Maanalaisissa louhinnoissa on räjähdysainekaasuilla suuri merkitys. Ilmaa raskaammat myrkylliset

kaasut jäävät helposti maanalaisiin tiloihin pitkäksi aikaa ja vaativat huolellista tuulettamista. (Räjähdekirja 2005, 124 – 126.)

Taulukoissa yksi ja kaksi on esitetty maanalaisissa louhinnoissa tyypillisesti käytettävien Forcitin valmistamien luhintaräjähteiden ominaisuuksia. Taulukossa 1 vertailutuotteena on sotilasräjähteistä heksogeeni (RDX). Heksogeeni on valittu taulukon 1 vertailutuotteeksi, koska sitä käytetään monissa kaupallisissa luhintaräjähteissä. Taulukossa 2 vertailutuotteena on Forcitin valmistama dynamiitti (Fordyn).

Taulukko 1. Louhintaräjähteiden ominaisuuksia (Räjähdekirja 2005, 145 - 146; Oy Forcit Ab)

	RDX	17x500 F-pp	17x1000 Kemix pp	39x1000 Kemix A pp	Kemiitti 810	Anfo
Tiheys kg/dm <sup>3</sup>	1,8	1,1	1,0	1,2	1,0	0,9
Happitasapaino %		+5,7	-4,3	-3,1	-1,6	0
Kaasutilavuus l/kg	908	406	946	964	1020	965
Räjähdyslämpö MJ/kg	6	2,4	2,9	3,0	2,9	4,0
Räjähdynopeus m/s	8400	2200	>4200	>5000	2000- 5500	3000- 3500
Iskuherkkyys		>2J	>2J	>2J	*	>2J
Pakkaskestävyys		-25	-25	-25	**	-25
Voima /painoyksikkö (s) (ANFO 1,0)	1,27	0,58	0,77	0,80	0,78	1,0

\*) testataan ns. shooting-testissä, jossa 15 g messinkilieriö ammutaan räjähdysaineeseen. K810 kestää 700 m/s sekunnissa nopeuden ilman reaktiota. Anfolla sama nopeus on 400m/s.

\*\*) Matriisi on säilytettävä suljetussa tilassa +10 - +25 °C lämpötilassa, valmiin tuotteen laskiessa alle +10 °C, saattaa pumppaaminen vaikeutua

Taulukko 2. Oy Forcit Ab:n valmistamien luhintaräjähteiden räjähdyskaasujen koostumuksia (Cheetah 2.0 laskentaohjelma)

	Fordyn (dynamiitti)	17x500 F-pp	17x1000 Kemix pp	39x1000 Kemix A pp	Kemiitti 810	Anfo
H <sub>2</sub> O g/kg	380	106	556	515	560	485
N <sub>2</sub> g/kg	270	107	282	270	278	330
CO <sub>2</sub> g/kg	305	278	118	72	142	182
NO g/kg	1,79	1,8	0	0	0	0,55
NO <sub>2</sub> g/kg	0,28	0,02	0	0	0	0,001
CO g/kg	0,003	0,02	40	51	16	0,1

## 2.1.2 Louhintaräjähteiden jaottelu

Luhintaräjähdysaine on yleisnimi kalliorakentamisessa, tarvekiviteollisuudessa ja kaivostoiminnassa käytettäville räjähdysaineille. Louhintaräjähteitä käytetään myös vedenalaisissa louhinnoissa ja purkuräjäytyksissä. (Räjähdekirja 2005, 123.)

Kansainvälisesti louhintaräjähteet jaetaan neljään luokkaan:

- NG-räjähteet
- Anfot
- Vesigeeliräjähteet
- Emulsioräjähteet

(Vuolio & Halonen 2010, 58.)

Louhintaräjähteet ryhmitellään olomuotonsa mukaan plastisiin, jauhemaisiin ja emulsioräjähteisiin. Ne voidaan pakata patruunoihin, putkiin, säkkeihin tai ne voivat olla pumpattavia räjähteitä. (Räjähdekirja 2005, 123.) Kemiitit ovat Oy Forcit Ab:n tuotenimi pumpattaville emulsioräjähteille. F-putkipanos on jauhemainen räjähdettä, joka kuuluu NG-putkipanoksiin. Dynamiitit ovat patruunoituja plastisia räjähteitä, jotka kuuluvat NG-räjähteisiin.

### 2.1.3 NG-räjähteet

NG-räjähteet sisältävät herkästi syttyvää räjähdysainetta, kuten nitroglyserolia tai nitroglykolia eli räjähdysöljyä. Tällaisilla räjähdysaineilla on korkea räjähdysteho ja ne soveltuvat miltei kaikkiin räjähdystöihin. Vaikka tuotteiden käsittelyvarmuus on 1960-luvulta lähtien parantunut ja ammoniumnitraatti on syrjäyttänyt räjähdysöljyjen osuutta, näiden tuotteiden mekanisoitu panostaminen hyvin rajoittunutta. Käytännössä NG-tuotteet panostetaan edelleen käsin. (Vuolio & Halonen 2010, 58 – 61.)

NG-räjähteistä voidaan valmistaa ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia. NG-putkipanokset pitävät sisällään piimaata, joka on myrkytön luonnon tuote. Tämän tyyppisten putkipanosten räjähdysnopeus on 1700 – 2400 m/s. NG-putkipanoksia käytetään tarkkuutta ja kevyttä panostusta vaativissa kohteissa, kuten tarvekivilouhimoilla tai maanalaisessa louhinnassa peränajossa kaarirei'illä. (Räjähdekirja 2005, 127 – 130.) Oy Forcit Ab:n valmistama Redex on taas erikoisdynamiitti, joka sisältää heksogeeniä (RDX). RDX lisää tavallisen dynamiitin räjähdysnopeutta ja se tekee siitä erinomaisen bulk-räjähteiden, kuten Anfot ja Kemiitit, aloitepanoksen. (TT Fordyn Redex 31102014.)

NG-tuotteiden sisältämä räjähdysöljy on ihmiselle myrkyllistä. Joutuesaan elimistöön nitroglykoli ja nitroglyseroli laskevat verenpainetta ja laajentavat verisuonia. Tämä aiheuttaa useimmille ihmisille päänsärkyä ja pahoinvointia. (Vuolio & Halonen 2010, 69.)

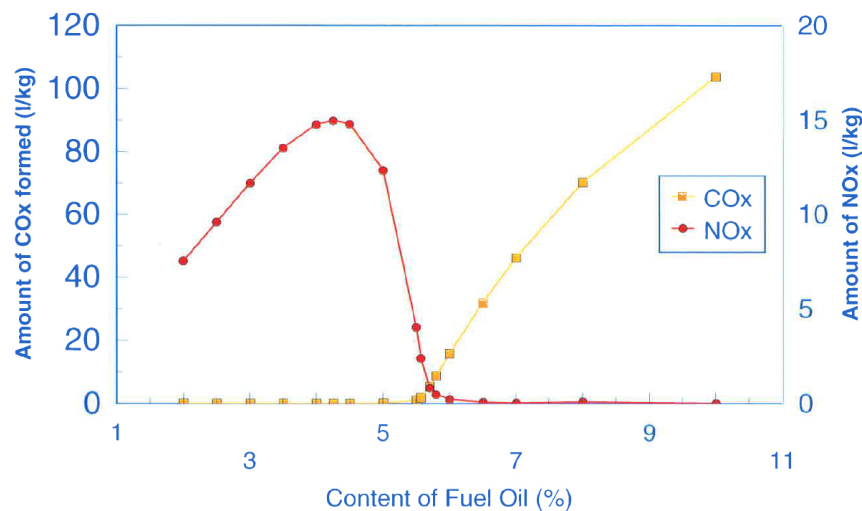
Räjähdysöljyä NG-tuotteista voi joutua elimistöön suorasta ihokosketuksesta tai hengitysilman kautta. Käytettäessä NG-tuotteita tulee panostustyön aikana välttää ihokosketusta. Lisäksi varastointi- ja säilytyspaikoilla tulee huolehtia riittävästä tuuletuksesta.

NG-tuotteiden myrkyllisyyden ja epäpuhtaiden räjähdyskaasujen takia emulsioräjähteet ovat syrjäyttäneet pääosin dynamiittituotteet maanalaisen tilojen louhinnoissa.

## 2.1.4 Anfot

Anfot ovat valmistustavaltaan yksinkertaisimpia louhintaräjähdyksaineita. Ne ovat ammoniumnitraatin ja öljyn seoksia. Valmistus tapahtuu sekoittamalla ammoniumnitraattia ja kevyttä polttoöljyä suhteessa 94,5:5,5. Tällä suhteella Anfot saadaan tehtyä happitasapainoon, jolloin räjähdyskaasut ovat mahdollisimman puhtaita. Lisäaineiden avulla Anfoista saadaan hetkellisesti kosteutta kestäviä sekä ylöspäin suuntautuvissa rei'issä pysyviä. Vedenkestävyyttä voidaan lisätä myös lisäämällä Anfon sekaan emulsiota (< 50%). Tämän tyyppisiä Heavy Anfoja ei Suomessa juurikaan käytetä, mutta maailmalla ne ovat yleisiä. Maanalaisissa louhinnoissa (vaaka- ja ylöspäin suuntautuviin reikiin) panostetaan Anfot tyyppillisesti paineilma-käyttöisillä panostuslaitteilla. Avolouhinnoissa panostus tapahtuu suoraan säkistä kaatamalla. (Räjähdekirja 2005, 132 – 137; Vuolio & Halonen 2010, 58 - 63.)

Vaikka Anfot valmistetaan happitasapainoon, tulee niistä käytön yhteydessä suhteellisen paljon ympäristöpäästöjä. Joutuessaan kosteuden kanssa kosketuksiin liukenee osa ammoniumnitraateista veteen ja tällöin tuote ei räjähdä puhtaasti. Kuvassa 2 on esitetty öljypitoisuuden merkitys CO<sub>x</sub> ja NO<sub>x</sub> pitoisuuksiin.



Kuva 2. Anfon öljymäärän vaikutus CO<sub>x</sub> ja NO<sub>x</sub> kaasujen muodostumiseen (Norsk Hydro 2001)

Suurimmat ympäristöpäästöt tulevat kuitenkin panostuksen yhteydessä, jolloin tuotetta jää syystä tai toisesta panostamattomana panostuspaikan ympäristöön. Veteen liukenevat nitraatit voivat rehevöittää vesistöä tai pilata pohjavesiä. Polttoöljyllä voi olla pitkäaikaisia haittavaikutuksia maaperässä ja vesistöissä. (Räjähdekirja 2005, 134; Ympäristöesite 2010, 1-8.) Kuvassa 3 näkyy hukkapanostusta, jota voi syntyä panostettaessa anfoilla säkistä suoraan reikään. Kuvassa näkyvä vaalea pulveri on ympäristöön jäänyttä Anfoa.



Kuva 3. Kuva Anfopanostus työmaalta (Oy Forcit Ab)

### 2.1.5 Emulsiot ja vesigeeliräjähteet

Emulsiolla tarkoitetaan kahden toisiinsa liukenemattoman nesteen seosta. Emulsioräjähteitä on kahta päätyyppiä:

- vesi-öljyssä emulsio (emulsioräjähde)
- öljy-vedessä emulsion (vesigeeliräjähde)

Kemiallisesti molemmat ovat emulsioita, mutta kansainvälisessä räjähdysaineterminologiassa öljy-vedessä emulsiosta käytetään nimeä vesigeeliräjähde. Emulsioräjähteiden pääraaka-aineita ovat hapetinliuos (nitraattiliuos), polttoaineliuos ja herkistin aineet. Nitraattiliuos koostuu tyypillisesti veteen liuotetuista nitraateista ja polttoaineliuos öljystä sekä emulgointiaineesta. Vaikka nitraattiliuoksen ja öljyseoksen muodostama matriisi sisältää räjähdysaineen pääkomponentit eli hapettimen ja polttoaineen, tarvitsee tuote herkistää, jotta se on räjähdysaine. Herkistäminen tapahtuu sekoittamalla matriisiin eli emulsioräjähteen puolivalmisteeseen kaasukuplia (esimerkiksi ontoja lasimikropalloja), sekoittamalla sekaan ilmaa mekaanisesti tai muodostamalla kaasukuplat emulsioon kemiallisesti. Räjähdyksessä kaasukuplat puristuvat ja kuumenevat etenevän räjähdysaalton vaikutuksesta. Räjähdys välittyy emulsiossa tällaisten ”kuumien pisteiden” avulla. Kuvassa 4 on kaavio emulsioräjähteiden valmistuksesta. (Räjähddekirja 2005, 136 – 142.)

## Matriisi tuotannossa



Kuva 4. Emulsioräjähteiden valmistus (Oy Forcit Ab)

Emulsiot voidaan valmistaa terveysvaikutuksiltaan mahdollisimman vaarattomista aineista. Niiden hyvä vedenkesto ja useiden kuukausien säilyvyys vaikeissakin olosuhteissa vähentää ympäristöön joutuvien nitraattien määrää. (Räjähdekirja 2005, 136 – 142.) Pumpattavien emulsioräjähteiden pääraaka-aineita ovat:

- ammoniumnitraatti	60 – 80 %
- natriumnitraatti	0 – 15 %
- vesi	15 – 25 %
- mineraaliöljyt	3 – 8 %
- emulgointiaineet	0,5 - 5,0 %

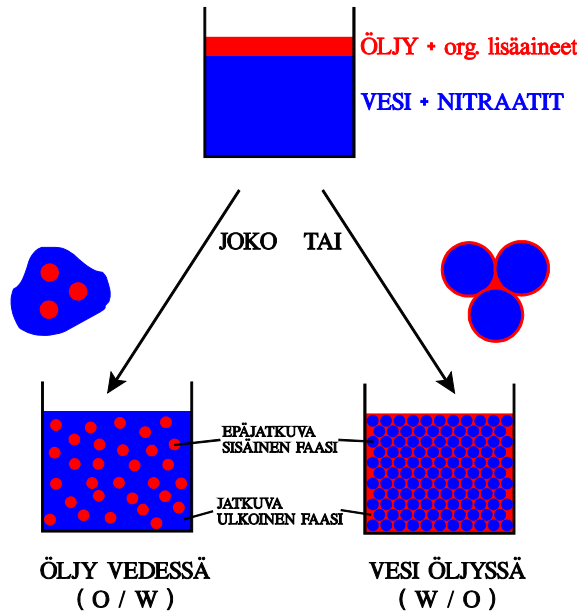
(Olsson & Niklasson 2012, 13.)

Vesigeeliräjähteiden pääraaka-aineita ovat mm. ammoniumnitraatti, joskus TNT ja aina jokin geelimäinen sidosaine (Vuolio & Halonen 2010, 62 - 64).

Vesigeeli- ja emulsioräjähteitä on saatavilla patruonoituina, putkiin pakattuna ja työmaalla herkistettäviä pumpattavia bulk-tuotteita. Oikein ja huolellisesti panostettuna, molempien tuotteiden käytössä syntyvä hukkanäkö on erittäin vähäistä. (Räjähdekirja 2005, 136 – 142.)

Puolustusvoimien tutkimuslaitoksella (PVTT) 2004 tehdyissä tutkimuksissa todettiin, että vesi-öljyssä emulsiolla on erittäin korkea hyötysuhde (~97%), kun taas öljy-vedessä emulsiolla eli vesigeeleillä on alhaisempi hyötysuhde (72%). Emulsiossa hapettavan aineen ja palavan aineen yhteinen rajapinta on erittäin suuri verrattuna vesigeelituotteisiin. Tämän vuoksi emulsio palaa lähes täydellisesti ja siitä saadaan kaikki sen sisältämä

kemiallinen energia käyttöön. Samasta syystä myös räjähdyskaasut ovat hyvin puhtaita. (Räjähdekirja 2005, 136 – 142.) Emulsioräjähteissä räjähdyslämpö on melko alhainen verrattuna muihin perinteisiin louhintaräjähteisiin, mutta täydellinen palaminen ja korkea hyötysuhde kompensoivat alhaista räjähdyslämpöä (MJ/kg) (Vuolio & Halonen 2010, 62 - 67). Kuvassa 5 näkyy vesigeelin ja emulsion rakenteellinen ero. Molemmat valmistetaan samoista pääraaka-aineista, mutta valmistustapa on erilainen.



Kuva 5. Emulsion ja vesigeelin ero (Oy Forcit Ab)

Taulukossa 3 on erityyppisten bulk-räjähdysaineiden hyötysuhteiden vertailua.

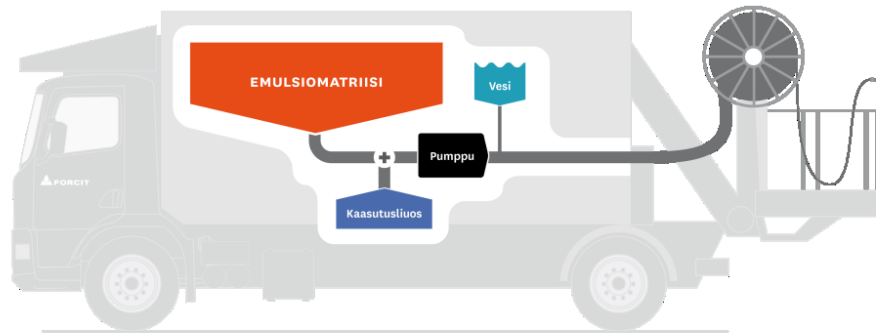
Taulukko 3. Yleisimpien bulk-räjähdysaineiden hyötysuhteet (Hakanpää & Lappalainen 2009, 165).

Räjähdysaine	VOD (m/s)	Energia (MJ/kg)	Hyötysuhde %	Tiheys (g/cm <sup>3</sup> )	Vedenkestävyys
ANFOt	2200 – 4300	3,9	80 - 85	0,4 - 1,1	Huono
HeavyANFO	4000 – 5000	3,5	85 - 90	1,0 - 1,35	Kohtalainen
Vesigeeli	4200 – 5500	2,9	70 - 75	1,15	Hyvä
Emulsio	4200 – 6200	3,1	<b>95 - 100</b>	0,9 - 1,3	Erinomainen

## 2.2 Kemiitti 810 panostusjärjestelmä

Kemiitti 810 soveltuu maanalaiseen kallion louhintaan, jossa tarvitaan nopeaa ja säädettävää panostusta sekä hyvää vedenkestoa. Se panostetaan pumppaamalla ylöspäin suuntautuviin, alaspäin suuntautuviin tai vaakasuoriin porareikiin erikoisvalmisteisella panostuslaitteella. Kemiitti 810 on panostuspaikalla emulsiomatriisista kemiallisesti herkistettävä ja pumppaamalla panostettava vesi-öljyssä-emulsioräjähdysaine. Olomuoto-

oltaan se on rasvamainen ja väritään valkoinen tai hieman kellertävä. Kemiitti 810 raaka-aineita ei luokitella räjähdysaineiksi. Tuote herkistyy räjähdysaineeksi vasta porareissä. Kemiitti 810 vaatii aina syttyäkseen nallin lisäksi pienen räjäyttimen, esimerkiksi heksogeenipohjaisen Forp-rimen, jonka räjähdysnopeus on yli 6000 m/s. Kuvassa 6 näkyy Kemiitti 810 valmistusprosessi. Kuvassa 7 on Forcitin valmistama Kemiitti 810 panostukseen rakennettu ECM (Emulsio Charging Module) yksikkö kiinnitettyä Normetin Charmec alustalle. (TT Kemiitti 810 13032012 2012.)

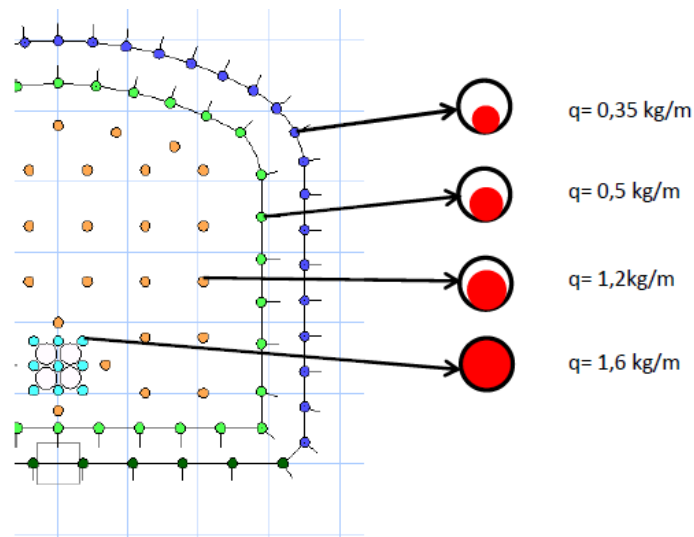


Kuva 6. Kemiitti 810 valmistusprosessi (Oy Forcit Ab)



Kuva 7. Forcitin valmistama ECM panostusyksikkö emulsiopanostukseen Normetin Charmecissa (Oy Forcit Ab)

Pumpattavan emulsion, kuten Kemiitti 810, etu muihin räjähteisiin nähden peränajossa on, että yhdellä tuotteella saadaan tehtyä suunniteltu panostus kaikkiin reikiin. Panostuslaitteen automatiikka säätelee reikien panostusasteen sopivaksi avaus-, pohja-, avarrus- ja reunareikiin valitun reseptin mukaisesti. Kuvassa 8 on esimerkki tyypillisistä tunnelilouhinnassa käytettävistä panostusasteista.



Kuva 8. Esimerkki erilaisista panostusasteista (Olsson 2012)

Peränajossa yleisesti käytettävät panostusasteet Kemiitti 810:llä ovat:

- kaari- ja reunareillä 350 – 450 g/m (siniset reiät)
- apukaarilla ~500 – 600 g/m (vihreät reiät)
- pohja, avarrus ja avaus reikäkoon mukaan.

Nykyisillä panostuslaitteilla saadaan pumpattavilla emulsioilla panostustyö tehtyä erittäin tarkasti ja laitteisto tallioi automaattisesti reikäkohtaisen panostuksen muistiin. Tarkka panostus edellyttää, että käytössä hyödynnetään laitteiston automatiikkaa, joka säätelee panostusta. Kuvassa 9 näkyy pumpattavalla emulsiolla tehtyjä ohuita panostuksia eli rantupanoksia.



Kuva 9. Kuvassa on putken panostettu rantupanos pumpattavalla emulsiolla (Olsson 2012)

Onnistunut työ edellyttää huolellisen pumppaamisen lisäksi kaasuuntumisen seurantaan työn aikana, jotta ei tehdä olosuhteisiin nähden liian alhaisella tai korkealla tiheydellä olevaa räjähdysainetta. Kemiitti 810 herkistään räjähdysaineeksi lisäämällä siihen kaasutusliuosta. Panostuslaitteisto annostelee kaasutusliuoksen automaattisesti. Liuos käynnistää kemiallisen reaktion emulsiomatriisissa, jonka seurauksena tuote herkistyy räjähdysaineeksi ja sen tiheys muuttuu noin 1.4 kg/l:stä noin 1.0 kg/l. Emulsiomatriisin ominaisuuksilla ja lämpötilalla on suuri merkitys kaasuuntumiseen. Panostuksen yhteydessä otettavilla näytteillä voidaan seurata kaasuuntumista ja säätää liuoksen määrää, jotta haluttu tiheys saavutetaan.

Pumpattavilla emulsioilla on varmistettava panoksen yhtenäisyydestä. Pienikin rako panoksessa saattaa aiheuttaa räjähdysen pysähtymisen. Myös kalliassa olevat raot ovat huomioitava panostustyössä. Aikaisemmin räjähtävien reikien paineisku tai vapautuvat kaasut saattavat edetä rakoja pitkin ja katkaista räjähdysen myöhemmin syttyivistä rei`istä.

### 2.3 F-putkipanos

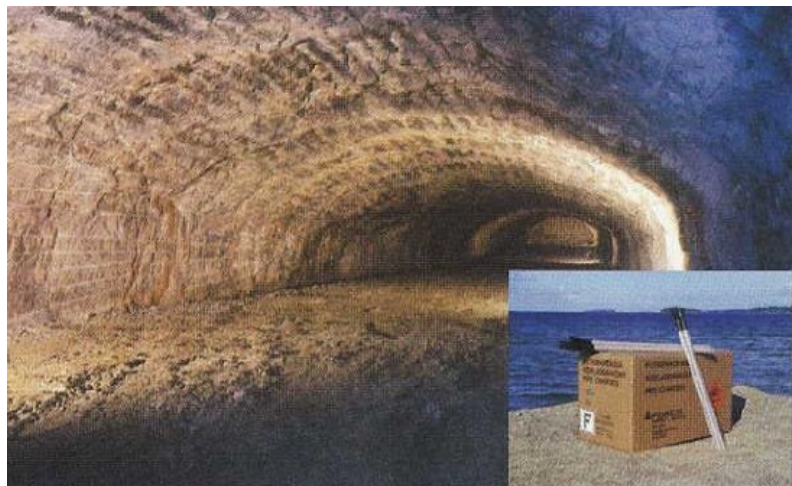
F-putkipanos on nitroglykolia ja piimaata sisältävä jauhemainen räjähdysaine. Räjähdysainemassa on pakattu polypropyleenimuoviputkiin. F-putkipanosten pääasiallinen käyttöalue on silo- ja tarkkuuslouhinta, mutta niitä voidaan käyttää myös muissa tarkkaa ja kevyttä panostusta vaativissa louhintatöissä. (TT NG-putkipanokset 02042013 2013.)

F-putkipanos on yksi Forcitin vanhimmista tarkkuuslouhinta tuotteista. Maanalaisessa louhinnassa sitä on perinteisesti käytetty kaarirei`issä, jossa tarvitaan tarkkaa ja kevyttä panostusta. F-putkipanoksessa on jatkokappale, jolla panos voidaan tehdä halutun mittaiseksi. Lisäksi niissä on ns. jarru, joka keskittää panoksen porareian keskelle ja estää putkien lentämisen ulos reiästä räjähdysen yhteydessä. Tällöin räjähdysvaikutukset leviävät tasaisesti koko reiän alueelle yhtä aikaa. F-putkipanoksen pääraaka-aineet ovat:

- nitroglykoli
- piimaa
- natriumnitraatti
- natriumkloridi

(TT NG-putkipanokset 02042013 2013.)

F-putkipanoksen vedenkesto on kohtuullinen. Jos ympäristöön jää räjähtämättömiä F-putkipanoksia, liukenevat nitroglykoli ja nitraatit maaperään. Oikealla ja huolellisella panostuksella voidaan ympäristövaikutuksia vähentää. Tuotteen tärkeimmät räjähdystekniset ominaisuudet on esitelty kappaleessa 2.1.1 Louhintaräjähteiden ominaisuudet. Kuvassa 10 näkyy F-putkipanos ja sillä louhittua kalliopintaa. (TT NG-putkipanokset 02042013 2013; Tuoteluettelo – Louhintaräjähteet 2012.)

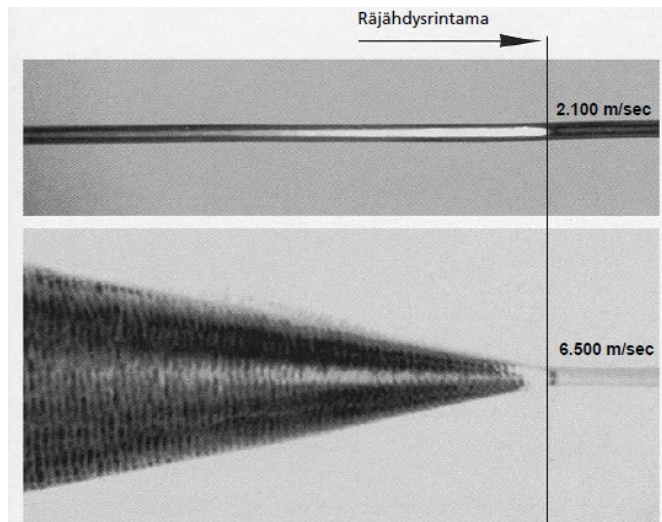


Kuva 10. 17x500 F-putkipanos (Oy Forciti Ab)

## 2.4 Sytytysvälineet ja sytytysjärjestys peränajossa

### 2.4.1 Impulssiletkusytytys

Impulssiletkusytytys on nykyisin yleisin louhintatöissä käytettävä sytytysmenetelmä. Se on syrjäyttänyt sähkönsallit lähes kokonaan tunnelilouhinnassa, koska impulssiletkusytytys on immuuni sähköisille häiriötekijöille ja magneettikentän muutoksille. Impulssiletkujärjestelmässä (shock tube system) sähköjohtimet on korvattu muoviletkulla. Letkun sisäseinämä on päällystetty reaktiivisella materiaalilla, joka on yleensä oktogeneenia ja alumiinijauhetta. Seos pystyy kuljettamaan paineaaltoa letkun läpi nopeudella 2000 - 2100 m/s. Letkun päässä paineaalto saa aikaan pistoliekin, joka on tarpeeksi voimakas sytyttämään nallissa olevan pyroteknisen hidastemassan. Ulkohalkaisijaltaan letku on ~3 mm, eikä siihen vaikuta letkun läpi kulkeva shokkiaalto. Näin ollen letku ei sytytä sen kanssa kosketuksissa olevaa räjähdysainetta. (Vuolio & Halonen 2010, 85 – 86; NONEL käyttäjän opas, 5.) Kuvassa 11 näkyy impulssiletkun sisällä tapahtuvan räjähdysen ja räjähtävän tulilangan ero.



Kuva 11. Impulssiletkussa paineaalto pysyy letkun sisällä, kun taas räjähtävä tulilanka räjähtää (NONEL käyttäjän opas, 5).

Impulssiletkujärjestelmään kuuluvat impulssiletkunallit, kytkinkappaleet ja runkoletku. Louhintatyössä haluttu syttymisjärjestys voidaan tehdä joko nallien yksilöllisillä hidasteilla tai pinnalla käytettävillä kytkinkappaleilla. Avolouhinnassa käytetään tyypillisesti saman hidasteajan omaavaa nallia joka reiässä ja syttymisjärjestys määrätään pinnalla kytkinkappaleiden avulla, joita on tarjolla mm. 0 ms, 9 ms, 17 ms, 25 ms, 33 ms, 42 ms, 65 ms, 67 ms, 100 ms, 109 ms, 176 ms ja 200 ms hidasteajoilla. Peränajossa taas käytetään valmiita tunnelinallisarjoja ja tärinäherkissä kohteissa lisäksi kytkinkappaleita hajottamaan syttymisaikoja. (Tuoteluettelo - Louhintaräjähteet 2012, 32 – 36; Vuolio & Halonen 2010, 85 – 91.) Kuvassa 12 näkyy erityyppisiä impulssiletkutuotteita.



Kuva 12. Eräiden valmistajien impulssiletkujärjestelmän tuotteita (Oy Forcit Ab)

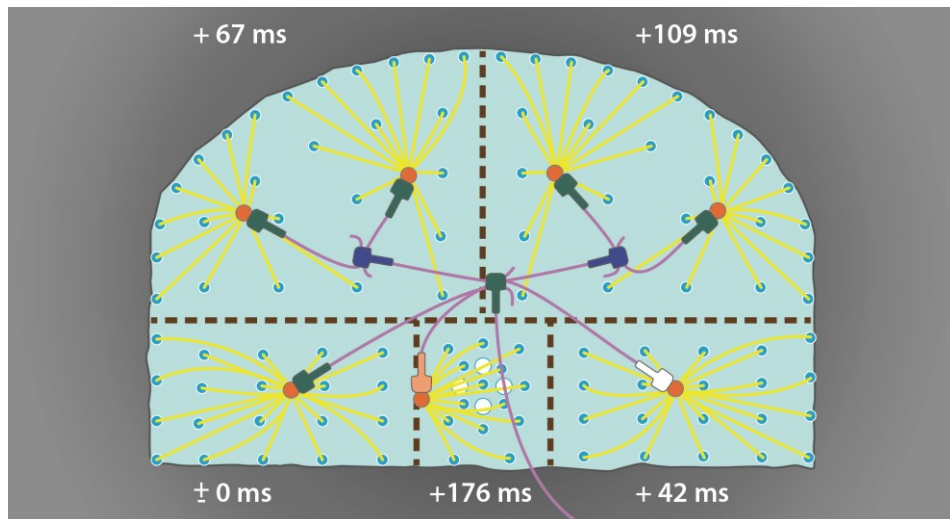
Peränajoon tarkoitetuissa impulssiletkunallisarjoissa (LP -sarjat, Long Period) hidasteajat vaihtelevat tyypillisesti 25 millisekunnista 9000 millisekuntiin valmistajasta riippuen. Taulukossa 4 on erään LP -sarjan numerot ja nimellispaloajat.

Nalli numero	Nimellinen paloaika (ms)*	Nalli numero	Nimellinen paloaika (ms)*
LP 01	100	LP 20	2000
LP 02	200	LP 25	2500
LP 03	300	LP 30	3000
LP 04	400	LP 35	3500
LP 05	500	LP 40	4000
LP 06	600	LP 45	4500
LP 07	700	LP 50	5000
LP 08	800	LP 55	5500
LP 09	900	LP 60	6000
LP 10	1000	LP 65	6500
LP 12	1200	LP 70	7000
LP 14	1400	LP 75	7500
LP 16	1600	LP 80	8000
LP 18	1800		

\* Nimellispaloaika sisältää 6m:n johtimen paloajan

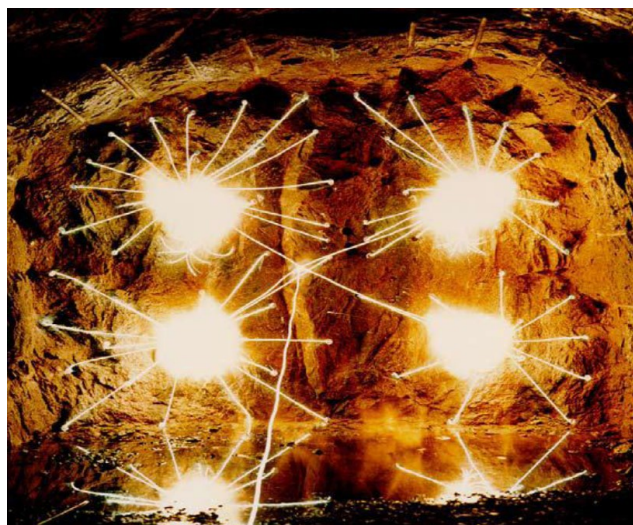
Taulukko 4. Daveynel LP -sarjan paloajat (TT Daveynel sähkötön sytytysjärjestelmä 200312)

Kuvassa 13 on esimerkki hidastimien käytöstä peränajossa. Reikien nallitus tehdään tunnelisarjan nalleilla, joissa on ennalta määritetty syttymisaika. Syttymisjärjestystä porrastetaan hidastimien avulla.



Kuva 13. Esimerkki hidasteiden käytöstä peränajossa (Oy Forcit Ab)

Vaikka impulssiletkusytytys on ollut markkinoilla jo 1970-luvulta lähtien ja nallien valmistustarkkuus on parantunut, sisältävät paloajat edelleen pientä epätarkkuutta. Hidasteaikojen hajontaan vaikuttavat pienet erot pyroteknisen massan raaka-aineissa, pakkaustiheydessä, lämpötilassa, valmistusolosuhteissa ja nallin iässä. Kun sytytysjärjestys halutaan optimoida vaativissa kohteissa, joissa louhintajäljelle ja/tai tärinöille on asetettu tiukat vaatimukset, voi paloaikojen epätarkkuus muodostua ongelmaksi. Peränajossa käytetään tyypillisesti kaarirei'illä suuren hidastusajan omaavia nalleja. Forcit ja Puolustusvoimien tutkimuslaitos tekivät yhdessä vuonna 2012 tutkimuksen, jossa verrattiin kolmen eri valmistajan impulssiletkunallien paloaikaeroja. Näissä tutkimuksissa todettiin paloaikaerojen olevan satoja millisekunteja tunnelilouhinnassa kaarirei'illä käytettävillä nallinumeroilla. (Sairiala 2013) Liitteeseen 1 on koottuna mittaustuloksia tutkimuksesta. Syttymisaikojen tarkkuuden merkitystä louhintajäljelle käsitellään tarkemmin luvussa viisi. Kuvassa 14 näkyy sytytyksen käynnistyminen tunnelilouhinnassa.



Kuva 14. Kytinkappaleiden toiminta peränajossa (Oy Forcit Ab)

## 2.4.2 Elektroninen nalli

Elektronisia nalleja voidaan käyttää kaikenlaisissa räjäytystöissä niin maan alla kuin maan päällä korvaamaan ns. perinteisiä nalleja. Ohjelmitavuutensa ja syttymistarkkuutensa ansiosta nallien käyttö antaa lisäarvoa kohteisiin, joissa edellytetään mm. tärinän ja lohkaroitumisen tarkempaa hallintaa porausparametrit ja geologia huomioiden. (Vuolio & Halonen 2010, 91 – 92.)

Elektroninen nalli on käytön kannalta täysin erilainen järjestelmä kuin muut sytytysjärjestelmät. Elektronisilla nalleilla voidaan jokaiselle nallille antaa yksilöllinen hidaste. Niissä perinteinen hidastemassa on korvattu piirikortilla. Esimerkiksi Forcitin maahantuomassa Daveytronic järjestelmässä nallit voidaan ohjelmoida 0 - 14000 ms yhden millisekunnin välein (+/- 0.02 %). Elektronisia nalleja ei voi laukaista eikä ohjelmoida millään muulla laitteella kuin omaan järjestelmään kuuluvilla laukaisu- ja ohjelmointilaitteilla. (Daveytronic SP käyttäjänkäsi kirja 2013, 7 – 13.) Kuvassa 15 näkyy elektronisen nallin rakenne.

1. Laukaisupiirin leikkauskuva
2. Krympattu tulppa
3. Logiikan kondensaattori (virtalähde)
4. ASIC-proessori
5. Laukaisukondensaattori
6. Integroitu sytykepää



Kuva 15. Halkileikkaus Daveytronic III elektronisesta nallista (Oy Forcit Ab)

Daveytronic -nalleilla voidaan yhdessä kentässä laukaista 1500 nallia ja lisävarusteiden avulla 3000 nallia. Nalleissa on ~ 1 gramma räjähdysainetta (0,8g PETN ja ~0,2g lyijyatsidi) eli ne vastaavat teholtaan perinteisiä nalleja ja niillä voidaan sytyttää kaikki nalliherkät räjähteet. (TT Daveytronic 260813 2013.) Kuvassa 16 on nähtävillä Daveytronic-järjestelmän ohjelmointi ja laukaisulaitteet.



Kuva 16. Daveytronic SP ohjelmointi ja laukaisulaitteet (Oy Forcit Ab)

Daveytronic-järjestelmä luo koodatun kaksisuuntaisen yhteyden nallien, laukaisuyksikön ja ohjelmointiyksikön välille. Tämän tyyppinen yhteys nallien ja yksiköiden välillä:

- mahdollistaa yksilöllisen hidasteajan jokaiselle nallille
- takaa kentän tarkastettavuuden laukaisupaikalta
- valvoo jokaisen nallin energiaa laukaisuhetkeen saakka
- raportoi kaikista poikkeamista laukaisijalle
- estää laukaisun, jos ei käytetä hyväksytyä Daveytronic-kaukolaukaisinta.

(TT Daveytronic 260813 2013; Daveytronic SP käyttäjänkäsi kirja 2013, 7 – 13.)

Tämänkaltainen teknologia mahdollistaa laukaisutapahtuman tarkan hallinnan ja tekee toiminnasta entistä turvallisempaa ja luotettavampaa.

Elektroninen järjestelmä sisältää impulssiletku- ja sähkösytytyksen parhaat puolet sekä tarjoaa lisäksi erinomaisen tarkkuuden. Käyttöturvallisuuden osalta elektroninen nalli on tunteeton sähköisille ärsykeille suoraa salamiskua lukuun ottamatta. Lisäksi kentän yksityiskohtainen tarkastaminen käytännössä estää toimimattomia tai kytkemättömiä nalleja sisältävän kentän laukaisemisen ja helpottaa virheiden paikantamista ja korjaamista.

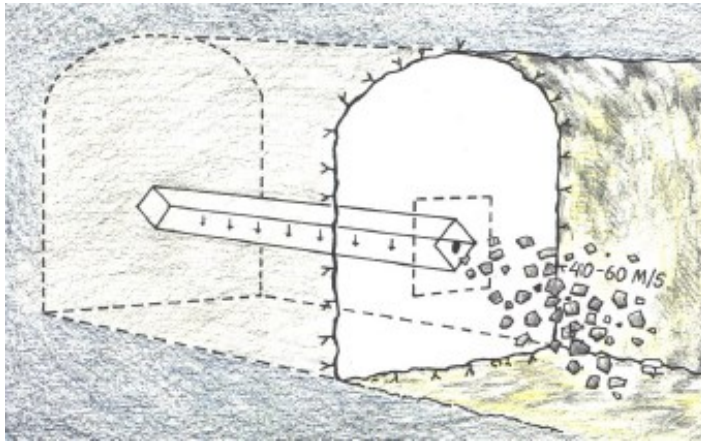
### 2.4.3 Sytytysjärjestys peränajossa

Peränajossa reiät voidaan ryhmitellä seuraaviin kokonaisuuksiin ja jokainen näistä ryhmistä suunnitellaan omana kokonaisuutena:

- avaus
- avarrus
- seinäreiät
- kattoreiät
- pohja

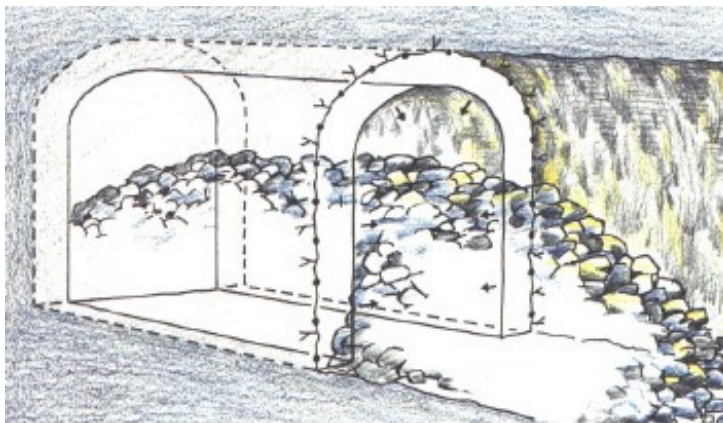
Nykyään yleisin tapa toteuttaa avaus on yhdensuuntaisavaus yhden - kolmen suurreiän ympärille. Suurreikien ympärille porataan avausreiät, jotka panostetaan suurella ominaispanostuksella. Näiden reikien irrottamalle kalliomassalle on annettava riittävästi aikaa purkautua suurreikään ja lentää ulos, jotta räjäytys ei jää lukkoon. Kalliomassa liikkuu räjähdysen jälkeen 40 - 60 m/s. Reikien ollessa 4 - 6 metriä syviä tulee avauksessa vierekkäisillä reiillä olla aikaa 100 – 150 ms turvota ja liikkua riittävästi. Valmiissa tunnelisarjanalleissa on usein alkupään hidastevälit 50 – 100 ms. Avauksessa käytetään jokaisella reiällä omaa nallinumeroa, jotta kallon liikkeelle saadaan riittävä aika. Kuvassa 17 havainnollistetaan avaus-

(Vuolio & Halonen 2010, 226 – 232.)



Kuva 17. Kuva avauksesta (NONEL käyttäjän opas, 35).

Avaruksessa eli kenttärei`issä käytetään suhteellisen suurta hidastusta 100 – 500 ms, jotta kalliomassat ehtivät purkautua kunnolla. Avaruksessa voidaan sytyttää kaksi nallia yhdellä numerolla (esimerkiksi vastakkaiset reiät). Purkautumiskulman pitää pysyä yli 90°, jotta kivillä on tilaa liikkua ja turvota. Kuvassa 18 näkyy tilanne avaruksen jälkeen. (Vuolio & Halonen 2010, 226 – 232; Hakanpää & Lappalainen 2009, 175 – 176.)



Kuva 18. Tilanne avaruksen jälkeen (NONEL käyttäjän opas, 36).

Katto- ja seinäreiät tulee sytyttää mahdollisimman yhtä aikaisesti, jotta saavutetaan mahdollisimman hyvä louhintajälki. Katon ja seinien jälkeen sytytetään pohjareiät ja viimeisenä seinien ja pohjan yhtymäkohdassa olevat nurkkareiät. Kuvassa 19 näkyy lopullinen, tavoiteltu louhintajälki. Kaarilinjojen ja kattoreikien tarkka panostus on jättänyt siistin seinämän ja reiänpuolikkaat näkyville. Reiänpuolikkaista nähdään myös porauksen tarkkuus. (Vuolio & Halonen 2010, 226 – 232; Hakanpää & Lappalainen 2009, 175 – 176.)

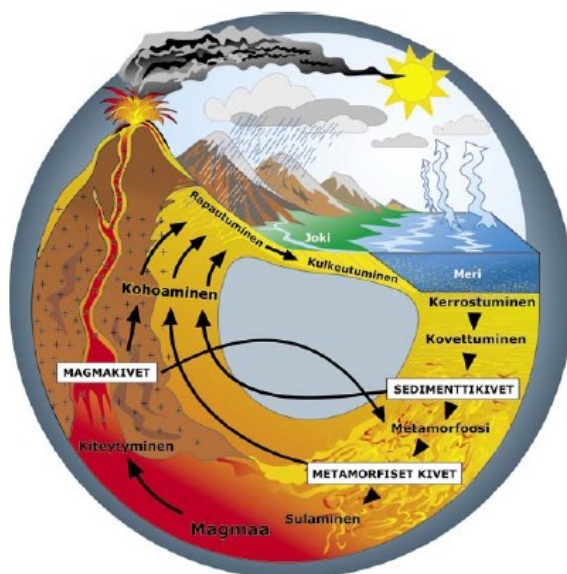


Kuva 19. Lopullinen louhintajälki (Oy Forcit Ab)

### 3 SUOMEN KALLIOPERÄ JA TYYPILLISET KIVILAJIT SUOMESSA SEKÄ NIIDEN RÄJÄYTETTÄVYYS

#### 3.1 Suomen kallioperä ja kivilajit

Suomen kallioperä kuuluu suurimmaksi osaksi kiinteään peruskallioalueeseen ja se on muodostunut kolmeen ryhmään kuuluvista kivilajeista: magmakivilajit (syväkivilajit), kerrostuneet kivilajit (sedimenttikivilajit) sekä kiteiset liuskeet (metamorffiset kivilajit). Yli 50 % Suomen pinta-alasta on syväkivilajeja. Yleisimpiä ovat graniitit, joita esiintyy runsaasti maan kaikissa osissa. Kiteiset liuskeet muodostavat noin 40 % Suomen kallioperästä. Niihin kuuluvat mm. kiilleliuskeet, gneissit, amfiboliitit ja kvartsiitit. (Selonen 2006, 4 – 25.) Kuvassa 20 näkyy aineen kierto maaperässä ja erityyppisten kivilajien synty.



Kuva 20. Aineen kierto. (Selonen 2006)

Kaikki kivilajit muodostuvat erilaisista mineraaleista, jotka ovat kiinteitä, kemialliselta koostumukseltaan vaihtelevia aineita. Esimerkiksi kvartsi, joka on eräs yleisimmistä mineraaleista, koostuu hapestä ja piistä (SiO<sub>2</sub>). Mineraalit ovat kivilajien rakenneosia. Mineraaleja tunnetaan tuhansia, mutta vain kuusi mineraalia vastaa 90 %:sta maankuoren rakenteesta. Yleisimmät mineraalit ovat kvartsi, kalimaasälpä, plagioklaasi ja kiilteet. Vaalea kiille on muskoviittia ja tumma kiille biotiittia. Muita yleisiä mineraaleja ovat pyrokseenit, amfibolit, oliviini ja karbonaatit. Kivilajeissa mineraaleja on yksi tai useampi. Kalkkikivi on poikkeus ja se muodostuu vain yhdestä mineraalista – kalsiitista. Kivilajien lujuusominaisuudet ovat riippuvaisia niiden mineraalikoostumuksesta. (Korhonen, Gardemeister, Jääskeläinen, Niini & Vähäsarja 1974, 14 - 26; Selonen 2006, 4 – 25.) Taulukossa 5 on yleisimpien Suomessa esiintyvien kivilajien päämineraalit.

Taulukko 5. Yleisimpien Suomessa esiintyvien kivilajien ominaispaino ja niissä esiintyvät mineraalit. (Selonen 2006, 22)

Geologinen alkuperä	Kivilaji	Kg/m <sup>3</sup>	Pääasialliset mineraalit
Magmakivet	Graniitti	2600-2700	Kalimaasälpä, kvartsi, plagioklaasi, biotiitti, sarvivälke Plagioklaasi, pyrokseenit, amfibolit, oliviini Plagioklaasi, sarvivälke, pyrokseenit, biotiitti Olivini, pyrokseenit, sarvivälke
	Gabbro	2800-3200	
	Dioriitti	2700-2800	
	Peridotiitti	3000-3500	
Sedimenttikivet	Hiekkakivi		Kvartsi, maasälvät Savimineraalit, kvartsi
	Savikivi		
Metamorffiset kivet	Gneissi	2600-2800	Kalimaasälpä, plagioklaasi, kvartsi, kiilteet Kvartsi, biotiitti, muskoviitti, maasälvät Kvartsi, kloriitti, muskoviitti, maasälvät Sarvivälke, plagioklaasi Kvartsi, maasälpä, kiille Kaliitti, dolomiitti
	Kiilleliuske	~2800	
	Fylliittiliuske	~2800	
	Amfiboliittiliuske	2900-3000	
	Kvartsiitti	~2700	
	Kalkkikivi	2700-2800	

Suomen kallioperälle on tyypillistä sen laadun voimakas vaihtelu. Vaihtelua esiintyy sekä rakenteessa että kivilajeissa. Eri kivilajeja esiintyy Suomen kallioperässä suunnilleen seuraavasti:

- Graniitti ja Dioriitti 53 %
- Migmatiittiset gneissit 22 %
- Kiilleliuske ja Kiillegneissi 9 %
- Gabro, Diabaasi ja Amfiboliitti 8 %
- Kvartsiitti ja Hiekkakivi 4 %
- Granuliitti 4%

(Rantamäki, Jääskeläinen & Tamminne 1979, 29.)

### 3.2 Kivilajien tekniset ominaisuudet ja niiden tutkimusmenetelmät

Kivilajien lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet voidaan selvittää laboratorio tutkimuksin. Keskeisimmät selvitettävät ominaisuudet kiven rikkoutumisen ja rakoilun syntymisen kannalta ovat:

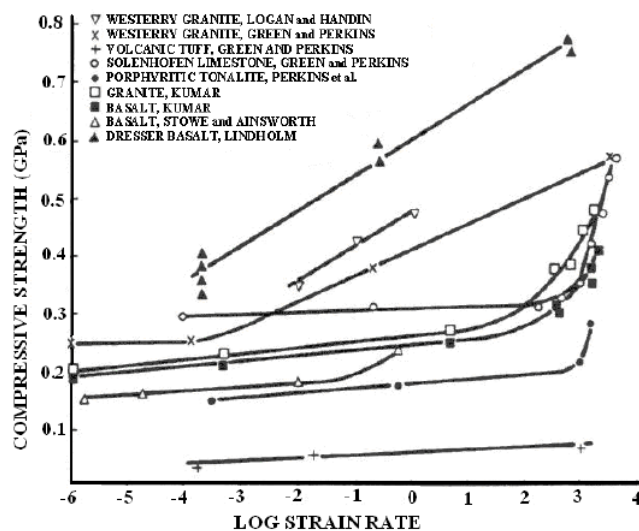
- yksiaksiaalinen puristus- ja vetomurtolujuus (UCS ja Brazilian test)
- tiheys
- kimmomoduuli (dynaaminen ja staattinen)
- Poissonin luku (dynaaminen ja staattinen)
- pitkittäisen P-aallon nopeus
- poikittaisen S-aallon nopeus
- huokoisuus

Osa ominaisuuksista voidaan määrittää myös likimääräisesti laskemalla, kun tarvittavat lähtötiedot ovat olemassa.

Kivilajin lujuudella tarkoitetaan yleensä suurinta jännitysarvoa, joka jatkuessaan johtaa kiven murtumiseen. Yleisimpiä arvoja, joita voidaan hyödyntää arvioitaessa kallionräjäytyksen vaikutuksia kiveen, ovat puristus- ja vetomurtolujuus. Kivilajin lujuus mekaanista rasitusta vastaan riippuu mm. kivilajin mineraalien laadusta, lujuudesta, lohkeavuudesta, rapautuneisuudesta, mineraalien raakoosta sekä ulkoisista tekijöistä kuten kosteus, lämpötila ja mekaanisen jännityksen muodostumisnopeudesta. Kivilajien muodonmuutosominaisuuksia kuvaavat mm. kimmomoduuli ja Poissonin luku. Kivilajien lujuus ja muodonmuutosarvot eivät ole vakioita vaan muuttuvat samassakin kivilajissa ja näytteessä kuormitustavan, -ajan ja suunnan mukaan. (Patrikainen 1983, 7 – 17.)

Kivilajin puristusmurtuma on toisiaan vastaan kohtisuorien puristusjännitysten erisuuruudesta johtuva leikkausmurtuma. Homogeeninen kivilaji ei rikkoudu, jos siihen kohdistuu joka puolelta yhtä suuret rasitukset. Liuskeisuuden voimakkuudesta, kiillemäisten mineraalien runsaudesta ja liuskeisuustasojen säännöllisyydestä sekä kuormituksen suunnasta riippuen kiven puristusmurtolujuus vaihtelee varsin paljon. Yleensä kivi kestää suurimmat puristusjännitykset liuskeisuutta vastaan kohtisuorassa pinnassa. Suomen kivilajeissa vetomurtolujuus on yleensä 5 - 10 % vastaavan kivilajin puristusmurtolujuudesta. (Patrikainen 1983, 7 – 17.)

Dynaamisen rasituksen alla kivilajin lujuus vaihtelee paljon kuormitus- ja jännitystiheyden mukaan. Yleensä kiven dynaaminen lujuus kasvaa kun jännitystiheys kasvaa. Kuvio 1 näyttää jännitystiheyden suhdetta eri kivilajien dynaamiseen puristuslujuuteen. Jännitystiheyden noustessa riittävän suureksi kasvaa myös kiven puristuslujuus äkillisesti hyvin suureksi. Vetomurtolujuudessa on havaittavissa sama jännityksen ja rasituksen suhde. (Sun 2013, 5 – 13.)



Kuvio 1. Puristuslujuuden suhde jännitystiheyteen (Blanton 1981)

Prasad (2000) on jakanut rasiustiheyden mukaan kiven rikkoutumisen kolmeen eri luokkaan alla olevan taulukon mukaan. Taulukossa 6 suuren tiheyden luokka vastaa kiven rikkoutumista räjäyttämällä.

Taulukko 6. Kiven rikkoutumistavat eri jännitystiheyksillä (Prasad 2000)

Ominaisuus	Matala jännitystiheys	Keskimääräinen jännitystiheys	Suuri jännitystiheys
Jännitystiheys (Sec-1)	< 10-6 – 10-4	10-4 – 10	< 10 – 104
Kuormitustapa	Staattinen kuorma	Mekaaninen kuorma	Isku tai räjähdys
Esimerkki	Staattinen vakiotesti	Murskaus ja rikotus	Louhinta

Alla olevissa taulukoissa 7 - 8 näkyy eri kivilajien puristuslujuuden ja vetomurtolujuuden eroja dynaamisen ja staattisen rasituksen alla.

Taulukko 7. Kivilajien puristusmurtolujuuksia (Prasad 2000)

Kivilaji	Staattinen puristuslujuus (MPa)	Dynaaminen puristuslujuus (MPa)	Dynaaminen kerroin
Stanstead granite	48±13	160±27	3.3
Altered marble	185±42	459±50	2.5
Kingston limestone	83±27	316±65	3.8
Gneiss	40±20	122±25	3.1
Vineland limestone 1	77±31	272±59	3.5
Marble	32±9	128±14	4
Gneissic marble	34±13	153±32	4.5
Laurentian granite	67±17	245±36	3.7
Quartz	67±17	281±65	4.2
Granite	61±16	241±21	4
Gneissic granite	52±13	238±27	4.6
Vineland limestone 2	49±8	147±20	3

Taulukko 8. Kivilajien vetomurtolujuuksia (Prasad 2000)

Rock	Staattinen vetolujuus (MPa)	Dynaaminen vetolujuus (MPa)	Dynaaminen kerroin
Bedford limestone	4.1	26.8	6.5
Yule Marble	6.2	48.2	7.8
Granite	6.9	39.3	5.7
Taconite	4.8-7	91	13
Basalt	9.6	20	2.1
Freda sandstone	4.5	9.3	2.1
Inada granite	5	35	7
Tage tuff	2	10	5

Kimmomoduulilla tarkoitetaan kiveen vaikuttavan jännityksen suhdetta jännityksen suuntaiseen muodonmuutokseen. Lyhytaikaisessa aksiaalisesä kuormituksessa suomalaisten kivilajien kimmomoduuli on melko suuri. Keskimäärin se vaihtelee välillä 60 -70 GN/m<sup>2</sup>. (Patrikainen 1983, 7 – 17.)

Suppenemisluvulla (Poissonin luku) tarkoitetaan jännitystä vastaan kohtisuoran muodonmuutoksen suhdetta jännityksen suuntaiseen muodonmuutokseen. Teoriassa suppenemisluku voi olla alueella 0 - 0,5. Käytännössä suppenemisluku vaihtelee suomalaisilla kivilajeilla 0,1 - 0,4, ja on useimmiten n. 0,20 - 0,25. Kvartsi ja maasäpärikkailla vaaleilla kivilajeilla suppenemisluku jää usein alle 0,15. Tummillä kivilajeilla suppenemis-

luku on yleensä yli 0,25. Rapautuneiden ja pehmeiden kivilajien suppenemisluku noudattelee yleistä keskiarvoa eli 0,20 - 0,25. Suppenemisluvulla on taipumusta kasvaa jännitystason kasvaessa. (Patrikainen 1983, 7 – 17.)

Huokoisuudella tarkoitetaan kivilajin huokosten ja mikrorakojen prosentuaalista tilavuutta. Huokoisuus voidaan ilmaista myös huokoslukuna, joka tarkoittaa kiviaineksen kokonaistilavuuden suhdetta kiinteän kiviaineksen tilavuuteen. Kivessä huokoisuuden kasvaminen tarkoittaa sen lujuuden pienenemistä. Rapautuminen lisää luonnollista huokoisuuden kasvua. Voimakkainta se on maaperän pintaosissa. (Patrikainen 1983, 7 – 17.)

Seismisten aaltojen nopeus kivilajeissa voidaan määrittää laboratoriossa käyttäen akustisen emissio menetelmää. Akustiseen emissioon perustuvassa mittalaitteessa on lähetin- ja vastaanotinanturit, joiden väliin kivinäyte asetetaan. Signaalin kulku-aika kiviäytteen läpi määritetään ja kiviäytteen pituuden sekä kulkuajan avulla saadaan laskettua seismisen nopeus.

Helsingin yliopistolla Suvi Heinosen tekemän Pro Gradu tutkimustulosten mukaan leikkaus- ja puristusaaltojen suhde on hyvin vakio, jolloin toinen aalloista on mahdollista määrittää suhteen avulla, kun suhde ja toinen aalto on tiedossa.

Puristusaalto eli p-aalto on pituussuuntainen aalto, jossa yksittäiset partikkelit liikkuvat samansuuntaisesti aallon etenemissuunnan kanssa. Aalto etenee kolmiulotteisesti, ja sen edetessä kiveen syntyy puristusta ja vetoa, sekä tästä seuraavia tilavuudenmuutoksia. (Holmberg 1984, 22.) Puristusaallolle voidaan määrittää etenemisnopeus alla olevilla kaavoilla.

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

(Petrosyan 1994)

(1)

$$C_p = \sqrt{\frac{G}{\rho}} * \sqrt{\frac{2(1 - \mu)}{(1 - 2\mu)}}$$

(Massarsch 2002)

(2)

$C_p$  = p-aallon nopeus  
 E = kimmomoduuli  
 G = leikkausmoduuli  
 $\rho$  = tiheys  
 $\mu$  = Poissonin luku

Koska kiinteä elastinen väliaine välittää leikkausjännityksiä, se voi välittää myös leikkausaaltoja. Leikkausaalloissa eli s-aalloissa yksittäisen partikkelin liikerata on kohtisuorassa aallon etenemissuuntaa vasten. Leikkausaalto etenee puristusaallon tavoin kolmiulotteisesti. (Holmberg 1984, 23.)

Leikkausaallon nopeuden suhde väliaineen leikkausmoduuliin ja tiheyteen on esitetty alla olevassa kaavassa. (Massarsch 2002, 81.)

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}} \quad (3)$$

$C_s$  = s-aallon nopeus  
 $E$  = kimmomoduuli  
 $G$  = leikkausmoduuli  
 $\rho$  = tiheys  
 $\mu$  = Poissonin luku

(Massarsch 2002)

Petrosyan käyttää omassa p-aallon kaavassaan dynaamista kimmomoduulia ( $E_d$ ), koska räjähdystapahtumassa kivi on voimakkaan dynaamisen rasituksen alaisena. P-aallon kaavasta voidaan johtaa kaava dynaamiselle kimmomoduulille. Dynaamista kimmomoduulia ja Poissonin lukua tarvitaan Esenin (2003) esittämässä määritelmässä kiven kovuudelle. (Esen, Onederraa, Bilginb, 2003.)

$$E_d = \frac{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)C_p^2}{(1 - \mu)} = 2C_s^2\rho(1 + \mu_d) \quad (4)$$

(Petrosyan 1994, Sun 2013)

$$K = \frac{E_d}{1 + \mu_d} \quad (5)$$

(Esen, ym. 2003)

$K$  = kiven kovuus (Rock stiffness)  
 $E_d$  = dynaaminen kimmomoduuli  
 $\mu_d$  = dynaaminen Poissonin luku

Dynaaminen poissonin luku on määritettävissä alla olevalla kaavalla:

$$\mu_d = \frac{C_p^2 - 2C_s^2}{2(C_p^2 - C_s^2)} \quad (6)$$

(Sun 2013)

Liitteeseen 2 on koottu eri lähteistä ja esitetyillä laskukaavoilla taulukko joidenkin kivilajien dynaamisista lujuusominaisuuksista. Kiven kovuusarvoa ( $K$ ) tarvitaan arvioitaessa louhinnan aiheuttamaa rikkoutumisvyöhykettä (EDZ). EDZ -vyöhykkeiden määrittäminen on esitetty luvussa 5.

### 3.3 Rakennusgeologinen kallioluokitus ja kallion räjäytettävyys

Tektoniikalla tarkoitetaan maan kuoren muodonmuutoksia ja näistä syntyneitä kallioperän rakenteita sekä niiden tutkimista ja kuvaamista. Tektoniset rakenteet jaetaan kahteen ryhmään syntytapansa mukaan: plastisen muodonmuutoksen sekä murrosdeformaation rakenteet. Plastisessa muodonmuutoksessa syntyneitä rakenteita ovat:

- liuskeisuus
- poimurakenteet
- intruusiorakenteet

Murrosdeformaatiossa eli murtumalla syntyneitä rakenteita ovat:

- rakoilu
- rikkonaiset kallionosat

(Korhonen & ym. 1974, 27 – 61.)

Tektoniset rakenteet ovat hyvin yleisiä Suomessa ja niillä on huomattava rakennustekninen merkitys.

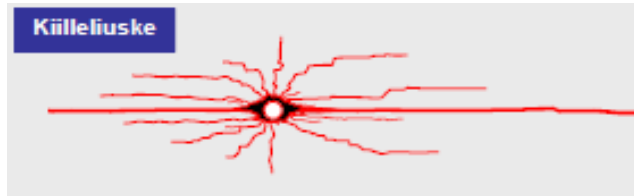
Suomen kallioperäolosuhteita varten on kehitetty rakennusgeologinen kallioluokitus kuvaamaan kallion laatua ja rakennetta. Luokitusta voidaan käyttää kalliorakennustöissä tutkimus-, suunnittelu- ja rakennusvaiheissa. Luokituksen mukaan tehtyjä kivilaatujen ja kalliolaatujen määrittämiä täydennetään kallion teknisiä ja geofysikaalisia ominaisuuksia koskevilla selvityksillä. (Korhonen & ym. 1974, 27 – 61.)

Taulukko 9. Rakennusgeologinen kallioluokitus, kalliolaadun kuvaus (Korhonen & ym. 1974).

Rakenteellinen kiinteys	Rakennetyyppi	Tihein rakoilu	Vallitsevien kivilajien kovuus/sitkeys
kiinteä kallio	massarakenteinen	harvarakoinen M1 vähärakoinen M2 runsarakoinen M3	pehmeä p
	liuskerakenteinen	harvarakoinen L1 vähärakoinen L2 runsarakoinen L3	hauras h
	seosrakenteinen	harvarakoinen S1 vähärakoinen S2 runsarakoinen S3	sitkeä s
löyhä kallio	löyhärakenteinen	harvarakoinen Lō1 vähärakoinen Lō2 runsarakoinen Lō3	kova k
	raparakenteinen	kuvataan kivilaadun perusteella siinä laajuudessa kuin se on rapautumisaste huomioon ottaen mahdollista	
rikkonainen kallio	halkeamarakenteinen rakorakenteinen murrosrakenteinen ruhjerakenteinen savirakenteinen	kallio jakautuu tasaisesti kahteen erilliseen osaan	
		runsarakoinen tiheärakoinen runsa tai tiheärakoinen	ei raketäytettä rakojen täyhteisyys vähäistä raoissa savitäytettä runsaasti kalliosavea

Kivilaadulla ja kalliorakenteilla on vaikutusta kallion räjäytettävyteen ja rakojen syntymiseen. Massamaisissa kivilaaduissa rakoilu syntyy yleensä symmetrisesti porareian ympärille, jos kivi on homogeenista. Massamai-

setkin kivilaadut lohkeavat helpommin luonnon rakosuunnissa. Liuskeisissa kivilaaduissa rakoilu on voimakkainta liuskeisuuden suunnassa. Jos seoksinen kivilaatu on voimakkaasti suuntautunutta, sen rakojen muodostuminen muistuttaa liuskeisen kivilajin rakoilua. (Korhonen & ym. 1974, 71 – 76.) Kuvassa 21 on esitetty periaatepiirros, kuinka rakoilu räjähdysyhteydessä syntyy porausreiän ympärille liuskeisissa kivilajeissa.



Kuva 21. Rakoilun muodostuminen kiilleliuskeessa (Sandvik Mining and Construction)

Räjäytettävän rakopinnan ja kivilajin liuskeisuuspinnan suunnan välinen kulma vaikuttaa suunniteltaviin porareikäväleihin, panostukseen ja lopulliseen pintaan. Jos haluttu rakopinta leikkaa liuskeisuutta loivassa kulmassa, kasvattaa se porausmäärää ja tarvittavaa räjähdysainemäärää verrattuna liuskeisuutta vastaan kohtisuoraan räjäytettävään rakoon. Liuskeisuuden suuntainen rako saadaan räjäytettyä huomattavasti vähemmällä porauksella ja pienemmällä räjähdysainemäärällä. (Korhonen & ym. 1974, 71 – 76.)

Sarvivälkkeen runsas esiintyminen tekee kivilaadusta sitkeän ja hyvin räjäytysvaikutuksia kestävän. Hauraat ja kovat (kvartsirikkaat) kivilaadut rikkoutuvat räjäytyksessä helpommin. Hauraissa ja kovissa kivilaaduissa rikkoutumisvyöhyke kasvaa suuremmaksi kuin sitkeissä kivilaaduissa. Sitkeät ja pehmeät kivilaadut vaativat suuremman ominaispanostuksen kuin kovat ja hauraat. Lisääntynyt panostus suurentaa rikkoutumisvyöhykettä. Lopullisia rakopintoja tehtäessä on tämä huomioitava tiheämmällä porauksella ja tarkemmalla panostussuunnittelulla. (Korhonen & ym. 1974, 71 – 76.)

Kvartsi on kova ja hauras mineraali. Sen Mohsin luku on 7. Kvartsilla ei ole lohkosuunta, vaan se lohkeaa murrospintoja pitkin. Kovuutensa takia kvartsi vaikeuttaa poraamista, mutta se lohkeaa helposti räjäytyksen yhteydessä. Sarvivälke on taas mineraalina erittäin sitkeä. Se kestää hyvin muodonmuutoksia ja vaikeuttaa sekä poraamista, että räjäyttämistä. (Rantamäki & ym. 1979, 10 – 19.) Räjäytyksen yhteydessä raot muodostuvat niiden mineraalien mukaisesti, joilla muodonmuutoskyky on heikoin. Esimerkiksi kvartsilla Poissonin luku on vain 0.085 ja sarvivälkkeen 0.25. (Lislerud 1990, 90 – 105.)

Räjähdysvaikutukset etenevät myös kallion luontaisiin rakopintoihin. Räjäytys tehostaa rakoilua ja rakoilutyypin mukaista geometriaa jäljelle jäävässä pinnassa. Rakoilutyypit liittyvät usein kivilaatuihin. Kuutiorakoilu on luontaista massamaisille kivilajeille ja laattarakoilu liuskeisille kivilaaduille. Näissä räjäytysjälkeä voidaan ennustaa kivilaadun mukaisesti. Kiihkeä ja sekarakoilu tekee kalliomassan käyttäytymisestä vaikeasti ennustettavaa. Runsa rakoilu edellyttää yleensä voimakkaampaa panostusta. (Korhonen & ym. 1974, 71 – 76.) Kun louhintajäljelle on annettu tarkkoja

vaatimuksia, pitää panostusta kasvattaa lisäämällä porausta ja suunnitella sytytys tarkemmin.

## 4 RÄJÄHDYS JA RÄJÄHDYSVAIKUTUKSET KALLIOSSA

### 4.1 Räjähdyksen eteneminen kalliossa

Räjähdyksessä on palamisreaktio, jossa räjähdysaineen sisältämä kemiallinen energia vapautuu nopeasti. Osa vapautuneesta energiasta synnyttää kallioon halkeamia, osa siirtää irronneita kallionosia ja osa siirtyy seismisenä energiana ehjään kallioon seismisen aallon muodossa aiheuttaen tärinää. Räjähdyksessä vapautuvaa energiaa kuluu myös esimerkiksi kivien lämpenemiseen ja ilmanpaineaallon syntymiseen. Kallioräjähdyksen energiatasapaino voidaan esittää seuraavalla kaavalla: (Sanchidrián, Segarra, López, 2007, 130 – 147.)

$$E_E = E_F + E_S + E_K + E_{MUUT}$$

$E_E$  = räjähdyksessä vapautuva kemiallinen energia (Explosive energy)

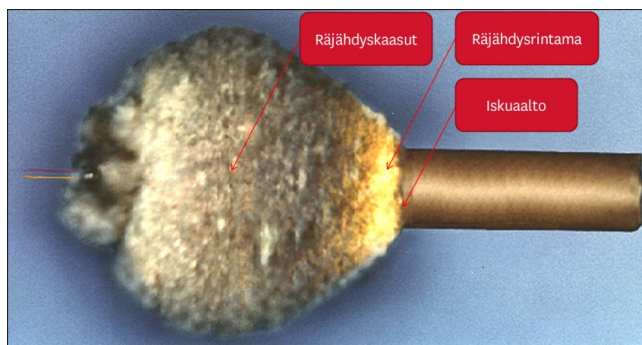
$E_F$  = halkeamien syntyyn kuuluva energia (Fragmentation energy)

$E_S$  = kallioon jännitysaallon muodossa siirtyvä seisminen energia, tärinä (Seismic energy)

$E_K$  = irronneiden kivien siirtymiseen kuuluva energia (Kinetic energy)

$E_{MUUT}$  = esimerkiksi kallion lämpenemiseen ja ilmanpaineaaltoon kuuluva energia

Kun palonopeus ylittää väliaineessa äänennopeuden, muuttuu palaminen räjähdykseksi eli detonaatioksi. Räjähdyksessä on kaksi paineaaltoa, iskuaalto (shokkiaalto) ja räjähdysaineen aiheuttamassa lämpötilassa laajenevien räjähdyskaasujen muodostama paineaalto. (Räjähdekirja 2005, 22 – 31.) Kallioon poratessa reiässä iskuaalto etenee nopeudella 3000 - 6000 ms aiheuttaen tyypillisesti 5 - 10 GPa:n paineen, joka on suurempi kuin kaasujen aiheuttama paine. Mikäli porareikä on täynnä räjähdysainetta, porareikänsä seinämään kohdistuva paine on noin puolet iskuaallon paineesta. Jos taas räjähdysaine ei täytä porareikää kokonaan, on paine vieläkin pienempi. (Persson, Holmberg & Lee 1994, 234 – 235.). Luvussa 5 käsitellään räjähdysaineen aiheuttamien paineiden arviointi yksityiskohtaisemmin. Kuvasa 22 on suurnopeuskameralla otettu kuva räjähtävästä räjähdysainepatruunasta.

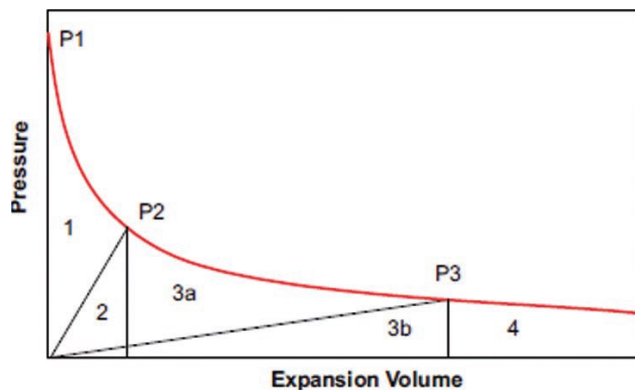


Kuva 22. Detonoiva räjähdysainepatruuna (Oy Forcit Ab)

Iskuaalto etenee porareiästä ympäröivään kallioon kartionmallisena ja laajenee edetessään säteittäin porareiän suuntaisesti. Tiivistäessään ja rikkoessaan kalliota shokkiaallon energia ja etenemisnopeus pienenevät ja se muuttuu plastiseksi aalloksi, joka voi aiheuttaa kalliossa ainoastaan plastisia muutoksia. Plastisia muutoksia ei käytännössä kuitenkaan tapahdu kivilajien haurauden vuoksi. Aaltoliikkeen vaimennuttua edelleen niin paljon, että pysyviä muutoksia ei enää synny, on aaltoliike muuttunut kimmoalloiksi. (Vuolio & Halonen 2010, 299 – 300; Persson & ym, 234 – 235.) Syntyvien rakojen johdosta paine kalliossa laskee hyvin nopeasti tilavuuden kasvaessa. Lownds esitti vuonna 1986 kuvion 1 mukaisen energian vapautumisen ideaalimallin, jossa eri vyöhykkeet on jaettu yleisesti tunnettuihin osiin:

- potentiaalinen shokkienergia alue 1
- jännitysenergia porareiän ympärillä 2
- lohkaroituminen ja lämpö 3a
- liikkeessä olevassa edussa oleva jännitys 3b
- hukkaenergia 4
- detonaatiopaine P1
- räjähdyspaine P2 (C-J tasolla)
- paine, kun työ kiven rikkomiseksi on tehty P3 (cut-off pressure, yleensä noin 100 MPa)

(Lownds 1986, 151 – 159.)



Kuvio 2. Energian jakautumismalli (Lownds 1986).

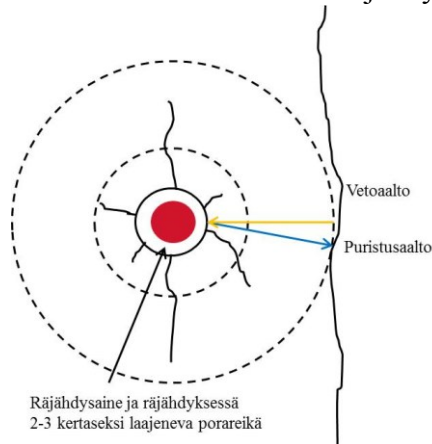
#### 4.2 Kallion rikkoutuminen

Kallion irtoaminen räjähdysen yhteydessä tapahtuu kolmessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa iskuaalto menee läpi kallion aiheuttaen puristusjännitystä. Sen etenemisnopeus on riippuvainen räjäytettävän kivilajin seismisen puristusaallon nopeudesta (p-aalto). Iskuaalto murskaa kiveä 2 - 3 kertaa porareiän halkaisijan kokoiselta alueelta sekä aiheuttaa kallioon mikroskooppisen pieniä rakoja, mutta harvoin varsinaisesti rikkoo kalliota. (Read & Stacey 2009, 278 – 282; Vuolio & Halonen 2010, 101.)

Toisessa vaiheessa iskuaalto saavuttaa vapaita pintoja ja heijastuu näistä takaisin muuttaen puristusjännityksen vetojännitykseksi. Koska kiven vetomurtolujuus on keskimäärin 5 – 10 % puristumurtolujuudesta, ylittyy yleensä tässä vaiheessa kiven lujuus (vetomurtolujuus) ja se murtuu. Ki-

veen muodostuu reiän keskeltä alkavia säteittäisiä rakoja. (Read & Stacey 2009, 278 – 282; Vuolio & Halonen 2010, 101.)

Kuvassa 23 on havainnollistettu porareian laajeneminen sekä aaltoliikkeiden eteneminen kalliosta räjähdystapahtuman yhteydessä.



Kuva 23. Puristus- ja vetoaallon eteneminen räjähdyksessä (Tomi Kouvonen)

Kolmannessa vaiheessa kuumuudessa laajentuneet räjähdyskaasut etenevät rakoihin ja laajentavat niitä edelleen, sekä muodostavat uusia rakoja. Kaasujen purkaantumisesta johtuen paine porareiässä laskee nopeasti ja vetojännitys halkeamissa lisääntyy. Kalliomassa alkaa liikkua ja tapahtuu lopullinen rikkoontuminen. (Read & Stacey 2009, 278 – 282; Vuolio & Halonen 2010, 101.) Kuvassa 24 näkyy liikkeessä oleva rikkonainen kalliomassa.



Kuva 24. Rikkoutuneen kalliomassan liike (NONEL käyttäjän opas)

#### 4.3 Räjähdyksaineen teho

Räjähdyksaineiden keskinäistä tehoa voidaan verrata S-luvulla. Se on suhdeluku, joka kertoo voima/painoyksikkö verrattavaan räjähdysaineeseen. Tuotteita voidaan verrata myös voima/metri suhteella. Sekin on suhdeluku ja kertoo kuinka suuren voiman metri tiettyä räjähdysainetta tietyissä halkaisijassa tuottaa. S-luku voidaan määrittää Lageforssin kaavalla, joka on esitetty alla:

$$S = \frac{5 Q_v}{6 Q_{v0}} + \frac{1 V}{6 V_0} \quad (7)$$

S = voima/painoyksikkö

$Q_v$  = käytettävän räjähdysaineen räjähdys lämpö (MJ/kg)

$Q_{v0}$  = vertailuräjähdyslämpö (MJ/kg)

V = käytettävän räjähdysaineen kaasutilavuus (l/kg)

$V_0$  = vertailukaasutilavuus (l/kg)

(Olsson & Niklasson 2012, 46)

Forcitin tuotteilla irrotustehoa verrataan tuoteluetteloissa nykyisin Anfoon, joten sen S-luku on yksi ja muita verrataan siihen. Mitä suurempi tulos on, sitä tehokkaammasta aineesta on kyse. S-luvun ja panostusasteen (kg/m) avulla voidaan laskea eri tuotteille myös voimaa/metri arvo. Persson & ym. (1994) mukaan S-luku soveltuu hyvin erilaisten NG-pohjaisten räjähdysaineiden vertailuun. Kaavan heikkoutena on, että se ei ota räjähdysnopeutta eikä käytetyn aineen tiheyttä huomioon. Useimmilla kaupallisilla räjähdysaineilla halkaisijan kasvaessa kasvaa myös räjähdysnopeus. Lisäksi kuten luvussa 2.1.5 todettiin, on emulsioräjähteiden räjähdyslämpö suhteellisen alhainen, mutta sitä kompensoi hyvä hyötysuhde. Lageforssin kaavassa ei tätä huomioida ollenkaan, joten se antaa emulsioille turhan alhaisen S-luvun.

S-luvun lisäksi voidaan laskea erituotteista saatava teho (GW). Tämä huomioi sekä räjähdysnopeuden että tuotteessa olevan kemiallisen energian eli räjähdyslämmön. Laskenta edellyttää, että räjähdyslämpö (MJ/kg) muutetaan tutkittavasta tuotteesta metrillä saatavaksi energiaksi (MJ/m). Tämän jälkeen fysiikan lakien mukaan, työ tehdyssä ajassa, voidaan laskea räjähdysnopeuden (m/s) avulla teho. Tämä laskenta ei huomioi räjähdyskaasuja eikä hyötysuhdetta ollenkaan, joten sekään ei ole aukoton.

S-luku soveltuu kuvaamaan eri räjähdysaineiden irrotustehoa, mutta jos halutaan verrata tehoa jolla räjähdysaine palaa porareiässä ja muodostaa rakoja kallioon on suora tehon määritelmä parempi. Taulukossa 10 on vertailtuna eri tuotteiden tehoja. Vertailu on tehty Oy Forcit Ab:n 17 x 500 F-putkipanokseen.

Taulukko 10. Louhintaräjähteiden tehojen vertailu (Oy Forcit Ab)

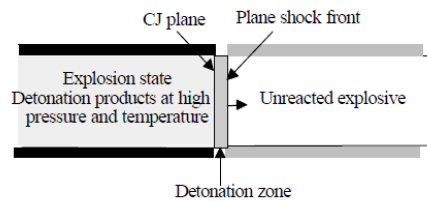
	17x500 F-pp	17x1000 Kemix pp	39x1000 Kemix A pp	Kemiitti 810 350g/m	Kemiitti 810 400g/m	Kemiitti 810 500g/m
Kaasutilavuus l/kg	406	946	964	990	990	990
Räjähdyslämpö MJ/kg	2,4	2,9	3,0	2,9	2,9	2,9
Energia MJ/m	0,48	0,638	3,87	1,02	1,16	1,45
Räjähdysnopeus m/s	~2200	>4200	>5000	~2100	~2300	~3500
Voima/ painoyksikkö (s)	1,0	1,40	1,44	1,41	1,41	1,41
Voima / m	1,0	1,56	8,9	2,47	2,82	3,53
Teho GW	1,2	2,9	19,4	2,1	2,7	5,1

Verrattaessa tuotteiden tehoja laskennallisilla arvoilla, on syytä muistaa, että hyvin iso osa räjähdysaineesta olleesta kemiallisesta energiasta katoaa räjähdysyhteydessä hukkaenergiانا ( $E_{MUUT}$ ). Persson & ym. (1994) mukaan todellisuudessa räjähdysaineen teho on riippuvainen räjäytystavasta, sytytyksestä ja kivilajin lujuusominaisuuksista.

#### 4.4 Räjähdyksenopeus (VOD) ja sen mittaaminen

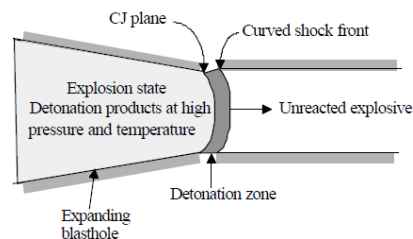
##### 4.4.1 Ideaali- ja epäideaalidetonaatio

Idealidetonaatioissa räjähdysrintama kulkee tasaisena tasana läpi räjähdysaineen aiheuttaen iskuaallon (shokkiaallon) ympäristöön. Varsinainen räjähdysrintama on erittäin ohut ja on Chapman-Jouget (C-J) -tason ja iskuaaltotason välissä. Idealidetonaatioissa oletetaan, että kaikki räjähdysaineen sisältämä potentiaalienergia vapautuu välittömästi ohuessa räjähdysrintamassa. C-J tason takana ovat räjähdysyhteydessä vapautuneet reaktiotuotteet, jotka ovat lähinnä kuumia kaasuja korkeassa paineessa. Tässä vaiheessa reaktiotuotteiden tilavuuden oletetaan olevan sama kuin alkupe räjähdysaineen. Kuvassa 25 on havainnollistettu idealidetonaatiota. (Evaluation of explosives performance through in-the-hole detonation velocity measurement 2001, 7 – 9.)



Kuva 25. Idealidetonaatio (Evaluation of explosives performance through in-the-hole detonation velocity measurement 2001)

Todellisuudessa kaupalliset räjähteet eivät käyttäydy ideaalitulanteen mukaisesti. Räjähdyksenopeus on tason sijasta kaareva, koska iskuaallon reunalla on pienempi paine ja vähemmän reaktiotuotteita vaikuttamassa detonaation etenemiseen. Iskuaallon reunoilla energiaa kuluu kiven rikkomiseen. Kuvassa 26 on mallinnettu epäidealidetonaatio. (Evaluation of explosives performance through in-the-hole detonation velocity measurement 2001, 7 – 9.)



Kuva 26. Epäidealidetonaatio (Evaluation of explosives performance through in-the-hole detonation velocity measurement 2001)

Käytännössä vain sotilasräjähteet käyttäytyvät ideaalidetonaation tavoin. Sotilasräjähteiden, kuten RDX, räjähdysnopeus on hyvin suuri ja niissä vapautuu hyvin vähän kaasuja. Lisäksi niiden nopeus ei ole yhtä sidoksissa sulkeumaan ja räjähdysainepatruunan halkaisijaan kuin kaupallisten louhintaräjähteiden. Kaupallisista räjähteistä räjähdysöljyn sisältävät tuotteet, kuten dynamiitit ja niiden johdannaiset, muistuttavat ideaalidetonaatiota. Emulsiorantupanokset, joiden halkaisija on hyvin lähellä kriittistä halkaisijaa, eivät käyttäydy ideaalidetonaation tavoin.

Räjähdyspaineeseen ja räjähdysnopeuteen liittyvä teoria ja mallintaminen pohjautuvat tyypillisesti ideaalidetonaatio malliin ja tämän takia ne eivät sovellu hyvin emulsioräjähteiden tarkasteluun. Esimerkiksi Cheetah 2.0 laskentaohjelmassa olevat laskukaavat pohjautuvat C-J teorian mukaiseen ideaalidetonaatioon, joten ne eivät anna täysin luotettavia tuloksia kaupallisille louhintaräjähteille. Alla on kuitenkin K810 emulsioräjähteen detonaatiofysikaaliset laskenta-arvot Cheetah 2.0 ohjelmalla laskettuna:

- C-J paine 5.85 Gpa
- VOD 4823 m/s
- partikkelinopeus 1212 m/s
- äänen nopeus 3511 m/s
- adiabaattinen gamma 2.98

Jotta yllä esitettyihin arvoihin pääsisi räjähdyksessä, pitäisi K810 emulsioräjähteen olla halkaisijaltaan noin 50 mm reiässä ja reikä panostettuna täyteen. Tutkimuksessa tutkittavien K810 rantupanosten halkaisijat vaihtelevat todellisuudessa 20 - 25:een mm tiheydellä 1.0 kg/l.

Kuvassa 27 näkyy suurnopeuskameralla otettu kuva Anfon detonaatorintamasta. Kuvassa näkyy, kuinka räjähdys etenee hyvin kaarevana. Professori Martin Braithwaitin (haastattelu 5.12.2014.) ja professori Finn Ouctherlonyn (haastattelu 25.9.2014.) mukaan vastaava ilmiö tapahtuu myös emulsiorantupanoksilla. Rantupanokset panostetaan porausreiän pohjalle ja tämä yhdistettynä kaarevaan detonaatorintamaan voi aiheuttaa syyn, miksi onnistunut räjäytysnopeuden mittaaminen on haasteellista. Detonaatorintaman reunoilla voi tapahtua ympäröivän paineen ja heijastumien johdosta kuolleeksi puristumista tai deflagraatiota. Tällöin mittausmenetelmät saavat häiriötä. Räjähdysnopeus tulisikin mitata massan keskeltä, jolloin saadaan detonaatorintaman todellinen ja häiriötön nopeus mitattua.



Kuva 27. Anfon detonaatorintama (Jackson 2010)

#### 4.4.2 Menetelmät räjähdysnopeuden mittaamiseen

Räjähdysainevalmistajat ilmoittavat tuotteiden räjähdysnopeudet yleensä vapaassa tilassa mitattuna ja useimmat tuotteet ilmoitetaan vaihteluvälillä tai minimiarvolla. Räjähdysnopeuteen vaikuttaa kemiallisen koostumuksen lisäksi panostustiheys ja räjähdysainepanoksen halkaisija sekä panostusolosuhteet.

Räjähdysnopeuden mittaamiselle on useita eri menetelmiä ja välineitä. Menetelmät voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan:

- pisteestä pisteeseen VOD
- jatkuvan mittauksen VOD

Pisteestä pisteeseen mittaus perustuu elektroniseen ajanottoon. Mittauksessa ensimmäinen sensori käynnistää ajanoton ja toinen pysäyttää sen. Mittausohjelma laskee räjäytysnopeuden mittausmatkan ja ajan mukaan. Mittauksen luotettavuudelle on tärkeää, että mittausmatka on tarkka. Pisteestä pisteeseen mittaus sopii hyvin vapaassa tilassa tehtäviin mittauksiin yksittäisistä räjähdysainepatruunoista.

Explomet on pisteestä pisteeseen mittaukseen soveltuva Sveitsiläinen räjäytysnopeusmittauslaite. Laitteeseen kiinnitetään valokuitukaapeli, mittaus käynnistyy ja päättyy räjähdysnopeuden aiheuttaman kirkkaan valon ohittaisa mittapisteet. Mikäli mittapisteiden etäisyys on tarkka, saadaan laitteella luotettavasti mitattua VOD. Kuvassa 28 on Explomet räjäytysnopeusmittauslaite.



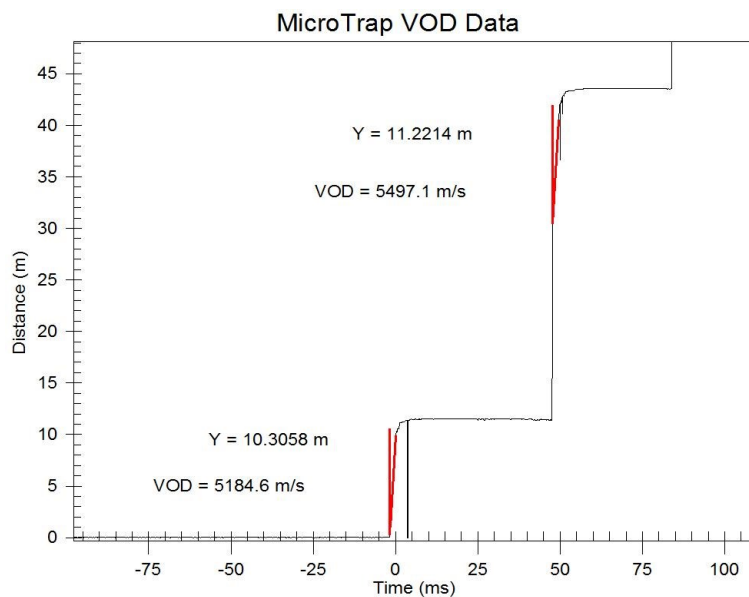
Kuva 28. Explomet räjäytysnopeusmittauslaite (Oy Forcit Ab)

Jatkuvalla mittauksella on olemassa useita eri tapoja. Yksi tapa on mitata vastuksen muutosta ajassa ja matkassa. Räjähdysainepanokseen voidaan asettaa esimerkiksi suuren ominaisvastuksen omaava kaapeli tai tanko. Räjähdysnopeuden yhteydessä mittalaite tallentaa vastuksen muutoksen ajan funktiona. Kuvassa 29 on MRELL:in valmistama Micortrap VOD/DATA Recorder.



Kuva 29. Microtrap VOD/DATA Recorder (Oy Forcit Ab)

Microtrap VOD/DATA Recorder on jatkuvaan mittaukseen pohjautuva laite, joka mittaa räjähdysaineeseen asennetusta kaapelista tai tangosta vastuksen muutosta ajassa ja matkassa räjähdystapahtuman aikana. Mittaustaajuus voidaan säätää aina kahteen megahertsiin asti. Yhdellä mittauskerralla voidaan mitata nopeus useammastakin kuin yhdestä reiästä tai tuotteesta. Mittaustulokset tallentuvat laitteen muistiin ja siirtetään analysointiohjelmalle. Ohjelma piirtää kuvaajan vastuksen muutoksesta ajan funktiona nopeudeksi. Kuvaajasta voidaan analysoida räjähdysnopeus, räjähdyspanosten syttymishetket ja räjähdysaineen palomatka. Näiden tietojen avulla voidaan arvioida räjähdysaineen toimivuutta kyseisessä räjähdystapahtumassa. Kuviossa 3 on kuva räjäytysnopeuskäyrästä ja saaduista tuloksista. Analysointiohjelmassa kuvaa tulkitaan valitsemalla tieto mitä halutaan ja sen jälkeen osoitetaan kuvasta haluttu aloituspiste ja lopetuspiste. Ohjelma laskee ja mittaa kysytyn tiedon automaattisesti.



Kuvio 3. Microtrap 7p5 ohjelmalla analysoitu räjäytysnopeus ja detonaatio matka.

4.4.3 K810 ja 17 x 500 F-pp VOD ja mittaustuloksia

Taulukoihin 11 - 13 on koottuna räjäytysnopeusmittauksilla saatuja tuloksia tutkittaville räjähteille. Mittaukset on tehty Microtrap VOD/DATA recorderilla ja niissä on käytetty 10.80  $\Omega$ /m ominaisvastuksen omaavaa mitataapelia. Mittaustulokset on analysoitu Microtrap 7p5 ohjelmalla.

Taulukko 11. 50 mm teräsputkesta mitattuja nopeuksia

Räjähdysaine	CR	Tiheys (kg/dm <sup>3</sup> )	Räjähdysenergia (MJ/kg)	VOD (m/s)
17 x 500 F-putkipanos	0,34	1,1	2,4	2189
17 x 500 F-putkipanos	0,34	1,1	2,4	2177
17 x 500 F-putkipanos	0,34	1,1	2,4	2204
K810 360g/m	0,44	0,94	2,9	2173
K810 470g/m	0,5	0,92	2,9	3139
K810 470g/m	0,5	0,92	2,9	3215
K810 470g/m	0,5	0,9	2,9	3016

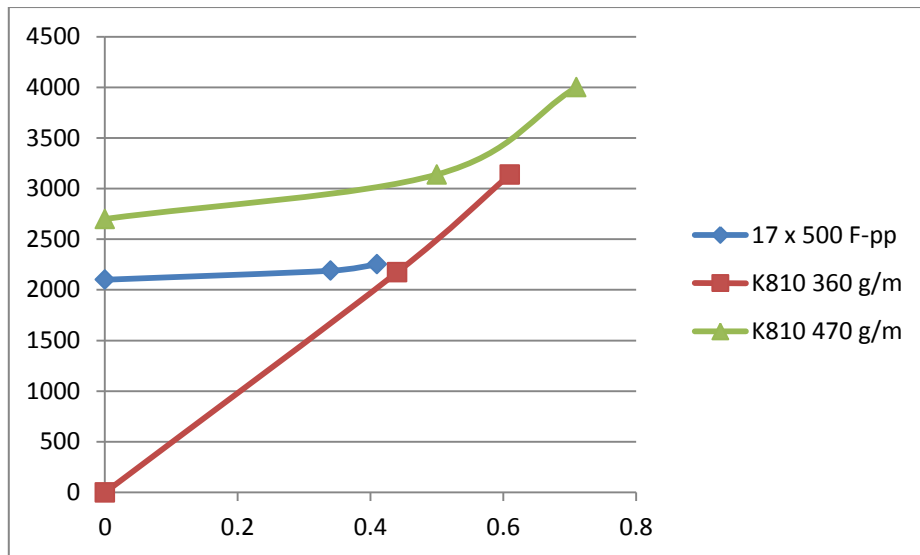
Taulukko 12. 41 porausreiästä mitattuja nopeuksia

Räjähdysaine	CR	Tiheys (kg/dm <sup>3</sup> )	Räjähdysenergia (MJ/kg)	VOD (m/s)
17 x 500 F-putkipanos	0,41	1,1	2,4	2252
K810 330/m	0,54	0,95	2,9	2707
K810 360g/m	0,61	0,77	2,9	3139
K810 470g/m	0,71	0,79	2,9	4002

Taulukko 13. Vapaassa tilassa mitattuja räjähdysnopeuksia

Räjähdysaine	Tiheys (kg/dm <sup>3</sup> )	Räjähdysenergia (MJ/kg)	VOD (m/s)
K810 500g/m	0,8	2,9	2835
K810 500g/m	0,8	2,9	2820
K810 500g/m	0,8	2,9	2589
K810 4600 g/m	1,01	2,9	4156
K810 4600 g/m	1,02	2,9	4248
K810 4600 g/m	1,03	2,9	4291
K810 4600 g/m	1,04	2,9	4440
K810 4600 g/m	1,05	2,9	4334

Kuvioon 4 on havainnollistettu graafisena käyränä CR luvun merkitystä räjähdysaineiden räjähdysnopeuksiin.



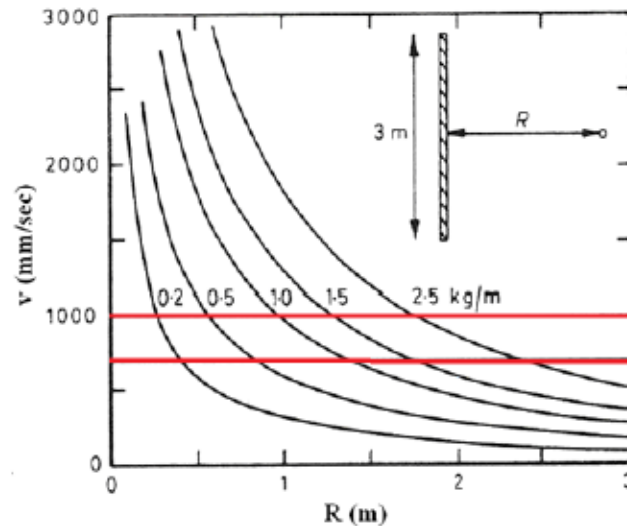
Kuvio 4. CR luvun vaikutus räjäytysnopeuteen

Mittaustuloksista on nähtävissä kuinka sulkeuma ja CR-luku vaikuttavat räjähdysnopeuteen. 470 g/m emulsiorannulla räjähdysnopeus on 50 mm reiässä ~3100 m/s ja 41 mm reiässä vastaava tulos on ~4000 m/s. Vapaassa tilassa ilman sulkeumaa 330 - 360 g/m emulsiorantu ei räjähdä, mutta jo 50 mm putkessa räjähdysnopeus on ~2200 m/s ja 41 mm porausreiässä saavutetaan ~2700 m/s nopeus. Toisaalta tuloksista näkyy myös CR-luvun ja sulkeuman vähäisempi vaikutus NG -pohjaiselle 17 x 500 F-putkipanokselle. F-putkipanokselle on tehty vuonna 2014 Forcitin toimesta yli 20 laadunvalvontaan liittyvää räjäytysnopeusmittausta. Näiden mittausten keskiarvo on 2278 m/s. Mittaukset on tehty valokaapelimitoituksena. Nämä tulokset tukevat myös tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia, että 17 mm F-putkipanoksen nopeus on hyvin vakio ja olosuhteilla on vähäinen vaikutus räjähdysnopeuteen. Kaikki tutkitut tuotteet palavat kuitenkin selvästi alle laskennallisen ideaalidetonaationopeuden mikä tekee räjähdystapahtuman ennustettavuudesta haasteellisen.

## 5 RAKOILUN SYNTYMINEN

### 5.1 Rakoilun syntyminen

Kalliossa tapahtuva rakoilu aiheutuu räjähdyksessä syntyvistä veto- ja puristusjännitystiloiista, jotka iskuaalto aiheuttaa edetessään kalliossa ns. tärinäaaltona. Räjähdysaineen äkillinen räjähdys porareissä aiheuttaa reiän seinämiin paineiskun, joka leviää ympäristöön. Isku on verrannollinen heilahdusnopeuteen ja aaltoliikkeen etenemisnopeuteen. Tutkimusten mukaan rakoilu alkaa kalliossa, kun heilahdusnopeus on luokkaa 700 - 1000 mm/s. (Vuolio & Halonen 2010, 261 - 265) Kuvio 5 kuvaa heilahdusnopeuden suuruutta erisuuruilla panostusasteilla tunnelilouhinnassa käytettävillä reikäläpimitoilla (41 - 51 mm).



Kuvio 5. Heilahdusnopeus etäisyyden ja panostusasteen funktiona. (Sun 2014)

Porareistä lähtevä rakoilu voidaan jakaa kolmeen pituusluokkaan: tiheään levinneisiin rakoihin  $L_d$  ( $< 10$  cm), laajalle levinneisiin  $L_w$  ( $> 10$  cm) ja piisimpään rakoon  $L_{max}$ . Lyhyimmät raot ovat porareian ympärillä ja siellä rakoilu on myös tiheintä. Tutkittaessa sahatuista kivinäytteistä rakoilua, merkitseviä rakoja ovat yli 10 cm pitkät raot ja niiden avulla voidaan laskea keskimääräinen odotettavissa oleva rakopituus. Keskimääräisten maksimirakojen muodostama vyöhyke on rakoiluvyöhyke. (Jokinen J, Ylätalo K 1995, 9.)

## 5.2 Räjähdyksen aiheuttama paine

Porausreiän seinämiin kohdistuvaa paineiskua voidaan arvioida useilla eri menetelmillä. Näistä yleisimpiä käytössä olevia ovat William Hustrulidin esittämä C-J teoriaan pohjautuva (Chapman-Jouquet / C-J plane) malli sekä Olssonin ja Ouchterlonyn tapa laskea porausreiän seinämään kohdistuva paine. Alla on käsiteltyä molemmat laskentatavat. Nämä kaksi tapaa on esitetty Suomessa mm. Vuolio & Halonen Räjäytystyöt 2010 oppaassa.

Tunnelilouhinnassa ei porausreikiä reunoilla ja apukaarilla panosteta täyteen vaan niihin jää tyhjä tila reiän ja panoksen väliin. Arvioitaessa louhinnasta jäljelle jäävän seinämän laatua, on arvioitava panostusasteen lisäksi porareian täyttöastetta ja sen vaikutusta porausreiän seinämiin kohdistuvaan paineiskuun. (Hustrulid 1999, 297 – 300.)

Täyttöastetta kuvaa suhdeluku CR (coupling ratio)

$$A = \frac{D_e}{D_h} \quad (8)$$

$D_e$  = räjähdysaineen halkaisija (mm)

$D_h$  = porausreiän halkaisija (mm)

(Hustrulid 1999, 297 – 300.)

Detonaatiopaine on räjähdysrintaman takana reaktiovyöhykkeessä oleva paine (Chapman-Jouquet / C-J plane). Se on räjähdysaineen tiheyden, räjähdysnopeuden ja partikkelinopeuden (peak particle velocity) funktio. (Cooper & Kurowski 1996, 67 – 72.)

Useimpien räjähdysaineiden aiheuttama detonaatiopaine voidaan laskea likimäärin alla olevalla kaavalla (+/- 7% tarkkuudella):

$$P_{DET} = 0,25\rho(VOD)^2 \quad (9)$$

$P_{DET}$  = detonaatiopaine (MPa)  
 $\rho$  = räjähdysaineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)  
 $VOD$  = räjähdysnopeus (m/s)  
 (Cooper & Kurowski 1996, 67 – 72.)

Räjähdyspaine on eri asia kuin detonaatiopaine. Se on paine, joka vaikuttaa heti räjähdysrintaman jälkeen kun räjähdysaine on adiabaattisen (lämpöä luovuttamaton tapahtuma) laajentumisen jälkeen palanut alkuperäiseen tiheyteen. Räjähdyspaine on noin puolet iskuaallon paineesta (45 - 50%).

$$P_e = 0,125\rho(VOD)^2 \quad (10)$$

$P_e$  = räjähdyspaine

Kun huomioidaan räjähdysaineen täyttöaste, saadaan yhtälö jolla voidaan arvioida porausreiän seinämään kohdistuvaa painetta:

$$P_{h1} = P_e(CR)^{2\gamma} \quad (11)$$

$P_{h1}$  = paine porausreiän seinämässä (MPa)  
 $\gamma$  = kokeellinen kerroin 1,2  
 (Hustrulid 1999, 297 – 300.)

Olsson ja Ouchterlony (2003) esittivät porausreiän seinämään kohdistuvan paineen laskemiseksi kaavaa:

$$P_{h2} = \frac{\gamma}{(\gamma + 1)^{(\gamma+1)}} \rho VOD^2 \left(\frac{D_e}{D_h}\right)^{2,2} \quad (12)$$

$$\gamma = \sqrt{\left(1 + \frac{VOD^2}{2Q}\right)} \quad (13)$$

$\gamma$  = dimensioton laajenemisvakio (adiabaattinen gamma)  
 $Q$  = räjähdysenergia (J/kg)

Taulukkoihin 14 - 16 on laskettu 41mm ja 51mm porausreikien seinämiin kohdistuva paineisku tutkimuksessa käytettäville räjähteille.

Taulukko 14. Teoreettiset laskenta-arvot tutkittaville tuotteille. (Oy Forcit Ab)

	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Räjähdysenergia (MJ/kg)	VOD (m/s)
F-putkipanos 17x500	1100	2,4	2200
K 810 350 g/m	990	2,9	2100
K 810 400 g/m	990	2,9	2300
K 810 500 g/m	990	2,9	3500

Taulukko 15. 41mm porausreiän seinään aiheutuvat teoreettiset paineet Oy Forcit Ab:n tyypillisillä tarkkuuslouhinta tuotteilla (Tomi Kouvonon)

	CR 41mm	P <sub>e</sub> (MPa)	P <sub>h1</sub> (MPa)	P <sub>h2</sub> (MPa)
F-putkipanos 17x500	0,41	666	78	145
K 810 350 g/m	0,54	599	130	241
K 810 400 g/m	0,61	655	155	271
K 810 500 g/m	0,71	1516	531	746

Taulukko 16. 51mm porausreiän seinään aiheutuvat teoreettiset paineet Oy Forcit Ab:n tyypillisillä tarkkuuslouhinta tuotteilla (Tomi Kouvonon)

	CR 51mm	P <sub>e</sub> (MPa)	P <sub>h1</sub> (MPa)	P <sub>h2</sub> (MPa)
F-putkipanos 17x500	0,33	666	46	90
K 810 350 g/m	0,43	599	72	139
K 810 400 g/m	0,49	655	118	215
K 810 500 g/m	0,57	1516	393	577

Olssonin ja Ouchterlonyn laskentamalli vaikuttaa räjähdyspaineen osalta luotettavammalta, koska heidän laskentamallillaan saadaan adiabaattinen gamma vastaamaan hyvin lähelle ideaalitulannetta, käytettäessä ideaalitulanteen muita detonaatiofysikaalisia arvoja. Toisaalta gamma on joustava ja muuttuu, jos tiheydessä tai räjähdysnopeudessa tapahtuu muutoksia. Hustrulidin mallissa saadaan C-J paine osumaan hyvin lähelle oikeaa ideaalitulanteessa, mutta kaavassa ei ole mitään kerrointa joka ottaisi huomioon kaupallisten louhintaräjähteiden epäideaalin tilanteen. Molemmissa kaavoissa on vakioeksponentit ja onkin arvioitava kokeellisten eksponenttien soveltuvuutta tutkittaville räjähteille.

Arvioitaessa räjähdyspaineita on muistettava, että räjähdysaineen tiheys vaikuttaa hyvin paljon räjähdysnopeuteen ja sitä kautta porausreiässä vaikuttaviin paineisiin. Rankine-Hugoniot teorian mukaan suurimmalla osalla räjähdysaineista räjähdysnopeuden ja räjähdysaineen tiheyden suhde on suoraan verrannollinen toisiinsa. Tämä räjähdysnopeuden ja tiheyden suhde voidaan kirjoittaa alla olevan kaavan mukaisesti.

$$VOD = \alpha + \beta \rho_0 \quad (14)$$

$\alpha$  ja  $\beta$  = kokeellisia vakioita  
 $\rho_0$  = alkuperäinen tiheys

Mikäli kokeellisia vakioita ei ole käytettävissä tutkittavista räjähteistä, mutta tiedetään VOD jossain tietyssä tiheydessä, voidaan muuttunut räjäytysnopeus laskea likimäärin alla olevalla kaavalla.

$$VOD_1 = VOD_2 + 3(\rho_1 - \rho_2) \quad (15)$$

$VOD_1$  = muuttunut VOD (km/s)

$VOD_2$  = tunnettu VOD (km/s)

$\rho_1$  = muuttunut tiheys (g/cm<sup>3</sup>)

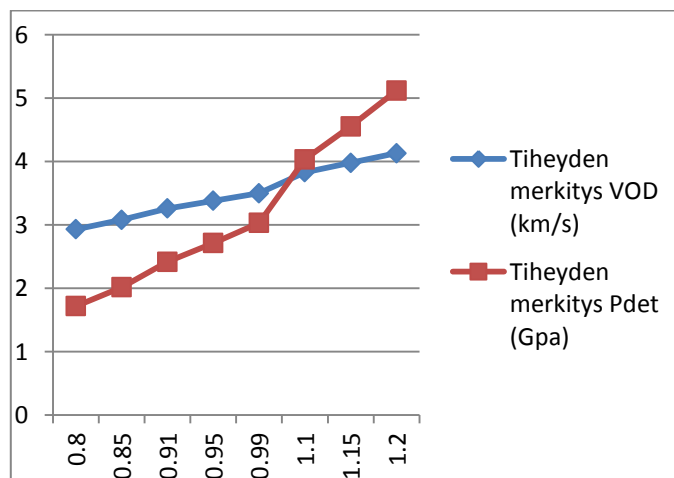
$\rho_2$  = alkuperäinen tiheys (g/cm<sup>3</sup>)

Tämä likimääräinen kaava antaa useimmille räjähdysaineille muuttuneen räjähdysnopeuden 10 % tarkkuudella oikein. Muuttuneen nopeuden jälkeen voidaan laskea räjähdyksestä syntyvät paineet yllä esitetyillä kaavoilla. (Cooper & Kurowski 1996, 69 – 70.)

Taulukkoon 17 on laskettu tiheyden muutoksen vaikutus K810 500 g/m räjäytysnopeuteen ja sitä kautta detonaatiopaineeseen. Tiheydellä 0,99 g/cm<sup>3</sup> on mitattu nopeus 3,5 km/s ja sen avulla on laskettu taulukon muut arvot.

Taulukko 17. Tiheyden merkitys räjähdysnopeuteen ja detonaatiopaineeseen (Tomi Kouvonon)

K810	VOD1 km/s)	VOD2 (km/s)	$\rho_1$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_2$ (g/cm <sup>3</sup> )	$P_{det}$ (Gpa)
500g/m	2,3	3,5	0,8	0,99	1,72
500g/m	3,08	3,5	0,85	0,99	2,02
500g/m	3,26	3,5	0,91	0,99	2,42
500g/m	3,38	3,5	0,95	0,99	2,71
<b>500g/m</b>	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>3,03</b>
500g/m	3,83	3,5	1,1	0,99	4,03
500g/m	3,98	3,5	1,15	0,99	4,55
500g/m	4,13	3,5	1,2	0,99	5,12



Kuvio 6. Tiheyden merkitys detonaatiopaineeseen ja VOD K810:llä 51mm reiässä (Tomi Kouvonon)

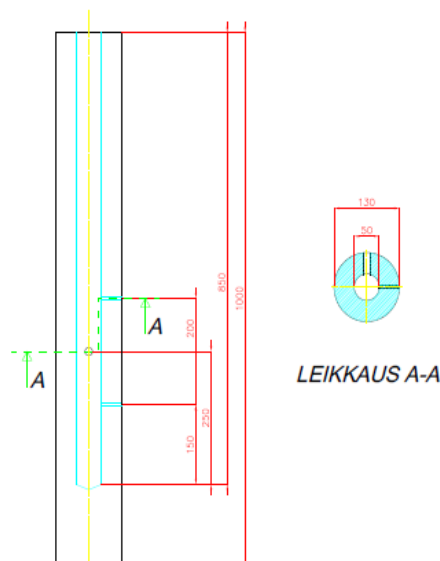
Kuviossa 6 on nähtävissä kuinka tiheyden kasvaessa puolitoistakertaiseksi nousee paine lähes kolminkertaiseksi. Käytettäessä pumpattavia emulsioita, kuten Kemiitti 810, on tämä tiheyden vaikutus otettava panostustyössä huomioon. Pienetkin muutokset tiheydessä vaikuttavat räjähdyksestä syntyviin paineisiin ja sitä kautta kalliossa tapahtuvaan rakoiluun. Lowdsin energiajakaumamallin mukaan tiheyden ja VOD:n nousu kasvattaa myös hukkaenergian osuutta. Tästä voidaan päätellä, että alhaisemmalla tiheydellä saadaan paremmin hyödynnettyä räjähteessä oleva energia ja samalla saavutetaan pienempi paine. Porausreiässä pienempi paine aiheuttaa pienemmän EDZ -vyöhykkeen ja murskaa kiveä pienemmältä alueelta reiän ympäriltä, jolloin räjähdyksessä syntyvän hienoaineksen määrä saadaan pienemmäksi. Emulsioräjähteiden osalta alhainen tiheys tarkoittaa myös suurempaa määrää kaasukuplia, jotka kantavat detonaatiota eteenpäin. Suurempi määrä kaasukuplia varmistaa detonaation häiriöttömän etenemisen räjähdysaineessa. Liian alhainen tiheys voi johtaa ongelmiin veden kanssa ja epätasaisena kaasuuntumisena.

### 5.3 Räjähdyspainemittaukset Vihtavuorella porausreikäsimulaattorissa

#### 5.3.1 Mittausjärjestelyt

Räjähdyspainemittausten tavoitteena oli mitata paineiskua, joka räjähdysaineesta syntyy sekä ylipaineen kesto 50 mm porausreikää vastaavissa olosuhteissa. Mittauksessa verrattiin F-putkipanoksen shokkiaallon aiheuttamaa paineiskua K810 rantupanoksen aiheuttaman shokkiaallon paineiskuun.

Tutkimuksessa sovellettiin asepiippuun syntyvien paineiden mittausmenetelmää. Mittauksia varten koneistettiin 130 mm paksusta rautaputkesta ns. ”porausreikäsimulaattori”. Kuvassa 30 näkyy räjäytysputken mitat ja rakenne.



Kuva 30. Porausreikä simulaattorin rakennekuva (Oy Forcib Ab)

”Simulaattorissa” voidaan räjäyttää pieniä räjähdysainemääriä 50 mm po-  
rausreikää vastaavissa olosuhteissa. Räjähdyksistä kyetään mittaamaan rä-  
jähdysnopeudet sekä sopivalla paineanturilla mittaamaan ja tallentamaan  
räjähdyspaineita tallennuslaitteistolle.

Koetta varten teräsputkeen asennettiin Kistler 6205A paineanturi, joka  
kestää 6000 baarin (600 MPa) paineen. Anturin paineherkkä osa suojattiin  
lämpöeristelevyllä valmistajan ohjeiden mukaisesti. Lämpösuojalevy estää  
räjähdysnopeuden lämpöimpulssia sotkemasta painemittausta. Levy on vaihdet-  
tava 4 - 5 räjähdyksen välein tai kun havaitaan sen vaurioituneen. Kuvassa  
31 näkyy mittausjärjestelyjä.



Kuva 31. Räjähdytysputki on kiinnitettyä kuormalavaan. Paineanturi näkyy putken kes-  
kellä ja putkesta tulee ulos tukirimaa pitkin räjähdyksennopeusmittauskaapeli ja  
nallin sytytysjohto. Oikealla näkyy signaalin tallennuslaitteisto. (Oy Forciti  
Ab)

Paineanturilta signaali kulki varausvahvistimen (B&K 2635) kautta sig-  
naalianalysointilaitteelle (Analogic D6500). Mittauslaitteet vuokrattiin Puolus-  
tusvoimien tutkimuslaitokselta ja mittaus tulokset analysoi tutkija Markus  
Lehkonen (DI). Varausvahvistimen ja signaalianalysointilaitteen oli kalibroin-  
nut Millog Oy. Mittausjärjestelmä toimi taajuuskaistalla 1 Hz – 200 kHz.

### 5.3.2 Mitattavat räjähteet

Tutkimuksessa mitattiin seuraavia räjähteitä:

- 17 x 500 F-putkipanos
- 360 g/m K810 rantupanos
- 470 g/m K810 rantupanos

Tutkittavat räjähteet olivat 50 cm pituisia eli räjähdysainemassat olivat  
noin 100 g, 180 g ja 235 g. Emulsiorantupanoset oli tehty muoviputken  
sisälle. Pienempi panos 22 mm ja isompi 25 mm muoviputkeen. Sytytys-  
menetelmä oli impulssiletkusytytys sekä neljässä viimeisessä kokeessa  
sähkösytytys. Rantupanosien räjäyttimenä käytettiin 25 g Forprime rä-  
jäytintä.

Räjähteet kiinnitettiin 10 mm x 10 mm rimaan. Samaan kokonaisuuteen  
kiinnitettiin räjähdyksennopeusmittauksia varten koaksiaalikaapeli ja valokui-

tukaapeli. Panos keskitettiin reiän keskelle jarrukappaleiden avulla. Kuvassa 32 näkyy räjäytysvalmis panos ja panos simulaattorissa juuri ennen räjäytystä.



Kuva 32. Kuvassa on vasemmalla puurimaan rakennettu panos ja oikealla panos on räjäytysputkeen asennettuna. (Oy Forcib Ab)

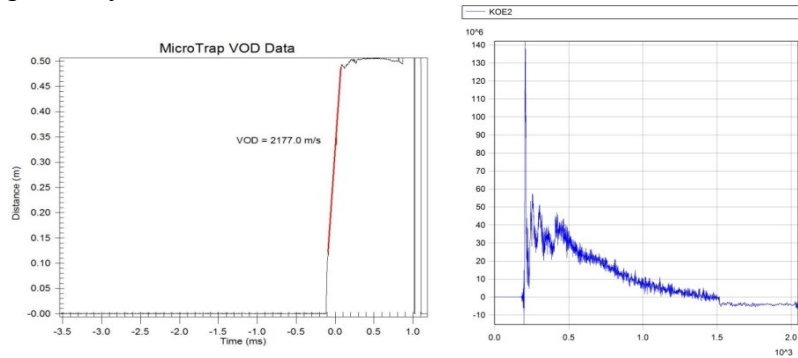
### 5.3.3 Mittaustulokset ja niiden analysointi

Paineista etsittiin maksimiarvoja ja ylipaineen kestoa. Tutkija Markus Lehkosen mukaan F-putkipanoksen osalta käyrät vastaavat tyypillistä suljetun tilan räjähdyspaine vaikutusta, mutta emulsiorantujen osalta käyrät ovat poikkeukselliset. Virhemarginaalit olivat ajoittain melko suuria ja ne johtuivat räjähdysaiheuttaman mekaanisen rasituksen tuottamista sähköisistä häiriöistä. Räjäytysputki pääsi liikkumaan alustassa räjähdysvoimasta. Taulukkoon 18 on koottu testitulokset.

Taulukko 18. Painemittaustulokset (Markus Lehkonen)

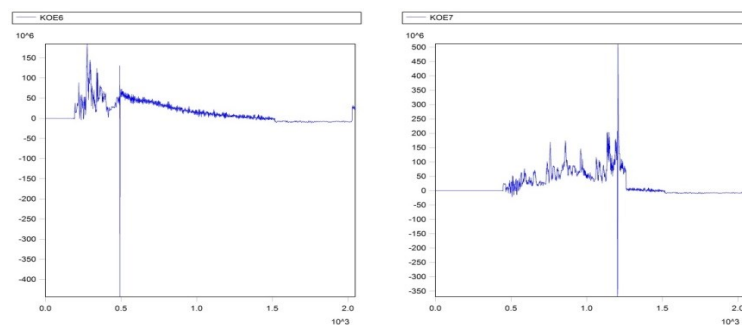
Koe no.	Räjähdysaine	Paino (g)	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	VOD (m/s)	Mitattu paine (Mpa)	Ylipaineen kesto (ms)	Epätarkkuus (MPa)
1	17 x 500 F-putkipanos 202g/m	101	1100	2189	asennusvirhe		
2	17 x 500 F-putkipanos 208 g/m	104	1100	2177	140	1,3	+/-15
3	17 x 500 F-putkipanos 212 g/m	106	1100	ei tulosta	120	1,4	+/-5
4	17 x 500 F-putkipanos 214 g/m	107	1100	2204	190	1,3	+/- 30
5	K810 356g/m (22mm rantu)	178	940	ei tulosta	190	1,3	+/-25
6	K810 354g/m (22mm rantu)	177	930	ei tulosta	185	1,3	+/- 5
7	K810 358g/m (22mm rantu)	179	940	2173	190	1,0	+/- -20
8	K810 362g/m (22mm rantu)	181	950	ei tulosta	90	4,0	+/- 10
9	K810 368g/m (22mm rantu)	184	920	432	330	2,0	+/- 10
10	K810 468g/m (25mm rantu)	234	920	3139	anturi vioittui, ei jatkettu mittausta		
11	K810 470g/m (25mm rantu)	235	920	3215			
12	K810 460g/m (25mm rantu)	230	900	3016			

F-putkipanoksen mitatut nopeudet ja paineet antoivat siistit sekä lähes häiriöttömät käyrät. Paineikäyrä nousee huippuunsa heti shokkiaallon iskiessä anturiin ja putoaa sen jälkeen kaasujen aiheuttamaksi paineeksi. Ylipaineen kesto on lähes samaa kaikilla testatuilla näytteillä. Räjätysnopeuskäyrät ovat siistit ja häiriöttömät. Nopeus on analysoitavissa heti nallin jälkeen koko matkalta. Kuviossa 7 on tyypilliset F-putkipanoksen VOD ja painekäyrät.



Kuvio 7. Kokeen 2 VOD ja painekäyrät. VOD käyrä osoittaa siistin ja häiriöttömän detonaation. Paineikäyrä on siisti ja tyypillinen suljetun tilan käyrä. Käyrässä näkyy pientä putken liikkeen aiheuttamaa häiriötä. (Kouvonen & Lehkonen 2014)

K810 rantupanoksilla painekäyrät olivat epämääräisempiä (kuvio 8) ja sisälsivät enemmän virheitä. Sama epämääräisyys näkyy myös räjäytysnopeuskäyrissä. Emulsioräjähteessä kaasukuplat kantavat räjähdystä eteenpäin ja kuplien määrällä sekä tasaisuudella on vaikutusta räjähdystapahumaan. Käytetyissä emulsiorannuissa on todennäköisesti ollut ilmaa sekoittuneena massan sekaan. Tutkitut emulsiorannut ovat lähellä K810 kriittistä halkaisijaa eivätkä räjähdä ideaalidetonaationopeudella. Energia sisältö (MJ/kg) on rannuissa kuitenkin hyvin lähellä ideaalitulannetta. Epätasainen kaasuuntuminen, hidas räjähdysnopeus ja suuri määrä kaasuja tekevät käyristä poikkeukselliset. Detonaatorintaman oletettava kaarevuus selittänee osaltaan myös ohuiden emulsiorantujen poikkeuksellisia käyriä. Kaarevan rintaman reunoilla räjähdysainetta on reaktiossa osallisena hyvin ohuelti ja siihen vaikuttaa samanaikaisesti porausreiän pinnoilta tulevat heijastumat. Detonaatorintaman reunalla on todennäköisesti alueita, jotka eivät räjähdä kunnolla.



Kuvio 8. Emulsiorantujen aiheuttamia painekäyriä. Käyrissä samalla kohdalla näkyvät suuret painepiikit alas ja ylös, ovat mekaanisen rasituksen aiheuttamia häiriöitä. (Lehkonen 2014)

Sekä 350 g/m emulsiorantu että F-putkipanos räjähtävät molemmat noin 2200 m/s, jolloin shokkiaallon aiheuttamat paineiskut tulisivat olla hyvin lähellä toisiaan. Testin mukaan ero keskiarvoissa on noin 50 MPa. Emulsiorannun suurempi CR-luku aiheuttaa suuremman paineiskun, koska etäisyys mitta-anturiin on pienempi kuin F-putkipanoksella. Emulsiosta vapautuu huomattavasti enemmän kaasuja (taulukko 19) ja ne pitävät painekäyrää korkeampana ja pidempikestoisena kuin F-putkipanoksessa. Louhintavaurion kannalta tämä korkean rasituksen pidempi kesto voi olla merkittävämpi tekijä kuin hieman suurempi dynaaminen isku.

Taulukko 19. F-putkipanoksen ja K810 350 g/m emulsiorannun räjähdyskaasut ja energia (Tomi Kouvonen)

Räjähde	Koeräjähteen massa (kg)	Vod (m/s)	Räjähdyskaasut (l)	Energia (MJ)
17x500 F-pp	0,1	~2200	40,6	0,24
K810 360 g/m	0,18	~2200	183,6	0,522

Määrittäessä keskiarvoja kokeen tulosten pohjalta, voidaan kokeen 8 ja 9 tulokset jättää huomioimatta. Kokeen 8 ylipaineen kesto on poikkeuksellisen pitkä muihin verrattuna ja käyrästä ei löydy selkeää painepiikkiä. Lisäksi räjähdysääni räjähdysyhteydessä oli poikkeuksellisen alhainen. Kyseessä oli siis deflagraatio eikä varsinainen detonaatio. Kokeen 9 kohdalla anturi tai lämpösuojalevy oli todennäköisesti jo vioittunut kokeen mekaanisista rasituksista ja siksi käyrässä on poikkeuksellisen suuri painepiikki. Kokeen 9 räjähtäysnopeus oli mitattuun paineeseen nähden liian alhainen, joten molemmissa mittauksissa oli jotain häiriötä. Korvakuulolta kokeen 9 ääni viittasi normaaliin räjähdykseen. Kokeen 4 (muihin F-putkipanos käyriin nähden) selkeästi suurempi negatiivinen paine on vähennetty keskiarvoista, koska se on painepiikin kohdalla ja negatiivinen arvo ei ole mahdollinen. Tutkija Markus Lehkosen mukaan painepiikin kohdalla oleva negatiivinen paine vääristää maksimipainetta negatiivisen paineen verran.

Taulukko 20. Taulukossa on painetestissä mitatut keskiarvotulokset sekä laskentakaa-vojen antamat paineet korjatuilla kertoimilla (Tomi Kouvonen)

Räjähdysaine	Paino (g)	CR	VOD (m/s)	Paine (Mpa)	Hustrulid (Mpa)	Olsson (Mpa)	Korjattu vakio $\gamma=0,84$ (Olson)	Korjattu vakio $\gamma=0,74$ (Hustrulid)
17 x 500 F-pp 209g/m	104,5	0,34	2190	<b>140</b>	50	96	141	133
K810 360g/m	179,8	0,44	2173	<b>197</b>	77	146	196	163
K810 466g/m	233	0,5	3123	anturi vioittui	210	335	431	398

Olssonin ja Hustrulidin esittämien kaavojen keskeisin ero on, että Hustrulidin kaava pohjautuu yksinkertaistettuun C-J teoriaan (Chapman-Jouquet), jossa räjähdysaineen aiheuttama heilahdusnopeus (PPV) on jätetty huomioimatta ja korvattu vakiokertoimella. Olssonin kaavassa heilahdusnopeuden tilalla on laajenemismakio, joka lasketaan räjähdysenergian ja räjähdysnopeuden avulla. Molemmissa kaavoissa porareihinhalkaisijan ja räjähdysaineen suhdetta kuvaa CR -luku, joka korotetaan kokeelliseen vakioeksponenttiin. Kumpikaan kaava ei huomioi väliainetta, jonka

läpi paineisku etenee kohti porausreiän seinämää eikä materiaalia, johon reikä on porattuna. Tässä testissä on pyritty hakemaan kokeellisesti vakio-eksponentti, joka antaisi mittaustuloksia vastaavat paineet porausreiän seinämässä. Interpoloimalla päädyttiin Olssonin osalta eksponenttiin 1.84 ja Hustrulidin osalta eksponenttiin 0.74 ( $2\gamma = 1.48$ ). Olssonin kaavassa korjattu eksponentti vaikuttaa toimivalta ja sen avulla saadaan laskettua mittaustuloksia vastaavia painearvoja. Interpoloinnin tulokset ovat taulukossa 20. Taulukkoon 21 on laskettu korjatulla kertoimella oletettavat maksimipaineet 51 mm porausreiässä tutkittaville räjähteille.

Taulukko 21. Korjatulla Olssonin kaavalla lasketut maksimipaineet tutkittaville räjähteille 51 mm porausreiässä (Tomi Kouvonen)

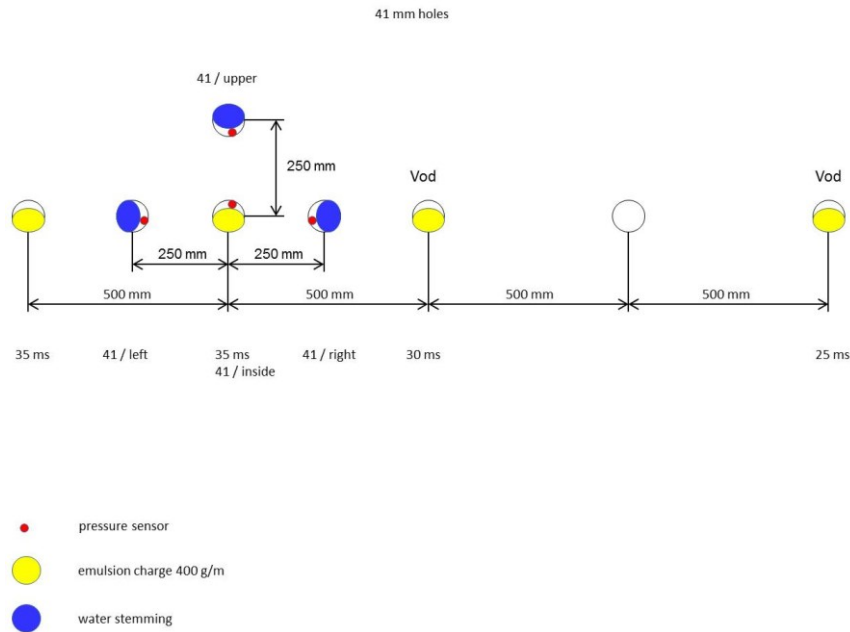
	CR	Räjähdysenergia (MJ/kg)	VOD (m/s)	Teho (GW)	Voima/m	Paine (MPa)
F-putkipanos 17x500	0,33	2,4	2200	1,2	1,0	141
K 810 350 g/m	0,44	2,9	2100	2,1	2,47	196
K 810 400 g/m	0,47	2,9	2300	2,6	2,82	258
K 810 500 g/m	0,52	2,9	3500	5,1	3,3	596

Tällä menetelmällä lasketut ja mitatut paineet kertovat voiman, jolla räjähdysaine maksimissaan iskee kallioon. Jännitystila, joka kallioon muodostuu ja rikkoo kiveä voi olla tätä joko suurempi tai pienempi riippuen kivilajin ominaisuuksista. Lopullisen varmuuden saamiseksi korjatulle eksponentille, tulee mittauksia tehdä lisää. Mittausjärjestelyissä pitää jatkossa kiinnittää huomioita räjäytysputken kunnolliseen tuentaan mittauspaikalla, jotta laitevaurioilta ja mittaushäiriöiltä vältytään. Lisäksi on tutkittava myös räjäytettävän materiaalin lujuus ja muodonmuutosominaisuuksien vaikutusta syntyviin paineisiin.

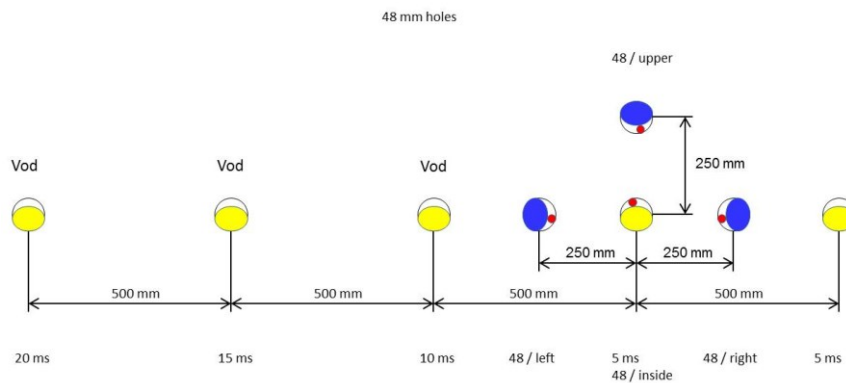
#### 5.4 Painemittaukset Sandvik Mining & Constructionin testikaivoksessa 9.9.2014

##### 5.4.1 Mittausjärjestelyt

Räjähdyspainemittausten tarkoituksena oli mitata räjähdyspainetta, jonka K810 400 g/m muodostaa 41 mm ja 48 mm porareian sisään kalliossa. Lisäksi tutkittiin painekäyttäytymistä reiän ympäristössä sekä painekäyttäytymisen vaikutusta kiven rakoiluun. Kallioon porattiin neljän metrin pituisia reikiä viisi kappaletta / reikäkoko. Reiät panostettiin Forcitin ECM panostuslaitteistolla. Sytytys toteutettiin Austin Detonator S.R.O:n elektronisilla nalleilla, joiden syttymistarkkuus on 0.01 % ohjelmoidusta ajasta. Räjähdysaineesta porareian seinämään aiheutuvan paineen lisäksi testissä tutkittiin paineiskun suuruutta kahden reiän välillä ja erityisesti syttymisaikatarkkuuden vaikutusta paineen suuruuteen. Kuvissa 33 ja 34 on esitetty koejärjestelyt.



Kuva 33. Räjähdyspainemittauksen toteutus 41 mm porausreiässä (Tomi Kouvonon)



Kuva 34. Räjähdyspainemittauksen toteutus 48 mm porausreiässä (Tomi Kouvonon)

Käytetty painemittaus sensori ja tiedonkeruulaitteisto olivat Austin Detonator S.R.O:n ja Dan-Mar Companyn yhteistyössä kehittämät. Mittausjärjestelmää ei ole ainakaan toistaiseksi kaupallisesti ostettavissa. Pavel Krivanek Austin Detonatorilta oli käyttämässä tallennuslaitteistoa ja tekemässä mittauskytkennät. Lisäksi hän osallistui tulosten analysointiin. Järjestelmän painemittausanturi on piezo sensori, joka mittaa ympäristön painetta 1 kHz taajuudella. Tallennuslaitteisto kykenee taltioimaan kahdeksan anturin tietoja kerralla. Tiedot voidaan siirtää tekstitiedostona tietokoneelle, jossa tuloksia voi käsitellä ja analysoida. Kuvassa 35 on tiedontallennus- ja analysointilaitteisto sekä paineanturi.

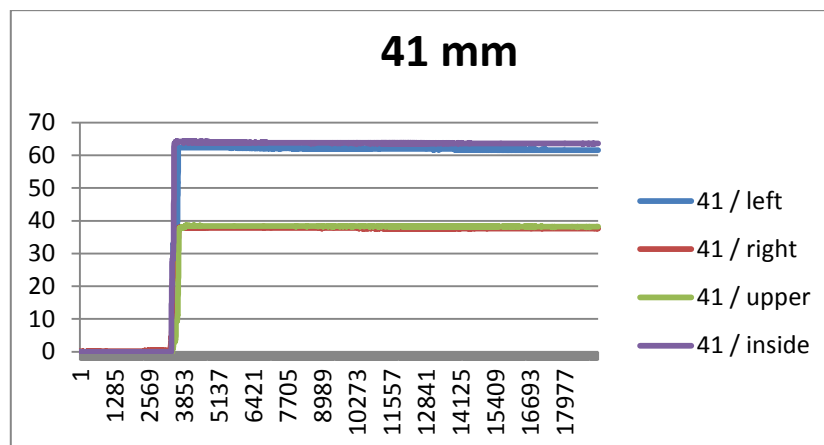


Kuva 35. Tiedon tallennus laite ja paineanturi (Tomi Kouvonen)

Tutkimuksessa mitattiin myös räjähdysten aiheuttamaa värinää ja räjähdysnopeutta. Räjähdysnopeusmittaukset tehtiin Microtrap VOD/DATA Recorderilla ja värinämittaukset INFRA V12/8560-1 kolmekomponenttivräinämittarilla. Näiden mittausten tarkoituksena oli toimia todisteena porausreiässä tapahtuvalle detonaatiolle ja nähdä, mikäli jokin reikä ei räjähtäisi kunnolla.

#### 5.4.2 Mittaustulokset ja niiden analysointi

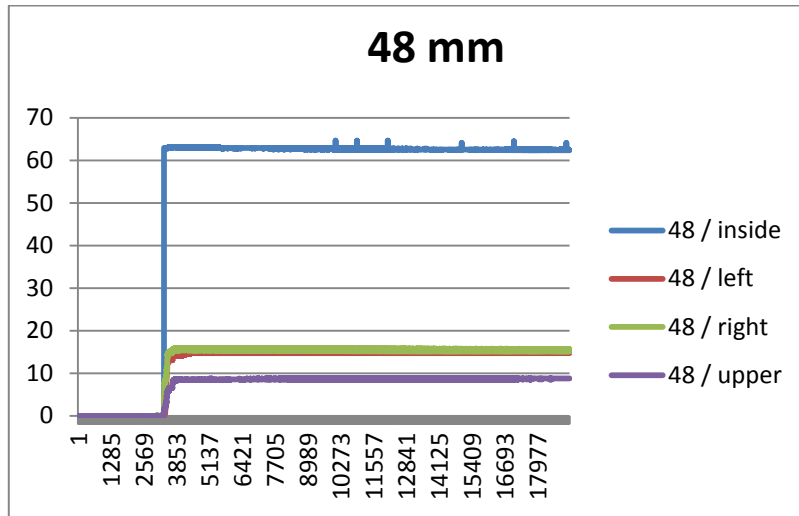
Sekä 41 mm että 48 mm porausreikiin kohdistui lähes yhtä suuri paine. 41 mm reiässä maksimi paine oli noin 65 MPa ja 48 mm reiässä 62 MPa. Eron pienuus johtuu mittausjärjestelyistä. Mittausreiässä räjähdysaine oli panostettu 39 mm muoviputkiin ja anturi laitettu putken päälle. Paineanturit ovat viisi millimetriä paksuja, jolloin mittausetäisyseroksi tulee kolme millimetriä. Kuvioista 9 näkee 41 mm porausreikään ja sen ympärillä oleviin antureihin syntyneet paineet.



Kuvio 9. 41 mm porausreikään ja ympäristöön aiheutunut paine (MPa)

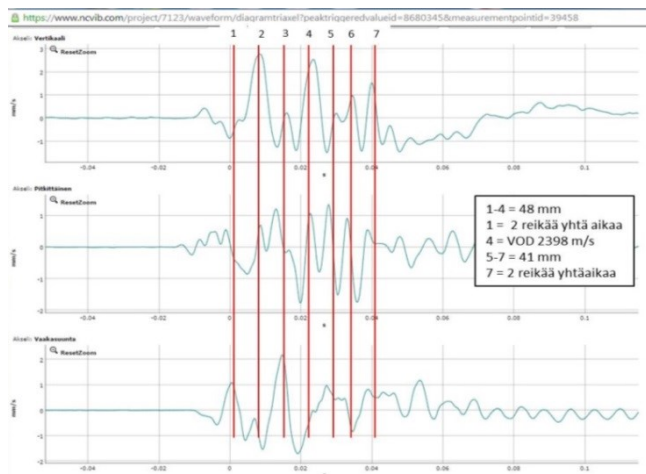
Käyristä näkee kuinka kahden, tarkasti, yhtä aikaa syttyvän reiän välillä paine on lähes yhtä suuri kuin räjähtävän reiän sisällä. Toisaalta kuvasta näkyy myös se, että kun reiät eivät syty yhtä aikaa on paine reikien puoli-

välissä pudonnut lähes 50 prosenttia ja on samalla tasolla kuin yksinäinen reikä tutkittavan kohteen yläpuolella.



Kuvio 10. 48 mm porausreikään ja ympäristöön aiheutunut paine (MPa)

Kuviosta 10 näkee 48 mm porausreikään ja sen ympärille syntyneet paineet. Tässä kuvassa ei näy sama johdonmukaisuus kuin kuviossa 9. Porausreiän sisällä oleva paine on mittausetäisyyseron pienuudesta johtuen järjestyksellisesti, mutta sekä oikealla että vasemmalla puolella olevat anturit antavat lähes saman paineen ja yläpuolinen anturi pienimmän paineen. Tärinämittaustuloksista on pääteltävissä, että ensimmäinen räjähdys ei ole detonoinut kunnolla. Siitä aiheutunut tärinä on selkeästi muita pienempi ja epämääräisempi. Ensimmäisenä piti räjähtää reikä, jossa anturi on sisällä ja sen oikeanpuoleinen reikä. Paineikäyrä osoittaa, että reikä jossa anturi oli, on räjähtänyt kunnolla. Tällöin on todennäköistä, että oikeanpuoleinen reikä ei ole räjähtänyt kunnolla. Tämän takia tilanne oikealla vastaa tilannetta reiässä olevan anturin vasemmalla puolella. Kuviossa 11 on testiräjäytyksen käyrä tärinämittaustuloksista. Käyrää tulkittaessa huomaa, että ainoastaan ensimmäisen piikin arvo on erittäin alhainen kaikissa mitattavissa heilahdusnopeuden suunnissa. Muiden piikkien osalta löytyy aina jostain mitattavasta suunnasta piikki, joka viittaa kunnolliseen detonaatioon.



Kuvio 11. Tärinämittaustulos (Tomi Kouvon)

48 mm reiän ympärillä olevien reikien paineet ovat selkeästi pienemmät kuin 41 mm reikien ympärillä, vaikka reiästä mitattu paine onkin lähes samaa luokkaa. Osa erosta johtunee kalliosta, joka ei ole homogeeninen väliaine ja paine etenee eri mineraaleissa eri tavoin. Lisäksi luonnolliset halkeamat vaikuttavat paineaallon etenemiseen. Osa johtuu pienemmästä CR luvusta, joka 48 mm reiässä olevalla 400 g/m K810 panoksella on. Paine ero ei näy reiän sisällä olevassa anturissa, koska mittauspisteiden ero oli reikien sisällä testissä vain kolme millimetriä. 48 mm reiässä paine joutuu leviämään suuremmalle alalle kuin 41 mm reiässä ja tämän takia paine tulee pienempänä seuraaville antureille reikien välissä.

Räjähdysnopeus saatiin mitattua luotettavasti vain yhdestä reiästä. Tulos tuli viimeisestä 48 mm reiästä ja oli 2389 m/s. Tärinämittaukset osoittavat, että muutkin reiät joista nopeutta mitattiin, ovat räjähtäneet oletettavasti hyvin lähelle samalla nopeudella, koska tärinäissä ei ole suuria heittoja. Mitattu tulos vastaa hyvin K810:n 400 g/m oletettavaa teoreettista detonaationopeutta 48 mm reiässä. Räjätysnopeusmittaus toteutettiin Microtrap kaapelimitauksella. Kaapeli oli reikien pohjilla ja emulsiorantujen kaarevan detonaatorintaman takia onnistunutta mittaustulosta ei saatu kuin yhdestä reiästä.

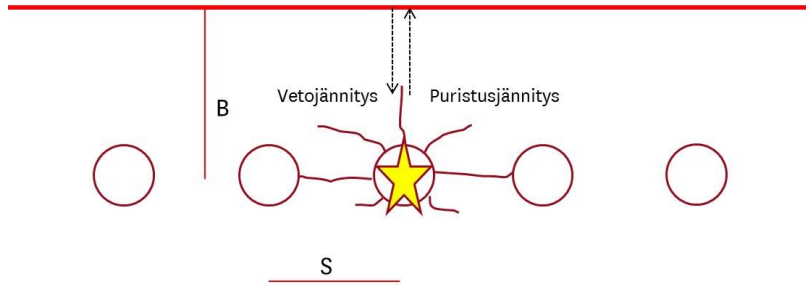
Kokeen tulosten pohjalta on nähtävissä, että tarkkaan määrättyllä syttymishetkellä on vaikutusta paineisiin reikien välillä. Koska reikien välillä ~50 % pienemmällä paineella saadaan rako leikkaantumaan, voidaan elektronisen nallin ja yhtäaikaisen syttymisen avulla hakea raon muodostumisen maksimi reikäväliä. Toisaalta, voi elektroninen nalli antaa anteeksi huonoa etu-reikäväli suhdetta. Pienelläkin syttymisaikaerolla nähtävissä oleva paineen lasku, voi näkyä lähietäisyydellä myös alentuneena tärinänä. Jos samalla pidetään syttymisjärjestys säännöllisenä, ei todennäköisesti louhintajälki huonone merkittävästi.

Tämä koe toteutettiin vain yhden kerran, mutta tulokset vaikuttavat johdonmukaisilta. Koe olisi hyvä toistaa useamman kerran, jolloin johtopäätökset olisivat luotettavampia. Koe olisi hyvä tehdä myös vedessä, jolloin väliaine johon räjähdys vaikuttaa, olisi homogeeninen. Paineikäyttäytymisestä saisi tällöin luotettavampaa tietoa.

Kokeen anturikohtaiset käyrät ovat liitteenä 3.

### 5.5 Porauskaavion ja sytytysjärjestyksen vaikutus rakoiluun

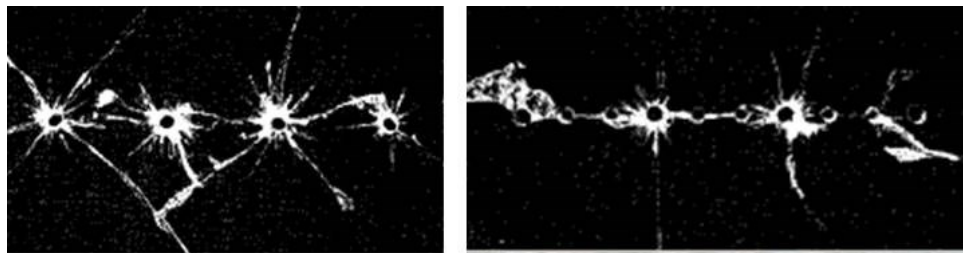
Reikävälin ja edun suhteella on vaikutusta rakojen muodostumiseen. Vuolio (2010) suosittelee edun (B) ja reikävälin (S) suhteeksi 0.8. Peränajossa kaarirei`illä tämä tarkoittaa sitä, että reikävälin ollessa 0.5 m tulisi edun olla 0.6 m. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että räjähdysyhteydessä raon pitää syntyä reikien välille ennen kuin vapaasta pinnasta heijastuva vetoaalto ja sen aiheuttama vetojännitys heijastuu takaisin. Tämä tarkoittaa myös sitä, että poraamalla reikien väliin apureikiä saadaan ehkäistyä lisärakojen muodostumista kallioon. (Vuolio & Halonen 2010, 262 – 263; Olsson 1999, 9.) Kuvassa 36 on havainnollistettu jännitystilojen muutoksia kalliossa.



Kuva 36. Jännitystilat ja rakojen syntyminen kallioon (Tomi Kouvonon)

Reikävälin ollessa liian suuri vetoaalto kerkeää heijastua takaisin ja tällöin jokainen reikä toimii yksittäisenä reikänä ja muodostaa homogeenisissa olosuhteissa rakoilua tasaisesti joka suuntaan. Koska kivilajit eivät ole koskaan täysin ehjiä ja homogeenisia, muodostuu rakoilu satunnaisesti heikoimman mineraalin muodostaman vyöhykkeen suuntaisesti tai lähimmän luontaisen raon suunnasta.

Kuvassa 37 on havainnollistettu apureikien vaikutusta leikkaavuuteen ja sitä kautta rakoiluvyöhykkeeseen. Kuvassa vasemmalla näkyy räjäytysjälki, kun vierekkäiset reiät syttyvät sattumanvaraisessa järjestyksessä ja oikealla sama tilanne, mutta reikien välille on porattu apureikiä. Kuvasta näkyy kuinka rakoilu reikien ympärillä vähenee merkittävästi.



Kuva 37. Tyhjiä apureikien merkitys rakoiluun. (Sandvik Mining & Construction)

Sytyttämällä reiät mahdollisimman yhtä aikaa saadaan leikkaavuutta reikien välillä tehostettua. Tällöin puristusaallot lähtevät rei'istä yhtä aikaa liikkeelle ja kohtaavat toisensa tai tyhjän reiän lähes yhtä aikaa. Tämän seurauksena vetoaallot ja niiden aiheuttama vetojäännitys kalliossa muodostavat raon reikien välille. Mikäli etu (B) ja reikäväli (S) ovat oikein määritetty, ei vapaasta tilasta heijastuva vetoaalto kerkeä takaisin ennen raon muodostumista reikien välille. Impulssiletkunalleissa oleva hajonta paloajoissa ei mahdollista tällaista yhtäaikaista syttymistä, mutta elektronisilla nalleilla se on saavutettavissa.

## 5.6 Louhinnan aiheuttaman rikkoutumisvyöhykkeen (EDZ) laskentamallit

Louhinnan aiheuttaman rakoilun eli rikkoutumisvyöhykkeen (EDZ) laskentaan on olemassa useita erilaisia laskentamalleja. C Sun (2013) on verrannut näitä eri malleja tutkimuksessaan Damagezone Prediction for Rock Blasting. Ruotsissa SveBeFo (Swedish Rock Engineering Research Organization) on tutkinut paljon rakoilua ja siksi toinen tässä verrattavista

laskentakaavoista on heidän kehittämänsä. Toinen laskentatapa on empiiristen kokeiden pohjalta määritetty laskentamalli. Mallin ovat kehittäneet S Esen, I Onederra ja H.A. Bilgin ja se julkaistiin vuonna 2003 International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences julkaisussa. Se on hieman yksinkertaisempi käyttää kuin SveBeFon malli, mutta ottaa hyvin huomioon kivilajien kyvyn kestää muodonmuutoksia.

Esen & ym. (2003) mukaan kallion rakoilun säde on porareian halkaisijan ja murskautumisvyöhykkeen (CZI) funktio. Jotta voidaan arvioida syntyvän rakoilun sädettä, pitää laskea ensin murskaantumisyöhykkeen indeksi (CZI).

$$CZI = \frac{P_h^3}{K \times \sigma_c^2} \quad (16)$$

CZI = murskautumisvyöhykkeen indeksi

$P_h$  = paine porausreiän seinämässä (Pa)

K = kiven kovuus

$\sigma_c$  = yksiakiaalinen puristuslujuus, UCS (Pa)

Murskautumisvyöhykkeen ja porareian halkaisijan avulla voidaan laskea odotettavissa oleva rikkoutumisvyöhykkeen säde. Rikkoutumisvyöhykkeen oletetaan Esenin & ym. (2003) mukaan olevan räjähdysaineen sekä räjäytettävän materiaalin ominaisuuksien ja porausreiän halkaisijan funktio.

$$r_c = 0.812 \times r_0 \times CZI^{0.29} \quad (17)$$

CZI = murskautumisvyöhykkeen indeksi

$r_c$  = odotettavissa oleva rikkoutumisvyöhykkeen säde (mm)

$r_0$  = porausreiän halkaisija (mm)

Esen & ym. (2003) tekivät lukuisia empiirisiä kokeita määrittäessään laskentatapaa. Taulukossa 22 on verrattu laskettuja arvoja todellisiin mittaustuloksiin.

Taulukko 22. Esen & ym. (2003) tutkimustuloksia eri räjähdysaineille

Räjähdysaine	Räjähdysaineen tiheys (kg/dm <sup>3</sup> )	VOD (m/s)	Porareian paine (GPa)	Mitattu rakoilu (m)	Ennustettu rakoilu (m)
ANFO	0.81	4077	2.929	0.67	0.48
Emulsio	1.2	5364	6.878	0.76	0.84
Emulsio	1.2	5364	6.878	0.83	0.84

Emulsioräjähteen osalta taulukon laskennalliset arvot vastaavat melko hyvin mitattuja arvoja. Esen & ym. (2003) käyttivät laskelmissaan teoreettisia räjäytysnopeuden sekä porausreiän seinämään kohdistuvan paineen arvoja. Laskennalliset arvot, erityisesti räjäytysnopeuden osalta, voivat heittää todellisissa olosuhteissa, joten se selittää pienet eroavaisuudet teorian ja käytännön välillä.

SveBeFon laskentamalli rikkoutumisvyöhykkeen määrittämiseksi on esitetty alla. Se on julkaistu Swebrec 2008:1 raportissa.

$$r_c = r_{c0} \times F_h \times F_t \times F_v \times F_b \quad (18)$$

$R_c$  = keskimääräinen odotettava rikkoontumisvyöhyke

$R_{c0}$  = korjaamaton rakopituus

$F_h$  = reikävälin korjaus kerroin

$F_t$  = syttymistarkkuuden korjaus kerroin

$F_v$  = veden vaikutuksen korjaus kerroin

$F_b$  = kallion ominaisuuksien korjaus kerroin

$F_h \times F_t$  on 2 käytettäessä impulssiletkusytytystä ja 1 kun käytetään sytytystä, jossa reikien syttymistarkkuus on vähintään 1ms, mikäli edun ja reikävälin suhde on alle 1.

Kuivassa reiässä vedenvaikutuksen voidaan olettaa olevan 1. Tässä tutkimuksessa ei veden vaikutusta tutkita, mutta vesireiässä kerroin on oletettavasti yli yhden, koska vesi tehostaa painevaikutuksia.

$R_{c0}$  voidaan laskea porausreiän seinämään kohdistuvan paineen ja rakojen muodostumisen kannalta kriittisen paineen avulla. Alla on esitetty korjaamattoman rakopituuden laskenta.

$$r_{c0} = r_0 \times \left( \frac{P_h}{P_{krit}} \right)^{1.525} \quad (19)$$

$r_0$  = porausreiän halkaisija (mm)

$P_h$  = porausreiän seinämään kohdistuva paine

$P_{krit}$  = rakojen muodostumisen kannalta kriittinen paine

Porausreiän seinämään kohdistuvan paineen määrittäminen on esitetty kappaleissa 5.2 - 5.3. Rakojen muodostumisen kannalta kriittinen paine lasketaan alla olevan kaavan mukaan.

$$P_{krit} = 10.8 \times \frac{K_{IC}}{(r_0)^{0.5}} \quad (20)$$

$K_{IC}$  = kiven lujuus rakojen muodostumista vastaan

$r_0$  = porausreiän halkaisija (mm)

$P_{krit}$  = rakojen muodostumisen kannalta kriittinen paine

Ouchterlonyn mukaan yllä esitetty SveBeFon laskenta malli soveltuu käytettäväksi, kun panostusaste on 0 - 0.6 kg/m dynamiitiksi muutettuna. Tämä vaihteluväli sopii tutkimuksessa käytettäville tuotteille. SveBeFon kaava on Esen & ym. (2003) kaavaan verrattuna huomattavasti monimutkaisempi ja kaavassa olevan  $K_{IC}$  arvon saaminen on haasteellista.  $K_{IC}$  arvo määritellään Chevron Bend vetolujuuden mukaan. Yleensä ISRM:n mukaisista kalliomekaanisista testeistä saadaan Brasilian testin mukainen vetolujuus.

Ouchterlony on laskenut Posivan työraportin 2010-27 liitteeksi SweBeFo:n mallin mukaisesti teoreettiset rakoiluarvot Posivan Onkalossa tyypillisesti esiintyvälle kivilajeille. Laskelma on erittäin perusteellinen ja tieteellinen, mutta sisältää hyvin paljon yksinkertaistuksia ja epätarkkoja arvoja. Rakoilun ennustaminen kivilajissa on käytännössä pakko tehdä keskimääräisillä kivilajien sekä räjähteiden ominaisuuksilla, koska olosuhteet vaikuttavat niihin suuresti ja esimerkiksi kivilajien kalliomekaaniset ominaisuudet vaihtelevat suuresti paikasta ja näytteenottosuunnasta riippuen. Teorialaskelmat voivat antaa keskimäärin oikean tuloksen, mutta eivät ole aukoton totuus. Koska laskenta-arvoina käytetään keskimääräisiä arvoja, on hyvä, jos itse laskelmakin on yksinkertainen ja tehdään helposti käyttöön saatavilla arvoilla. Näistä kahdesta verratusta menetelmästä Esen et al. (2003) laskentamalli on huomattavasti yksinkertaisempi. Taulukossa 23 on laskettuna Esenin menetelmällä tutkimuksen räjähteille teoreettinen EDZ -vyöhyke 48 mm reiässä kolmelle eri kivilajille. Porausreiän seinämään kohdistuvan paineiskun suuruutena on käytetty korjattua Olsonin ja Ouchterlonyn teoreettista painearvoa.

Alla olevan taulukon keskiarvorakoilu on liitteen kaksi eri kivilajien keskimääräinen rakoilu 48 mm reiässä. Liitteessä 4 on laajempi taulukko eri kivilajeille lasketuista EDZ -arvoista.

Taulukko 23. Tutkimuksen räjähteiden teoreettisia EDZ arvioita 48 mm porareissä (Tomi Kouvonen)

Räjähde	CR	P <sub>h</sub> (MPa)	EDZ <sub>grandioriitti</sub>	EDZ <sub>dioriitti</sub>	EDZ <sub>kuru grev</sub>	EDZ <sub>ka</sub>
17x500 F-pp	0,35	153	0,24	0,21	0,19	0,24
K810 350g/m	0,46	212	0,3	0,26	0,23	0,3
K810 400g/m	0,48	267	0,35	0,3	0,27	0,35
K810 500g/m	0,53	620	0,6	0,52	0,47	0,6

## 5.7 Rikkoutumisvyöhykkeen ja rakoilun tutkimusmenetelmät ja aikaisemmat tutkimukset

### 5.7.1 Maatutka menetelmä (GPR EDZ menetelmä)

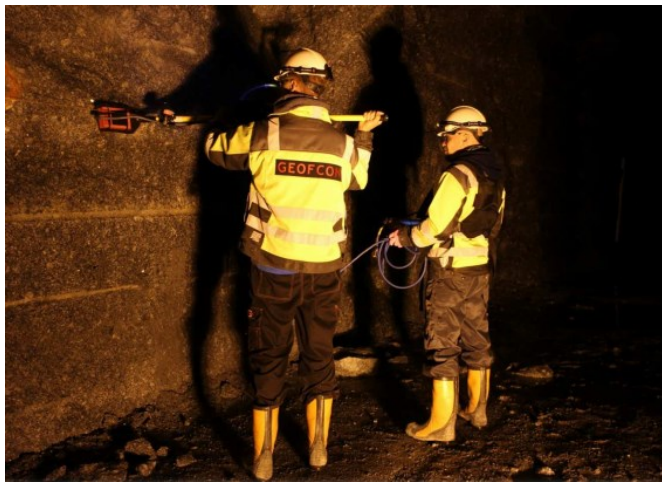
Maatutka (engl. Ground Penetrating Radar – GPR) koostuu maatutkayksiköstä ja maatutka-antennista tai näiden yhdistelmästä. Maatutkalla tarkoitetaan yleisesti laitteistoja, jotka on suunniteltu pintaa rikkomatta paikantamaan ja kartoittamaan pinnanalaisia kohteita ja rakenteita. Maatutkamenetelmä perustuu sähkömagneettisen aaltoliikkeen vuorovaikutukseen (läpäisy, heijastuminen, taipuminen ja sironta) väliaineessa. Vuorovaikutuksen kannalta olennaisia väliaineparametreja ovat sähköjohtavuus ja dielektrisyys. Yleisimmin maatutkalaitteistot hyödyntävät sähkömagneettisen aallon taajuuskaistaa 10 - 5000 MHz. Toiminnassa maatutkan lähettinantennin lähettämän signaalin kohdatessa väliaineen sähköisen rajapinnan tapahtuu heijastumista ja sirontaa muiden vuorovaikutusten ohella. Kun heijastunut signaali saavuttaa maatutkan vastaanotinantennin, voidaan muodostaa maatutkayksikön näytölle tutkakuva perustuen heijastuneen signaalin amplitudin ja kulkuajan mittaamiseen. (Kantia 2014, 4 – 6.)

GPR EDZ mittauksissa käytetään GSSI:n valmistamaa maastokelpoista SIR-3000 maatumakayksikköä ja 1600 MHz:n keskitaajuudella toimivaa mallin 5100B maavasteantennia. (Kantia 2014, 4 – 6.) Kuvassa 38 näkyy GPR EDZ tutkimuksissa käytetty maatumakalaitteisto.



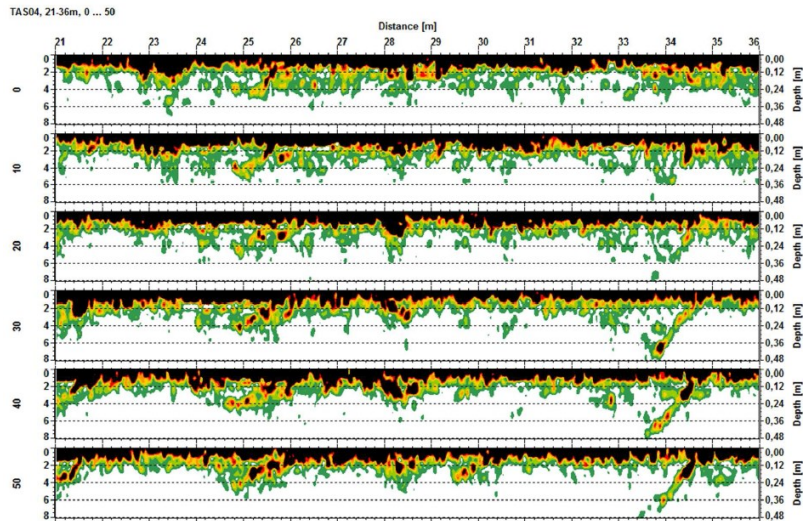
Kuva 38. SIR-300 maatumakalaitteisto (Geofcon)

Mittauksissa yksikön antenna siirretään ennakkoon suunnitelluilla mittauslinjoilla painettuna huolellisesti kallionpintaa vasten. Antennin hyvä kontakti väliaineeseen on oleellista aineiston korkean laadun takaamiseksi. Tämän lisäksi tutkittava kallionpinnan tulee olla puhdas irtoaineksista sekä ylimääräinen vesi tulee olla poistettu. Mittaus sidotaan linjapituuteen, joko pulssianturiin kiinnitetyllä lankamitalla tai mittapyörällä. Kuvassa 39 on käynnissä GPR EDZ mittaus Sandvik Mining & Constructionin testi-kaivoksessa syksyllä 2014.



Kuva 39. Mittaustyötä SIR-300 maatumakalaitteistolla (Geofcon)

GPR EDZ vasteen laskenta perustuu korkeataajuisen maatumaka-aineiston korkean taajuuskaistan amplitudispektrin analysointiin. Valitulta taajuuskaistalta lasketaan EDZ -indeksi, joka edustaa äärellisen tilavuuden vaurioastetta. (Kantia 2014, 4 – 8.) Kuviossa 12 on esimerkki EDZ profiilista.

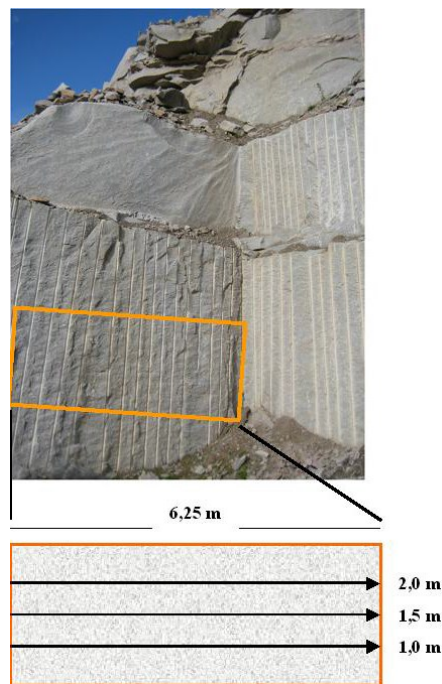


Kuvio 12. Esimerkkikuva EDZ profiilista (Kantia 2014c)

Maatutka-aineiston prosessointi suoritetaan Roadscanners Oy:n Road Doctor Pro ohjelmistolla ja GPR EDZ vasteen laskenta Roadscanner Oy:n RD Rock lisäsovelluksen avulla. (Kantia 2014, 4 – 8.)

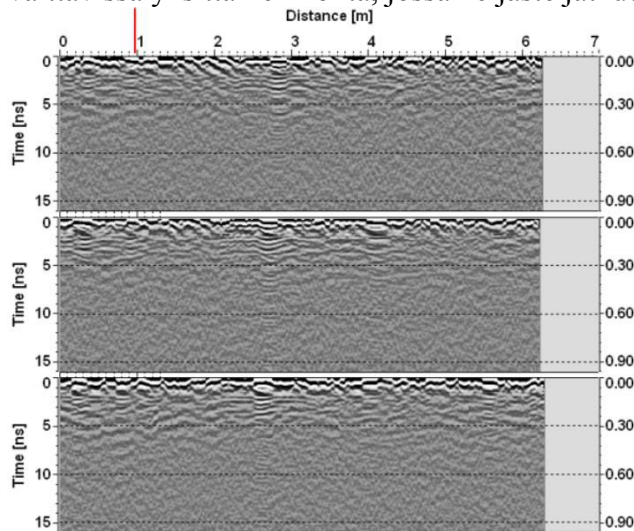
### 5.7.2 Aikaisemmat tutkimukset GPR EDZ laitteistolla

Roadscanners Oy teki vuonna 2008 maatutkamenetelmän kehitykseen liittyen EDZ tutkimuksia Kurun tarvekivilouhimolla. Tutkimuksessa mitattiin louhoksen seinämään jäävää louhintavauriota räjäytyksen jäljiltä. Kuvan 40 seinämästä mitattiin kolme linjaa keskeltä ja niiden pohjilta analysoitiin mahdollista louhintavauriota. (Heikkinen, Kantia, Lehtimäki, Silvast & Wiljanen 2010, 26 – 37.)



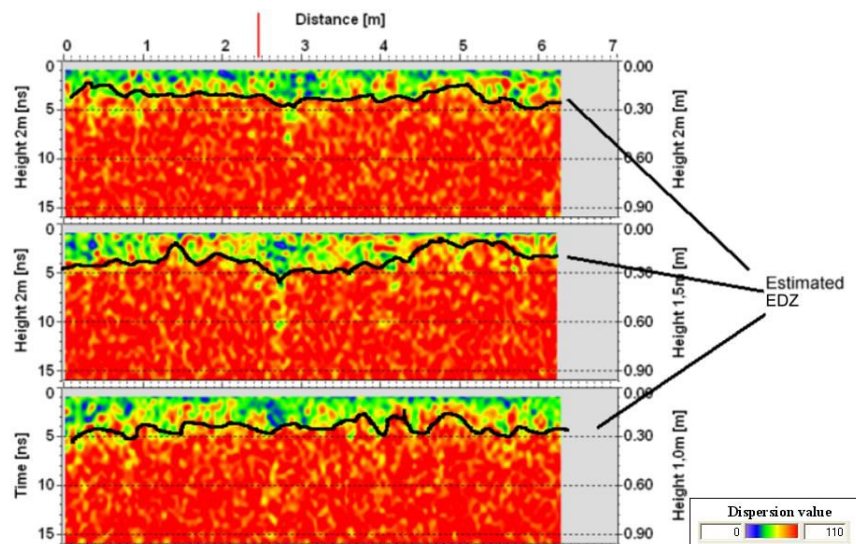
Kuva 40. Tutkimuskohde ja mittalinjat Kurun tarvekivilouhimolla 2008 . (Heikkinen & ym. 2010, 26 – 37.)

Kuviossa 13 mittatuloksissa näkyy heijasteita aina 30 cm syvyydelle asti. Keskiarvovaurioksi määritettiin 25 cm. Noin 2.8 metrin kohdalla on havaittavissa yksittäinen kohta, jossa heijaste jatkuu syvemmälle.



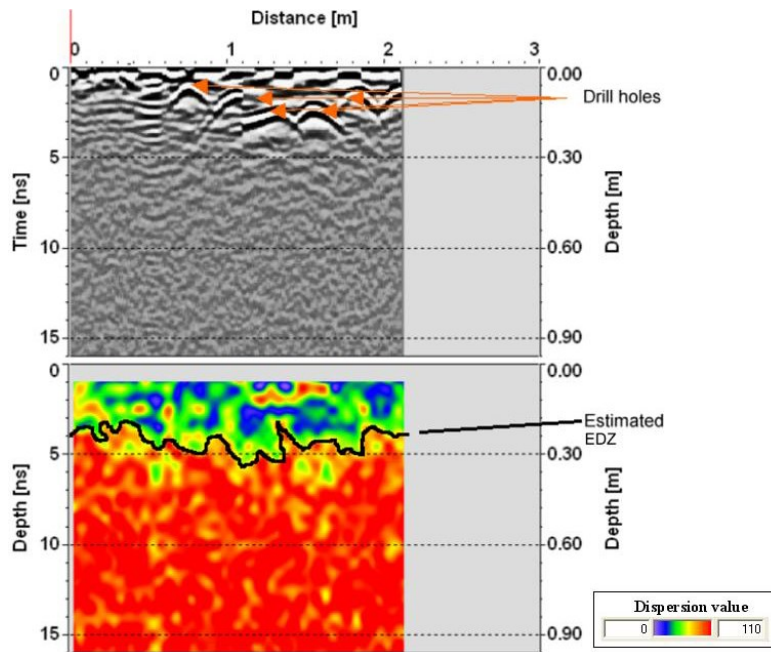
Kuvio 13. Maatutkalaitteiston mittakuva kohteesta. (Heikkinen & ym. 2010, 26 – 37.)

Kuvion 14 EDZ –vaste profiileissa (2008 käytössä ollut esitysmuoto) näkyy selkeämmin 2.8 metrin kohdalla oleva rako muuta louhintavaurio aluetta syvempänä. Rako voi olla luonnonrako tai kivessä oleva heikompi alue, jossa louhintavaurio on ulottunut syvemmälle. Koska kalliota ei ole analysoitu maatutkauksella ennen räjäytystä, on mahdotonta päätellä yksittäisen syvemmän raon alkuperää. (Heikkinen & ym. 2010, 26 – 37.)



Kuvio 14. Mittauksesta muodostettu EDZ profiili. (Heikkinen & ym. 2010, 26 – 37.)

Kuviossa 15 on epätäydellisen kiven irtoamisen myötä kallioon jäänyt kiveä porareiän puolikkaiden päälle. Maatutkaprofilissa näkyy porareiät heijastumina ja louhintavauriovaste on tässäkin kohteessa keskimäärin 25 cm.

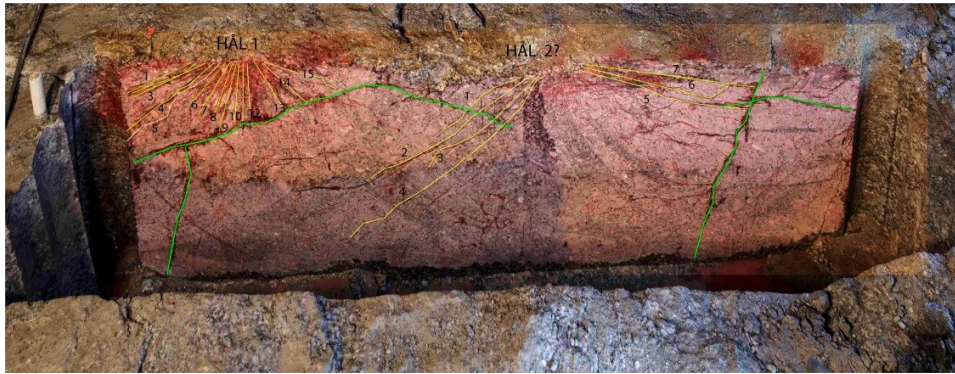


Kuvio 15. Louhintavaurio ja siitä muodostettu EDZ profiili. . (Heikkinen & ym. 2010, 26 – 37.)

Kyseisistä louhinnoista ei ole räjäytysuunnitelmia julkisesti saatavilla, joten tuloksia pitää analysoida pelkillä oletuksilla. Tyypillisesti tarvekilouhimoilla seinämiä louhitaan keveillä putkipanoksilla tai räjähtävillä tulilangoilla. Putkipanosten detonaationopeus on 1700 – 2200 m/s ja niissä on räjähdysainetta keskimäärin 200 g/m, lisäksi putkipanosten yhteydessä käytetään usein räjähdysainetta välittämiseen 10 g/m räjähtävää tulilankaa, joka voi tutkimusten mukaan suurentaa syntyvää rakoilua. Seinämää louhitaan samalla, kun edestä irrotetaan isoja lohkaraita tuotantoa varten, jolloin edun ja reikävälin suhde on erittäin suuri. Tyypillisesti louhinta tehdään tarvekilouhinnoissa 30 - 40 mm halkaisijalta oleviin reikiin. Laskettaessa Esen et al. (2003) laskentamallin mukaan 35 mm reiälle noin 2200 m/s räjähdysnopeudella syntyvä rakoilu, saadaan tulokseksi 0.21 metriä. Huono edun ja reikävälin suhde ja räjähtävântulilangan käyttö huomioiden vaikuttaa mitattu tulos 0.25 metriä luotettavalta rakoilulta.

### 5.7.3 Rakoilun tutkiminen tunkeumaliuksilla

Kaikkein luotettavin tieto rikkoutumisvyöhykkeestä voidaan saada sahaamalla räjäytetystä kohteesta näytepaloja ja tutkimalla rakoilua niistä porareikien ympäriltä tunkeumaliuksilla. Tätä menetelmää voidaan käyttää myös haluttaessa vahvistusta GPR EDZ menetelmälle. Tunkeumaliukset tuovat kalliassa olevat raot esille ja niitä on helppo mitata. Kuvassa 41 näkyy tunkeumaliuksilla esiin saatuja rakoja. Kuvaan on merkitty vihreällä räjäytyksen yhteydessä laajenneita luonnon rakoja ja keltaisella on merkitty porareikien puolikkaasta säteittäin lähtevät räjäytyksen aiheuttamat uudet raot.



Kuva 41. Tunkeumaliuksella esiin saatuja rakoja (Olsson 2014b)

### 5.7.4 Aikaisempia EDZ tutkimuksia emulsioräjähteille

Mats Olsson on tehnyt Ruotsissa lukuisia mittauksia eri räjähdysaineiden rakoiluvyöhykkeiden osalta. Vuonna 1998 hän teki tutkimuksen, jossa panostettiin Vångan graniittiin kahdeksan reikää emulsiolla (350 g/m) ja sytytettiin elektronisilla nalleilla yhtä aikaa. Tutkimus tehtiin halkaisijaltaan 48 mm ja pituudeltaan viisi metriä pitkissä vaakasuuntaisissa rei'issä. Tutkimuksen oletuksena oli, että rakoiluvyöhyke olisi yli 40 cm, mutta mittaukset osoittivatkin rakoilun olevan selvästi alle 30 cm.

Södra Länkenin tunneli projektissa työkohteessa SL03 Olsson vertasi 350 g/m emulsioräjähteen aiheuttamaa rakoilua 17 mm Gurit putkipanoksen rakoiluun. Gurit on NG-putkipanos ja sen VOD on ~2300 m/s ja energia sisältö on 3,4 MJ/kg, joten se on ominaisuuksiltaan verrattavissa F-putkipanokseen. Tutkimus tehtiin kymmenessä viisi metriä pitkässä katkossa 48 mm porausrei'issä. Tutkimus tehtiin sahaamalla seinämästä näytekappaleita ja mittaamalla niistä rakopituuksia tunkeumaliuksen avulla. Tutkimuksessa verrattiin myös impulssiletkusytytyksen ja elektronisten nallien eroa rakoiluvyöhykkeessä. Räjähdyksen yhteydessä seinämään näkyville jäävien porareian puolikkaiden määrässä oli merkittävä ero riippuen sytytystavasta. Elektronisilla nalleilla noin 70 - 75 % porareianpuolikkaista oli havaittavissa seinämästä, kun taas impulssiletkusytytyksessä vastaava luku oli noin 15 %. Rakoiluvyöhykkeessä oli havaittavissa myös merkittävää eroa. Elektronisella nallilla sytytetyissä osissa tunnelia Guritilla mitattiin noin 10 cm rakoiluvyöhykettä ja emulsiolla (350 g/m) noin 18 cm. Impulssiletkulla sytytetyissä osissa emulsion (350 g/m) rakoilu oli noin 30 cm luokkaa.

Vuonna 2006 Visa-Matti Myllymäen tekemässä diplomityössä emulsio- ja putkipanosten aiheuttama rikkoutumisvyöhyke tunnelilouhinnassa tutkittiin Kemiitti 810 350 g/m, 600 g/m ja 17 mm F-putkipanoksen EDZ vyöhykkeitä. Tutkimus toteutettiin YIT:n Vuoli-tunneli projektin aikana. Räjähdyksessä syntyvien rakoilujen tutkiminen toteutettiin sahaamalla louhitusta seinästä lohkoja irti ja tunkeumaliuksien avulla mitattiin rakopituuksia. Työssä tehtiin myös räjäytysnopeusmittauksia.

17 mm F-putkipanoksien VOD tulokset ja mitatut rakopituudet ovat luotettavan oloisia ja nopeus korreloi järkevästi rakopituuksia. Emulsiorantu-

jen VOD tulokset voivat pitää sisällään suuriakin virheitä. Epäideaalista detonaatiosta johtuva kaareva detonaatorintama ei mahdollista kaapelimittauksella luotettavaa räjähdysnopeusmittausta. Lisäksi panostustarkkuudesta ja emulsion tiheydestä räjäytyshetkellä ei ole kunnollista tietoa käytettävissä. 350 g/m emulsiorantujen mitatut rakopituudet vaikuttavat luotettavilta ja oikein mitatuilta. Taulukkoon 24 on koottu tutkimuksen keskeisimmät mitatut rakoiluvarvot ja verrattu niitä teoreettisiin arvoihin. Vuoli-tunnelissa sytytys oli tehty impulssiletkunalleilla ja reiät porattu 51 mm porakruunulla. Tutkimuskohde oli karkearakeista graniittia, mutta tarkempaa geologista kartoitusta kohteesta ei ole.

Taulukko 24. Visa-Matti Myllymäen diplomityön rakoilutulosten vertailu teoreettiseen laskentaan (Tomi Kouvonen)

Räjähdysaine	EDZ <sub>ka</sub> (m)	L <sub>max</sub> (m)	VOD (m/s)	P <sub>h</sub> (MPa)	EDZ <sub>teoriassa</sub>
17x500 F-pp	0,27	0,34	2518	176	0,28
350 g/m	0,23	0,25	1692	138	0,23

Taulukon 24 painearvot on laskettu korjatulla Ouchterlonyin mallilla. Taulukosta näkee, kuinka todelliset nopeudet ja korjattu paine antaa Esen & ym. (2003) mallilla totuudenmukaisen teoreettisen EDZ arvon.

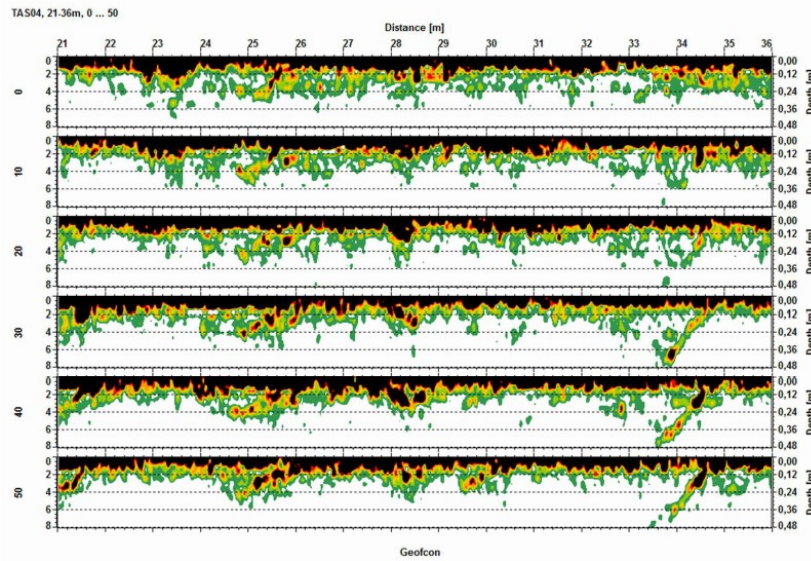
Äspolaboratoriet on Ruotsissa sijaitseva maanalainen tutkimuslaboratorio, jota SKB rakennuttaa. Louhintoihin liittyen on siellä tutkittu K810 emulsioräjähteen EDZ vyöhykkeitä. Louhittua tunnelia on mitattu GPR EDZ menetelmällä ja lisäksi sieltä on saatu näytteitä tunkeumaliuostutkimuksia varten. Tunkeumaliuostutkimukset on tehnyt Mats Olson EDZ Consulting yrityksestä. EDZ tutkimuksessa käytettiin SKB:lta saatujen panostussuunnitelmien mukaan taulukon 25 mukaisia panostusasteita ja sytytys tehtiin elektronisilla nalleilla. Porausreiät porattiin 48 mm porakruunulla. Tässä SKB:n tutkimuksessa oli poraukselle ja panostukselle asetettu erittäin suuret tarkkuusvaatimukset (+5 %).

Taulukko 25. Äspolaboratorietissa käytetyt panostusasteet

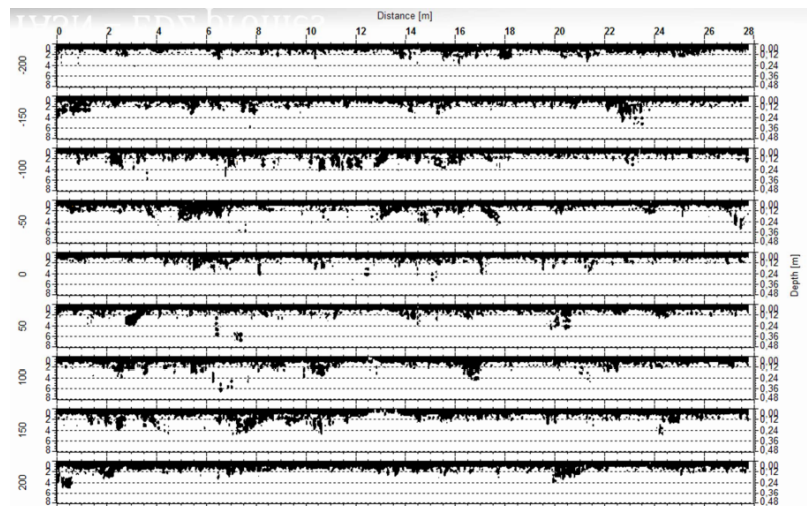
K810	SKB panostus	
	S/B	g/m
kaarireiät	0,5/0,6	350
apukaari	0,6/0,8	500
pohja	0,5/0,5	500
pohjan apulinja	0,5/0,5	500

GPR EDZ tutkimuksen on suorittanut Pekka Kantia Geofcon:lta. SKB ei ole julkaissut vielä lopullista tutkimusraporttia ja tähän tutkimukseen saatiin käytettäväksi lattian GPR EDZ kuvat. Pohjalla käytetty panostusaste on ollut 500 g/m K810 emulsioräjähdettä. Tutkimukset tehtiin TASN ja TAS04 tunneleissa. Pituussuuntaisten tutkalinjojen lisäksi tulos varmennettiin poikittaisilla mittalinjoilla.

Kuvista 16 - 17 löytyvät TASN ja TAS04 EDZ tutkimuskohteiden GPR EDZ tulokset lattian osalta.



Kuvio 16. TAS04 lattian EDZ profiili (Kantia 2014a)



Kuvio 17. TASN lattian EDZ profiili (Kantia 2014a)

Mats Olsson (2014) on tehnyt Äspolaboratorietin tunkeumaliuostutkimukset syksyllä 2014. Taulukossa 26 on tutkimuksen alustavat ja suuntaa antavat tulokset. Tulokset tulevat vielä tarkentumaan, mutta niistä näkee, että GPR EDZ mittaus ei anna ainakaan liian pieniä rikkoontumisvyöhykkeen arvoja.

Taulukko 26. Tunkeumaliuksella tutkitut rakopituudet (Olsson 2014a)

Kohde	EDZ <sub>ka</sub> (m)	L <sub>max</sub> (m)	L <sub>min</sub> (m)	Panos (g/m)	Reikä (mm)
seinä	0,11	0,24	0,03	K810 350g/m	48
seinä	0,8	0,17	0,02	K810 350g/m	48
seinä	0,8	0,25	0,01	K810 359g/m	48
lattia	0,05	0,6	0,04	K810 500g/m	48
lattia	0,11	0,20	0,03	K810 500g/m	48

TASN ja TAS04 EDZ tutkimuksien osalta keskimääräinen EDZ vaste GPR EDZ mittauksella on noin 0,2 metriä. SKB:n tutkimukseen ei ole liittynyt VOD mittauksia, joten teoreettinen tarkastelu pitää tehdä käyttäen K810 500 g/m panostusasteen keskimääräistä nopeutta 3500 m/s. Kivilaji tutkimusalueella oli Dioriittia ja sen keskimääräiset kalliomekaaniset ominaisuudet ovat liitteessä 2.

Taulukko 27. SKB:n EDZ tutkimustulosten vertailu teoreettiseen tulokseen (Tomi Kouvonon)

Räjähdysaine	EDZ <sub>ka</sub> (m)	P <sub>h</sub> (MPa)	EDZ <sub>teoriassa</sub>	Erotus %
500 g/m	0,21	494	0.52	-59%

Sekä GPR EDZ, että tunkeumaliuostutkimuksen tulokset on saatu käyttöön SKB:n luvalla. Ne ovat keskeneräisistä tutkimuksista, joiden tulokset julkaistaan lopullisesti vuoden 2015 aikana.

Esen et al. laskentamalli vaikuttaisi melko luotettavalta tavalla määrittää EDZ vyöhyke, mikäli käytössä on riittävän tarkat lähtöarvot. Laskenta ei huomioi edun ja reikävälin suhdetta, eikä sytytystapaa. Sytytystapaa varten kaavaan sopii näiden laskelmien pohjalta F<sub>t</sub> kerroin, joka on 1 käytettäessä pyroteknisiä sytytysvälineitä ja 0.4 - 0.6, kun käytetään elektronisia nalleja joiden tarkkuus on 0.01 - 0.02 %.

## 6 KENTTÄTUTKIMUKSET

### 6.1 Rakoilututkimukset Kurun kiven tarvekivilouhimolla

#### 6.1.1 Tutkimuskohteen geologia

Kurun harmaa on kaupallinen nimi Kurun tarvekivilouhimolla louhittaville graniittilohkoille. Kivi on massiivinen ja tasa- sekä hienorakeinen. Tampereen Kovakivi on teettänyt GTK:lla kivilajitutkimukset Kurun harmaalle vuonna 2007. Alle on lueteltu kiven mineraalikoostumus:

- Plagioklaasi 32.6 %
- Kvartsi 31.0 %
- Kalimaasälpä 30.8 %
- Biotiitti 3.5 %
- Muskoviitti 1.2 %
- Muut 0.9 %

Samoissa tutkimuksissa on teetetty kalliomekaaniset testit Kurun harmaalle. Niiden mukaan kiven keskimääräinen tiheys on 2660 kg/m<sup>3</sup>, kimmoduuli 52 GPa ja puristusmurtolujuus 300 MPa. Tähän tutkimukseen liittyen kairattiin kurun tarvekivilouhimolta näytepaloja sekä ehjästä, että räjäytetystä kivistä. Näytteet tutkittiin GTK:lla ja niiden tulokset vastasivat aiempia tutkimuksia. Lisäksi näytteistä määritettiin nyt mm. p-aallon nopeus (5564 m/s) ja huokoisuus (0,64 %). (Kantia 2014b, 18 – 24.) Kolme sydänkairanäytettä oli Oulussa Labrocin laboratorioissa ohuthietutkimuksessa. Myös nämä tulokset (Labroc 2014, 1-4.) tukevat jo määritettyjä ki-

vilajiominaisuuksia. Tarkemmin Kurun harmaan kalliomekaaniset ominaisuudet löytyvät liitteen 2 taulukosta. Taulukossa 28 on laskettuna tutkitun kivilajin ominaisuuksilla ja tutkimuksen räjähteillä odotettavissa oleva EDZ vyöhyke 41 mm reiässä. Räjähdyspaineen arvo on laskettu korjatulla kertoimella ja tiheydellä 0.8 kg/l, koska putkiin pumpatut emulsiot olivat valmistettu työmaalle tähän tiheyteen.

Taulukko 28. Kurun harmaan laskennallinen EDZ 41mm reiässä (Tomi Kouvonon)

Räjähde	CR-luku	Kiven kovuus (K)	P <sub>h</sub> (MPa)	EDZ
17x500 F-pp	0,41	54	200	0,19
K810 360g/m	0,61		325	0,26
K810 490 g/m	0,71		844	0,49

### 6.1.2 Panostusmenetelmät

Tutkimuksessa oli tarkoitus mitata räjäytetyistä lohkoista maatutkalla EDZ vyöhykettä ja arvioida tulosten pohjalta maatutkan soveltuvuutta laajempiin kokonaisten tunnelikatkojen mittaamiseen. Tutkimuksessa käytettiin Forcitin 17 x 500 F-putkipanosta, K810 360 g/m emulsiota ja K810 490 g/m emulsiota. Tutkimuspaikalta oli haasteellista saada panostettavaksi riittävän suuria lohkoita, jotka kestäisivät käytetyt panostusasteet. Tämän takia mittatuloksia saatiin vain F-putkipanoksen osalta ja vähäisissä määrin 360 g/m emulsion osalta.

Räjäytetyissä lohkoissa reiät oli porattu pystysuuntaan rivi muotoon. Kemiitti 810 emulsiopanokset oli pumpattu muoviputkiin ja ne panostettiin putkissa reikiin kuten F-putkipanoskin. F-putkipanoksissa oli jarrujouset, joilla ne keskitettiin reikien keskelle. Emulsiopanoksissa ei keskitystä tehty, koska pumpattaessa panostuslaitteella rantupanos muodostuu reiän pohjalle. Sytytykseen käytettiin Daveytronic järjestelmän elektronisiaanaleja. Kuvassa 42 näkyy panostettu lohko ja louhintajälki (Oy Forcit Ab).



Kuva 42. Panostettu lohko ja louhintajälki (Oy Forcit Ab)

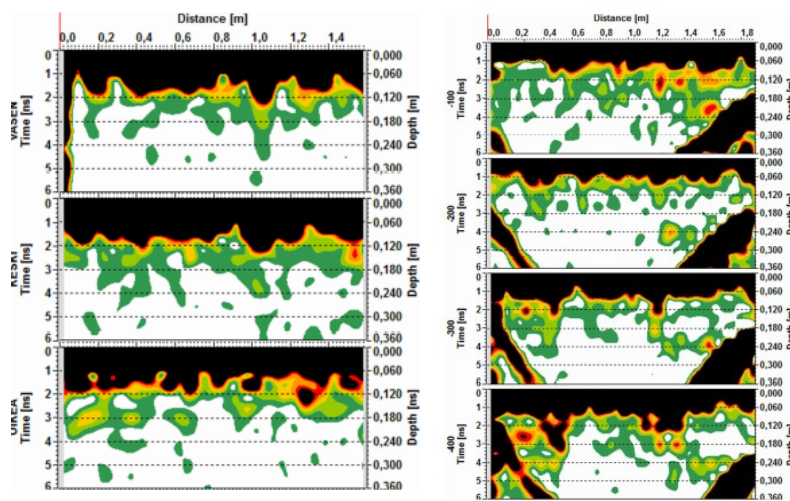
6.1.3 Rakoilun ja rikkoutumisvyöhykkeen tutkiminen räjäytetyistä kohteista ja johtopäätöksiä

Räjäytettävät kohteet tutkattiin maatumkalaitteistolla ennen porausta, porauksen jälkeen ja räjäytyksen jälkeen. Maatumkauksen teki Pekka Kantia Geofconilta. Maatumkatulosten pohjalta määritettiin kunkin räjäytyksen aiheuttama EDZ mitatulle kappaleelle. Kuvassa 43 näkyy maatumkamituslinjat ennen ja jälkeen räjäytyksen.



Kuva 43. Maatumkalinjoista esimerkit ennen ja jälkeen räjäytyksen (Kantia 2014b)

Kuviossa 18 näkyy tyypillinen GPR EDZ vaste sekä 17 x 500 F-putkipanoksen, että K810 360 g/m räjäytyksen jälkeen.



Kuvio 18. K810 360 g/m aiheuttamaa rakoilua kuvassa vasemmalla ja oikealla 17 x 500 F-putkipanoksen rakoilua (Kantia 2014b)

Taulukkoon 29 on koottu tutkimuksessa saadut keskimääräiset rakoilut ja laskettu rinnalle Esen & ym. (2003) kaavalla teoreettinen rakoilu. Tutkimuksessa käytettiin sytytykseen elektronisia nalleja. Teoreettisessa laskennassa on käytetty korjattua painearvoa. Tulosten valossa  $F_t$  kerroin 0,4 – 0,6 sopisi myös näihin tuloksiin.

Taulukko 29. Teoreettisen ja laskennallisen EDZ vyöhykkeen vertailu tutkituilla räjähteillä Kurun harmaassa (Tomi Kouvonen)

Räjähde	Kiven kovuus (K)	EDZ <sub>teoria</sub>	EDZ <sub>mitattu</sub>	Erotus (%)
17x500 F-pp	54	0,19	0,12	-37%
K810 360g/m		0,26	0,14	-46%
K810 490 g/m		0,49	-	

Tutkimuskohteesta kairattiin näytteitä sekä GTK:lle että Labrocille jatko-tutkimuksia varten. Kuvassa 40 näkyy kairauspaikat. Kairanäytteet on ni-metty seuraavasti:

1. kallion luonnollinen pinta
2. 17 x 500 F-putkipanoksella louhittu pinta
3. K810 360 g/m louhittu pinta

Kutakin näytetyyppiä kairattiin kolme kappaletta. Isompia kairattiin yhdet näytteet ja pienempiä kahdet. Pienemmät näytepalat toimitettiin GTK:lle ja isommat Labrocin tutkimuksiin. GTK teki näytteille petrofysiikan tut-kimuksia. Labroc teki näytepaloille ohuthietutkimuksen.



Kuva 44. Kairanäytteet jatkotutkimuksia varten (Kantia 2014b)

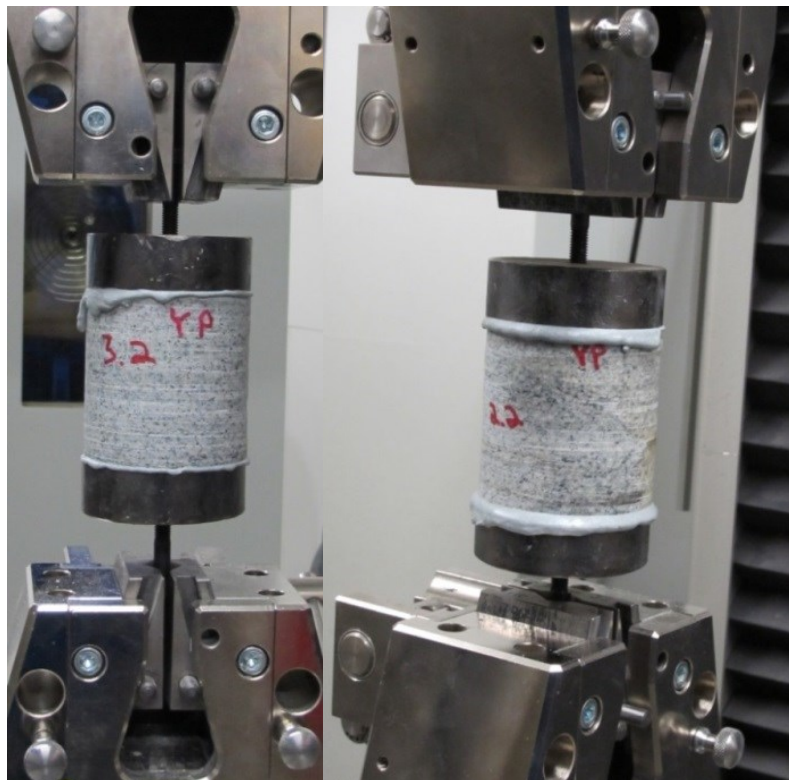
Petrofysiikan tulosten ja GPR EDZ tutkimuksen väliltä ei löytynyt yhtä merkittävää yhteistä tekijää. Huokoisuuden lisääntyminen rakoilun lisääntymisen myötä oli merkittävin yhtenäinen tekijä. Luonnon pinnalta otettujen näytteiden huokoisuuden keskiarvo oli 0,64 %, 17 x 500 F-putkipanoksen kohdalla 0,65 % ja K810 360 g/m kohdalla 0,67 %. Rakoi-

lun myötä huokoisuus siis lisääntyy kivessä. Ohuthietutkimuksessa todettiin molemmissa räjähdyksessä olleissa näytteissä olevan joidenkin kvartsikiteiden hajonnan pieniksi palasiksi, muuten ei havaittu merkittävää rakoilua tai kiven rakenteen sisäisiä muutoksia. Taulukossa 30 on GTK:n tutkimusten keskiarvot eri näytteille.

Taulukko 30. GTK:n näytetutkimuksen tulokset (Kantia 2014b)

SAMPLE	DENSITY	MAGNETIC SUSCEPTIBILITY	RESISTIVITY			POROSITY	P-WAVE VELOCITY
	D [kg/m <sup>3</sup> ]	K [10 <sup>-6</sup> SI]	R0.1 [ohmm]	R10 [ohmm]	R500 [ohmm]	Pe [%]	[m/s]
1.1 and 1.2	2630,8	2906,9	17680	17140	16370	0,64	5563,9
2.1 and 2.2	2628,1	1211,9	29530	28680	27660	0,65	5681,7
3.1 and 3.2	2630,1	2599,3	12133	11778	11400	0,67	5552,0

Ohuthietutkimuksen lisäksi 80 mm sydänkairanäytteillä (näytteet 1, 2 ja 3) tehtiin Hämeenlinnan ohutlevykeskuksella vetomurtolujuus kokeita staattisessa vedossa. Ne eivät olleet ISRM:n mukaisia standardikokeita. Ehjistä kalliosta kairatulle näytteelle tehtiin yksi vetokoe ja räjäytetyistä kohdista kairatuille näytteille tehtiin kullekin kolme vetokoetta. Sydänkairapalat olivat 30 cm pitkiä ja niistä sahattiin kustakin kolme näytteen halkaisijan (80 mm) paksuista näytettä vetoa varten. Kuvassa 45 näkyy vetokokeen järjestelyt.



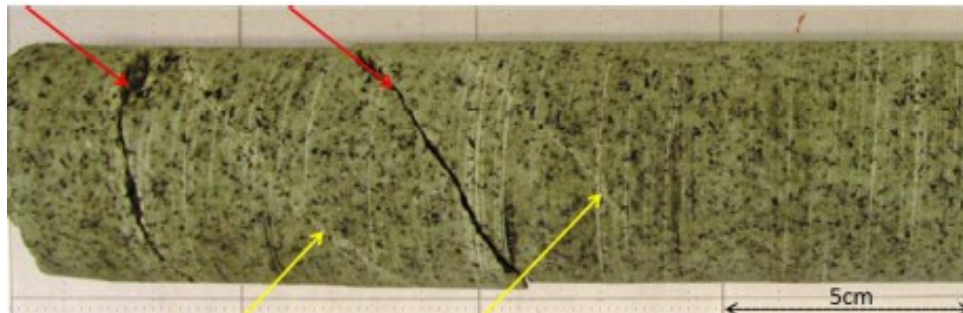
Kuva 45. Vetomurtolujuus kokeiden järjestely (Tomi Kouvonen)

Näytepalat on sahattu sydänkairapalan päistä ja keskeltä.

Alle on lueteltuna vetokokeiden tulokset.

- 1.1 7.16 MPa
- 2.1 7.33 MPa
- 2.2 8.7 MPa
- 2.3 8.56 MPa
- 3.1 0.69 MPa
- 3.2 8.08 MPa
- 3.3 8.43 MPa

Tuloksien mukaan F-putkipanoksella räjäytetyssä kohdassa ei räjäytys ole ensimmäisen näytepalan jälkeen heikentänyt vetomurtolujuutta. 360 g/m Kemiitillä räjäytetyssä kohdassa vetomurtolujuus on vielä toisessakin palassa alhaisempi. Testissä käy myös ilmi kuinka lujuusominaisuudet vaihtelevat samassa kivilajissa. Näyte yksi on ehjästä kalliosta ja siinä on huomattavan alhainen vetolujuus räjäytettyjen kohtien kolmansiin näytepaloihin verrattuna. Nämä suuntaa-antavat vetokokeet vahvistavat GPR EDZ mittaustuloksia. F-putkipanoksen rakoilu ulottuu 0,1 – 0,12 m louhintapinnasta ja K810 360 g/m ulottuu 0,12 – 0,16 m louhintapinnasta, ol- len voimakasta heti louhitun pinnan läheisyydessä. Kuvassa 46 on K810 360 g/m kairanäyte. Kuvassa punaisella on osoitettu voimakkaasti avautunutta rakoilua ja keltaisella on merkitty mikrorakoilua. Kuvan näytteen visuaalinen tarkastelu tukee GPR EDZ tuloksia. Kuvan näytteessä rakoilua ei ole havaittavissa yli 0,14 m.



Kuva 46. Räjäytyksen aiheuttamaa rakoilua kalliosta, avoimet raot on merkitty punaisella ja mikroroot keltaisella (Kantia 2014b).

## 6.2 Rikkoutumisvyöhyke (EDZ) tutkimukset Sandvik Mining & Constructionin testikaivoksessa

Forcit, Posiva, Sandvik, SKB ja Geofcon päättivät keväällä 2014 tehdä yhteisen EDZ tutkimushankkeen Sandvik Mining & Constructionin Tampereen tehtaan testikaivoksessa. Tutkimusta varten perustettiin työryhmä ja projektin vetäjäksi valittiin Geofconilta Pekka Kantia. Tutkimus nimettiin LOVA 2014 projektiksi ja siitä julkaistaan Posivan työraportti sarjassa oma erillinen tutkimusraportti vuoden 2015 aikana. Tässä työssä Forcitilla on oikeus hyödyntää kaikkea tutkimuksessa ilmi tullutta tietoa ja tätä tutkimusta hyödynnetään LOVA 2014 loppuraportin kirjoituksessa.

LOVA 2014 tutkimukseen liittyen Sandvikin testiluolassa louhittiin noin 24 metriä tunnelia, joista noin 19 metriä K810 pumpattavalla emulsioräjähteellä.

## 6.2.1 Tutkimuskohteen geologinen kartoitus

Pääkilvilajit Sandvikin testikaivoksessa ovat grandioriitti ja graniitti. Tiheys grandioriitilla vaihtelee 2640:stä 2690:een kg/m<sup>3</sup> ja graniitilla 2693:sta 2707:ään kg/m<sup>3</sup>. Alla on lueteltuna sekä graniitin, että grandioriitin mineraalikoostumukset.

Graniitti:

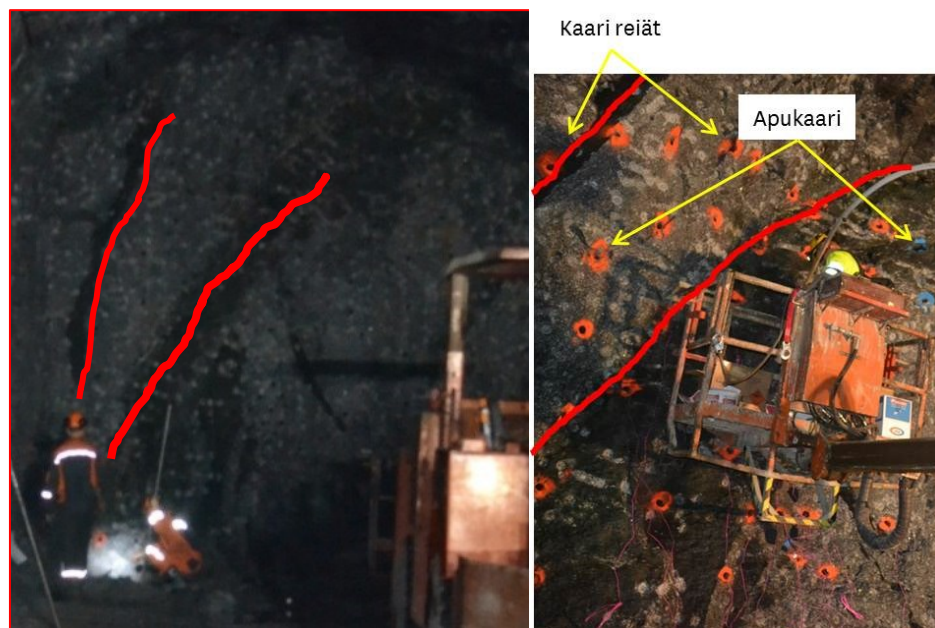
- Kiille 37 %
- Kvartsi 29 %
- Plagioklaasi 26 %
- Kalimaasälpä 8 %

Grandioriitti

- Kvartsi 34 %
- Plagioklaasi 32 %
- Kalimaasälpä 20 %
- Biotiitti 14 %

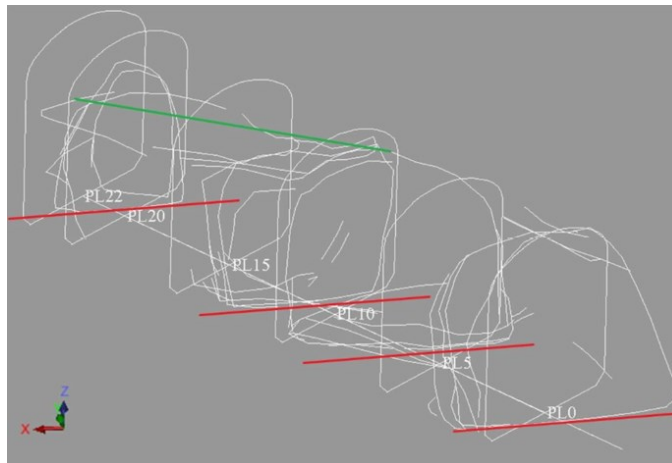
(Research report nr V-louh 64/87 1987; Test report: TKK-Kal14C2009, 2009 )

Tutkimuskohde sijaitsee luolastossa grandioriittialueella. Visuaalisen analyysin pohjalta tutkimuskohteen vasenta laitaa hallitsi muutama voimakas pystylusta. Lustat on merkitty punaisella kuvaan 47. Lustat asettivat haasteita louhintoja vasemmalla laidalla koko tutkimuksen ajan. Lisäksi louhintojen aikana huomattiin kalliosta olevan myös muutamia voimakkaita vaakalustia.



Kuva 47. LOVA 2014 testin lähtötilanne (Oy Forcit Ab)

Tunnelin geologinen kartoitus vahvistaa jo alkuun tehtyjä visuaalisia havaintoja. Lisäksi geologisessa kartoituksessa tuli esille katossa tunnelin suuntaisesti esiintyvä luonnon rako. Kuvassa 48 on tunnelin geologisessa kartoituksessa esille tulleet luonnon raot. (Kämäräinen 2014.)



Kuva 48. Kuvassa on vihreällä katossa esiintyvä luonnon rako ja punaisella oikeaa laattaa hallitsevat luonnon raot (Kämäräinen 2014).

Kalliomekaanisia- sekä petrofysikaalisia tutkimuksia varten kairattiin testitunnelista 22 halkaisijaltaan 48 mm:n kairanäytettä. Lisäksi tunkeumaliuostutkimuksia varten sahattiin kuusi lohkoa kalliosta. Näytteiden sijainti tunnelissa on liitteessä kuusi. Taulukossa 31 on esitetty näytteiden keskeisimmät kalliomekaniikan tulokset. Kalliomekaaniset tutkimukset teki Stress Measurement Company Oy (SMCOY) ja petrofysiikan tutkimukset GTK. Liitteessä seitsemän on petrofysiikan kokeiden tutkimustulokset.

Taulukko 31. Testikaivoksen kalliomekaaniset ominaisuudet (Hakala & Heine 2014).

Näyte	Kimmomoduuli (GPa)	Poissonin luku	Crack damage stress (MPa)	Puristusmurtolujuus (MPa)	Vetomurtolujuus (MPa)
5	78	0,42	74	153	10,3
20	62	0,26	118	150	8,7
22	65	0,25	119	163	11,1
16	69	0,35	79	150	8,1

Poissonin luvun ja Crack damage stress testin tulokset poikkeavat suuresti. Näytteet 5 ja 20 on kairattu hyvin läheltä toisiaan, silti tuloksissa on merkittävä ero. Lujuus ominaisuuksien voimakas vaihtelu viittaa siihen, että louhintajäljessä ja kallion rikkoontumisessa saattaa olla suuria eroja pieninkin alueen sisällä. P-aallon nopeus vaihteli tutkittavissa näytteissä 5500 – 6250 m/s, sekin viittaa siihen, että kallion rikkoontumisessa voi olla paikoittain suuria eroja.

Sivun 54 taulukossa 23 on kivilajitietojen pohjalta laskettu odotettavat teoreettiset rakoiluvyöhykkeet tutkimuksessa käytettäville emulsiorannuille 48 mm porareikään.

## 6.2.2 Testikatkojen poraus

Testikatkojen porauksen toteutti Sandvik Mining & Constuction. Porauskaavio tehtiin ISure ohjelmalla ja poraus tehtiin pääosin automaattiporauksena. Poraussuunnittelu pohjautui usein reiän pohjan sijaintiin, mutta peräpanostuksessa yhtä tärkeää on myös reikien aloituspaikkojen keskinäinen sijainti. Porausreikäkokona käytettiin pääosin 48 mm kruunua. Kat-



sen Oy Forcit Ab. Pumpattavalla emulsiolla panostettujen katkojen panostamiseen käytettiin ECM panostuslaitteistoa, joka oli tarkastettu ja kalibroitu Forcitin Vihtavuoren tehtaalla ennen projektin aloittamista. Louhintojen tavoitteena oli selvittää K810 emulsioräjähteen rakoiluvyöhykkeitä seuraavilla panostusasteilla:

- 350 g/m
- 400 g/m
- 500 g/m

Lisäksi tavoitteena oli selvittää elektronisen nallin ja impulssiletkunallin vaikutuksia syntyvään rakoiluvyöhykkeeseen sekä pienemmän reikäkoon vaikutusta ohuiden emulsiorantujen palamisvarmuuteen.

Ensimmäisen katkon poraus, panostus ja sytytys toteutettiin SKB:n Ruotsissa vastaavassa tutkimuksessa käyttämän panostuskaavion mukaisesti. Kaikkien louhittujen katkojen räjäytyssuunnitelmat ovat liitteenä 5. Ensimmäisen katkon pituus oli 4,0 m ja muiden 5,0 m. Ensimmäisessä ja neljännessä katkossa toinen puoli kaaresta ja lattiasta (apulinja ml.) sytytettiin impulssiletkunalleilla. Muuten sytytyksessä käytettiin elektronisia nalleja, joiden syttymistarkkuus oli +/- 0,02 % ohjelmoidusta ajasta. Toisessa ja kolmannessa katkossa käytettiin toisella puolella kaarta ja lattiaa 41 mm reikää, kun muuten louhinta tehtiin käyttäen 48 mm reikää.

Taulukkoon 32 on koottuna eri katkoissa käytetyt reikävälit (S) ja edut (B) sekä panostusasteet (g/m) kaarireikien, pohjan sekä apulinjojen osalta.

Taulukko 32. Tutkimuksessa käytetyt edut, reikävälit ja panostusasteet (Tomi Kouvonnen)

	Katko 1 ja 2		Katko 3 ja 4	
	S/B	g/m	S/B	g/m
kaarireiät	0,5/0,6	350	0,4/0,6	400
apukaari	0,6/0,8	500	0,6/0,8	500
pohja	0,5/0,5	500	0,4/0,5	500
pohjan apulinja	0,5/0,5	500	0,6/0,5	700

Panostustarkkuutta seurattiin keräämällä ECM laitteistolta panostusdata muistiin ja vertaamalla teoreettista kokonaiskulutusta toteutuneeseen kuluutukseen. Taulukossa 33 on panostuslaitteistolta kerätyn tiedon pohjalta laskettu panostustarkkuus.

Taulukko 33. Panostustarkkuus (Tomi Kouvonnen)

Tavoite g/m	Reikien lkm	Saavutettu g/m	Virhemarginaali %
350	54	360	+3%
400	69	400	+0%
500	131	520	+4%
700	10	730	+4%
1200	27	1210	+1%
1800	48	1790	-1%
Kokonaispanostus	Teoriassa	Käytännössä	Virhemarginaali %
YHT	1342,8 kg	137,42 kg	+ 2,73%

Taulukko ei ole täysin luotettava, koska käytössä ei ollut tarkkoja reikäpituuksia. Jotta saatiin varmuus riittävästä panostustarkkuudesta (+5 %), panostettiin rantuja yksittäisiin 39 mm muoviputkiin ja punnittiin metrin

mittaisia kappaleita. Taulukossa 34 on punnitustulokset ja kuvassa 51 on punnitseminen nähtävillä. Matriisin lämpötila vaihteli panostus hetkillä 13 - 17 C° ja räjähdysaineen lopputiheys saavutettiin keskimäärin 1,5 h kohdalla ollen 1,1 kg/l.

Taulukko 34. Laadunvalvontapunnitukset (Tomi Kouvonon)

Panostusaste	350 g/m	400 g/m	500 g/m
punnitus 1	342	411	504
punnitus 2	358	420	486
punnitus 3		388	507
punnitus 4		393	466
keskiarvo	350	403	490.75
virhemarginaali	<b>0,00 %</b>	<b>0,75 %</b>	<b>-1,85 %</b>



Kuva 51. Laadunvarmistus punnitukset (Oy Forcit Ab)

Kuvassa 52 näkyy 350 g/m emulsiorantu panostettuna porausreikään. Kuvasta näkee kuinka rantu muodostuu siististi ja tasaisesti reiän sisälle, kun panostus tehdään huolella ja luotetaan panostuslaitteiston automatiikkaan.



Kuva 52. 350 g/m K810 emulsiorantu porausreiässä (Oy Forcit Ab)

### 6.2.4 Räjätysten aiheuttaman rikkoutumisvyöhykkeen tutkiminen ja tutkimustulokset

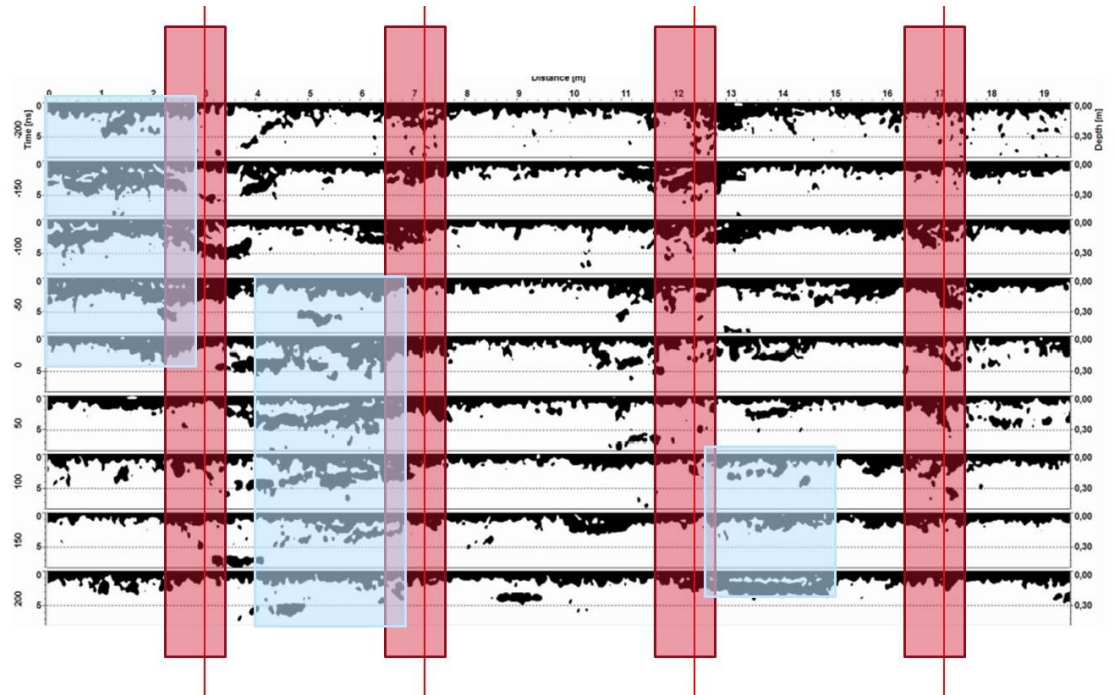
EDZ vyöhykkeet tutkittiin tunnelista maatulka-avusteisella GPR EDZ menetelmällä, lisäksi tuloksen varmentamiseksi sahattiin neljä lohkoa K810:llä louhitulta alueelta. Näistä lohkoista rakojen muodostuminen tut-

kittiin tunkeumaliuksilla. Mats Olson EDZ consulting yrityksestä teki tunkeumaliuostutkimuksen. Taulukkoon 35 on koottuna Olssonin mittaus-  
tulokset.

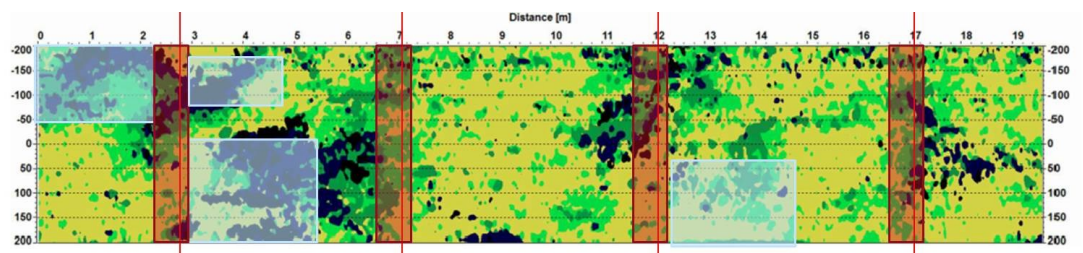
Taulukko 35. Tunkeumaliuksella tutkitut rakopituudet (Olsson 2014b)

Kohde	EDZ <sub>ka</sub> (m)	L <sub>max</sub> (m)	L <sub>min</sub> (m)	Lohko/ katko	panos	Reikä (mm)
lattia	0,26	0,36	0,15	3 /4	K810 500g/m	48
seinä	0,15	0,29	0,05	4/4	K810 400g/m	48
lattia	0,11	0,17	0,08	1 /1	K810 500g/m	48
seinä	0,14	0,23	0,07	2 /3	K810 400g/m	41

GPR EDZ tutkimuksen suoritti Geofcon. Mittaussuunnitelma on liitteessä 6. Mittaukset tehtiin GSSI:n Sir-3000 GPR laitteella, käyttäen 1.6 GHz maavasteantennia. Kuvioissa 20 - 24 on esitetty GPR EDZ mittauksen tuloksia. Mittaussuunnitelman mukaiset ristimittaukset vahvistivat alla olevat mittaustulokset luotettaviksi.

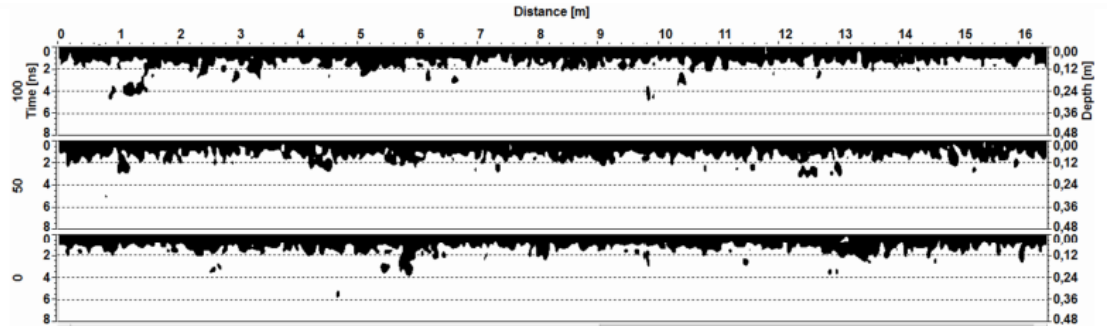


Kuvio 19. Lattian GPR EDZ tulokset (Tomi Kouvonon; Kantia 2014c)

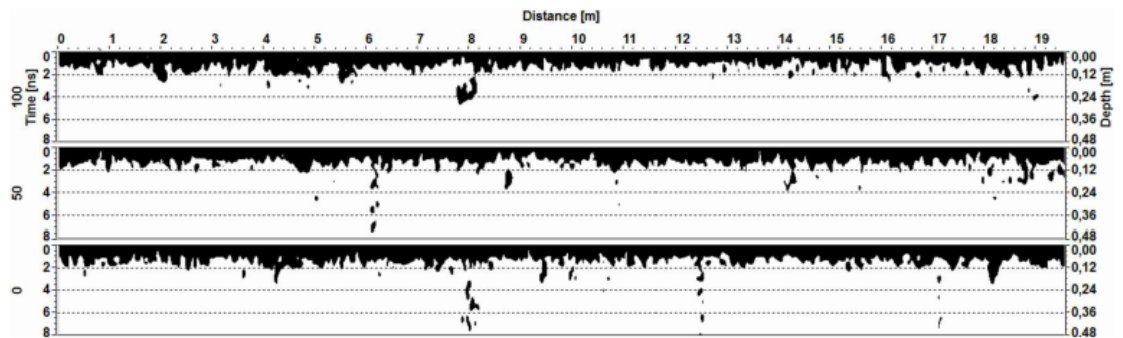


Kuvio 20. Tarkempi GPR EDZ analyysi lattiasta (Tomi Kouvonon; Kantia 2014c)

Kuvissa 20 ja 21 on punaisella viivalla merkitty katkojen yhtymäkohdat ja läpinäkyvällä punaisella pohjapanoksen vaikutusalue. Läpikuultavalla sinisellä on merkitty alueet, joissa irtoavuuden kanssa oli haasteita ja niissä on louhittu pohjaa kahteen kertaan. Alueilla, joissa louhinta on onnistunut suunnitellusti, on EDZ pääsääntöisesti alle 30 cm. Kuvan 21 tarkemmassa GPR EDZ profilissa mustalla on alueet joissa kallio on vaurioitunut noin 30 cm syvyyteen, vihertävät sävyt ovat alueita joissa rakoilua on selvästi alle 30 cm.

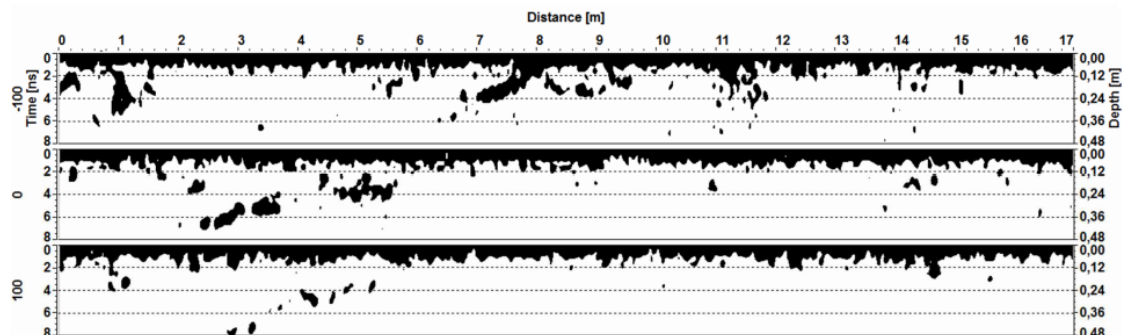


Kuvio 21. Vasemman seinän EDZ profiili (Kantia 2014c)



Kuvio 22. Oikean seinän EDZ profiili (Kantia 2014c)

Seinien EDZ on hyvin tasaista ja vaste on matalampi kuin lattiassa. Kuvissa 22 - 23 näkyy vain muutamia paikkoja, joissa rakoilu on tunkeutunut vallitsevaa EDZ vyöhykettä syvemmälle. Kuvista ei ole selkeästi erotettavissa alueita joissa on louhittu kahdesti tai reikäkokoa on vaihdettu. Panostusasteen muuttuminen kahden katkon jälkeen on kuvista löydettävissä, mutta ero on keskimäärin vain muutama sentti.



Kuvio 23. Katon EDZ Profiili (Kantia 2014c)

Katon EDZ noudattelee pääosin seinien EDZ vastetta, mutta paikka paikoin on alueita, joissa rakoilua on havaittavissa erityisen syvällä. Poraus-tarkkuus oli katossa monin paikoin erittäin huonoa ja se selittää suuret EDZ arvot. Lisäksi katossa olevat voimakkaat luonnon raot selittävät ajoit-taista syvälle syöksyvää kapeaa vaurioaluetta.

Kaikissa EDZ käyrissä esiintyy yllättäviä EDZ piikkejä. Huonon poraus-tarkkuuden lisäksi geologialla on oma vaikutuksensa asiaan. Kalliomekaa-nisissa tutkimuksissa esille tulleet suuretkin erot muodonmuutoslujuudessa ja crack damage stress testissä kertovat kalliiossa olevista heikkousalueista. Tunnelin geologisessa kartoituksessa tuli esille myös luonnonraot, joita havaittiin jo panostamisen aikana.

#### 6.2.5 Johtopäätökset Sandvikin testikaivoksen louhinnoista

Taulukossa 36 on verrattu testikaivoksen grandioriitin teoreettista rakoilua mitattuihin tuloksiin. Teoreettinen rakoilu on laskettu vain 48 mm reikään ja paineena on käytetty korjattua painetta. Liitteen 5 teoreettisista arvoista nähdään, että 41 mm - 51 mm rei'issä ei rakoilulla ole suurta eroa. Tämän tutkimuksen GPR EDZ tutkimus vahvistaa laskelmia. Mittauksista ei ole selkeästi nähtävillä reikäkoon vaikutusta rakoiluun.

Taulukko 36. Mitattujen tulosten vertailu teoriaan (Tomi Kouvonon)

Räjähde	CR	P <sub>h</sub> (MPa)	EDZ <sub>teoria</sub>	EDZ <sub>liuos</sub>	EDZ <sub>GPR EDZ</sub>	Tarkkuus %
K810 350g/m	0,46	212	0,3		0,12	-60 %
K810 400g/m	0,48	267	0,35	0,15	0,14	-58 %
K810 500g/m	0,53	620	0,6	0,12	0,28	-53 %

Taulukon 36 tuloksissa F<sub>t</sub> kerroin 0,4 – 0,6 toimii hyvin elektronisen nallin kertoimena. Panostusasteen kasvaessa syttymistarkkuuden suhteellinen vaikutus pienenee hieman. Samalla reikäkoon vaikutus tulee selkeämmin esille. Liitteen 4 rakoiluarvot ovat K810 500 g/m:lle 41 mm ja 51 mm vä-lillä +-10 % tarkkuudella samat, kun taas esimerkiksi F-putkipanoksen osalta laskennassa ei ole merkitsevää eroa.

Mittaustuloksista näkyy selkeästi pohjapanoksen vaikutus syntyvään ra-koiluun. Pohjapanoksen kohdalla rakoilu on merkittävästi suurempaa kuin muualla. Myös kohdissa, joissa on jouduttu räjäyttämään uudestaan, rakoilu on suurempaa kuin kerralla onnistuneessa kohdassa.

Ensimmäisen katkon lattian poikkeuksellisen pieni rakoilu liuosnäytteessä johtuu geologisista tekijöistä. Ensimmäisen katkon pohjalla on ollut voi-makas vaakalusta, jota pitkin räjähdysvoima on edennyt. Sahatun näytteen kohdalla räjähdysvoima on paennut lustaa pitkin. GPR EDZ vaste on myös tällä kohdalla poikkeuksellisen matala.

Kuvissa 53 – 55 on havainnollistettu poraustarkkuuden merkitystä louhin-täjäljelle. Kuvassa 53 näkyy onnistunutta seinämää, jossa reiät on porattu suoraan. Kuvissa 54 – 55 näkyy kuinka reikien keskinäiset etäisyydet voi-vat heitellä paljonkin suunnitellusta.



Kuva 53. Hyvän poraustarkkuuden jäljiltä siistiä seinämää



Kuva 54. Huono poraustarkkuus (Oy Forcit Ab)



Kuva 55. Huono poraustarkkuus (Oy Forcit Ab)

Seinämien tasainen ja pieni rikkoontuminen johtuu panostusasteen pienen lisäksi sekä emulsiorannun sijainnista porareissä että etu reikäväli suhteesta. Emulsiorantu on reiän pohjalla, joten lattian osalta se on kosketuksissa suoraan lopulliseen louhintapintaan, kun taas seinämien osalta ohut rantu ei ole kosketuksissa lopulliseen pintaan. Lattialinja räjäytetään tyypillisesti viimeisenä tunnelilouhinnassa. Tässä vaiheessa kivet muualta ovat jo pohjan päällä. Vaikka kivi on irronnutta, painaa se paljon ja suuntaa räjähdyspaineita myös alaspäin toisin kuin seinillä tai katossa, josta kivet putoavat vapaasti.

## 7 YHTEENVETO

EDZ (Excavation Damage Zone) eli louhinnan aiheuttama rikkoontumisvyöhyke syntyy kalliopintaan louhinnan vaikutuksesta. Louhittaessa kalliota poraus-räjäytys -menetelmällä porausreiässä syntyvä räjähdyspaine rikkoo kalliopintaa aiheuttaen rakoilua. Räjähdysaineella aiheutettu rakoilu on riippuvainen räjähdysten aiheuttamasta paineesta, geologiasta, syttymisaikojen tarkkuudesta, poraustarkkuudesta ja edun sekä reikävälin suhteesta. Rakoilua aiheutuu louhittuun kalliopintaan myös murrosdeformaatiosta. Normaalisti murrosdeformaation aiheuttaman rakoilun synty kestää vuosituhansia. Louhitun kalliotilan jännitystilat muuttuvat poistetun kiven vuoksi ja kalliossa pääsee tapahtumaan liikehdintää, mikä synnyttää rakoja. Tämä kallion liike ei tapahdu aina heti räjähdysten yhteydessä, mutta tapahtuu nopeammin kuin luontainen murrosdeformaatio. Louhittaessa pysyviä kalliotiloja, kuten ydinjätteen loppusijoituspaikat, on arvioitava räjähdysaineilla aiheutetun rakoilun lisäksi myös ajan kanssa tapahtuvan liikkeen aiheuttamaa rakoilua.

Geologiasta rakoilun syntymiseen vaikuttavat olemassa olevat raot sekä räjäytettävän kivilajin kyky kestää muodonmuutoksia. Luonnonraot pääsevät laajenemaan ja avautumaan räjähdyksessä kuumuudessa laajenevien kaasujen voimasta. Kivilajin muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavat mineraalikoostumus ja kiderakenteet.

Porausreiän seinämään vaikuttava voima eli räjähdyspaine on riippuvainen käytetyn räjähdysaineen tiheydestä ja räjähdysnopeudesta sekä porareian täyttöasteesta. Hyvin suunnitellussa tarkkuuslouhinnassa paineisku on pienempi kuin räjäytettävän kiven puristusmurtolujuus. Painealto etenee kivessä, kunnes kohtaa vapaita pintoja ja heijastuu niistä vetona takaisin. Kivilajien vetomurtolujuus on noin 10 % puristusmurtolujuudesta ja vedossa se ylittyy. Tällöin kiveen syntyy rakoja. Reikävälin ja edun suhteen tulee olla alle 1. Tällöin raot muodostuvat ensin tarkkuuslouhintalinjalle.

Räjähdysaineilla aiheutettua rakoilua voidaan mallintaa teoreettisesti. Siinä on huomioitava, että kivilajien kalliomekaaniset lujuusominaisuudet voivat vaihdella paljon näytteenotto paikasta ja suunnasta riippuen. Teoreettinen arviointi on riippuvainen myös käytettyjen laskenta-arvojen luotettavuudesta. Laskelmissa on huomioitava, että todellinen räjähdysnopeus saattaa vaihdella merkittävästi pumpattavilla emulsioilla, mikäli tiheys vaihtelee. Alla on esitetty tämän tutkimuksen tulosten pohjalta kaava, jolla voidaan arvioida syntyvää rakoilua alle 0.6 kg/m panostusasteella tutkimuksen räjähteille. Kaavat antavat luotettavan arvion syntyvästä rakoilusta 41 - 51 mm rei'issä. Panostusasteen ylittäessä 0.6 kg/m tai reikäkoon kasvaessa, kasvaa myös kaavan virhemarginaali nopeasti.

$$r_c = r_{c0} \times F_h \times F_t \times F_v \quad (21)$$

$R_c$  = keskimääräinen odotettava rikkoontumisvyöhyke

$R_{c0}$  = korjaamaton rakopituus

$F_h$  = reikävälin korjauskerroin

$F_t$  = syttymistarkkuuden korjauskerroin

$F_v$  = veden vaikutuksen korjauskerroin

$$r_{c0} = 0.812 \times r_0 \times CZI^{0.29} \quad (22)$$

CZI = murskautumisvyöhykkeen indeksi

$r_{c0}$  = odotettavissa oleva rikkoutumisvyöhykkeen säde (mm)

$r_0$  = porausreiän halkaisija (mm)

$$CZI = \frac{P_h^3}{K \times \sigma_c^2} \quad (23)$$

CZI = murskautumisvyöhykkeen indeksi

$P_h$  = paine porausreiän seinämässä (Pa)

K = kiven kovuus

$\sigma_c$  = yksiakiaalinen puristuslujuus, UCS (Pa)

$$P_h = \frac{\gamma}{(\gamma + 1)^{(\gamma+1)}} \rho V O D^2 \left(\frac{D_e}{D_h}\right)^{1.84} \quad (24)$$

$\gamma$  = dimensioton laajenemisvakio (adiabaattinen gamma)

$D_e$  = räjähdysaineen halkaisija (mm)

$D_h$  = porausreiän halkaisija (mm)

Yllä esitetty laskentatapa on johdettu tutkimuksen kahdesta kaavasta empiiristen kokeiden avulla. Kaava antaa rakoiluarvon tutkittavalle räjähteelle käytettäessä impulssiletkunallia. Tutkimustulosten mukaan syttymistarkkuuden korjauskerroin elektronisille nalleille vaihtelee välillä 0.4 - 0.6. Poraustarkkuuden, veden vaikutuksen ja etureikäväli suhteen kerrointa ei ole määritetty tässä tutkimuksessa. Niillä on kuitenkin vaikutusta syntyvään rakoiluun.

Tutkimustulosten pohjalta voidaan taulukossa 37 olevia rakoiluarvoja pitää luotettavina ja hyvänä suunnittelun lähtökohtana tunnelilouhintoihin tämän tutkimuksen räjähdysaineille. K810 osalta taulukko edellyttää lopputiheyttä 1.0 l/kg. Taulukossa on esitetty teoreettinen laskenta-arvo rakoilulle, korjaamaton rakopitus ja sille virhemarginaali, syttymistarkkuuden korjauskerroin ja elektronisilla nalleilla saavutettava rakopitus.

Taulukko 37. Uudet rakoiluarvot tutkimuksen räjähteille 41 - 51 mm reiässä

Räjähde	$r_t$ (m)	$r_{c0}$ (m)	$F_t$	$r_{Ft}$ (m)
17 x 500 F-pp	0,24	<b>0,24 +-0,05</b>	~0,4	<b>0,15 +-0,05</b>
K810 350 g/m	0,3	<b>0,3 +-0,05</b>	~0,4	<b>0,2 +-0,05</b>
K810 400 g/m	0,37	<b>0,37 +- 0,05</b>	~0,4	<b>0,22 +-0,05</b>
K810 500 g/m	0,67	<b>0,67 +-0,05</b>	~0,55	<b>0,3 +-0,05</b>

Tutkimustulosten mukaan rakoilu ei merkittävästi muutu tutkimuksen räjähteillä 41 - 51 mm porareikien välillä.

Maatutkamenetelmän avulla voidaan analysoida ja kartoittaa kallion ominaisuuksia. Maatutkaprofiileista voidaan havainnoida ja tulkita rakoilua sekä litologisia piirteitä. GPR EDZ menetelmän avulla voidaan tutkia syntynyttä rakoilua louhitusta kalliopinnasta. Menetelmä vaatii vielä toistaiseksi erikoisosaamista. Maatutkauksesta on kehitettävissä tehokas ja luotettava väline louhittujen kalliotilojen laadunvalvontaan. Tulevaisuudessa käytettävien laitteistojen tulee olla helppokäyttöisiä ja raportti EDZ vyöhykkeestä tulee olla saatavilla helposti tulkittavassa ja ymmärrettävässä muodossa. GPR EDZ menetelmän kehitys jatkuu Geofconilla.

Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan todeta, että 400 g/m K810 rantupanos soveltuu T 400 mm louhintakohteisiin. Elektronisilla nalleilla, voidaan 500 g/m rantupanoksella saada rikkoutumisvyöhyke alle 400 mm:iin. T 200 mm kohteissa on suositeltavaa käyttää 17 x 500 F-putkipanoksia. Panostettaessa pumpattavilla emulsioilla on työn aikana seurattava kaa-suuntumista ja säädettävä laitteistoa siten, että lopputiheys asettuu 1,0 kg/l. Laitteistoissa olevalla automatiikalla saavutetaan tarkasti halutut panostusasteet ja hukkanpanostus on lähes olematonta.

Räjähdyspaineen käyttäytymistä tulee tutkia lisää, jotta sen käyttäytyminen ymmärretään kunnolla. Tämä antaa mahdollisuuden vaikuttaa louhinnan suunnitteluun optimoimalla räjähdyspaineet. Pumpattavien emulsioiden ohuiden rantupanosten detonaatiota tulee tutkia tarkemmin ja pyrkiä selvittämään voidaanko räjähdystapahtumaa saada lähemmäksi ideaalidetonaatiota muuttamalla tuotteen kemiallista koostumusta. Kaivos- ja urakointikohteissa on mahdollisuus tutkia, voidaanko EDZ optimoinnilla saada kustannussäästöjä muista työvaiheista. Pysyvissä kalliotiloissa, kuten ydinjätteiden loppusijoituspaikat, tulee tutkimuksissa keskittyä myös pitkänajan muutoksiin louhitussa kalliopinnassa.

## LÄHTEET

- Blanton, T. L. 1981. Effect of strain rates from 10<sup>-2</sup>/sec-10<sup>-1</sup>/sec on three rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* 18 (1981), 47-62.
- Braithwait, M. 2014. Professori, Cambridge University. Haastattelu 5.12.2014
- Evaluation of explosives performance through in-the-hole detonation velocity measurement. 2001. National institute of rock mechanics, India. Final report, project code MT/96/96.
- Hakala, M. & Heine, J. 2014. Uniaxial and Indirect tension testing of rock samples. SMCOY tutkimusraportti. Lokakuu 2014.
- Hakapää, A., & Lappalainen, P. 2009. Kaivos- ja louhintateknikka. Opetushallitus ja kaivannaisteollisuus yhdistys ry. ISBN 978-952-13-3488-7
- Jackson, S. 2010. In Proceeding of 14<sup>th</sup> Int. Detonation Symposium, 2010
- M Rantamäki, R Jääskeläinen, M Tamminen. Geotekniikka.17. muuttumaton painos. Otatieto 1979. ISBN 951-672-257-1
- Cooper P., Kurowski R. 1996. Introduction to the technology of explosives. Wiley-vch, Inc. ISBN 0-471-18635-X
- Esen, S., Onederraa, I., Bilginb, H.A. 2003. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40 (2003), 485–495.
- Heikkilä, P., Jokinen, J., Ylätaalo K. 1992 The effect of explosive charge on the extent of blast-induced damage in rock. Otaniemi. Research report TKK-KAL A3. ISBN 9511-22-11-1138-6
- Heikkinen, E., Kantia, P., Lehtimäki, T., Silvast, M., Wiljanen, B. 2010. EDZ Assessments in Various Geological environments using gpr method. Working report 2010-04. Toukokuu 2010. Viitattu 9.9.2014. <http://www.posiva.fi/tietopankki/tyoraportit>
- Heinonen, S. 2008. Seismisen heijastusluotausaineiston prosessointi ja korrelointi Outokummun syväreikäaineistoon. Helsingin yliopisto, Geofysiikan suuntautumisvaihtoehto. Pro Gradu –tutkielma.
- Heiniö, M. (1999) Rock Excavation Handbook. Sanvik: Sanvik Tamrock Corp.
- Holmberg, R. (1984). Vibrations generated by traffic and building construction activities. Stockholm, Swedish Council for Building Research.
- Hustrulid, W. 1999. Blasting principles for open pit mining volume 1- General design concepts. Rotterdam: A.A. Balkema Publisher. ISBN 90 5410 459 7.

Jokinen, J., Ylätaalo, K., 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. ISBN 951-22-2862-9

Kantia, P. 2014a. The GPR EDZ study in Äspö HRL TAS04 MEMO report 01.03.2014. Report in preparation

Kantia, P. 2014b. GPR EDZ tutkimus Kurun kovakivilouhimolla. Geofcon. Helmikuu 2014. Oy Forciti Ab:n tilaama tutkimus.

Kantia, P. 2014c. The GPR EDZ study in the test mine. LOVA2014. MEMO report 27.10.2014

K-H Korhonen, R Gardemeister, H Jääskeläinen, H Niini, P Vähäsarja 1974. Rakennusalan kallioluokitus. Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 12. Valtion teknillinen tutkimuskeskus 1974. ISBN 951-38-0081-4

Kämäräinen, V-P. 2014. Geological mapping in Sandvik's test tunnel, report in preparation (LOVA 2014). Nokia, 29<sup>th</sup> of September 2014. Geofcon.

Kuusisto, M. 2007. Suomen maankuoren kivilajikoostumuksen tulkinta seismisistä aineistoista. Helsingin yliopisto, Geofysiikan suuntautumismuutokset. Lisensiaatintyö.

Tolppi, T. & Kontio, V. 2014. Ohuthieanalyysi. Labrocin tutkimusraportti 2681/OH. Oulu.

Lislerud A. 1990. Fjellsprengningsteknik. Doktor ingenjoravhandling. Institue for anlegsdrift. Trondheim.

Lownds, C.M. 1986. The strength of explosives, in The Planning and Operation of Open Pit and Strip Mines. South African Institute of Mining and Metallurgy:Johannesburg (ed: J P Deetlefs).

Mustonen, S., Norokallio, J., Mellanen, S., Lehtimäki, T., Heikkinen, E. 2010. EDZ09 Project and Related EDZ Studies in ONKALO 2008 – 2010. Working Report 2010-27. Posiva Oy. Joulukuu 2010. Viitattu 9.9.2014. <http://www.posiva.fi/tietopankki/tyoraportit>

Myllymäki, V-M. 2006. Emulsio- ja putkipanostuksen aiheuttama rikkoutumisvyöhyke tunnelilouhinnassa. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Diplomityö.

NONEL käyttäjän opas. Oy Forciti Ab & Orica Mining Services. Viitattu 12.12.2014. <http://www.forciti.fi/archives/tuotekategoria/louhintarajahteet>

Salomonsson & ym. 2001. Technical seminar with Hydro Technical Nitrates, 11.6.2001. Norsk Hydro 2001.

Olsson, M. 2014a. EDZ I TASN och TASS 04, report in preparation. EDZ-Consulting AB. Tukholma 2014

Olsson, M. 2014b. EDZ in the Tampere test mine. EDZ-Consulting AB. Tukholma 2014

Olsson, M. 1999. Sprickutbredning i kvartsaende berg – Arbetsrapport från försöksperiod 1997-1999. Stiftelsen svensk bergteknisk forskning. SveBeFo Rapport K11.

Olsson, M. 1998. Sprickutbredning från strängemulsion. SveBeFo Rapport 98-10-13

Olsson, M. & Niklasson B 2012. Tunneldrivning med pumpemulsion. Erfarenheter av sprängämne, utrustning och laddningsarbete. SveBeFo Rapport 115. ISSN 1104-1773

Olsson, M. & Ouchterlony F 2003. Ny skadezonsformel för skonsam sprängning. Stockholm. Stiftelsen svensk bergteknisk forskning. SveBeFo Rapport 65, Stockholm.

Olsson, M., Ouchterlony F., Svärd J. 2008. Sprängskador från strängemulsion, fältförsök och förslag till skadezonstabell. Swebrec Rapport 2008:1, Stockholm.

Ouchterlony, F. 2014. Professori, Montanuniversität Leoben. Haastattelu 25.9.2014

Oy Forcit Ab. 2014. TT Fordyn Redex 31102014, Lokakuu 2014

Oy Forcit Ab 2013. TT Daveytronic 260813, Elokuu 2013

Oy Forcit Ab. 2013. TT NG-putkipanokset 02042013, Huhtikuu 2013

Oy Forcit Ab 2013. Daveytronic käyttäjän käsikirja, Helmikuu 2013

Oy Forcit Ab. 2012. Tuoteluettelo – Louhintaräjähteet, Toukokuu 2012

Oy Forcit Ab. 2012. TT Daveynel sähkötön sytytysjärjestelmä 200312, Maaliskuu 2012

Oy Forcit Ab. 2012. TT Kemiitti 810 13032012, Maaliskuu 2012

Oy Forcit Ab. 2010. Ympäristöesite, Helmikuu 2010

Patrikainen, P. 1983. Suomen kivilajien merkittävimmät materiaaliominaisuudet ydinjätteen loppusijoituksen kannalta. Geologinen tutkimuslaitos. Ydinjätteen sijoitustutkimuksen projektiryhmä. Tiedonanto 25 G-1.5.

Persson, P-A., Holmberg, R., Lee, J. 1994. Rock blasting and explosives engineering. Florida. CRC Press, inc. ISBN 0-8493-8978-X

Petrosyan M. I. 1994. Rock breakage by blasting. Rotterdam: Balkema, 1994 ISBN 90 6191 902 9

Prasad, U. 2000. Dynamic Fracture Characteristics of Selected Rocks. Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University. Montreal, Canada. PhD dissertation,

Read, J., & Stacey, P. 2009. Guidelines for open pit slope design. Korjattupainos 2012. CRC Press/Balkema ISBN 9780415874410

Research report nr V-louh 64/87. 1987. Helsinki University of Technology, Faculty of Process Engineering and Material Science, Department of Materials Science and Mining Laboratory of Mining Engineering

Räjähdekirja. 2005. Suomen Kemian Seura, Räjähdeyhdistys. Gummerus Kirjapaino Oy ISBN 952-91-8604-5

Sairiala M-E. 2013. Impulssiletkunallien ja pintakytkimien viiveiden mittaaminen. Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. Mittausraportti Oy Forcit Ab:n tilaamaan paloaika tutkimukseen eri tuotteille.

Sanchidrián, J-A., Segarra, P., López, L-M. 2007. Energy components in rock blasting. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 44:1.

Selonen O, 2006. Suomalaiset luonnonkivimateriaalit. Kiviteollisuus liitto Ry 2006. Tekninen tiedote nro 2. ISBN 951-97026-3-6

Sun C. 2013. Damage zone prediction for rock blasting. Doctor of Philosophy, Department of Mining Engineering. The University of Utah, 2013. PhD dissertation

Tampereen Kovakivi\_Kuru\_Grey\_fin\_2007. GTK:n tutkimusraportti 2007.

Tampereen Kovakivi\_Kuru\_Grey\_fin\_2007\_mineraalikoostumus. GTK:n tutkimusraportti 2007.

Test report: TTK-Kal14C2009. 2009. Test report ordered by Sandvik Mining and Construction Oy. Helsinki University of Technology, Rock Engineering

Vuolio, R., & Halonen, T. 2010. Räjätystyöt 2010. 1. Painos. Suomen Rakennusmedia OY. ISBN 978-952-5785-34-0

## OTTEITA IMPULSSILETKUNALLIEN PALOAIKA TUTKIMUKSESTA

**Nimellisviive 500 ms**

	<b>Exel</b>	<b>Austin</b>	<b>Davey Bickford</b>
viiveen keskiarvo	<b>501 ms</b>	<b>495,4 ms</b>	<b>481,3 ms</b>
hajonnat	0,004346	0,003536	0,002541
hajonnan osuus ka:sta	0,9 %	0,7 %	0,5 %
viivemaksimi	511 ms	500 ms	485 ms
viiveminimi	496 ms	490 ms	477 ms
maksimin ja minimin välinen ero	15 ms	10 ms	8 ms
ka:n ero nimellisarvoon	+ 1 ms	- 4,6 ms	-1,9 ms

Impulssiletkujen palonopeuksien keskiarvot olivat seuraavat:

	<b>Exel</b>	<b>Austin</b>	<b>Davey Bickford</b>
paloaika	3,65 ms	4,15 ms	3,7 ms
letkun toiminnallinen pituus	7,4 m	8,6 m	7,4 m
palonopeus	<b>2027 m/s</b>	<b>2072 m/s</b>	<b>2000 m/s</b>

**Nimellisviive 1200 ms**

	<b>Exel</b>	<b>Austin</b>	<b>Davey Bickford</b>
viiveen keskiarvo	<b>1215 ms</b>	<b>1212 ms</b>	<b>1199 ms</b>
hajonnat	0,011851	0,007851	0,011011
hajonnan osuus ka:sta	1,0 %	0,6 %	0,9 %
viivemaksimi	1243 ms	1225 ms	1211 ms
viiveminimi	1200 ms	1190 ms	1176 ms
maksimin ja minimin välinen ero	43 ms	35 ms	35 ms
ka:n ero nimellisarvoon	+ 15,3 ms	+ 12 ms	- 1 ms

**Nimellisviive 1800 ms / 2500 ms**

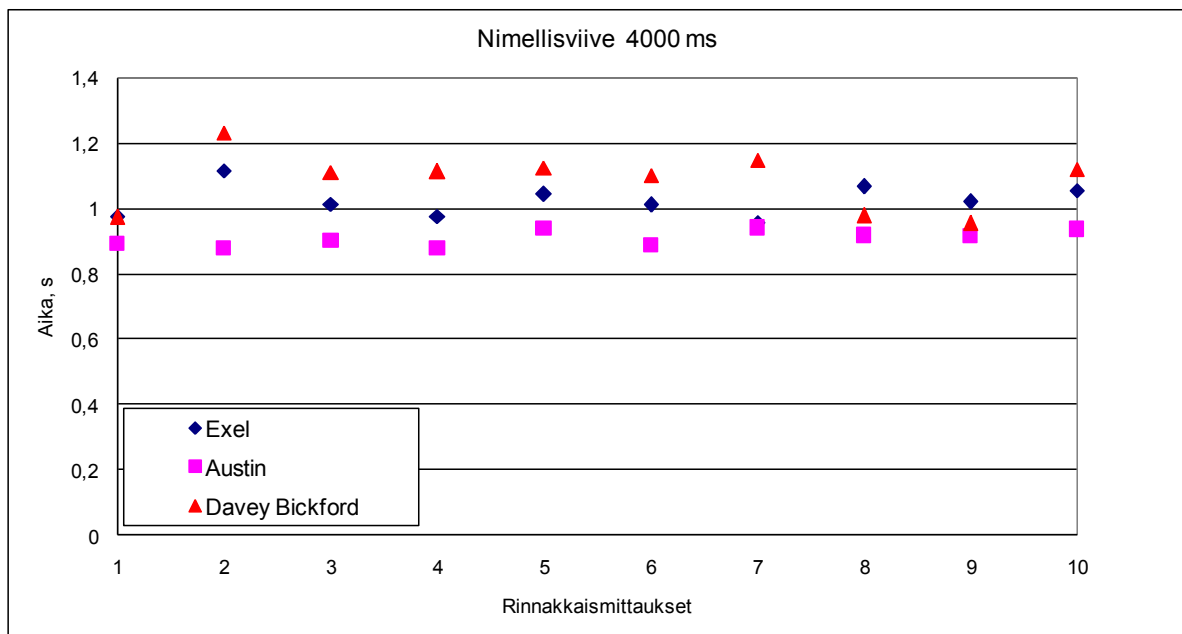
	<b>Exel</b>	<b>Austin</b>	<b>Davey Bickford</b>
viiveen keskiarvo	<b>1780 ms</b>	<b>2533 ms</b>	<b>2524 ms</b>
hajonnat	0,03284	0,035623	0,051076
hajonnan osuus ka:sta	1,8 %	1,4 %	2,0 %
viivemaksimi	1812 ms	2574 ms	2718 ms
viiveminimi	1705 ms	2479 ms	2385 ms
maksimin ja minimin välinen ero	107 ms	95 ms	333 ms
ka:n ero nimellisarvoon	-19,6 ms	+ 32,7 ms	+23,8 ms

**Nimellisviive 4000 ms**

4000 ms:n viive oli niin pitkä, ettei suurnopeuskameran kuvausaika riittänyt kattamaan koko tapahtumaa käytetyllä kuvausnopeudella. Tästä syystä tapahtuma pyrittiin kuvaamaan kahdella kameralla, mutta kameroiden synkronointi ilmeisesti epäonnistui, eikä kokonaisviiveitä kyetty määrittämään. Tästä syystä 4000 ms:n nallien kohdalla voidaan tarkastella vain nallin räjähtämisaikojen välisiä eroja.

	<b>Exel</b>	<b>Austin</b>	<b>Davey Bickford</b>
maksimin ja minimin välinen ero	158 ms	63 ms	276 ms

Koska nallien kokonaisviiveitä ei saatu mitattua, on alla olevassa kuvassa esitetty nallien räjähtämisaikojen väliset erot graafisesti.

**Nimellisviive 6000 ms**

6000 ms:n nallien kohdalla tilanne on sama kuin 4000 ms nalleilla, kameroiden synkronointi epäonnistui ja kokonaisviiveiden määrittäminen epäonnistui.

	<b>Exel</b>	<b>Austin</b>	<b>Davey Bickford</b>
maksimin ja minimin välinen ero	360 ms	167 ms	185 ms

## KIVILAJIEN LUJUUSOMINAISUUKSIA

Kivilaji	Tiheys $\rho$ g/cc	Puristuslujuus Mpa	Vetolujuus Mpa	Leikkaus moduuli G Gpa *)	Kimmomoduuli $E_d$ Gpa
Basaltti	2,9	149	11	24,4	62
Dolomiitti	2,5	55	3	22,5	28
Gneissi	2,8	224	14	30,7	81
Graniitti	2,7	186	9	21,7	43
Kalkkikivi	2,7	159	5	25,9	55
Marmori	3,1	251	15	40,0	106
Hiekkakivi	2,5	134	1	14,4	7
Kuru grey	2,6	225	12	26,8	67
Dioriitti (Äspö)	2,76	195	16	29,3	69
Migmatic gneis VGN (Posiva)	2,7	111	12	24	60
Pegmatic graanit PGR (Posiva)	2,65	100	9,1	22	55
Grandioriitti (Sandvik)	2,7	136		24	59
Kvartsiitti	2,8	170		44,6	78

Kivilaji	Poissonin luku $\mu_d$	Ääänipaineaalto P mps (Cp)	Ääänipaineaalto S mps (Cs)	Seismsisten- aaltojen suhde	Kiven kovuus K **)
Basaltti	0,27	5229	2900	1,83	50,0
Dolomiitti	0,32	4024	3000	1,34	21,4
Gneissi	0,22	5732	3313	1,73	66,0
Graniitti	0,33	4844	2833	1,71	32,1
Kalkkikivi	0,25	5000	3100	1,61	45
Marmori	0,28	6705	3590	1,87	85,2
Hiekkakivi	0,2	3933	2400	1,64	29,0
Kuru grey	0,25	5560	3211	1,73	53,6
Dioriitti (Äspö)	0,24	5570	3260	1,7	59,3
Migmatic gneis VGN (Posiva)	0,24	5164	2981	1,73	48
Pegmatic graanit PGR (Posiva)	0,23	5037	2893	1,74	44
Grandioriitti (Sandvik)	0,25	4683	2980	1,57	48
Kvartsiitti	0,27	5900	3990	1,50	61,4

$$*) G = C_s^2 \rho$$

$$E_d = \frac{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)C_p^2}{(1 - \mu)}$$

$$**) K = \frac{E_d}{1 + \mu_d}$$

$C_p$  = p-aalto

$C_s$  = s-aalto

$K$  = kiven kovuus (Rock stiffness)

$E_d$  = dynaaminen kimmomoduuli

$\mu_d$  = dynaaminen poissonin luku

$G$  = leikkausmoduuli

$\rho$  = tiheys

Lähteet:

Esen, S., Onederraa, I., Bilginb, H.A. 2003. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 (2003) 485–495.

Kantia, P. GPR EDZ tutkimus Kurun kovakivilouhimolla. Geofcon. Helmikuu 2014

Kuusisto Minna. 2007. Suomen maankuoren kivilajikoostumuksen tulkinta seismisistä aineistoista. Lisensiaatintyö. Helsingin yliopisto, Geofysiikan suuntautumisvaihtoehto.

Petrosyan M. I. 1994. Rock breakage by blasting. Rotterdam: Balkema, 1994 ISBN 90 6191 902 9

Posiva 2004-33 Working report. Study of Rock Damage Caused by Drill and Blast excavation at Aspö Hard Rock laboratory

Read, J., & Stacey, P. 2009. Guidelines for open it slope design. Korjattupainos 2012. CRC Press/Balkema ISBN 9780415874410

Research report nr V-louh 64/87. 1987. Helsinki University of Technology, Faculty of Process Engineering and Material Science, Department of Materials Science and Mining Laboratory of Mining Engineering

Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (Geologic and Otherwise) GEOL 615\_www.stanford.edu

Sun C. 2013. Damage zone prediction for rock blasting. Doctor of Philosophy, Department of Mining Engineering. The University of Utah, 2013

Tampereen Kovakivi\_Kuru\_Grey\_fin\_2007. GTK:n tutkimusraportti 2007.

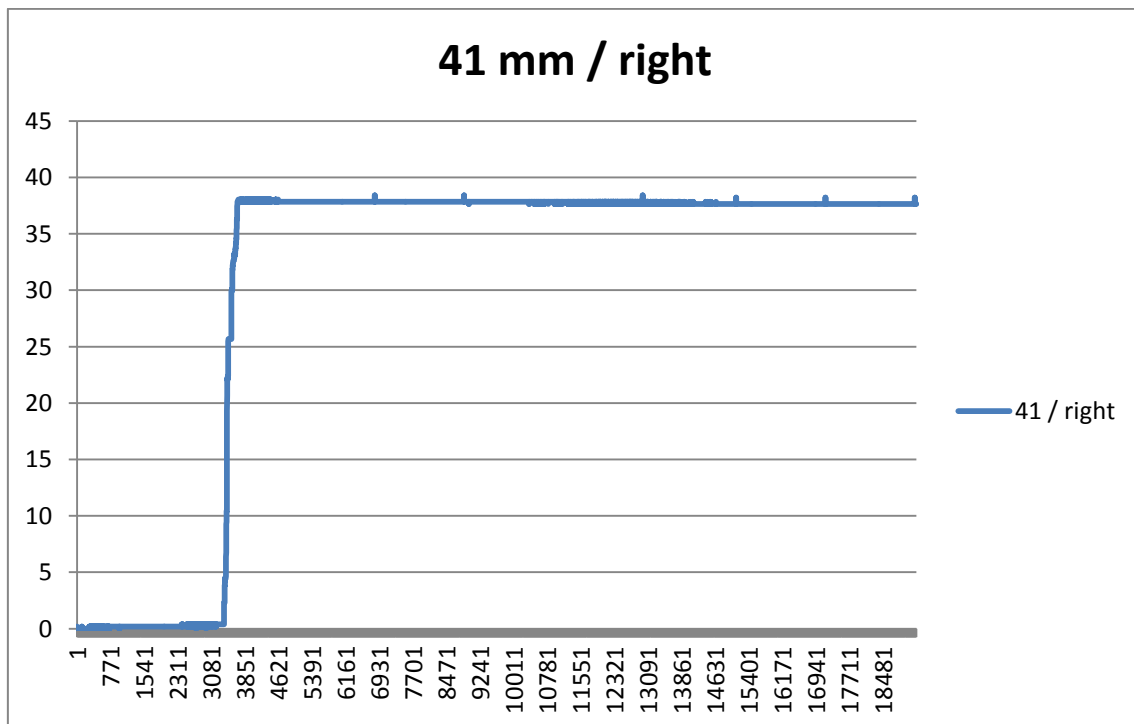
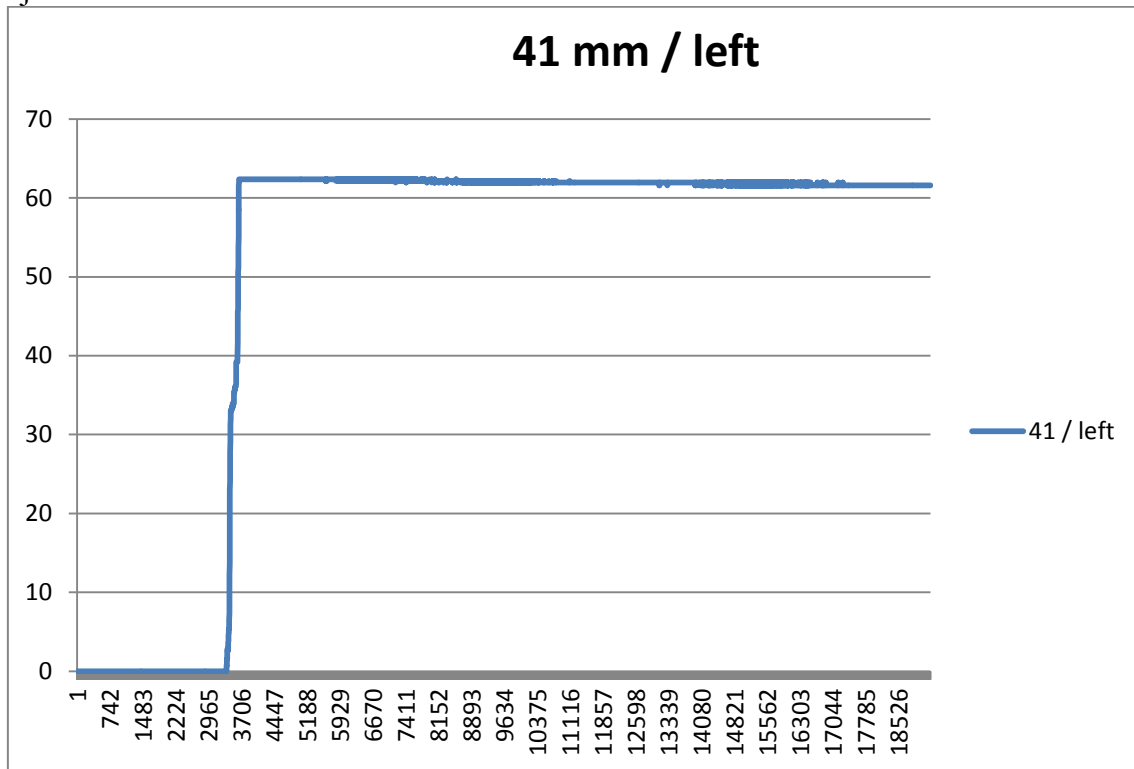
Tampereen Kovakivi\_Kuru\_Grey\_fin\_2007\_mineraalikoostumus. GTK:n tutkimusraportti 2007.

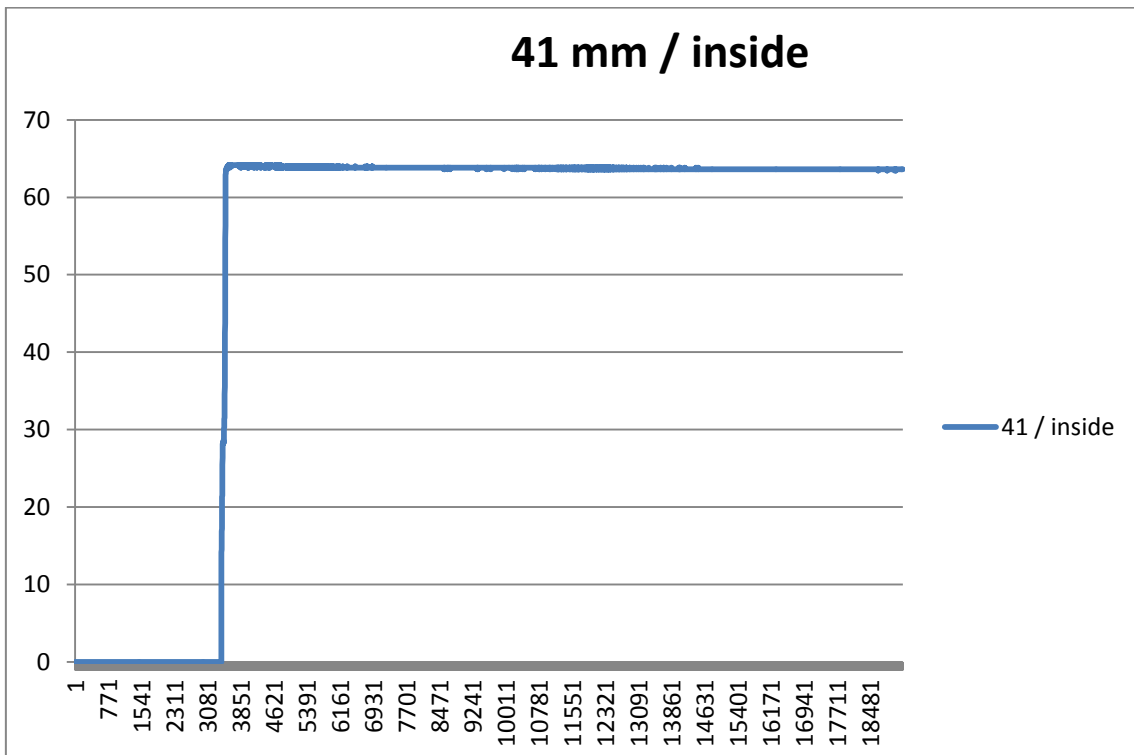
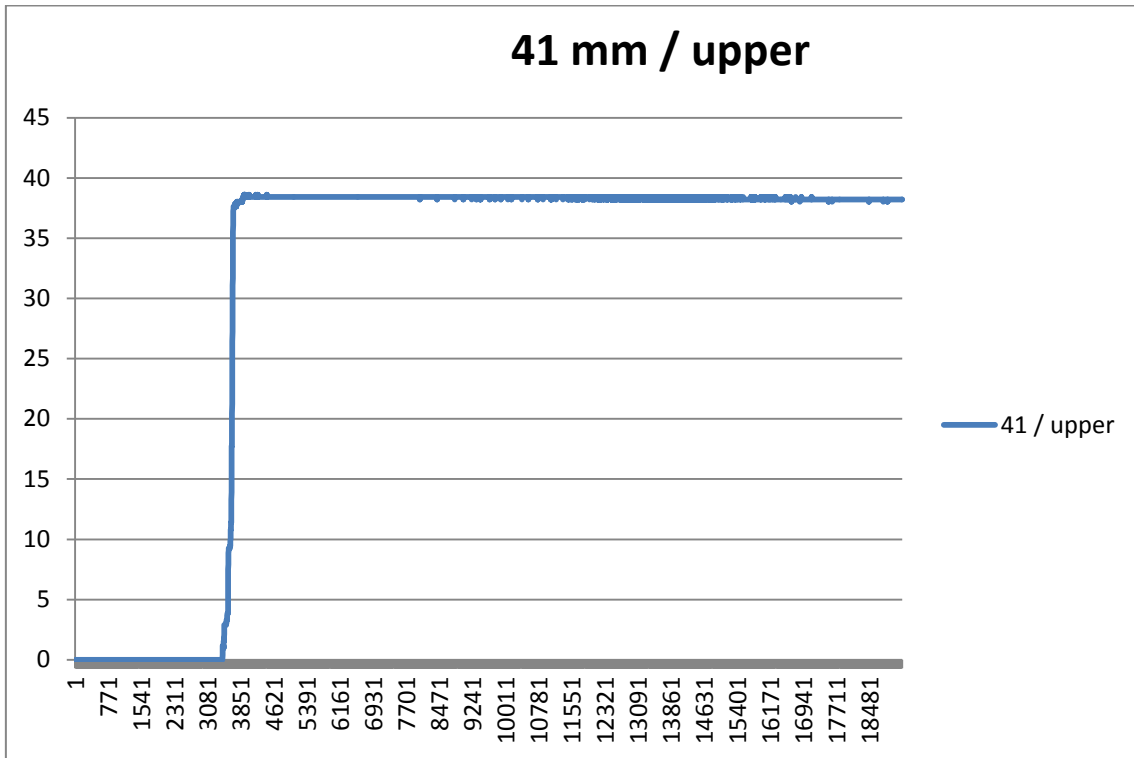
Test report: TTK-Kal14C2009. 2009. Test report ordered by Sandvik Mining and Construction Oy. Helsinki University of Technology, Rock Engineering

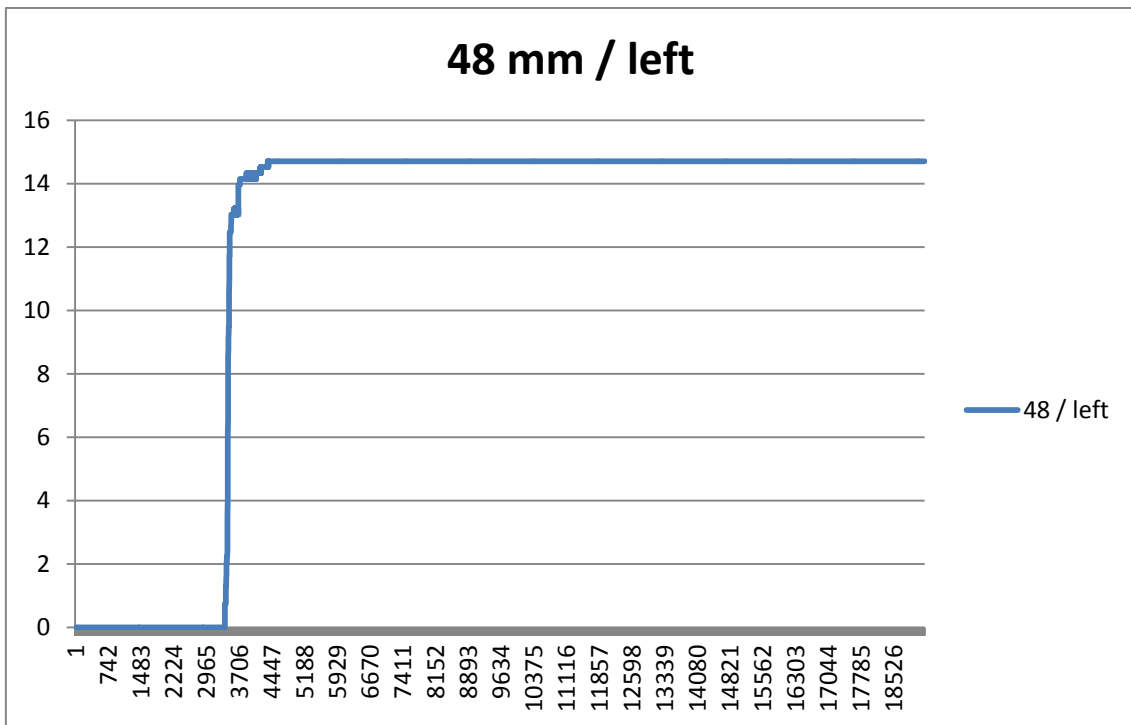
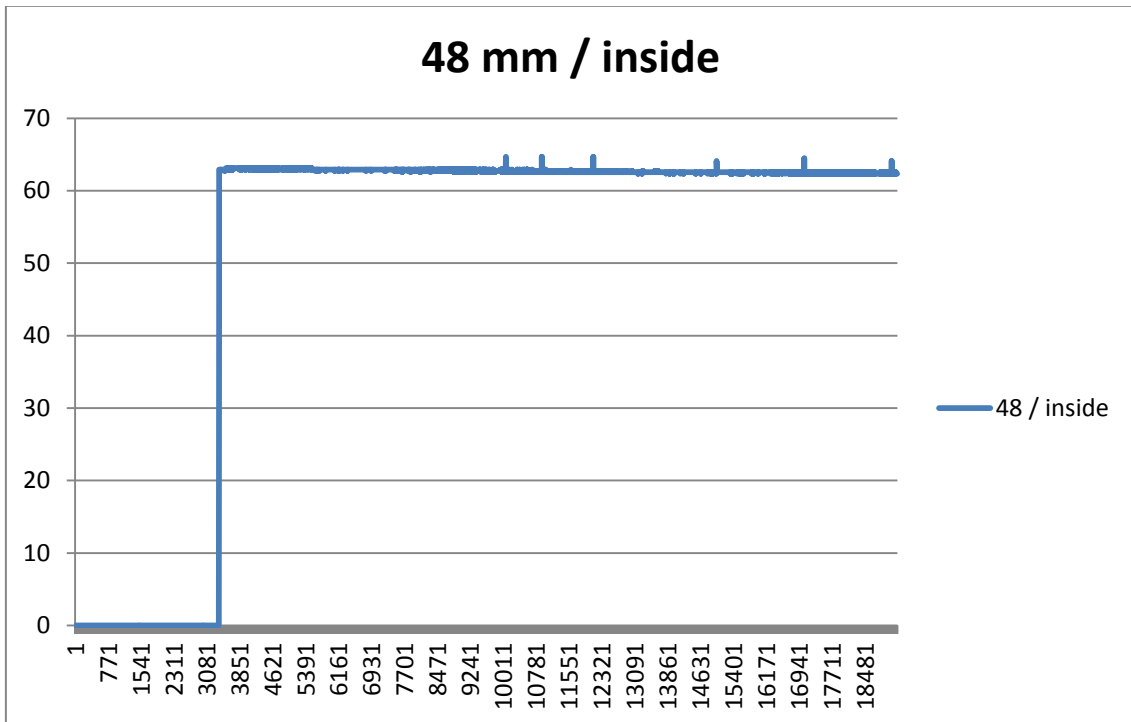
Uotinen Lauri. 2008. Kalliotunnelien ratarakenteiden värinävsaimennuksen mitoituksen ja suunnittelun perusteet. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

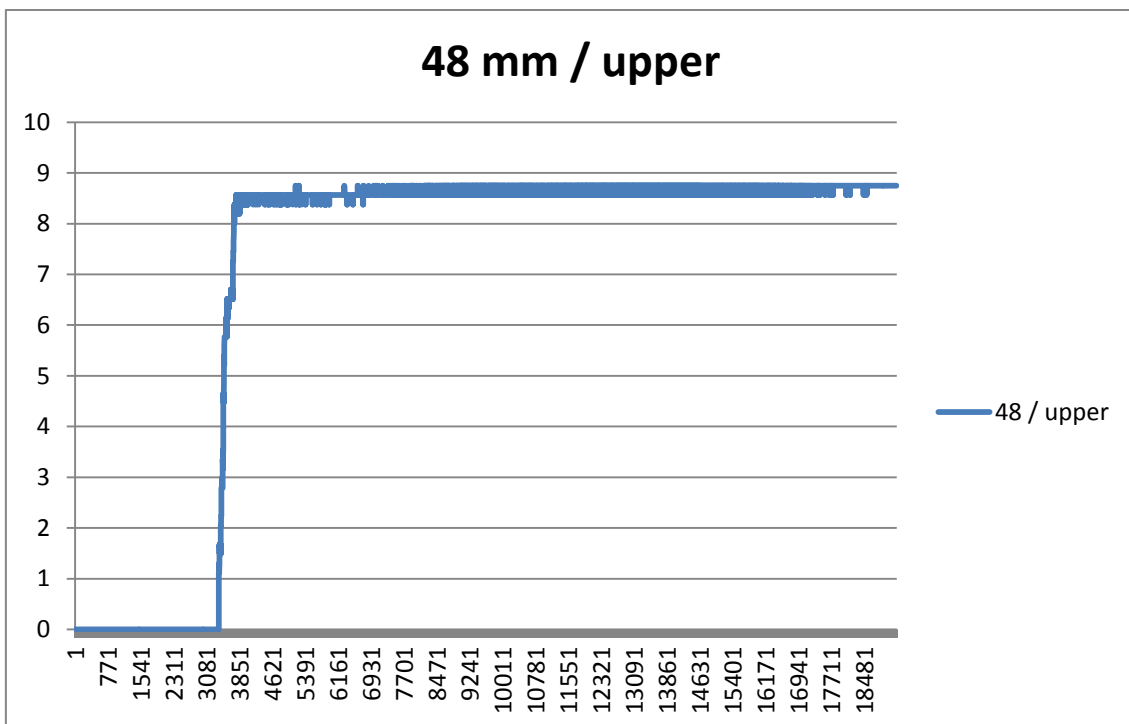
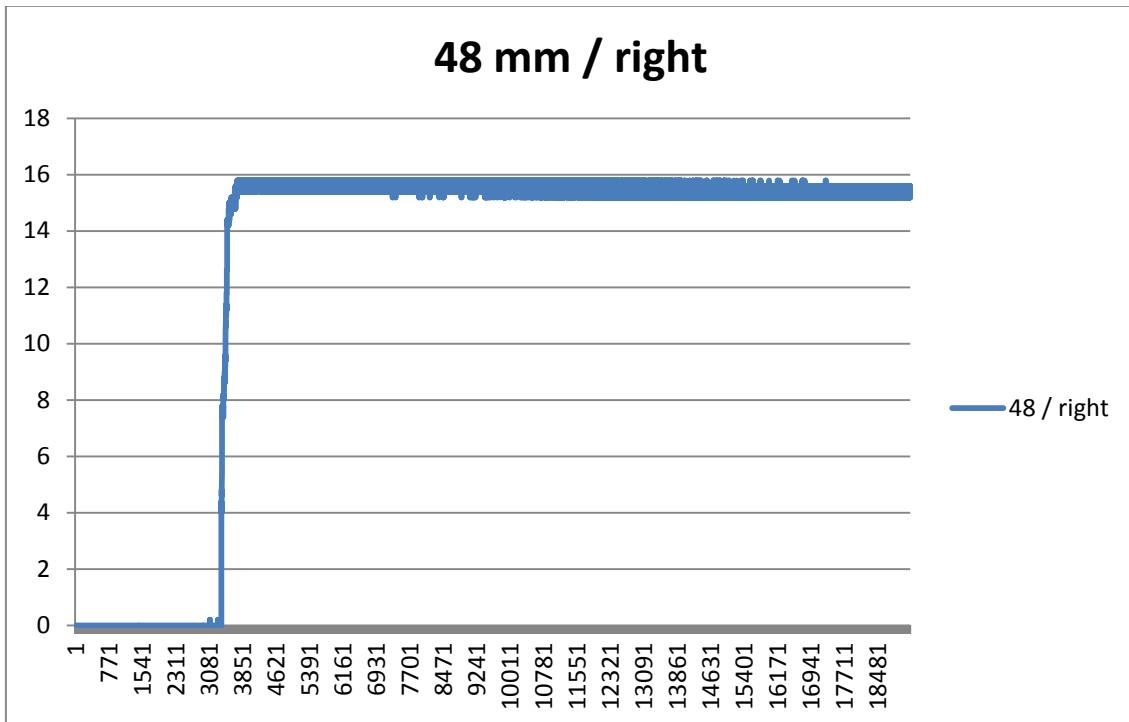
PAINEMITTAUSKÄYRÄT 9.9.2014

Alla olevat kaaviot ovat Sandvikilla tehdyn painemittaustutkimuksen paineanturikohtaiset tulokset. Käyrissä vasemmalla näkyy paine (MPa), joka mitta-antureissa vaikutti eri ajanhetkillä.









TEOREETTISIA RAKOILUARVOJA ERI KIVILAJEILLE

51mm reikä

Rajajäyhäaine		K810 (350g/m)		K810 (400g/m)		K810 (500g/m)	
Panostusaste	0,35 kg/m	0,4 kg/m	0,4 kg/m	0,5 kg/m	0,5 kg/m	0,5 kg/m	0,5 kg/m
Porareikä ro	51 mm	51 mm	51 mm	51 mm	51 mm	51 mm	51 mm
Paine (Pa)	150000 Pa	258000 Pa	258000 Pa	590000 Pa	590000 Pa	590000 Pa	590000 Pa
Kivijäli	EDZ (mm)	CI	EDZ (mm)	CI	EDZ (mm)	CI	EDZ (mm)
Basalti	6783	286	15471	342	190720	594	190720
Dolomiitti	118529	535	270343	641	3332684	1111	3332684
Gneissi	2274	225	5196	270	63929	467	63929
Granitti	6801	286	15513	345	191233	594	191233
Kalkkivi	6919	284	15096	341	186094	590	186094
Marmor	1406	303	3207	243	35534	721	35534
Hiekkakivi	1406	303	3207	243	35534	721	35534
Kuru Grey	2754	235	6282	254	71459	487	71459
Dioritti (Ääpo)	6864	286	9854	311	123714	539	123714
Granidioritti (Sandvik)	8481	300	19344	360	238462	623	238462
Migmatiic gneiss VGN (Posiva)	12732	328	29038	393	357974	681	357974
Pegmatiic graaniit PGR (Posiva)	17113	350	39031	419	481156	727	481156
Kvartsitti	4271	258	9742	309	120091	536	120091

Ka.  
Fr = 0,5 (elektroniset nallit) **299** 150

41mm reikä

Rajajäyhäaine		K810 (350g/m)		K810 (400g/m)		K810 (500g/m)	
Panostusaste	0,35 kg/m	0,4 kg/m	0,4 kg/m	0,5 kg/m	0,5 kg/m	0,5 kg/m	0,5 kg/m
Porareikä ro	41 mm	41 mm	41 mm	41 mm	41 mm	41 mm	41 mm
Paine (Pa)	267000 Pa	417000 Pa	417000 Pa	1058000 Pa	1058000 Pa	1058000 Pa	1058000 Pa
Kivijäli	EDZ (mm)	CI	EDZ (mm)	CI	EDZ (mm)	CI	EDZ (mm)
Basalti	17147	282	65323	377	1066877	696	1066877
Dolomiitti	299633	527	1141467	706	18642851	1302	18642851
Gneissi	5748	222	21886	297	357636	548	357636
Granitti	17193	282	65499	378	1069747	696	1069747
Kalkkivi	16731	280	63738	375	1049999	692	1049999
Marmor	3554	200	13541	267	221152	493	221152
Hiekkakivi	36553	332	139252	445	2274309	821	2274309
Kuru Grey	6963	231	26525	310	433210	571	433210
Dioritti (Ääpo)	11093	256	42090	343	686456	632	686456
Granidioritti (Sandvik)	21440	296	81675	396	133945	731	133945
Migmatiic gneiss VGN (Posiva)	32184	323	122609	433	202487	799	202487
Pegmatiic graaniit PGR (Posiva)	43259	345	164799	462	2691562	852	2691562
Kvartsitti	10797	254	41132	341	671763	629	671763

Ka.  
Fr = 0,5 (elektroniset nallit) **305** 147

51mm reikä

Rajajäyhäaine		17x500 F-puolipanos		17x500 F-puolipanos	
Panostusaste	0,2 kg/m	0,2 kg/m	0,2 kg/m	0,2 kg/m	0,2 kg/m
Porareikä ro	51 mm	51 mm	51 mm	51 mm	51 mm
Paine (Pa)	140000 Pa	200000 Pa	200000 Pa	200000 Pa	200000 Pa
Kivijäli	EDZ (mm)	CI	EDZ (mm)	CI	EDZ (mm)
Basalti	3573	331	7307	233	149005
Dolomiitti	45073	433	135935	436	55006
Gneissi	865	183	2416	183	224000
Granitti	2586	233	7226	233	186090
Kalkkivi	2517	230	7032	232	159000
Marmor	535	164	1494	165	251000
Hiekkakivi	5499	273	15363	275	134000
Kuru Grey	1047	190	2926	191	225000
Dioritti (Ääpo)	1660	210	4637	211	171000
Granidioritti (Sandvik)	3225	243	9011	245	136000
Migmatiic gneiss VGN (Posiva)	4841	266	13527	267	111000
Pegmatiic graaniit PGR (Posiva)	6507	289	18182	285	100000
Kvartsitti	1624	209	4538	210	170000

Ka.  
Fr = 0,5 (elektroniset nallit) **242** 121

LOVA 2014 RÄJÄYTYSSUUNNITELMAT

KENTTÄ 1/LOVA 2014 (malli SKB)

Tunnus	Kenttä Nro	Pinta-ala	Kohde				Pvm				
<b>SANDVIK</b>	<b>1/LOVA2014</b>	<b>23.40</b>	<b>EDZ tutkimus</b>				<b>.8.2014</b>				
		Kentän tilavuus m <sup>3</sup>	Poranalan halkaisija		Tärinämittaukset						
		<b>94</b>	<b>48 mm</b>		3 mittaria						
	Teoreettinen katkon pituus	Räjähdyksen aika	Poranalan pituus		Panostaja		Räjähdytysohjaaja				
	<b>4.5</b>		Kaari 4.3m, muut 4.5m		Tomi Korvonen/Joni Saarelainen		Sami Karvonen				
Kohde	Reikien lkm	Räjähdysohje tyyppi	Pohjapanos		Värispanos		Yhteensä / reikä	Panostamattomaa		Kg/kohde	Sytitys LP/DT III
			Panostus [kg]	Pituus [m]	Panostus [kg/m]	Pituus [m]		Pituus [m]	Panostus [kg]		
Kaarireiät	37	Forprime 150015, K810	0.80	0.50	0.35	3.80	4.30	2.13	0	57.5	DT III / LP
Apukaari	18	Forprime 150015, K810	0.80	0.50	0.50	3.80	4.30	2.70	0.2	48.6	DT III / LP
Pohja	8	Forprime 150015, K810	0.80	0.50	0.50	3.90	4.40	2.75	0.1	22.0	DT III / LP
Pohjan apukaari	7	Forprime 150015, K810	0.80	0.50	0.50	3.90	4.40	2.75	0.1	19.3	DT III / LP
Avaus	12	Forprime 150015, K810	0.0	0.0	1.80	4.00	4.00	7.20	0.5	86.4	DT III
Kenttä	9	Forprime 150015, K810	1.5	0.70	1.20	3.50	4.30	5.70	0.3	57.3	DT III
Yhteensä	81										
Suurin lkm	4									Teoreettiset kilot (kg)	285.1
Poramäärät	259.30	Huomautukset								Kokonaispanostus (kg)	296.7
Panostetut parametrit	311.00	Vaarallinen alue:								Srotus	11.6
Ominaispanostus [kg/m <sup>3</sup> ]	3.03										<b>4.1 %</b>
Ominaisporaus / m <sup>3</sup>	3.82										

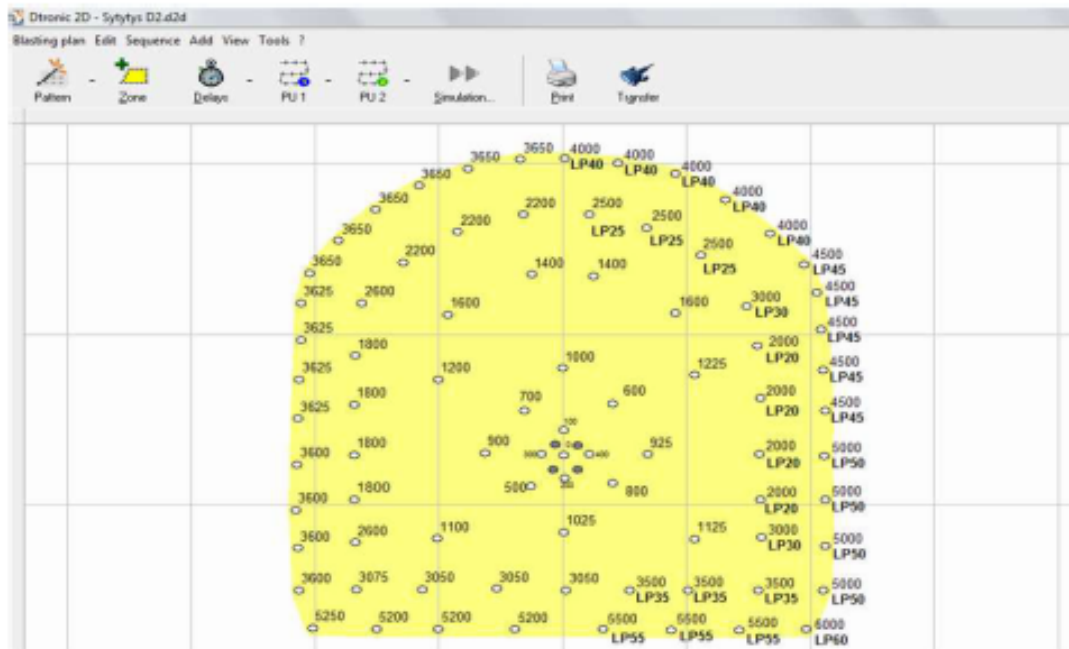
	Reikäväli (S)	Etu (B)
Kaarireiät = Contur	0.5	0.6
Apukaari = helpper	0.6	0.8
Kenttä = Field	0.8	0.8
Pohjan apukaari = Bottom-hole helpper	0.5	0.5
Avaus = opening		

Sytitys: Vasen kaari ja apukaari + pohja oikealta Davemyl, muuten DT III

Panostaja: \_\_\_\_\_

Räjähdytysohjaaja: \_\_\_\_\_

Sytityssuunnitelma D2d



Toteutettiin pellikuvana

LOVA 2014 RÄJÄYTYSSUUNNITELMAT

KENTTÄ 2/LOVA 2014

Tunneli	Kenttä Nro	Pinta-ala	Kohde					Pvm			
SANDVIK	1/LOVA2014	22,40	EDZ tutkimus					22.8.2014			
		Kentän tilavuus m <sup>3</sup>	Porareian halkaisija		Tärinämittaukset						
		100	48/41 mm		2 mittaria, kukaan ylä ja alapäässä						
	Teoreettinen kaikon pit.	Räjätys aika	Porareian pituus		Panoajat			Räjätystyöryhtäjä			
	5,0	15,00	5 m		Teeri Kaavere/Jussi Savolainen			Sami Karvonen			
Kohde	Reikien lkm	Räjätysaine tyyppi	Pohjapanos		Varsipanos		Yhteensä / reikä		Panoamaton osa	Kg/kohde	Sytytykset LP/D7 M
			Panosuus [kg]	Pituus [m]	Panosuus [kg/m]	Pituus [m]	Pituus [m]	Panosuus [kg]			
Kaarinelit	27	Forprime 150005, K810	0,70	0,50	0,35	4,50	4,30	2,28	0	81,4	DT III
Apukaari	18	Forprime 150005, K810	0,70	0,50	0,50	4,30	4,30	2,85	0,3	55,3	DT III
Pohja	8	Forprime 150005, K810	0,70	0,50	0,50	4,40	4,40	2,90	0,1	23,2	DT III
Pohjan apulieja	7	Forprime 150005, K810	0,70	0,50	0,50	4,40	4,40	2,90	0,1	20,1	DT III
Aksut	12	Forprime 150005, K810	0,0	0,0	1,80	4,50	4,00	8,10	0,5	97,3	DT III
Kenttä	9	Forprime 150005, K810	1,5	0,70	1,20	4,70	4,30	7,14	0,3	64,3	DT III
Yhteensä	81										
Suureikä	4										
Parametrit	359,10	<b>Huomioitu:</b> Kaaresta ja pohjasta oikea puoli 41mm reikä (18kpl), muuten 48mm						Teoreettiset kilot (kg)	317,7		
Panostetut parametrit	371,00	Vääröllinen alue: 200m tunnelin suun suuntaisesti, sivulle 50m ja vieresen kaikon päällä 200m säteellä						Kokonaispanostus (kg)	307,1	ECH	
Ominaispanostus [kg / m <sup>3</sup> ]	3,18	Max moin: 2800 ms, 8,7kg						Eroitus	-10,6		-3,3
Ominaisporaus / m <sup>3</sup>	3,59										

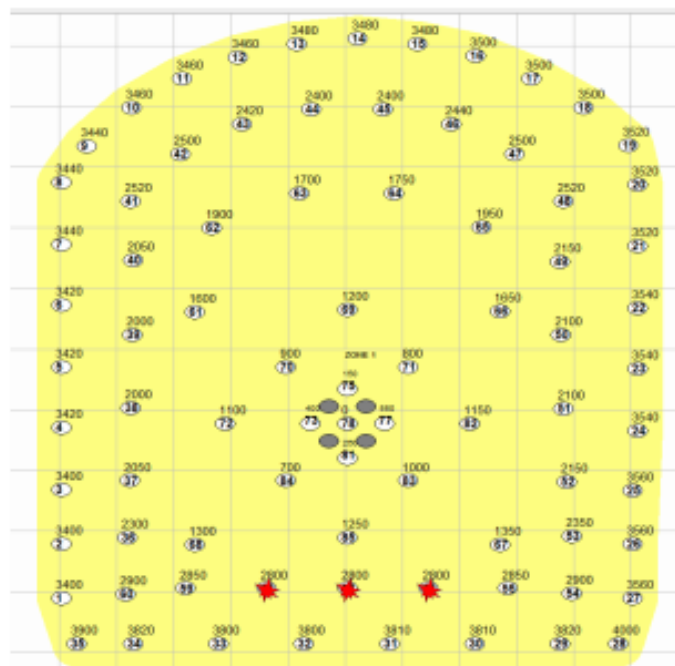
	Reikäväli (Etu (B))	
Kaarinelit	0,5	0,6
Apukaari	0,6	0,8
Kenttä	0,8	0,8
Pohja+ apulinja	0,5	0,5
Avaus		

Sytytykset: DT III, ks. erillinen suunnitelma

Panostaja: \_\_\_\_\_

Räjätystyöryhtäjä: \_\_\_\_\_

Sytytyssuunnitelma D2d



LOVA 2014 RÄJÄYTYSSUUNNITELMAT

KENTTÄ 3/LOVA 2014

Tuote:	Kenttä nro	Pinta-ala	Kohde				Peri.				
<b>SANDVIK</b>	1/LOVA2014	32.40	<b>EDZ tutkimus</b>				28.8.2014				
		Kentän tilavuus m <sup>3</sup>	Poranreikän halkaisija		Täntämittausten						
		100	48/41 mm		2 mittaus, kaikin ylä ja alapäässä						
	Teoreettinen katkon pituus	Räjätys aika	Poranreikän pituus		Päästöt		Räjätysjärjestelmä				
	5.0	16.00	5m		hormi kuormat/laatu tasotilassa		hormi kuormat				
Kohde	Reikien lkm	Räjätysaika (tyyppi)	Pohjapainos		Värsipainos		Ponostusmäärän		Syttyyn LP/DT IV		
			Ponostus [kg]	Pituus [m]	Ponostus [kg/m]	Pituus [m]	Määrä / reikä	end			
Kaarinreikä	35	Porainen 150015, KRO	0.80	0.50	0.40	6.50	3.00	3.50	0	97.0	DT III
Apukoulu	18	Porainen 150015, KRO	0.80	0.50	0.50	4.30	4.80	3.95	0.2	53.1	DT III
Pohja	12	Porainen 150015, KRO	0.80	0.50	0.50	4.40	4.90	3.00	0.1	26.0	DT III
Pohjan apukoulu	7	Porainen 150015, KRO	0.80	0.50	0.70	4.40	4.90	3.85	0.1	23.3	DT III
Aava	12	Porainen 150015, KRO	0.0	0.0	1.80	6.50	6.50	8.10	0.5	97.3	DT III
Kenttä	9	Porainen 150015, KRO	1.5	0.70	1.20	4.00	4.70	6.20	0.3	58.7	DT III
Yhteensä	93										
Suurreikä	4									390.2	
Poramäärä	405.00	Muunnoskerro	Kaarinesta ja pohjasta vasen puoli arvoin (apukoulu ml.) reikä (1 kg), muuten 0.5				Teoreettiset liitot (kg)			390.3	ECM
Päästöt poramäärä	360.00		Väärä reikien määrä: 300re tammelin suun suuntaisesti, sivulle 50m ja vierheen kaikin päällä 20m säteellä				Kokonaispäästöt (kg)			8.2	3.3
Optimipainos [kg/m <sup>3</sup> ]	3.0		Max hormi: 12kg 45000re								
Optimipainos / m <sup>3</sup>	4.65										

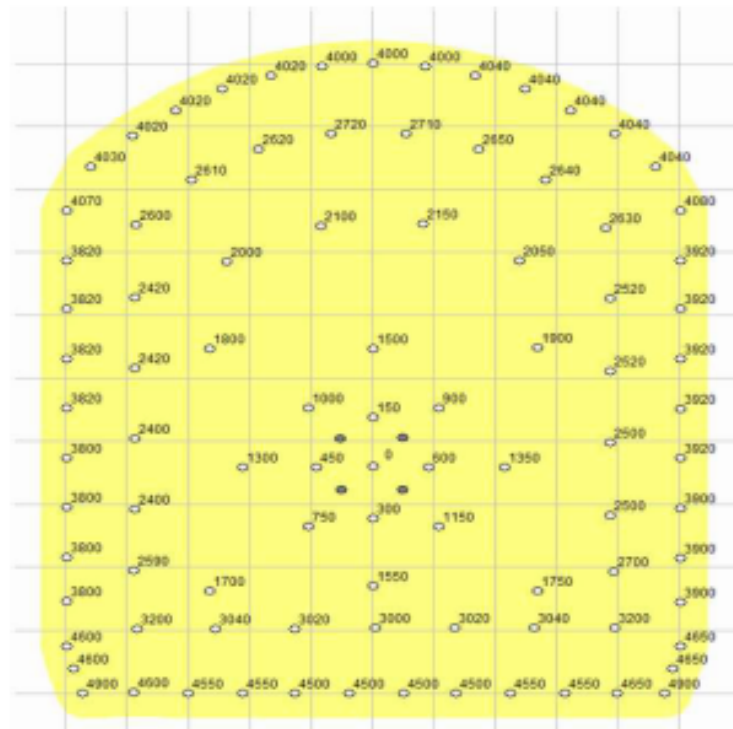
	Reikäväli [S]	Etä [B]
Kaarinreikä	0.4	0.6
Apukoulu	0.6	0.8
Kenttä	0.8	0.8
Pohjan apukoulu	0.6	0.5
Pohja	0.4	0.6
Aava		

Sytytys: DT III, ks. erillinen suunnitelma

Ponostaja: \_\_\_\_\_

Räjätysjärjestelmä: \_\_\_\_\_

Sytytysuunnitelma D2d



LOVA 2014 RÄJÄYTYSSUUNNITELMAT

KENTTÄ 4/LOVA 2014

Tunnus	Kenttä Nro	Pinta-ala	Kohde	Pvm							
<b>SANDVIK</b>	<b>1/LOVA2014</b>	<b>22.40</b>	<b>EDZ tutkimus</b>	<b>2.9.2014</b>							
		Kierroin S lautas m <sup>2</sup>	Porareilin holkki sija	Täsi nämitoukset							
		<b>100</b>	<b>48</b>	2 mittaria, kulkun yllä ja alapöytä							
	Teoreettinen katkos piti	Räjätys aika	Porareilin pituus	Panostajat							
	<b>5.0</b>	<b>16.00</b>	3 m	täsi raouassa							
				Räjätysryöhtäjä							
				täsi raouassa							
Kohde	Reikien luv	Räjätysaika tyyppi	Pohjapanos	Värispanos	Yhteensä / reikki		Panostusmäärä	Kg/kohde	Sytytys		
			Panosuus [kg]	Pituus [m]	Panosuus [kg/m]	Pituus [m]	Pituus [m]	Panosuus [kg]	Pituus [m]	LP/DT II	
Kaarielit	35	Forpime 1900s, K80	0.95	0.50	0.40	4.50	5.00	2.35	0	98.2	LP/DT II
Apukaan	18	Forpime 1900s, K80	0.95	0.50	0.50	4.40	4.90	3.75	0.1	56.7	LP/DT II
Pohja	12	Forpime 1900s, K80	0.95	0.50	0.50	4.50	5.00	3.20	0	56.4	LP/DT II
Pohjan apulinja	7	Forpime 1900s, K80	0.95	0.50	0.70	4.40	4.90	4.03	0.1	28.2	LP/DT II
Avaus	12	Forpime 1900s, K80	0.0	0.0	1.80	4.70	4.70	8.46	0.3	101.5	DT II
Kenttä	0	Forpime 1900s, K80	1.5	0.70	1.30	4.10	4.60	6.43	0.3	57.8	DT II
Yhteensä	82										
Suunnitelt	4										
Parametrit	469.00	Maanaukukset							Teoreettiset kirot (kg)	328.8	
Panostetut parametrit	397.10	Väärällinen alus: 200m tunnelin suun suuntaisesti, sivulle 50m ja värisen kulkun päällä 20m väleillä							Rakennuspanostus (kg)	406.4	SCM
Ominaispanostus [kg/m <sup>2</sup> ]	3.73	Max moin: 10kg 4000s							Eristus	27.3	7.3
Ominaispanostus / m <sup>2</sup>	4.65										

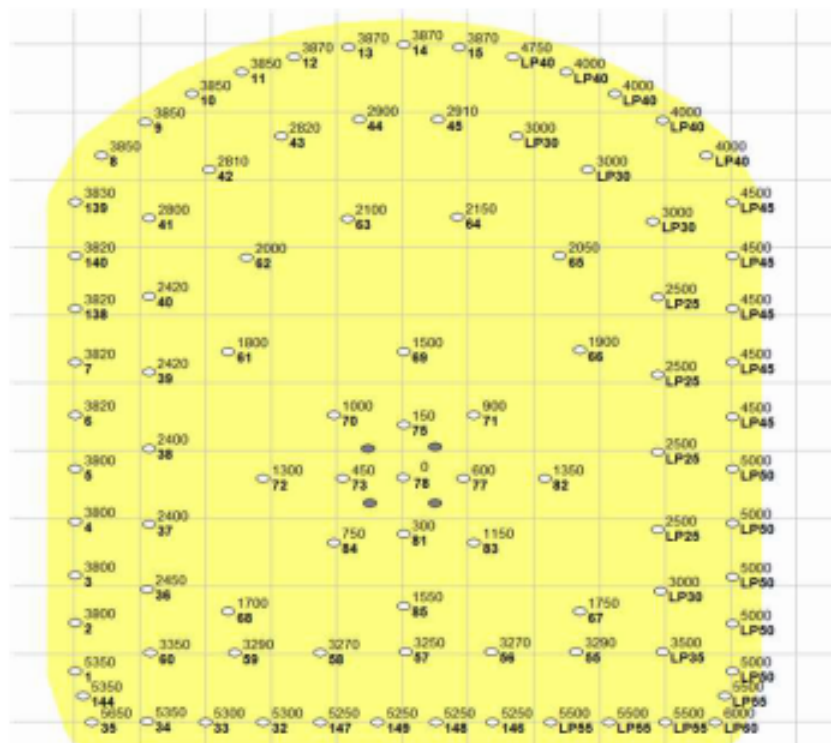
	Reikäväli (A)	Etä (B)
Kaarielit	0.4	0.6
Apukaan	0.6	0.8
Kenttä	0.8	0.8
Pohjan apulinja	0.6	0.5
Pohja	0.4	0.6
Avaus		

Sytytys: DT II, ks. erillinen suunnitelma

Panostaja: \_\_\_\_\_

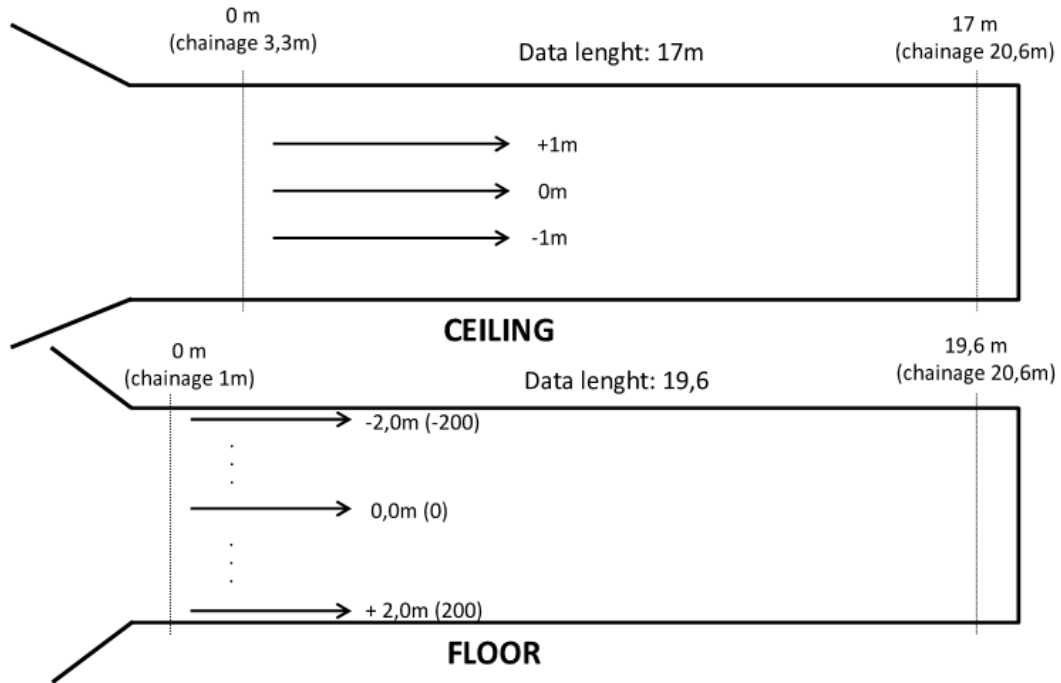
Räjätysryöhtäjä: \_\_\_\_\_

Sytytysuunnitelma D2d

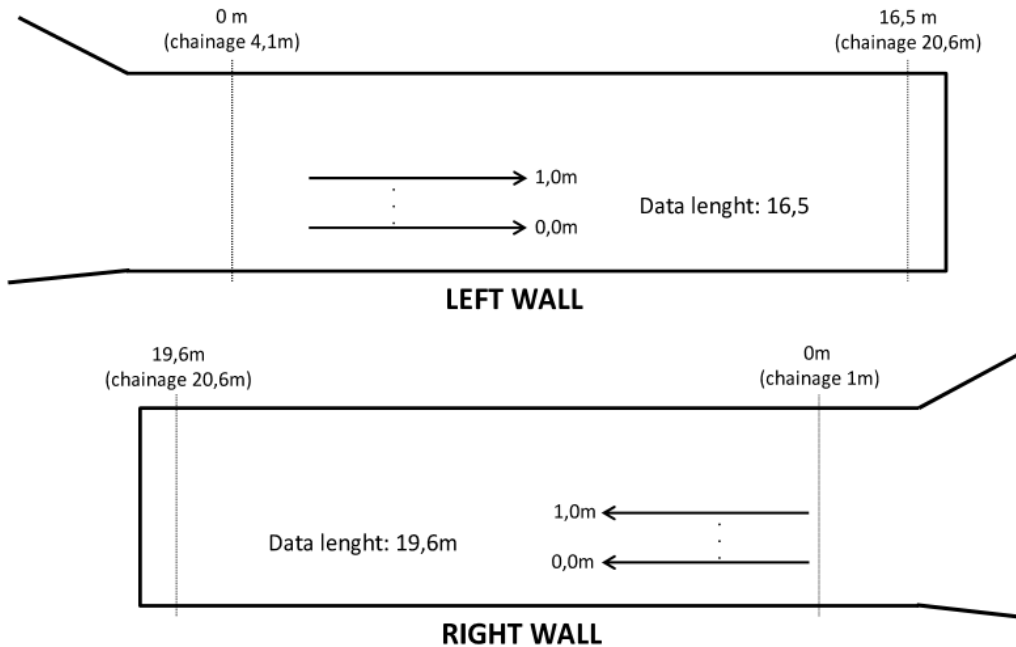


LOVA 2014 MITTAUSSUUNNITELMAT

Alla olevissa kuvissa on havainnollistettu testitunnelin GPR EDZ mittalinjat, sekä näyt-  
teiden ottopaikat.



Katosta tutkattiin kolme linjaa ja lattiasta 41 linjaa

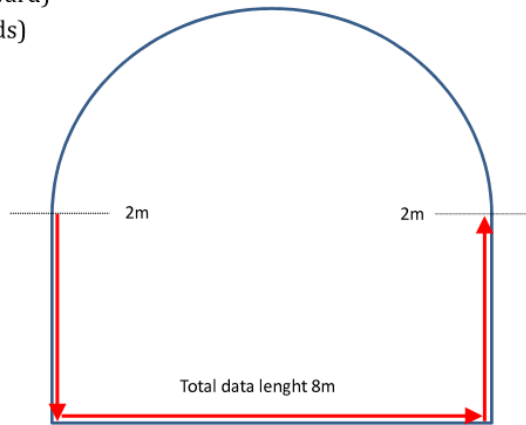


Molemmista seinistä tutkattiin 11 linjaa

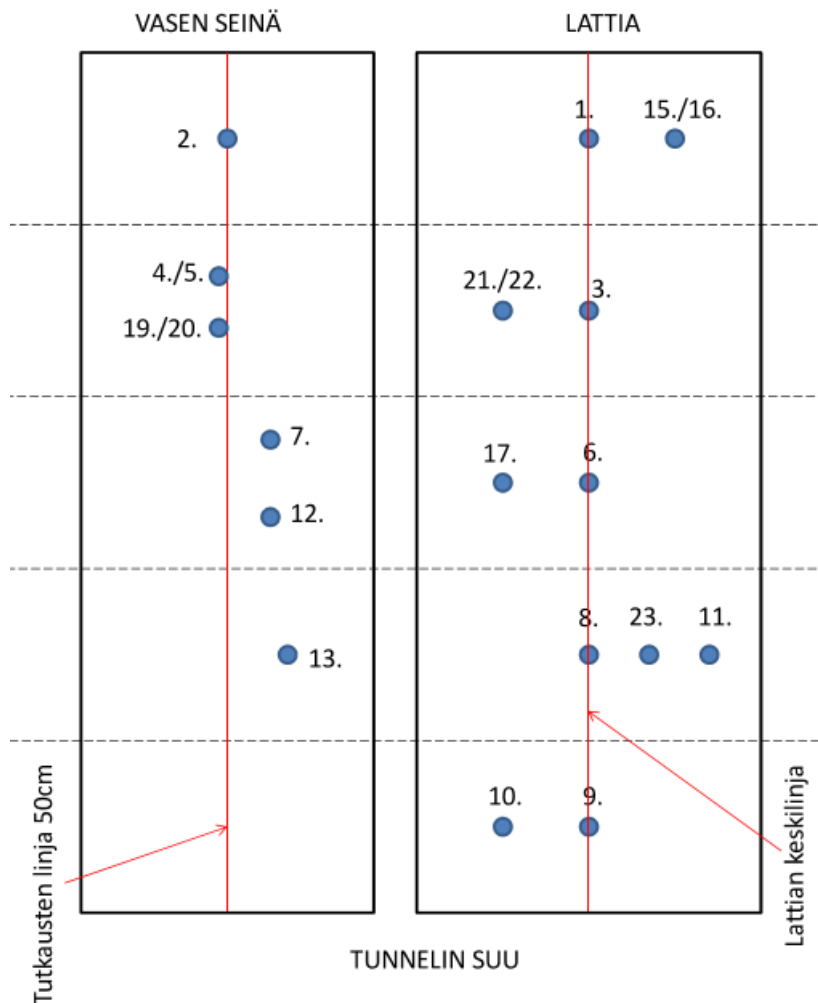
LOVA 2014 MITTAUSSUUNNITELMAT

- 11 cross lines were measured.
- Three lines covered left wall, floor and right wall.
- Three lines were measured on left wall (downward)
- Five lines were measured on right wall (upwards)

SURFACE	LOCATION TUNNEL	LOCATION GPR CHAINAGE	DATA LENGHT
LEFT-FLOOR-RIGHT	2,4	1,4	8
LEFT-FLOOR-RIGHT	4,4	3,4	8
LEFT WALL	10,6	9,6	2
LEFT WALL	11,65	10,65	2
LEFT WALL	11,65	10,65	2
RIGHT WALL	14,95	13,95	2
RIGHT WALL	14,95	13,95	2
RIGHT WALL	16,56	15,56	2
RIGHT WALL	16,56	15,56	2
RIGHT WALL	19	18	8
LEFT-FLOOR-RIGHT	20,15	19,15	8



Pitkittäisten linjojen lisäksi tutkattiin 11 poikittaista linjaa kuvan mukaisesti.



Kairanäytteiden sijainti testitunnelissa

## LOVA 2014 PETROFYSIIKAN TESTITULOKSET

Alla oleviin taulukoihin on koottuna LOVA 2014 näytteiden tulokset emulsiokatkojen osalta (katko 1-4)

SAMPLE	LOCATION	LENGTH [mm]	DENSITY [kg/m <sup>3</sup> ]	P-WAVE [m/s]	RESISTIVITY VALUES			IP-ESTIMATES		POROSITY [%]
					R0.1[ohmm]	R10 [ohmm]	R500[ohmm]	PL [%]	PT [%]	
LOVA-K1-9.1	FLOOR	50,6	2685	5679	40600	39000	36200	4	11	0,52
LOVA-K1-9.2		50,7	2685	6026	36500	35200	32700	4	10	0,53
LOVA-K1-9.3		50,9	2682	6049	32400	31300	29100	3	10	0,51
LOVA-K1-9.4		50,8	2728	6027	29800	28700	26500	4	11	0,41
LOVA-K1-9.5		50,7	2714	5989	29400	28200	26300	4	11	0,44
AVERAGE		50,7	2698,8	5954,0	33740,0	32480,0	30160,0	3,8	10,6	0,5
LOVA-K1-10.1	FLOOR	50,6	2789	5958	23900	23000	20700	4	13	0,37
LOVA-K1-10.2		51,0	2759	6142	27600	26500	24000	4	13	0,41
LOVA-K1-10.3		50,7	2702	6263	29900	28800	26700	4	11	0,46
LOVA-K1-10.4		24,3	2703	6505	34300	33200	30700	3	10	0,51
LOVA-K1-10.5		50,5	2685	6410	31000	29800	27700	4	11	0,51
AVERAGE		45,4	2727,6	6255,6	29340,0	28260,0	25960,0	3,8	11,6	0,5

## Katkon 1 näytteiden tulokset

SAMPLE	LOCATION	LENGTH [mm]	DENSITY [kg/m <sup>3</sup> ]	P-WAVE [m/s]	RESISTIVITY VALUES			IP-ESTIMATES		POROSITY [%]
					R0.1[ohmm]	R10 [ohmm]	R500[ohmm]	PL [%]	PT [%]	
LOVA-K2-8.1	FLOOR	21,8	2711	6249	71600	68300	60000	5	16	0,45
LOVA-K2-8.2		25,1	2716	5857	58600	56100	49500	4	16	0,44
LOVA-K2-8.3		28,4	2732	5935	47100	45100	40200	4	15	0,39
AVERAGE		25,1	2719,7	6013,7	59100,0	56500,0	49900,0	4,3	15,7	0,4
LOVA-K2-11.1	FLOOR	45,1	2702	5901	23100	22300	20800	3	10	0,58
LOVA-K2-11.2		50,9	2719	5546	13000	12700	12000	2	8	0,73
LOVA-K2-11.3		50,2	2696	5263	9550	9230	8790	3	8	0,88
AVERAGE		48,7	2705,7	5570,0	15216,7	14743,3	13863,3	2,7	8,7	0,7
LOVA-K2-13.1	WALL	46,4	2687	5923	51900	49300	43100	5	17	0,53
LOVA-K2-13.2		50,9	2701	5922	33300	31900	29100	4	13	0,50
LOVA-K2-13.3		50,8	2719	5762	18600	17900	17000	4	9	0,47
LOVA-K2-13.4		50,8	2691	5283	10500	10100	9690	4	8	0,78
AVERAGE		49,7	2699,5	5722,5	28575,0	27300,0	24722,5	4,3	11,8	0,6
LOVA-K2-23.1	FLOOR	27,8	2708	6327	45100	43400	39300	4	13	0,42
LOVA-K2-23.2		50,8	2702	5728	48100	46200	41500	4	14	0,44
LOVA-K2-23.3		50,8	2718	5764	40400	38700	35000	4	13	0,50
LOVA-K2-23.4		38,1	2707	6263	56800	54500	48300	4	15	0,42
LOVA-K2-23.5		50,7	2695	6112	55200	52900	46200	4	16	0,42
AVERAGE		43,6	2706,0	6038,8	49120,0	47140,0	42060,0	4,0	14,2	0,4

## Katkon 2 näytteiden tulokset

## LOVA 2014 PETROFYSIIKAN TESTITULOKSET

SAMPLE	LOCATION	LENGTH [mm]	DENSITY [kg/m <sup>3</sup> ]	P-WAVE [m/s]	RESISTIVITY VALUES			IP-ESTIMATES		POROSITY [%]
					R0.1[ohmm]	R10 [ohmm]	R500[ohmm]	PL [%]	PT [%]	
LOVA-K3-6.1	FLOOR	50,9	2708	6107	26400	25100	22000	5	17	0,51
LOVA-K3-6.2		51,3	2656	5900	59100	56200	48600	5	18	0,60
LOVA-K3-6.3		50,6	2693	6077	34400	32700	28400	5	17	0,62
LOVA-K3-6.4		36,6	2692	5421	7680	7440	7040	3	8	1,10
AVERAGE		47,3	2687,3	5876,3	31895,0	30360,0	26510,0	4,5	15,0	0,7
LOVA-K3-7.1	WALL	50,9	2701	5761	21500	20500	19000	5	12	0,69
LOVA-K3-7.2		51,1	2709	5966	46600	44500	39200	5	16	0,50
LOVA-K3-7.3		51,0	2708	6211	46700	44400	37800	5	19	0,52
LOVA-K3-7.4		32,7	2690	5276	41100	39500	35700	4	13	0,67
AVERAGE		46,4	2702,0	5803,5	38975,0	37225,0	32925,0	4,8	15,0	0,6
LOVA-K3-12.1	WALL	50,6	2706	6061	60700	57300	47400	6	22	0,57
LOVA-K3-12.2		51,0	2725	5851	40300	38700	34400	4	15	0,51
LOVA-K3-12.3		51,3	2704	5657	28600	27600	25600	3	10	0,69
LOVA-K3-12.4		51,1	2723	5891	46700	44600	38600	4	17	0,51
LOVA-K3-12.5		44,5	2718	6020	53400	50800	43800	5	18	0,47
AVERAGE		49,7	2715,2	5896,0	45940,0	43800,0	37960,0	4,4	16,4	0,6
LOVA-K3-17.1	FLOOR	50,9	2709	5835	37900	36500	33000	4	13	0,47
LOVA-K3-17.2		51,1	2714	5770	35000	33500	30500	4	13	0,51
LOVA-K3-17.3		50,8	2692	5640	33400	31900	29200	4	13	0,59
LOVA-K3-17.4		36,7	2718	5878	34200	32900	29800	4	13	0,50
AVERAGE		47,4	2708,3	5780,8	35125,0	33700,0	30625,0	4,0	13,0	0,5

## Katkon 3 näytteiden tulokset

SAMPLE	LOCATION	LENGTH [mm]	DENSITY [kg/m <sup>3</sup> ]	P-WAVE [m/s]	RESISTIVITY VALUES			IP-ESTIMATES		POROSITY [%]
					R0.1[ohmm]	R10 [ohmm]	R500[ohmm]	PL [%]	PT [%]	
LOVA-K4-3.1	FLOOR	50,8	2727	5857	26000	25000	23400	4	10	0,45
LOVA-K4-3.2		51,1	2687	6551	25200	24300	22900	4	9	0,47
LOVA-K4-3.3		42,1	2662	6172	34000	32900	31300	3	8	0,56
LOVA-K4-3.4		50,6	2687	5438	16100	15700	15000	2	7	0,74
AVERAGE		48,6	2690,8	6004,5	25325,0	24475,0	23150,0	3,3	8,5	0,6
LOVA-K4-4.1	WALL	50,8	2701	6316	30300	29200	27200	4	10	0,42
LOVA-K4-4.2		50,9	2685	6100	29900	28800	27000	4	10	0,46
LOVA-K4-4.3		48,5	2692	5765	35500	34100	31900	4	10	0,52
LOVA-K4-4.4		51,1	2712	5836	30900	29800	27800	4	10	0,43
LOVA-K4-4.5		51,1	2718	5810	32500	31300	29200	4	10	0,40
AVERAGE		50,5	2701,6	5965,4	31820,0	30640,0	28620,0	4,0	10,0	0,4
LOVA-K4-19.1	WALL	51,2	2698	6145	46800	44900	41200	4	12	0,41
LOVA-K4-19.2		51,5	2703	6250	44000	42200	38700	4	12	0,41
LOVA-K4-19.3		51,6	2700	6132	40000	38500	35300	4	12	0,45
LOVA-K4-19.4		41,4	2690	6444	43200	41600	38500	4	11	0,43
LOVA-K4-19.5		50,7	2711	5829	35400	34000	31500	4	11	0,44
AVERAGE		49,3	2700,4	6160,0	41880,0	40240,0	37040,0	4,0	11,6	0,4
LOVA-K4-21.1	FLOOR	51,1	2713	6173	29700	28500	26800	4	10	0,42
LOVA-K4-21.2		48,4	2718	6092	30000	28700	27000	4	10	0,42
LOVA-K4-21.3		51,4	2695	6248	33900	32500	30400	4	10	0,46
LOVA-K4-21.4		51,0	2726	5722	29400	28300	26400	4	10	0,45
LOVA-K4-21.5		50,6	2724	6049	26600	25500	23900	4	10	0,44
AVERAGE		50,5	2715,2	6056,8	29920,0	28700,0	26900,0	4,0	10,0	0,4

## Katkon 4 näytteiden tulokset