



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VEIKKO HÄRÖ  
GRANIITIN MYÖTÖNOPEUSHERKKYYS LEIKKAUSKOKEESSA

Diplomityö

Tarkastaja: Apulaisprofessori Mikko Hokka  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Teknillisten  
tieteiden tiedekuntaneuvoston kokoukses-  
sa 29. marraskuuta 2017

## TIIVISTELMÄ

**VEIKKO HÄRÖ:** Graniitin myötönopeuserkkyys leikkauskokeessa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 36 sivua

Toukokuu 2018

Materiaalitekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Metallimateriaalit

Tarkastaja: Apulaisprofessori Mikko Hokka

**Avainsanat:** graniitti, myötönopeuserkkyys, leikkauskoe, mode II, murtumismekaniikka, dynaaminen murtumismekaniikka

Tieto kivilajien leikkausmyötönopeuserkkyyydestä on tärkeässä asemassa etenkin kalli-  
on ja kiven poraamiseen liittyvissä sovelluksissa. Kiven lujuuden kasvaminen poraa-  
misnopeuden kasvaessa voi aiheuttaa merkittäviä kustannuksia terien ja laitteiden ku-  
lumisen muodossa, mikäli porattavan kiven leikkausmyötönopeuserkkyysominaisuutta  
ei tunneta tai oteta huomioon. Tässä työssä tarkastellaan ja vertaillaan kahden Suomessa  
yleisen kalliokivilajin: Kurun harmaan graniitin ja Taivassalon punaisen graniitin leik-  
kausmyötönopeuserkkyyttä näennäisstaattisissa ja dynaamisissa myötönopeuksissa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on määrittää Taivassalon punaisen graniitin ja Kurun  
harmaan graniitin leikkausmyötönopeudet ja tarkastella niiden keskinäisiä eroavuuksia.  
Lisäksi tarkoituksena on tarkastella kriittisesti käytettyjen menetelmien luotettavuutta ja  
esittää niihin parannusehdotuksia mahdollisia tulevia kokeita varten.

Koejärjestelyä varten valmistettiin korkillinen näytteenpidike. Näennäisstaattisen myö-  
tönopeuden kokeet suoritettiin Instron 8801 –mallisella servohydraulisella aineen-  
koetuslaitteistolla. Dynaamisen myötönopeuden kokeet suoritettiin Split Hopkinson  
Pressure Bar –laitteistolla. Molemmilla laitteilla suoritettiin kokeet kahdella eri myötö-  
nopeudella molemmille kivilajeille. Kokeista saadut tulokset muutettiin vertailukelpoi-  
siksi, minkä jälkeen niitä vertailtiin kivilajien ja kuormitusnopeuksien kesken.

Koe vahvisti, että kivinäytteiden murtojännitys kasvoi kuormitusnopeuden kasvaessa.  
Koetulosten tarkkuus ja todenmukaisuus jäivät kuitenkin kyseenalaisiksi etenkin Kurun  
harmaan graniitin koetulosten hajanaisuuden vuoksi. Tämän vuoksi koejärjestelyjä olisi  
muutettava ja kokeita tehtävä lisää, ennen kuin lopullisia tuloksia graniittilajien leikka-  
usmyötönopeuserkkyyksien arvoista voitaisiin julistaa. Etenkin näytteenpidikkeen  
geometriaa täytyy muuttaa iskupulssin dispersion vähentämiseksi dynaamisissa myötö-  
nopeuksissa. Myös kivinäytteiden poraamisessa on suositeltavaa noudattaa erityistä  
varovaisuutta, jotta ne eivät vahingoittuisi enneaikaisesti.

## ABSTRACT

**VEIKKO HÄRÖ:** Strain rate sensitivity of granite in a shear test

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 36 pages

May 2018

Master's Degree Programme in Material Engineering

Major: Metal Materials

Examiner: Assistant Professor Mikko Hokka

**Keywords:** granite, strain rate sensitivity, shear test, mode II, fracture mechanics, dynamic fracture mechanics

Knowledge of shear strain rate sensitivity is of great importance in rock drilling and boring applications. The increase in rock strength as the drilling rate is increased can cause significant expenses in form of wear and tear of drill bits and other equipment if the shear strain rate sensitivity of the drilled rock is not known or not taken into consideration. In this thesis two common rock types in Finnish bedrock is being examined and compared, Kuru Grey granite and Balmoral Red granite in quasi-static and dynamic strain rates.

The goal of this study is to determine strain rate sensitivity of Balmoral Red granite and Kuru Grey granite in shear loading and to compare their differences. In addition, the used methods are to be examined critically and suggestions for improvements are to be made for possible future experiments.

For this experimental setup, a custom made capped jig was made. Experiments of quasi-static strain rate were conducted with an Instron model 8801 servo-hydraulic fatigue testing system. Experiments of dynamic strain rate were conducted with a Split Hopkinson Pressure Bar system. For both systems, two different strain rates were used for both rock types. Results of the experiments were converted to be comparable, after which they were compared between rock types and loading rates.

The experiment confirmed, that yield strength of the rock specimen increased when the strain rate was increased. The accuracy and veracity of the test results were left questionable especially due to the scattered nature of the test results of Kuru grey granite. Because of this, changes in the experimental setup must be made and more experiments must be performed before conclusive results for shear strain rate sensitivity for the granite types can be announced. Especially the geometry of the test jig must be changed to reduce dispersion of the striker pulse in dynamic strain rates. It is also advised to exercise extreme caution when drilling the rock specimen so that they will not be damaged prematurely.

## **ALKUSANAT**

Tämä opinnäytetyö on kirjoitettu Tampereen teknillisen yliopiston Teknillisten tieteiden laitokselle osana materiaalitekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa. Se käsittelee kahden eri graniittilajin, Kurun harmaan graniitin ja Taivassalon punaisen graniitin myötönpeusherkkyysien määrittämistä leikkauskokeessa.

Haluan kiittää Mikko Hokkaa työn aiheen ehdottamisesta, ammattitaitoisesta ja kannustavasta ohjaamisesta sekä avustamisesta työn kokeellisen osuuden suorittamisessa. Haluan myös kiittää Ari Varttilaa näytteenpidikkeen ja sen korkin valmistamisesta sekä avusta niiden suunnittelussa.

Tampere 16.5.2018

Veikko Härö

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ .....	I
1 JOHDANTO .....	1
1.1 Aiempi tutkimus .....	1
1.2 Työn tavoitteet .....	2
1.3 Työn rakenne .....	3
2 MURTUMISTEORIAA .....	4
2.1 Keraamien sidokset ja mikrorakenteet .....	4
2.2 Murtuman ilmeneminen .....	5
2.3 Kuormituksen ilmenemismuodot .....	6
2.4 Kappaleen murtuminen .....	8
2.4.1 Yleistä murtumisteoriaa .....	9
2.4.2 Dynaaminen murtumismekaniikka .....	10
3 LAITTEISTOT JA NIIDEN TOIMINTA .....	12
3.1 Alkuvalmistelut .....	12
3.1.1 Tarkasteltavat graniittilajit .....	12
3.1.2 Kivinäytteiden valmistus ja näytteenpidike .....	13
3.2 Instron .....	15
3.3 Split Hopkinson Pressure Bar .....	16
4 TULOKSET .....	18
4.1 Kivinäytteet kokeen jälkeen .....	18
4.2 Jännitys-aika-käyrät .....	20
4.2.1 Instron .....	20
4.2.2 SHPB .....	24
4.3 Myötönpeusherkkyys .....	30
4.4 Menetelmän soveltuvuus ja sen arviointi .....	32
5 YHTEENVETO .....	34
LÄHTEET .....	35

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1:</b>	<i>Murtumismekaniikan kolme eri ilmenemismuotoa [10].....</i>	7
<b>Kuva 2:</b>	<i>Kiven poraamiseen käytetty terä.....</i>	13
<b>Kuva 3:</b>	<i>Poratut kivinäytteet: vasemmalla Taivassalon punainen graniitti ja oikealla Kurun harmaa graniitti.....</i>	14
<b>Kuva 4:</b>	<i>Näytteenpidikkeen dimensiot.....</i>	14
<b>Kuva 5:</b>	<i>Näytteenpidikkeen korkin dimensiot.....</i>	15
<b>Kuva 6:</b>	<i>Instron-laitteisto käyttövalmiina.....</i>	16
<b>Kuva 7:</b>	<i>Näytteenpidike on asetettuna Split Hopkinson Pressure Bar – laitteistoon, joka on valmiina laukaistavaksi.....</i>	17
<b>Kuva 8:</b>	<i>Instron-kokeissa rikottuja näytteitä.....</i>	18
<b>Kuva 9:</b>	<i>SHPB-kokeissa rikottuja näytteitä.....</i>	20
<b>Kuva 10:</b>	<i>Kurun harmaan graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 1 mm/min iskunopeudella.....</i>	21
<b>Kuva 11:</b>	<i>Kurun harmaan graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 50 mm/min iskunopeudella.....</i>	22
<b>Kuva 12:</b>	<i>Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 1 mm/min iskunopeudella.....</i>	22
<b>Kuva 13:</b>	<i>Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 50 mm/min iskunopeudella.....</i>	23
<b>Kuva 14:</b>	<i>Esimerkki SHPB-testin etutangon venymäliuskan tuottamasta datasta.....</i>	25
<b>Kuva 15:</b>	<i>Kohdistetut iskupulssi ja heijastunut pulssi, sekä niiden disperiokorjatut muodot.....</i>	25
<b>Kuva 16:</b>	<i>Etutankoon kohdistuneet voimat iskupulssin ja heijastuneen pulssin aikana, sekä niiden summavoima.....</i>	26
<b>Kuva 17:</b>	<i>Etutankoon kohdistuneet jännitykset pulssin aikana, sekä niiden summajännitys.....</i>	27
<b>Kuva 18:</b>	<i>Kurun harmaan graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 1 bar iskutangon paineella.....</i>	27
<b>Kuva 19:</b>	<i>Kurun harmaan graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 2 bar iskutangon paineella.....</i>	28
<b>Kuva 20:</b>	<i>Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 1 bar iskutangon paineella.....</i>	28
<b>Kuva 21:</b>	<i>Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 2 bar iskutangon paineella.....</i>	29
<b>Kuva 22:</b>	<i>Kurun harmaan graniitin leikkausjännitysten keskiarvot ja –hajonnat iskunopeuden suhteen sekä niistä muodostettu eksponentiaalinen trendikäyrä.....</i>	30

**Kuva 23:** *Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännityksen keskiarvot ja –  
hajonnat iskunopeuden suhteen sekä niistä muodostettu  
eksponentiaalinen trendikäyrä. ....31*

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

et al. SHPB	lat. Et alii tai et aliae, ja muut Split Hopkinson Pressure Bar
a	loven leveys murtumassa
$A_b$	tangon poikkipinta-ala
B	kappaleen paksuus
$B_s$	näytteen paksuus
E	materiaalin kimmomoduuli
$E_b$	tangon kimmomoduli
F	voima
K	kappaleen jännitysintensiiteettikerroin
$K_t$	loven jännityksen keskittämiskerroin
r	etäisyys murtuman kärjestä
$r_b$	työntötapin/tangon poikkisäde
t	aika
$U_{st}$	alueen jännitysenergia
$U_{su}$	alueen pintaenergia
$U_{tot}$	murtuman alueen kokonaisenergia
v	iskunopeus kokeessa
$\gamma_s$	murtumapintojen muodostumisenergia
$\varepsilon_c$	dispersiokorjattu myötymä
$\theta$	kulma suhteessa murtuman etenemissuuntaan
$\nu$	materiaalin Poissonin vakio
$\rho$	loven kaarevuussäde
$\sigma_c$	murtuman etenemistä edistävä kappaleeseen kohdistuva kriittinen jännitys
$\sigma_{ij}$	murtuma-alueen jännitystilän xyz-koordinaatiston mukaiset jännitystilat
$\Sigma_{ij}$	jännityskomponenttien kulmanvaihtelua kuvaava termi
$\sigma_{ij}^{(1)}$	tapauskohtainen lisätermi murtuman moodien matemaattiselle ratkaisulle
$\tau$	leikkausjännitys
$\tau_F$	murtoleikkausjännitys leikkauskokeessa



# 1 JOHDANTO

Kiviä on käytetty rakennusmateriaalina kautta aikojen. Tämän vuoksi niitä on myös tutkittu paljon. Niiden rakenne ja koostumus vaihtelevat ympäri maailmaa, mutta yleisesti ottaen ne ovat lujia ja hauraita. Lujuutensa ja yleisyytensä vuoksi kiviä on käytetty ja käytetään jossain määrin edelleen kantavina rakenteina. Tämän vuoksi tutkimus on kohdistettu pääasiassa kivien kestävyysolosuhteissa. Myös leikkaus- ja puristusolosuhteiden yhteisvaikutusta on tutkittu jonkin verran. Sen sijaan puhtaaseen leikkausjännitykseen perustuvaa tutkimusta kivistä ei ole saatavilla juuri lainkaan. Tästä tiedosta on hyötyä esimerkiksi kivien ja kalliooperän poraamista koskevissa tapauksissa. Useampaa kivilajia tutkittaessa samoilla menetelmillä voidaan saada selville myös kivien koostumuksen ja rakenteen vaikutukset kyseisten kivilajien mekaanisiin ominaisuuksiin.

Haurautensa vuoksi kivi ei ole optimaalinen vaihtoehto rakennusmateriaalina. Hauras materiaali voi rikkoutua hyvin äkillisesti ja varoittamatta aiheuttaen odottamattomia rikkoutumisia ja pahimmillaan vaaratilanteita. Kivien heterogeeninen rakenne, sisäiset virheet, raekoon vaihtelu ja rakeiden välinen koheesio ovat muutamia monista muuttujista, jotka vaikuttavat kiven murtumiskäyttäytymiseen. Haurasmurtumalle on teorioita ja sitä voidaan simuloida matemaattisilla malleilla, mutta käytäntö poikkeaa monesti niistä hyvin paljon. Siksi sen käyttäytymistä on tutkittava kattavasti käyttötarkoituksesta riippuen, jotta kiven käyttäminen rakenteissa olisi turvallista. Kiville onkin tehty paljon tapauskohtaisia kokeita, jotta pystytään kartoittamaan niiden ominaisuuksien ääripäitä.

Tieto kiven leikkausmyötönnopeuserkkyyydestä on merkittävässä osassa kalliooperän ja kivien poraamisovelluksissa. Kiven lujuuden kasvaminen myötönnopeuden kasvaessa voi johtaa poran terien merkittävään kulumiseen ja laitteiden hajoamiseen, jos leikkausmyötönnopeuserkkyysominaisuutta ei oteta huomioon. Poraamisen kohdemateriaalina olevan kivilajin leikkausmyötönnopeuserkkyuden tuntemalla on mahdollista valita porauslaitteisto ja terä sekä porausnopeus, joilla poraaminen onnistuu taloudellisimmalla mahdollisella tavalla.

## 1.1 Aiempi tutkimus

Zhao [1] on koennut artikkelissaan viime vuosikymmenien aikana tapahtuneita merkittävimpiä edistysaskeleita kividynamiikassa. Hän päätelee Zhao *et al.* [2] (katso [1]) ja Fu-kuin *et al.* [3] (katso [1]) tutkimusten pohjalta, että kivimateriaalin leikkausjännitys on riippuvainen myötönnopeudesta. Tulokset viittaavat siihen, että kuormitusnopeuden kasvaessa kertaluokkaa suuremmaksi leikkauslujuus kasvaa noin 10%. Zhao [4] (katso

[1]) tutkimus viittaa lisäksi siihen, että tämä leikkauslujuuden muutos johtuu koheesion eikä kitkakulman muutoksesta. Kazeranin [5] (katso [1]) sekä Kazeranin ja Zhaon [6, 7] (katso [1]) suorittamat erilliselementtimallinnukset (engl. discrete element modeling) murtuvalle kiville johtivat seuraaviin johtopäätöksiin. Myötönopeusherkkyyteen vaikuttavat mikrorakenteen sisäiset myötönopeudesta riippuvaiset ominaisuudet, kivimateriaalin koostumuksen rakenteelliset myötönopeudesta riippuvaiset ominaisuudet ja koejärjestelyt. Mikrorakenteen sisäiset myötönopeudesta riippuvaiset ominaisuudet syntyvät mikroelementtien välisestä koheesiosta. Kivimateriaalin koostumuksen rakenteelliset myötönopeudesta riippuvat ominaisuudet ovat peräisin mineraalien raerakenteesta ja homogeenisuudesta. Koejärjestelyt vaikuttavat myötönopeusherkkyysominaisuuksiin kuormituksen ja kannattimien loppukitkan muodossa.

Cho ja Kaneko [8] havaitsivat suurien kuormitusnopeuksien tuottavan kivessä paljon uusia mikromurtumia. Tällöin uudet mikromurtumat laukaisivat materiaalin sisäisiä jännityksiä, minkä seurauksena murtumat eivät edenneet niin pitkälle kuin hitaammilla kuormitusnopeuksilla. Hitailta kuormitusnopeuksilla murtumia syntyi vähän, mutta ne etenivät huomattavasti pidemmälle. Tutkimuksessa havaittiin myös, että kiven murtumiskäyttäytymiseen vaikutti pääasiassa kuormituksen kasvunopeus ja huippuarvo, ei kuormituksen laskunopeus.

Huang *et al.* [9] tutkivat hauraiden materiaalien leikkauslujuutta eri myötönopeuksilla. He käyttivät työssään Split Hopkinson Pressure Bar –laitteistoa, tarkoitusta varten luotua näytteenpidikettä, pulssinmuokkaustekniikkaa ja momenttiansatekniikkaa. Tämän työn lähestymisperiaate on sama, mutta kahdelle eri graniittilajille hienorakeisen hiekkakiven sijaan. Tässä työssä ei myöskään käytetty momenttiansatekniikkaa, koska näytteen jälkitarkastelua ei nähty tarpeelliseksi.

## 1.2 Työn tavoitteet

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan kahden Suomessa yleisen graniittilajin, Kurun harmaan graniitin ja Taivassalon punaisen graniitin leikkausmyötönopeusherkkyyttä näennäisstaattisissa ja dynaamisissa myötönopeuksissa. Kivilajien leikkausmyötönopeusherkkyyden selvittämisen lisäksi tarkoituksena on vertailla näitä kivilajeja keskenään. Tällä työllä on myös tarkoitus tarkastella leikkausmyötönopeusherkkyyden määrittämiseen käytettyä menetelmää kriittisesti. Kriittisen tarkastelun pohjalta voidaan edelleen pohtia parannuksia, joilla menetelmästä saataisiin tulevaisuudessa luotettavampi.

Näennäisstaattisilla myötönopeuksilla tehtävät kokeet suoritetaan Instron 8801-mallisella servohydraulisella aineenkoetuslaitteistolla. Näennäisstaattisella tarkoitetaan myötönopeuksia, joilla tarkasteltavalla materiaalilla on riittävästi aikaa sopeutua muodonmuutokseen. Dynaamisen myötönopeuden kokeet puolestaan suoritetaan Split Hopkinson Pressure Bar –laitteistolla. Työssä tarkastellaan kahden eri graniittilajin, Kurun

harmaan graniitin ja Taivassalon punaisen graniitin myötönopeuserkkyysominaisuuksia ja vertaillaan niitä keskenään.

### **1.3 Työn rakenne**

Työ koostuu kolmesta pääosioista. Luvussa 2 tarkastellaan murtumisteoriaa. Aluksi murtumisteoriaa pohjustetaan tarkastelemalla materiaalien mikrorakennetta ja atomisidoksia. Siitä siirrytään tarkastelemaan murtuman ilmenemistä makrotasolla ja kuormituksen ilmenemismuotoihin. Lopuksi esitellään murtumismekaniikan ja dynaamisen murtumismekaniikan teorian pääkohtia. Luvussa 3 keskitytään kokeessa käytettyihin laitteisiin ja niiden toimintaan. Ensiksi tarkastellaan kokeessa tarvittavien oheistyökalujen valmistamiseen ja näytteiden valmistukseen. Siitä jatketaan Instron- ja Split Hopkinson Pressure Bar – laitteistojen tarkasteluun edellä mainitussa järjestyksessä. Luku 4 käsittelee suoritettuja koetuloksia ja niistä tehtyjä johtopäätöksiä. Luvun ensimmäisessä osassa tarkastellaan koenäytteitä kokeen jälkeen. Tästä siirrytään koelaitteistokohtaisesti jännitys-aika-käyrien luomiseen raakadatasta. Seuraavassa osiossa tarkastellaan koetuloksien pohjalta määritettyjä kivilajikohtaisia myötönopeuserkkyyskäyriä. Luvun lopussa analysoidaan koejärjestelyjen soveltuvuutta työn tavoitteisiin nähden, ja pohditaan mahdollisia virhelähteitä. Lisäksi tässä osiossa esitetään parannusehdotuksia koejärjestelylle tulevia kokeita varten.

## 2 MURTUMISTEORIAA

Tässä luvussa tarkastellaan murtumiskäyttäytymistä tunnettujen murtumisteorioiden pohjalta. Aluksi tarkastellaan materiaalien sidoksia atomitasolla. Siitä siirrytään tarkastelemaan kappaleen murtumisen ilmenemistä makrotasolla. Sen jälkeen esitellään murtumismekaniikan eri ilmenemismuodot, minkä jälkeen tarkastellaan yleistä ja dynaamista murtumisteoriaa.

### 2.1 Keraamien sidokset ja mikrorakenteet

Joachim Röslerin et. al. [10] teoksen *Mechanical Behavior of Engineering Materials* mukaan kaikki materiaalit, jotka eivät ole metalleja eikä orgaanisia yhdisteitä lasketaan keraameiksi. Keraamit muodostavat mikrorakenteen, jossa rakenteen atomien kaikki elektronit ovat sidoksissa rakenteen atomeihin. Kemiallisella tasolla keraamimateriaalien atomit ja/tai molekyylit voivat olla sidoksissa toisiinsa vahvoilla kovalenttisilla tai ionisilla sidoksilla tai heikoilla van der Waals –voimilla. Kovalenttisissa sidoksissa atomit jakavat ulkoelektroneitaan keskenään täyttääkseen toistensa ulkokuoren. Tällaiset sidokset muodostuvat atomien välille, jotka tarvitsevat vain muutaman elektronin täyttääkseen ulkokuorensa. Kovalenttiset sidokset ovat kohdennettuja tietyille tai tietyille atomeille. Tämän vuoksi keraamien atomeja on verrattain vaikeampaa liikuttaa kuin metallien atomeja, joiden ulkoelektronit ovat jakautuneet tasaisesti ja kohdistamattomasti metallin mikrorakenteeseen. Tästä johtuen kovalenttiset keraamit ovat vaikeasti muovattavia ja hauraita, mutta lujia materiaaleja.

Ionisidokset puolestaan muodostuvat metallin ja epämetallin välisestä elektronien vaihdosta. Tässä tapauksessa sidoksen metallinen osapuoli luovuttaa yhden tai useamman elektronin sidoksen epämetalliselle osapuolelle tyhjentääkseen ulkokuorensa elektroneista. Epämetallinen osapuoli vastaanottaa yhden tai useamman näistä elektroneista täyttääkseen ulkokuorensa. Tästä elektroninvaihdosta johtuen sidoksen osapuolet ovat sähköisesti varautuneita ja vetävät toisiaan vahvasti puoleensa. Sähköisen varauksensa vuoksi ionit muodostavat kiderakenteen, jossa vastakkain varautuneet ionit asettuvat vastakkain eräänlaiseksi kolmiulotteiseksi verkostoksi. Sidokset ovat kovalenttisten sidosten tapaan suuntautuneita, minkä vuoksi tällaiset materiaalit ovat hauraita.

Dipolisidokset ovat heikkoja sidoksia, jotka muodostuvat kovalenttisesti sitoutuneiden molekyylien välille. Näissä tapauksissa molekyylien atomien keskinäiset elektroniaffiniteetit eli elektronivetovoimat poikkeavat merkittävästi toisistaan. Tämä vuoksi jaetut elektronit eivät ole yhtä lähellä sidoksen eri atomeja. Tästä seuraa lievä sähköinen epätasapaino eli polarisaatio. Tästä seuraa edelleen molekyylien keskinäinen vastakkaisesti

varautuneiden osien välinen sähköinen vetovoima. Vetyidos on dipolisidoksen poikkeuksellisen vahva versio, jossa sidoksen toisena osapuolena on ionisoitunut vetyatomi eli protoni. Pienen kokonsa ja elektronien puuttumisen ansiosta ionisoitunut vetyatomi pääsee poikkeuksellisen lähelle negatiivisesti osittaisvarautuneen atomin orbitaaleja muodostaen tavallista vahvemman dipolisidoksen.

Molekyylien välisenä vallitsevana voimana ovat van der Waals – voimat, mikäli molekyylien välillä ei esiinny mitään edellä mainituista vuorovaikutuksista. Näitä voimia esiintyy muidenkin sidostyyppien ohella, mutta niiden voimat ovat suhteessa merkittömän pieniä. Van der Waals –voimat syntyvät, kun atomin elektronit liikkuvat jatkuvasti kuorellaan. Tämän vuoksi atomi tai molekyyli on aina hieman polarisoitunut ja muodostaa siten erittäin heikkoja dipolisidoksia toisten lievästi polarisoituneiden atomien tai molekyylien kanssa.

Suuntautuneiden sidostensa vuoksi keraamien mikrorakenne on usein monimutkaisempi kuin vapaammin sitoutuneiden metallien. Suuri osa keraameista on myös yhdisteitä, mikä mutkistaa rakennetta entisestään. Tällöin joudutaan käyttämään monikantaista hilaa kuvaamaan keraamin kiderakennetta.

Keraamit voivat olla myös *amorfisia*, jolloin niillä ei ole määrättyä pitkän tähtäimen kiderakennetta. Tällaisia keraameja kutsutaan laseiksi. Ne ovat monesti läpinäkyviä, koska niiltä puuttuu valoa heijastavat raerajat. Järjestäytymättömän rakenteensa vuoksi laseja voidaan pitää eräänlaisina alijäähtyneinä sulina.

## 2.2 Murtuman ilmeneminen

Wolé Soboyejon [11] teoksen *Mechanical Properties of Engineering Materials* perusteella kuormituksenalaiset materiaalit muuttavat muotoaan kahdella eri tavalla ennen murtumista: elastisesti ja plastisesti. Teoksen mukaan ensisijaisesti materiaali pyrkii muuttamaan muotoaan elastisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että kappale palautuu entiseen muotoonsa kuormituksen loputtua. Mikrotasolla elastinen muodonmuutos selittyy kappaleen atomien välisten vahvojen ja/tai heikkojen sidosten jännityksenalaisena venymisenä. Elastisen muodonmuutoksen saavutettua raja-arvonsa alkaa kappale muuttaa muotoaan plastisesti. Tämä pysyvä muodonmuutos ei palaudu kappaleeseen kohdistuneen kuormituksen loputtua. Tästä huolimatta kappaleen muoto palautuu elastisen muodonmuutoksen verran. Plastinen muodonmuutos selittyy mikrotasolla materiaalin mikroskooppisten rakennevirheiden eli dislokaatioiden siirtymisenä ja niiden välisenä vuorovaikutuksena. Lopulta kappale murtuu. Murtuman syynä voi olla kappaleen sisäisen rakennevirheen kasvu plastisen muodonmuutoksen myötä tai kappaleen atomisidosten katkeaminen.

Röslerin *et. al.* [10] mukaan mekaaninen materiaalin rikkoutuminen tapahtuu joko plastisen muodonmuutoksen myötä tai murtumalla. Rikkoutumisen määritelmä plastisen

muodonmuutoksen vaikutuksesta voi vaihdella tapauskohtaisesti riippuen rikkoutuneen kappaleen käyttötarkoituksesta. Yleensä kappale nähdään rikkoutuneeksi siinä vaiheessa, kun se muuttuu muotoaan plastisesti. Materiaalin myötö- ja murtolujuuksien välinen ero on sen verran pieni, että kappaleen käyttöä plastisen muodonmuutoksen jälkeen ei voida pitää turvallisena. Murtuessaan kappale sen sijaan rikkoutuu osiin tai vähintäänkin halkeilee paljaalla silmällä havaittavasti.

Plastinen myötölujuus voidaan määrittää Trescan tai von Mises'n myötökriteeristä. Niiden teoreettisesta taustasta kerrotaan tarkemmin Röslerin teoksessa *Mechanical Behavior of Engineering Materials* [10]. Piirtämällä kappaleen jännitystilasta Mohrin jännitysypyrät, voidaan määrittää vallitseva rikkoutumismekaniikka. Kappale rikkoutuu myötämällä, jos Trescan tai von Mises'n myötökriteerin määrittämä redusoidun jännityksen arvo saavutetaan  $\sigma_{eq}(\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III})=R_p$  ensiksi. Kappale rikkoutuu puolestaan murtumalla, jos siihen kohdistuva pääjännitys  $\sigma_I$  saavuttaa halkaisulujuuden  $\sigma_C$  ensiksi. Halkaisulujuuden arvo on kuitenkin vain teoreettinen arvo materiaalille, jossa ei ole sisäisiä virheitä. Todellisuudessa kaikissa materiaaleissa on virheitä, minkä vuoksi halkaisulujuuden arvo on huomattavasti teoreettista arvoa pienempi.

Normaaliolosuhteissa Soboyejon [11] mukaan hauraiden materiaalien plastinen eli palautumaton myötymä on tyypillisesti alle prosentin luokkaa. Murtuma tapahtuu siis ennen kuin elastinen muodonmuutos saavuttaa raja-arvonsa tai välittömästi sen jälkeen.

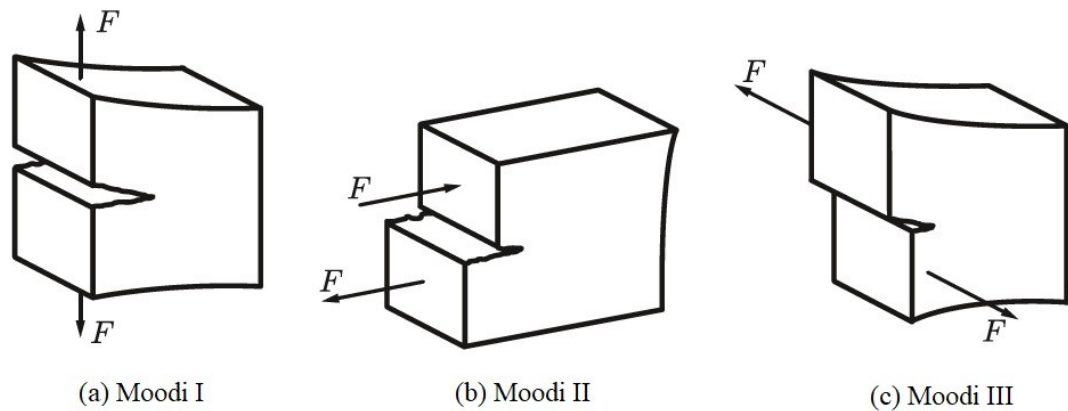
Hauraiden materiaalien tapauksessa murtuminen tapahtuu raerajamurtumalla. Mikrokooppisella tasolla tämä tarkoittaa atomisidosten katkeamista särön kohdalta, eikä kuormituksen suuntaista plastista muodonmuutosta tapahdu juuri ollenkaan. Kappale ei kuitenkaan murru kerrallaan, vaan särö syntyy paikallisesti kappaleen korkeimman vetojännityksen kohdalla ja alkaa edetä sille suotuisaan suuntaan kuormituksen jatkuessa. Murtuma voi saada alkunsa kappaleen geometriasta, mikrorakenteesta tai aiemmasta plastisesta muodonmuutoksesta johtuen, mikä johtaa myöhemmin luvussa 2.4.1 käsiteltävään Englishin mukaiseen paikalliseen jännityskeskittymään.

Soboyejon [11] esittämä toinen mahdollinen murtumismekanismi on leikkausmurtuminen. Tällöin sitkeän materiaalin sisässä sijaitsevat partikkelit irtautuvat ympäröivästä matriisimateriaalistaan ja muodostavat elliptisiä rakoja matriisiin liikkeessaan. Nämä syntyneet raot toimivat jännityksen keskittäjinä ja johtavat kappaleen kuroutumiseen ja lopulta rikkoutumiseen. Leikkausmurtuma kuitenkin vaatii matriisimateriaalissa tapahtuvaa plastista muodonmuutosta, joten sitä ei esiinny hauraasti käyttäytyvillä keraameilla.

### 2.3 Kuormituksen ilmenemismuodot

Murtumismekaniikassa tunnetaan kolme eri kuormituksen ilmenemismuotoa, joilla murtuma etenee. Ne on nimetty moodeiksi (*engl. mode*) I-III. **Kuva 1** on esitetty näissä

moodeissa tapahtuvat jännitykset ja niiden suhde murtumapintaan. Moodi I vastaa tilannetta, jossa murtuma etenee kohtisuorassa tasossa kuormitussuuntaan nähden kappaleen ollessa vetojännityksen alaisena. Samalla vetojännitys vetää murtopintoja erilleen toisistaan. Puristusjännitys puolestaan puristaa murtopinnat yhteen, jolloin kuormitus välittyy murtopintojen välillä kuin murtumaa ei olisikaan. Moodit II ja III puolestaan kohdistavat murtumapinnoille toisistaan poikkeavat leikkausjännityksen avaamatta säröä. Moodissa II leikkausjännitys kohdistuu murtuman etenemisen kanssa rinnakkaiseen suuntaan. Moodissa III leikkausjännitys puolestaan kohdistuu murtuman etenemissuunnan kanssa kohtisuorassa kulmassa, mutta murtumatason myötäisesti. Nämä moodit kuluttavat ulkoista kuormitusta murtumapintojen väliseen kitkaan, minkä vuoksi murtuman etenemiseen vaadittava kuormitus on tällöin suurempi kuin moodissa I.



**Kuva 1:** Murtumismekaniikan kolme eri ilmenemismuotoa [10]

Näiden moodien matemaattisessa ratkaisussa Freund [12] viittaa Irwinin vuonna 1960 esittämään ratkaisuun. Siinä kappaleen jännitystilaa  $\sigma_{ij}$  kuvaa

$$\sigma_{ij} = \frac{K(t)}{\sqrt{2\pi r}} \Sigma_{ij}(\theta) + \sigma_{ij}^{(1)} + o(1), \quad (1)$$

missä  $r \rightarrow 0$ . Kaavan muuttujat on esitetty polaarikoordinaatistossa, jossa  $r$  kuvaa etäisyyttä murtuman kärjestä ja kulma  $\theta=0$  vastaa murtuman etenemissuuntaa. Nimetään se suunta suorakulmaisessa koordinaatistossa  $x_1$ -akselin suunnaksi. Suunta  $\theta=\pi/2$  asetetaan murtumistasoa vastaan kohtisuoraksi suunnaksi. Tällöin  $x_3$ -akseliksi jää murtuman reunanmyötäinen suunta.  $K(t)$  on aikariippuvainen elastinen jännitysintensiiviteettikerroin, jonka fyysiset dimensiot ovat voima/pituus<sup>3/2</sup>. Sen saamat arvot riippuvat kappaleen geometriasta ja kuormituksen yksityiskohdista tapauskohtaisesti.  $\Sigma_{ij}(\theta)$  on dimensioton termi, joka kuvaa eri jännityskomponenttien kulmien vaihtelua. Se on määritelty siten, että  $\Sigma_{ij}(0)=1$ . Tämä termi on universaali, eikä siten ole riippuvainen kappaleen geometriasta tai kuormituksen yksityiskohdista.

Moodille I,  $K(t)=K_1(t)$  ja

$$\begin{aligned}\Sigma_{11}(\theta) &= \cos\frac{1}{2}\theta \left\{ 1 - \sin\frac{1}{2}\theta \sin\frac{3}{2}\theta \right\}, \\ \Sigma_{12}(\theta) &= \cos\frac{1}{2}\theta \sin\frac{1}{2}\theta \cos\frac{3}{2}\theta, \\ \Sigma_{22}(\theta) &= \cos\frac{1}{2}\theta \left\{ 1 + \sin\frac{1}{2}\theta \sin\frac{3}{2}\theta \right\}.\end{aligned}\tag{2}$$

Moodille II,  $K(t)=K_2(t)$  ja

$$\begin{aligned}\Sigma_{11}(\theta) &= -\sin\frac{1}{2}\theta \left\{ 2 + \cos\frac{1}{2}\theta \cos\frac{3}{2}\theta \right\}, \\ \Sigma_{12}(\theta) &= \cos\frac{1}{2}\theta \left\{ 1 - \sin\frac{1}{2}\theta \sin\frac{3}{2}\theta \right\}, \\ \Sigma_{22}(\theta) &= \sin\frac{1}{2}\theta \cos\frac{1}{2}\theta \cos\frac{3}{2}\theta.\end{aligned}\tag{3}$$

Moodille III,  $K(t)=K_3(t)$  ja

$$\begin{aligned}\Sigma_{31}(\theta) &= -\sin\frac{1}{2}\theta, \\ \Sigma_{32}(\theta) &= \cos\frac{1}{2}\theta.\end{aligned}\tag{4}$$

Termi  $\sigma_{ij}^{(l)}$  saadaan jokaiselle moodille kaavalla

$$\sigma_{ij}^{(1)} = \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sigma_{ij} - \frac{K(t)}{\sqrt{2\pi r}} \Sigma_{ij}(\theta) \right\},\tag{5}$$

ja se on tapauskohtainen. Reunaehtojen vuoksi vapaasti liukuvilla murtumapinnoilla  $\sigma_{i2}^{(l)}=0$ , kun  $i=1,2,3$ . Murtumapintojen raja-arvoista riippumattomat arvot pystytään saamaan selville vain koko jännityskentän ratkaisun pohjalta.

## 2.4 Kappaleen murtuminen

Freund [12] kuvaa murtumismekaniikan alan muovautuvien kappaleiden mekaanisen tilan kvantitatiivisena kuvaamisena ja materiaalin sisäisten murtumien kasvun vastustuskyvyn tutkimisena. Pohjimmiltaan murtumismekaniikan tutkimisen lähtökohtana on murtuman etenemistä ajavan voiman selvittäminen. Tähän tarkoitukseen on tarpeellista luoda matemaattisia malleja, jotka käsittelevät tapauskohtaisia idealisoituja tilanteita. Näitä malleja yhdistelemällä voidaan luoda hypoteeseja, joita voidaan vahvistaa tai kumota tutkimalla materiaalien murtumista.



Merkittävimpiä materiaalien murtumista tutkineita tutkijoita ovat olleet English [13], Griffith [14] ja Orowan (1950). English esitti lovien toimivan jännityksen keskittäjinä. Griffith loi teorian ennustamaan hauraiden materiaalien, kuten lasin murtuman etenemistä. Orowan täydensi Griffithin teoriaa huomioimalla plastisen muodonmuutoksen. [11] Tässä työssä tarkastelemme kuitenkin haurasta graniittia, jonka plastinen muodonmuutos oletetaan olevan mitättömän pieni.

Yksi ensimmäisiä dynaamisen murtumismekaniikan teoriapohjan luoja on Mott (1948), joka havaitsi inertian vastustavan materiaalin murtuman etenemistä ja lisäsi sen vaikutuksen Griffithin teoriaan. Stroh (1957) esitti päätelmiä murtuman teoreettisesta maksimienemisnopeudesta materiaalissa Mottin mallin pohjalta (katso [12]).

### 2.4.1 Yleistä murtumisteoriaa

Englishin [13] tutkimuksen mukaan lovet kappaleessa aiheuttavat jännityskeskittymiä sen elastisessa muodonmuutoksessa. Loven jännityksen keskittämiskerroin  $K_t$  saadaan kaavalla

$$K_t = \frac{\text{loven kärjen maksimijännitys}}{\text{jännitys kaukana lovesta}} = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}, \quad (6)$$

missä  $a$  on loven leveys (murtuman pituus) ja  $\rho$  on loven kaarevuussäde. Täten esimerkiksi pyöreään loven ( $a=\rho$ ) kärkeen kohdistuu noin 3-kertainen jännitys verrattuna kappaleen eheään osaan. Tämän lisäksi kaavasta voi nähdä, että kaarevuussäteen  $\rho$  kasvaessa jännityksen keskittämiskerroin lovesta kasvaa. Siten terävyydeltään atomien kokoluokkaa olevat rakennevirheet keskittävät huomattavan paljon jännitystä johtaen helposti murtuman etenemiseen virheen kärjessä.

Griffith [14] esitti vuonna 1921 murtuman etenemisteoriansa, joka perustui sisäisten energioiden muutokseen näytteen rajapintojen siirtyessä sekä uusien murtumien pintaenergioiden väliseen tasapainoon. Täten

$$U_{tot} = U_{st} + U_{su} - \frac{\pi\sigma^2 a^2 B}{E'} + 4a\gamma_s B, \quad (7)$$

missä  $U_{tot}$  on murtuman alueen kokonaisenergia (*engl. total*),  $U_{st}$  on alueen jännitysenergia (*engl. strain*),  $U_{su}$  on alueen pintaenergia (*engl. surface*)  $\sigma$  on jännitys,  $a$  on murtuman pituus,  $B$  on kappaleen paksuus ja  $\gamma_s$  on murtumapintojen muodostumisenergia ( $\text{J/m}^2$ ). Tasomyötymätilanteessa  $E'=E/(1-\nu^2)$  ja tasojännitystilanteessa vastaavasti  $E'=E$ , missä  $E$  on materiaalin kimmomoduuli ja  $\nu$  on Poissonin vakio. Meyersin ja Chawlan [15] mukaan tasomyötymä on idealisoitu tilanne, jossa tarkasteltavan kappaleen yhden ulottuvuuden myötymä ja leikkausmyötymät oletetaan nolleksiksi. Lisäksi kappaleen kyseisen ulottuvuuden mitta on erittäin suuri verrattuna tarkasteltaviin mittoihin.

Tasojännitystila on puolestaan tilanne, jossa yhden ulottuvuuden jännitys ja leikkausjännitykset oletetaan nollassa. Tässä tapauksessa kyseisen ulottuvuuden mitta on erittäin paljon pienempi kuin tutkittavan tason dimensiot.

Derivoimalla kaavan 7 puolittain  $a$ :lla ja asettamalla se nollassa saadaan kriittinen tasapainoasema, jossa murtuma alkaa edetä, mutta systeemin kokonaisenergian määrä ei muutu. Täten saadaan

$$\frac{dU_{tot}}{da} = \frac{d(U_{st} + U_{su})}{da} - \frac{2\pi\sigma^2 aB}{E'} + 4\gamma B = 0 \quad (8)$$

eli jännityselementti ratkaistuna

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E'}{\pi a}}, \quad (9)$$

missä  $\sigma_c$  vastaa murtuman etenemistä edistävää kappaleeseen kohdistuvaa kriittistä jännitystä. Tämä kaava pätee kuitenkin vain erittäin hauraisiin materiaaleihin, joissa ei tapahdu plastista muodonmuutostyötä murtuman etenemisen aikana. Lisäksi kuormituksen tulee olla staattista eli sen on tapahduttava dynaamisessa jännitystasapainossa. Dynaamisissa murtumistapauksissa tarkasteltava kappale ei ole dynaamisessa jännitystasapainossa, jolloin inertian vaikutus on huomioitava. Sellaisia tapauksia tarkastellaan enemmän seuraavassa osiossa.

## 2.4.2 Dynaaminen murtumismekaniikka

Freundin [12] mukaan dynaaminen murtumismekaniikka on murtumismekaniikan alalaji, jossa inertia ja myötönopeuserkkyysominaisuudet ovat merkittäviä tekijöitä murtumiskäyttäytymisen kannalta. Inertian vaikutuksen merkittävyyteen murtumistapauksissa vaikuttaa materiaalin ominaisuudet, kuormitusolosuhteet ja kappaleen geometrinen konfiguraatio. Se voidaan havaita nopean murtuman etenemisen tai murtuneen kappaleen nopean kuormituksen seurauksena. Kappaleen nopean kuormituksen seurauksena sen läpi kulkee jännitysaalto. Murtuman etenemiseen johtava ajava voima on selvitettävä, jotta voidaan päätellä eteneekö murtuma tämän jännitysaallon seurauksena vai ei. Kappaleen murtuman nopean etenemisen seurauksena murtuman pintojen vastakkaisilla puolilla sijaitsevat partikkelit erkanevat toisistaan murtuman kärjen ohitettua tämä piste. Dynaamisessa murtumismekaniikassa on huomioitava tätä liikettä vastustava inertiaalinen vastustuskyky, sillä se voi vaikuttaa murtuman etenemistä ajavaan voimaan.

Murtuman omaavaan kappaleeseen kohdistuvan kuormituksen ollessa nopea, sisäinen jännityskenttä ei ole tasapainoasemassa ja inertian vaikutukset on otettava huomioon. Freundin [12] esittämä ”nopea” on vaikeasti määriteltävä ja tapauskohtainen käsite. Yleisesti ottaen kuormituksen jännitysaallon nousuaikaa nollassa maksimiarvoonsa voi-

daan verrata jännitysaallon etenemisnopeuteen materiaalissa. Jos nousuaika on suuruusluokaltaan moninkertainen aallon etenemisnopeuteen, inertian vaikutus ei ole merkittävä. Muussa tapauksessa inertian vaikutus tulisi ottaa huomioon.

Freund [12] havainnollistaa teoreettisella esimerkillä, miten inertia tai jännitysaallon vaikutukset voivat vaikuttaa murtuman kärjen jännityskeskittymiin ja kuormitukseen. Hitaalla kuormituksella kappaleen kaikki kuormituspisteet kokevat kuormituksen samanaikaisesti. Kuormitusta vastustaa kappaleen jäykkyysominaisuus. Tällöin kappale vastustaa kuormitusta muodostamalla deformaatiokentän, joka tasapainottaa kuormituksen tasapainoasemassa olevan jännityskentän avulla. Nopeassa kuormituksessa kappale vastustaa muodonmuutosta jäykkyysominaisuuden lisäksi inertiaominaisuudella eli vastustamalla materiaalin liikettä. Siten jokainen kuormituspiste vaikuttaa murtuma-alueeseen muuttuvana mekaanisena aaltona.

Mott (1948, Freundin [12] mukaan) esitti Griffithin [14] teoriaan lisäystä, joka huomioi inertian vaikutuksen kappaleen murtuman etenemisessä. Tällöin kaava 8 muuttuisi peruselementeiltään muotoon

$$\frac{dU_{tot}}{da} = \frac{d(U_{st} + U_{su} + T_{tot})}{da} = 0, \quad (10)$$

missä  $T_{tot}$  on murtumaan kohdistuva kineettinen energia. Tämä kineettisen energian termi sisältää kappaleen murtuman etenemisnopeuden neliön ja murtuman pituuden. Tämä malli pitää paikkansa vain erikoistilanteessa, jossa murtuma etenee vakaasti. Myöhemmin Stroh (1957, Freundin [12] mukaan) päätteli Mottin teorian pohjalta, että suurin mahdollinen murtuman etenemisnopeus materiaalissa on kappaleen Rayleighin aallonnopeus, joka Telfordin *et. al.* [16] mukaan on riippuvainen kappaleen elastisista vakioista lähellä kappaleen pintaa.

## 3 LAITTEISTOT JA NIIDEN TOIMINTA

Myötönpeuserkkyyttä määritettäessä tarvitaan useampia koelaitteita ja –järjestelyjä, sillä myötönpeuden vaihtelun vaikutusta halutaan tarkastella verrattain suurella vaihteluvälillä. Tässä työssä käytetään Instronin 8801-mallista servohydraulista aineenkoetuslaitteistoa näennäisstaattisilla myötönpeuksilla ja Split Hopkinson Pressure Bar –laitteistoa (SHPB) dynaamisilla myötönpeuksilla.

### 3.1 Alkuvalmistelut

Työ suoritettiin kahdelle Suomessa yleiselle kivilajille: Kurun harmaalle graniitille ja Taivassalon punaiselle graniitille. Ennen kokeiden aloittamista oli valmistettava näytteenpidike ja porattava kivinäytteet.

#### 3.1.1 Tarkasteltavat graniittilajit

Kingin [17] esittämän mukaan Graniitin määritelmä on laaja, minkä vuoksi eri graniittilajeja on lukematon määrä. Se luokitellaan kuuluvaksi syväkivilajeihin. Se sisältää 10-50 prosenttia kvartsia ja 65-90 prosenttia alkaalista maasälpää. Näiden lisäksi graniitti sisältää pieniä määriä amfibolia eli sarvivälkettä ja muskoviittiä eli kiillettä. Kalimaasälpä ja plagioklaasi kuuluvat alkalisten maasälpäiden ryhmään. Kalimaasälvän kemiallinen koostumus on  $KAlSi_3O_8$ . Plagioklaasi on puolestaan maasälpäryhmä, joka koostuu vaihtelevista määristä alibiittia  $Na(AlSi_3O_8)$  ja anortiittia  $Ca(Al_2Si_2O_8)$ . Ryhmään kuuluvat seokset ovat kuitenkin vaikeata erottaa toisistaan ilman kemiallista analyysia, joten plagioklaasia täsmällisempiä nimityksiä on harvoin tarpeellista käyttää.

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan Kurun harmaata graniittia ja Taivassalon punaista graniittia. *Taulukko 1* on vertailtu näiden kivilajien EN-12407 standardin mukaisia mineraalikoostumuksia. Eniten kivilajien koostumus eroaa toisistaan plagioklaasipitoisuudessaan, joka Kurun harmaalla graniitilla on 10,4 painoprosenttia suurempi kuin Taivassalon punaisella graniitilla. Punaisessa graniitissa on puolestaan 8,8 painoprosenttia enemmän kalimaasälpää ja 1,7 painoprosenttia enemmän biotiittia kuin harmaassa graniitissa. Muut mineraaliset poikkeavuudet ovat alle yhden painoprosentin. Lisäksi Tampereen Kovakivi Oy:n [18] ja Palin Granit Oy:n [19] esittämien tietojen mukaan molempien kivilajien EN-1936 standardin mukainen huokoisuus on  $0,4 \text{ kg/m}^3$ , harmaan graniitin tiheys on  $2630 \text{ kg/m}^3$  ja punaisen graniitin tiheys on  $2650 \text{ kg/m}^3$ .

**Taulukko 1:** Kurun harmaan ja Taivassalon punaisen graniitin EN-12407 standardin mukaiset mineraalikoostumukset [18, 19]

	Taivassalon punainen (Paino-%)	Kurun harmaa (Paino-%)
Kalimaasälpä	39,6	30,8
Kvartsi	30,1	31
Plagioklaasi	22,2	32,6
Biotiitti	5,2	3,5
Muut	1,8	0,9
Muskoviitti	1,3	1,2

Paljaalla silmällä katsottuna Kurun harmaa graniitti koostuu harmaista ja mustista rakeista. Taivassalon punainen graniitti puolestaan sisältää ruskeanpunaisia ja mustia rakeita. Kurun harmaa graniitti on selkeästi hienorakeisempaa kuin Taivassalon punainen graniitti.

### 3.1.2 Kivinäytteiden valmistus ja näytteenpidike

Kivinäytteiden poraamiseen käytettiin pylväsporakonetta, johon oli kiinnitetty **Kuva 2** mukainen timanttipäällysteinen poranterä. Terään oli kytketty vesijäähdytys, mikä esti terän kuumentumisen ja poisti samalla kertyvää tomua ja irronnutta kivimurskaa porausalueelta.



**Kuva 2:** Kiven poraamiseen käytetty terä

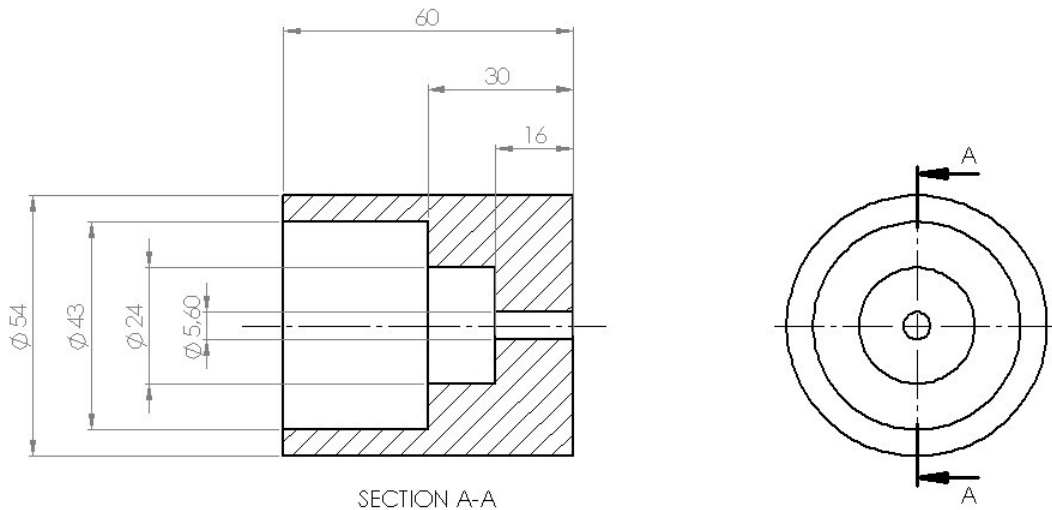
**Kuva 3** on esimerkit poratuista kivinäytteistä. Kuvassa vasemmalla sijaitsee Taivassalon punainen graniitti ja oikealla puolestaan Kurun harmaa graniitti. Punaisen graniitin näytekaksuus on 10 mm ja harmaan graniitin paksuus on puolestaan 13 mm. Näytteiden toiselle puolelle (kuvassa pöytää vasten) sijaitseva särmä jäi rosoiseksi porauksesta johtuen. Kuvastakin on nähtävissä, että Taivassalon punaisella graniitilla on suurempi rae-  
koko, kuin Kurun harmaalla graniitilla. Tämän vuoksi punaiselle graniitille jäi rosoi-

sempi särmä. Testeissä näyte asetettiin parempilaatuinen puoli näytteenpidikettä vasten, jotta rosoisesta särmästä aiheutuisi mahdollisimman vähän haittaa.



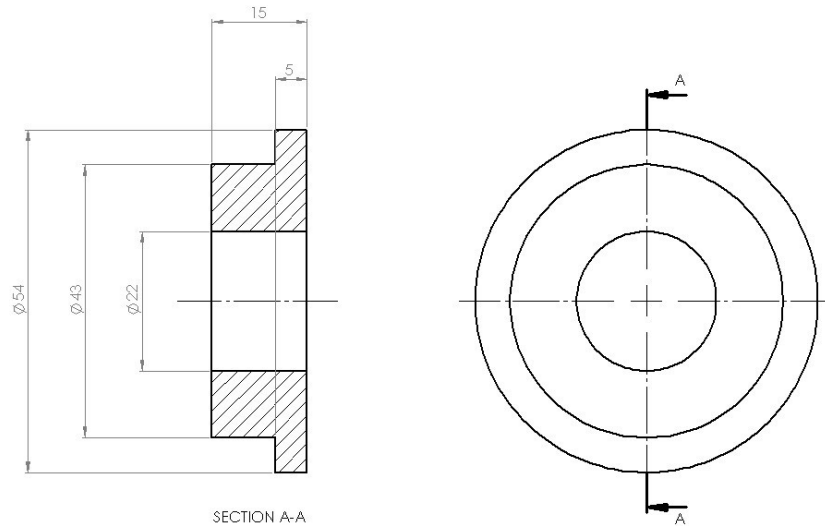
**Kuva 3:** Poratut kiviäytteet: vasemmalla Taivassalon punainen graniitti ja oikealla Kurun harmaa graniitti

**Kuva 4** on nähtävissä halkileikkaus näytteenpidikkeestä. Sen tarkoituksena on pitää näytettä paikallaan testien aikana sivuttaissuunnassa ja muuttaa näytteeseen kohdistuva puristusvoima siihen kohdistuvaksi leikkausvoimaksi. Pidikkeeseen mahtuu kiviäyte, jonka halkaisija on noin 43 mm. Näytettä painetaan tangolla, jonka halkaisija on 22 mm, joten näytteen taakse jäävän tilan halkaisijan on oltava hieman sitä suurempi. Halkaisijan ei saa olla kuitenkaan liian suuri, jotta ei ala muodostua taivutusvoimia.



**Kuva 4:** Näytteenpidikkeen dimensiot

Näytteenpidikkeelle valmistettiin **Kuva 5** mukainen muovinen korkki. Sen päätarkoituksena on saada tanko osumaan mahdollisimman keskelle näytettä. Lisäksi se estää kiven palasten ja kivitomun leviämistä suuremmilla testinopeuksilla.



**Kuva 5:** Näytteenpidikkeen korkin dimensiot

Näytteenpidikettä käytettiin Instron-laitteistolla suoritetuissa kokeissa ilman korkkia. Korkki valmistettiin Instron-kokeiden jälkeen, joten sitä käytettiin vain SHPB-laitteistolla suoritetuissa kokeissa.

### 3.2 Instron

Testien näennäisstaattisilla nopeuksilla, 1 mm/min ja 50 mm/min suoritettu osuus suoritettiin **Kuva 6** mukaisella Instron 8801-mallisella servohydraulisella aineenkoetuslaitteistolla. Laitteen valmistajan mukaan [20] laitteiston kaksisuuntainen toimielin kykenee kohdistamaan näytteeseen enimmillään 100 kN puristus- tai vetokuormituksen. Tässä koejärjestelyssä hyödynnetään laitteen puristusominaisuutta, joka kohdistaa näytteeseen leikkausjännityksen näytteenpidikkeen ansiosta. Testien kokeiluvaiheessa käytettiin myös 50 kN:n kuormitukseen kykenevää mallia, mutta kyseinen kuormituskapasiteetti havaittiin riittämättömäksi äärimmäisissä tapauksissa. Laitteisto käyttää 8800MT-mallista ohjausjärjestelmää.



*Kuva 6: Instron-laitteisto käyttövalmiina*

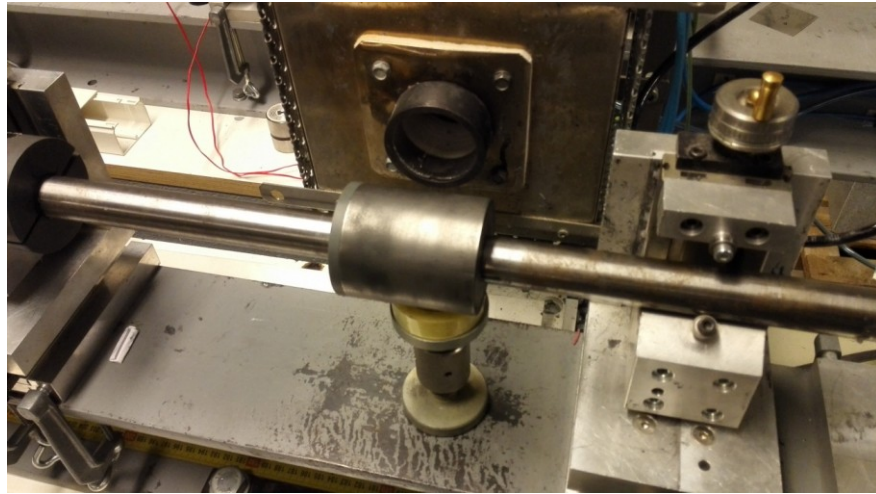
Näytteenpidike asetetaan laitteen alaosan tasolle sijoitetun lieriön päälle. Halkaisijaltaan 22 mm leveä työntötanko asetetaan laitteen yläosassa sijaitsevien leukojen väliin. Työntötanko tuodaan kosketuksiin näytteen kanssa ennen testin aloittamista. Ennen kokeiden aloittamista laitteisto on linjattava huolellisesti, jotta työntötanko osuu tasaisesti koko työntöpinnallaan näytteeseen. Kun linjaus on suoritettu, voidaan aloittaa testien suorittaminen aiemmin mainituilla nopeuksilla. Laitteen voima-anturin lukemia voi seurata näytöltä reaaliajassa testin aikana. Testi on lopetettava manuaalisesti näytteen murruttua. Näyte on murtunut, kun voima-anturin arvot ovat saavuttaneet lakipisteensä ja alkavat laskea merkittävästi. Testilaitteisto ottaa talteen tiedot työntötangon sijainnista ja voima-anturin mittaamasta voimasta määrättyinä aikaväleinä.

### 3.3 Split Hopkinson Pressure Bar

*Kuva 7* on esitetty Split Hopkinson Pressure Bar –järjestelmään aseteltu näytteenpidike, joka on ladattu graniittinäytteellä. Laite on valmiina laukaistavaksi. Vasemmalla puolella sijaitseva tanko on etutanko, joka kuljettaa iskutangon tuottaman jännityspulssin näytteeseen. Näytteenpidikkeen etuosaan on kiinnitetty reiällinen muovikorkki, jonka avulla etutanko ohjautuu keskelle näytettä. Pulssin osuessa näytteeseen näyte rikkoutuu, mikä sitoo osa pulssin energiasta. Loput pulssin energiasta heijastuu takaisin etutankoon sekä näytteenpidikkeen kautta takatankoon. Näytteenpidike on tuettu säädettävällä tu-



kialustalla, jota on korotettu teippirullalla. Ilman tukea näytteenpidike olisi kallellaan. Osassa kokeita näytteenpidike tuettiin myös sen ympäri kiertävällä jousella, joka kuitenkin poistettiin mahdollisten virhetekijöiden vähentämiseksi.



***Kuva 7:** Näytteenpidike on asetettuna Split Hopkinson Pressure Bar –laitteistoon, joka on valmiina laukaistavaksi.*

Kuvan ulkopuolella sijaitsevat etu- ja takatankoihin kiinnitetyt venymäliuskat, jotka mittaavat tankoihin kohdistuneet myötymät kokeen aikana. Venymäliuskat on kiinnitetty etu- ja takatankojen puoliväleihin.

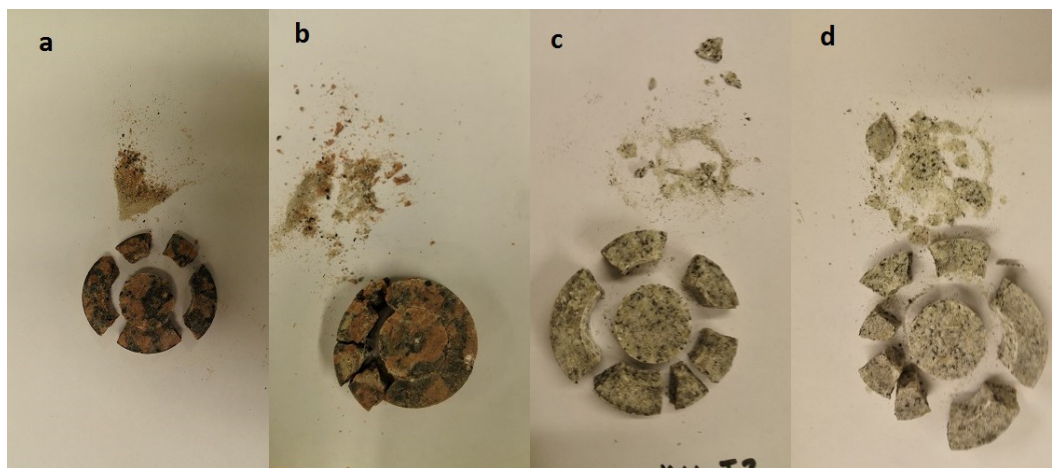
Jännityspulssin etenemistä ja heijastumista näytteen ja näytteenpidikkeen sisällä ja rajapinnoissa on mahdollista simuloida elementtimenetelmää hyväksikäyttäen. Tässä työssä simulointia ei kuitenkaan suoritettu ajan ja osaamisen puutteen vuoksi.

## 4 TULOKSET

Sekä Instron- että SHPB-laitteistolla suoritettut testit suoritettiin kahtena eri päivänä. Instron-laitteistolla tehtyjä testejä tehtiin ensimmäisenä päivä kolme kummallekin kivilajille nopeudella 1 mm/min. Tällöin havaittiin, että testejä tehdessä käydään lähellä laitteiston 50 kN:n maksimikuormaa. Laitteiston linjaamisessa oli myös ongelmia, minä vuoksi ensimmäisen päivän Instron-kokeiden tulokset jätetään tulosten käsittelyn ulkopuolelle. Toisena Instron-päivänä suoritettiin yhteensä kaksikymmentä testiä, viisi testiä molemmille kivilajeille kahdella eri nopeudella: 1 mm/min ja 50 mm/min. Tällöin käytimme Instron-laitetta, jonka maksimikuormituskapasiteetti oli 100 kN ongelmien välttämiseksi. Linjauksen kanssa ei ollut tällä kertaa ongelmia.

### 4.1 Kivinäytteet kokeen jälkeen

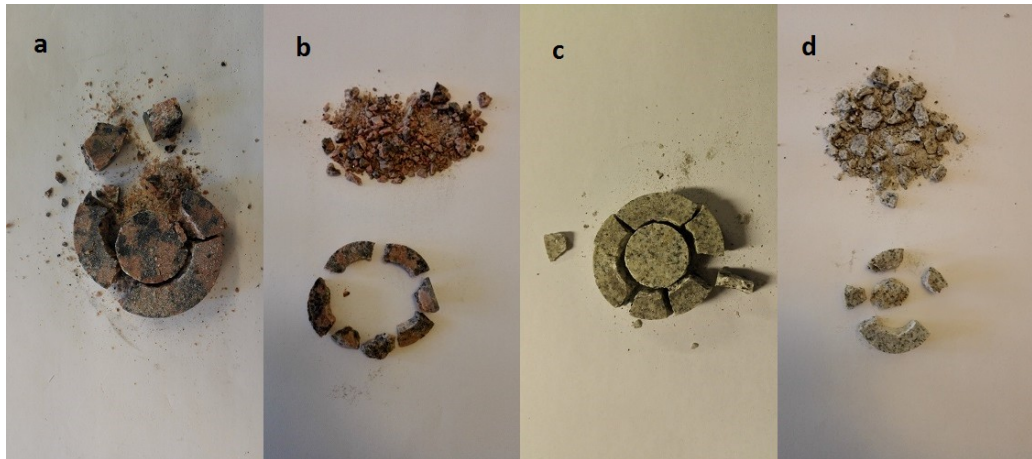
*Kuva 8* on nähtävissä esimerkit kustakin kivilajista kummallakin Instron-laitteistolla suoritetuista iskunopeuksista. Kuvasta on nähtävissä, että iskunopeuden muutos tässä suurusluokassa ei aiheuta merkittäviä silminnähtäviä eroja kiven murtumisessa ja kertyneen tomun määrässä. Kivilajien kesken on huomattava, että Taivassalon punaisesta graniitista irtoaa vain vaihtelevan kokoista tomua kun taas Kurun harmaasta graniitista jää jälkeen myös ohuita hiutaleita. Hiutaleiden koko ja määrä kasvaa hieman iskunopeutta kasvatettaessa. On kuitenkin huomioitava, että näytteen poistaminen näytteenpidikkeestä vaikuttaa näytteen kuntoon kuvassa.



**Kuva 8:** Instron-kokeissa rikottuja näytteitä  
*a) Taivassalon punainen graniitti, iskunopeus 1 mm/min,*  
*b) Taivassalon punainen graniitti, iskunopeus 50 mm/min,*  
*c) Kurun harmaa graniitti, iskunopeus 1 mm/min,*  
*d) Kurun harmaa graniitti, iskunopeus 50 mm/min*

Ensimmäisenä SHPB-päivänä suoritettiin kuusi koetta Taivasalon punaiselle graniitille. Näistä viisi suoritettiin 1,0 barin iskutangon paineella ja yksi 2,0 barin paineella. Ensimmäisessä kokeessa havaittiin, että etutangon venymäliuska oli viallinen, joten se vaihdettiin. Tämän vuoksi ensimmäinen testitulokset jätetään käsittelemättä. Kahden seuraavan kokeen pulssin eteneminen ei vastannut odotuksia. Suoritettiin muutama testi-lyönti ilman näytettä ja näytteenpidikettä. Epäiltiin, että näytteenpidike aiheuttaa odottamatonta takaisinheijastusta. Kokeita jatkettiin ilman toimenpiteitä, koska asialle oli vaikeaa tehdä mitään. Toisena SHPB-päivänä suoritettiin yhdeksän testiä Kurun harmaalle graniitille. Ensimmäiset neljä testiä suoritettiin 1,0 barin iskutangon paineella. Seuraavat kolme koetta suoritettiin 2,0 barin paineella. Kahdessa viimeisessä testissä käytettiin useamman kerroksen paksuista pulssinmuokkausmetallia. Näiden testien iskutangon paineet olivat 1,0 ja 1,5 baria edellä mainitussa järjestyksessä. Näiden kahden testin tulokset jätetään tässä työssä myöskin käsittelemättä.

**Kuva 9** on kerätty **Kuva 8** tapaan esimerkkikuvat molemmista kivilajeista Split Hopkinson Pressure Bar -laitteistolla suoritetuista kokeista kahdella eri iskupaineella. Tällä kertaa sekä kivilajien, että iskupaineiden välillä on nähtävissä eroja. Taivassalon punaisesta graniitista irtoaa selvästi enemmän tomua kuin Kurun harmaasta graniitista 1,0 barin iskupaineella. Vastaavaa käyttäytymistä on havaittavissa 2,0 barin iskupaineella, jossa harmaasta graniitista jää paljon keskisuuria palasia kun taas punaisesta graniitista jäljelle jäävien palasten koossa on enemmän hajontaa. Merkittävimpana erona on kuitenkin nähtävissä iskupaineen muuttamisesta aiheutuva vaikutus. Molemmat kivilajit hajoavat huomattavasti pienemmiksi osiksi iskupainetta nostettaessa 1,0 barista 2,0 bariin. Pienemmällä iskupaineella suoritetuissa kokeissa muodostunutta ”keskitulppaa” ei enää synny, vaan se on hajonnut pieniksi palasiksi ja tomuksi. Etenkin harmaan graniitin palasista on vaikeaa hahmottaa näytteen alkuperäistä geometriaa. Näytteen irrottaminen näytteenpidikkeestä oli kuitenkin erittäin työlästä suuremmalla iskunopeudella, koska näyte oli pakkautunut lujasti näytteenpidikkeeseen. Siksi kuvat näytteistä eivät kuvaa täydellisesti iskun jälkeistä tilaa. Lisäksi kuvan näytteisiin on kohdistunut useita iskuja, vaikka mittauksissa keskitytään vain ensimmäiseen iskuun. Tämä oltaisiin voitu estää käyttämällä ”momentum trap”-tekniikkaa, mutta sen käyttöä ei nähty tässä työssä tarpeelliseksi.



**Kuva 9:** SHPB-kokeissa rikottuja näytteitä  
*a) Taivassalon punainen graniitti, iskupaine 1,0 bar*  
*b) Taivassalon punainen graniitti, iskupaine 2,0 bar*  
*c) Kurun harmaa graniitti, iskupaine 1,0 bar*  
*d) Kurun harmaa graniitti, iskupaine 2,0 bar*

## 4.2 Jännitys-aika-käyrät

Työssä suoritettavat näennäisstaattiset ja dynaamiset leikkauskokeet on suoritettu erilaisilla laitteistoilla, jotka mittavat tulokset erilaisilla antureilla. Lisäksi kivinäytteiden paksuudet eri kivilajeilla poikkeavat toisistaan. Tämän vuoksi mitattu data on muokattava vertailukelpoiseksi jälkikäteen. Kaikki mitattu data on täten päätetty muuttaa muotoon, jossa vaaka-akseliksi on merkitty aika ja pystyakseliksi on puolestaan merkitty materiaaliin kohdistunut jännitys. Jännitys sopii hyvin työn tarkoitukseen, sillä se on näytteen geometriasta riippumaton suure. Myötymä sopisi vaaka-akseliksi paremmin kuin aika, mutta leikkauskokeessa näytteen absoluuttisen myötymän määrittäminen on käytännössä mahdotonta.

### 4.2.1 Instron

Kuten luvussa 3.2 mainittiin, Instron-laitteisto tallettaa kokeista työntötangon sijainnin ja voima-anturin lukeman määrätyin aikaväleihin. Voima-arvoihin pohjautuvat tulokset antavat kuitenkin kappaleen geometriaan pohjautuvaa tietoa. Tämän työn pyrkimyksenä on tarkastella yleisesti kahden kivimateriaalin ominaisuuksia, joten tulosten suuret on muutettava vastaamaan näitä pyrkimyksiä.

Veto- ja puristuskokeiden datan käsittelyssä on tapana käyttää tulosten x-akselina myötymää, eli näytteen pituuden tai paksuuden muutosta suhteessa näytteen alkupituuteen tai -paksuuteen. Tällöin saadaan näytteen pituudesta tai paksuudesta riippumattomia

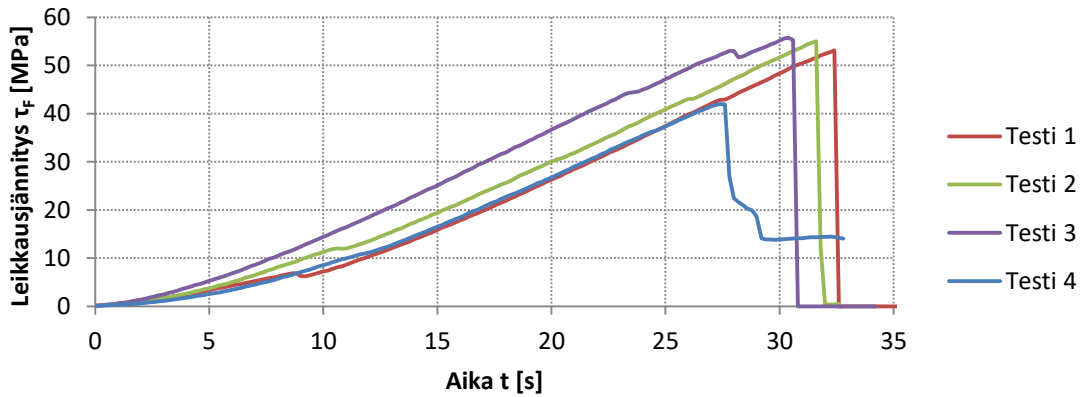
tuloksia. Leikkausjännityslaskelmissa leikkausmyötymän määrittäminen ei ole kuitenkaan näin yksinkertaista, joten tässä työssä käytetään kulunutta aikaa tulosten x-akselina.

Jakamalla voima-anturin arvot työntötapin pinta-alalla saadaan jännityksen arvot

$$\tau(t) = \frac{F(t)}{2\pi r_b B_s}, \quad (11)$$

missä  $\tau$  on näytteeseen kohdistuva leikkausjännityksen arvo,  $F$  on voima-anturin arvo,  $B_s$  on näytteen paksuus ja  $r_b$  on työntötapin säde. Leikkausjännitystä käyttämällä tuloksista saadaan työntötapin säteestä ja näytteen paksuudesta riippumattomia.

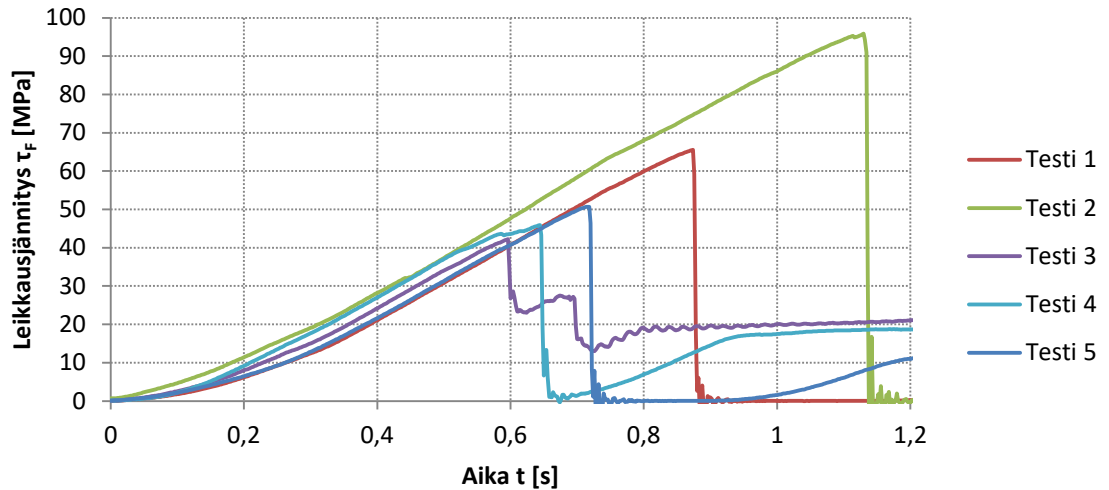
**Kuva 10** on esitetty Kurun harmaan graniitin Instron-kokeiden leikkausjännitykset ajan suhteen iskunopeudella 1 mm/min.



**Kuva 10:** Kurun harmaan graniitin leikkausjännitys ajan suhteen iskunopeudella 1 mm/min

Yksi suoritetuista testeistä jätettiin pois kuvaajista, koska se jouduttiin keskeyttämään laitteiston maksimikapasiteetin lähestyessä huippuaan. Syyksi oletettiin huonosti aseteltu näytekappale. Muut testit käyttäytyvät varsin lineaarisesti eikä suurta hajontaa tulosten välillä ole. Testissä 4 näyte murtui muita aikaisemmin noin 27 sekunnin kohdalla, eikä jännitys laske rikkoutumisen jälkeen nolnaan asti kuten muissa testeissä. Muissa testeissä näytteet murtuivat 31 ja 33 sekunnin välillä. Leikkausmurtojännitykset näille testeille olivat 53:n ja 56:n megapascalin välillä.

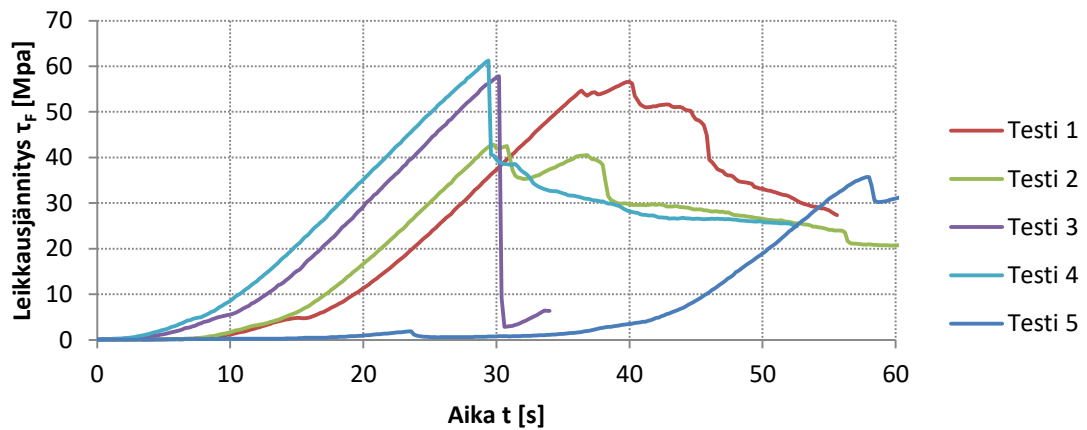
**Kuva 11** on esitetty Kurun harmaan graniitin Instron-kokeiden leikkausjännitykset ajan suhteen iskunopeudella 50 mm/min.



**Kuva 11:** Kurun harmaan graniitin leikkausjännitys ajan suhteen iskunopeudella 50 mm/min

Kokeiden maksimileikkausjännitykset eroavat toisistaan merkittävästi pienimmän ollessa noin 42 ja suurimman noin 96 megapascalia. Kaikkien kokeiden käyrät ovat kohtuullisen lineaarisia. Huippujännityksen jälkeen kaikki testit paitsi testi 3 laskeutuvat nolnaan. Myös näytteiden murtumisajat vaihtelivat suuresti 0,6 ja 1,2 sekunnin väleillä.

**Kuva 12** on esitetty Taivassalon punaisen graniitin Instron-kokeiden leikkausjännitykset ajan suhteen iskunopeudella 1 mm/min.

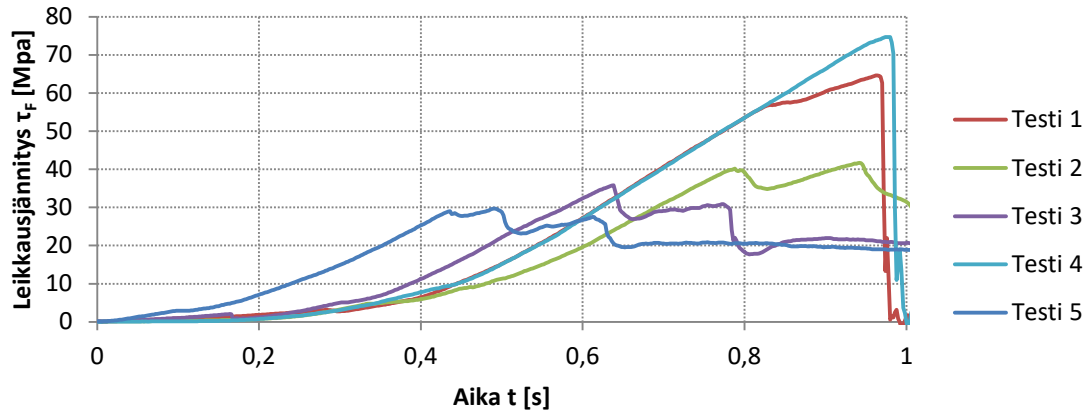


**Kuva 12:** Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännitys ajan suhteen iskunopeudella 1 mm/min

Kokeiden tuloksissa on paljon hajontaa sekä käyrien muodon, että maksimijännitysten arvojen suhteen. Vain testien 3 ja 4 käyriä voi tulkita lineaarisiksi. Niidenkin käyrien alku on kaarevampi kuin Kurun harmaan graniitin vastaavien. Näistäkin testeistä vain testin 3 jännityksen arvo laskeutuu nolnaan maksimijännityksen saavuttamisen jälkeen. Testien 1, 2 ja 5 käyrät ovat vaikeasti tulkittavissa, sillä niiden muoto ei ole kovin line-

aarinen ja niiden rikkoutumispistettä on vaikea määrittää. Kokeiden maksimijännitykset vaihtelevat välillä 35 ja 62 megapascalia. Murtoaajat vaihtelevat puolestaan välillä 29 ja 58 sekuntia.

**Kuva 13** on esitetty Taivassalon punaisen graniitin Instron-kokeiden leikkausjännitykset ajan suhteen iskunopeudella 50 mm/min.



**Kuva 13:** Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännitys ajan suhteen iskunopeudella 50 mm/min

Testien 2, 3 ja 5 tulokset ovat näissäkin kokeissa vaikeasti tulkittavia. Testit 1 ja 4 käyttäytyvät odotetun lineaarisesti, vaikkakin hieman kaarevammin kuin Kurun harmaan graniitin tapauksessa. Nämä kaksi testiä käyttäytyvät hyvin pitkälle lähes identtisesti. Testin loppupuolella testissä 1 tapahtuu pieni notkahdus alaspäin leikkausjännityksessä ja murtuma tapahtuu hieman aikaisemmin. Murtojännitysten vaihteluväli on 29 ja 75 megapascalia ja murtoaikojen vaihteluväli on 0,49 ja 0,98 sekuntia.

Kuvista nähdään kaikkiin näytteisiin kohdistuvan jännityksen kasvavan ajan funktiona, kunnes lopulta jännitys romahtaa lähes välittömästi nolnaan. Kasvu tapahtuu aluksi loivasti ja jyrkkenee tapauskohtaisesti kokeen edetessä. Jännityksen pudotessa nolnaan kappale murtuu. Murtumisen jälkeen jännityksen arvot saattavat vielä nousta, mutta kyseessä on vain murtuneen kappaleen osien välinen kitka. Tämä työn kannalta oleellista on vain näytteen murtumiseen asti esitetty data, joten kuvaajan ulkopuolelle on jäänyt osa murtuman jälkeisestä datasta.

**Taulukko 2** on koottu **Kuva 10-13** esitettyjen testien keskiarvot murtojännityksistä ja – ajoista sekä niiden keskihajonnat.

**Taulukko 2:** Murtojännityksien ja –aikojen keskiarvot sekä niiden keskihajonnat *Kuva 10-13* testeistä

Kivilaji ja iskunopeus	Murtojännitys [Mpa]	Murtumisaika [s]
Kuru, 1 mm/min	51 ± 6	30 ± 2
Kuru, 50 mm/min	60 ± 22	0,79 ± 0,22
Taivassalo, 1 mm/min	51 ± 11	37 ± 12
Taivassalo, 50 mm/min	49 ± 19	0,80 ± 0,22

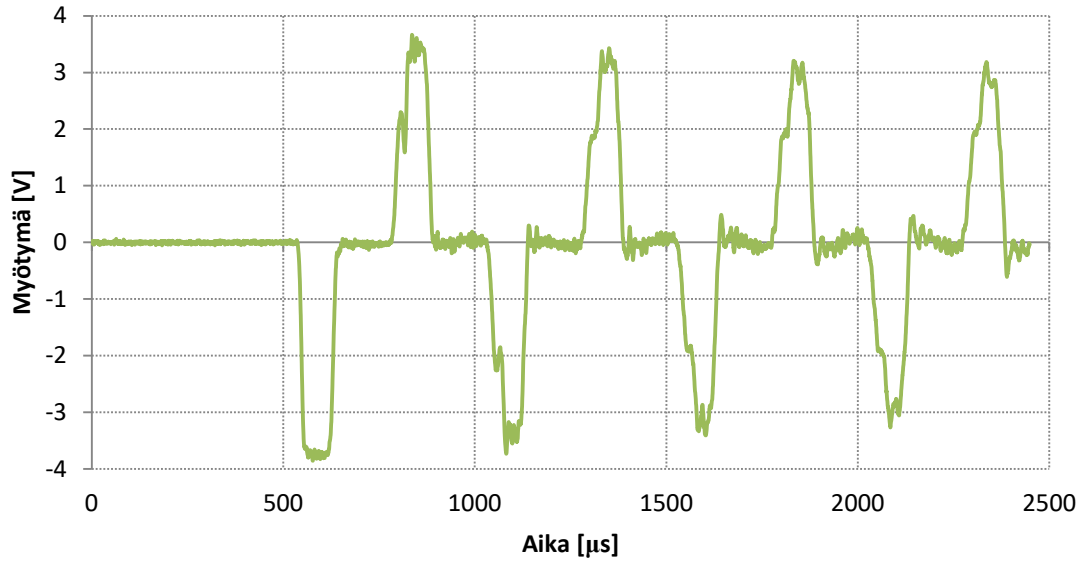
Taulukosta on havaittavissa, että saatujen murtojännitysten keskihajonta on erittäin suuri Kurun harmaan graniitin 1 mm/min nopeuden testejä lukuun ottamatta. Niidenkin murtojännitysten hajonta on kohtalaisen suuri. Murtojännitysten keskiarvot ovat pääosin hyvin lähellä toisiaan. Kurun harmaan graniitin iskunopeuksilla 50 mm/min suoritettujen kokeiden murtojännitysten keskiarvo on muita suurempi. Murtuminen tapahtuu iskunopeuden 1 mm/min testeille noin puolen minuutin kuluttua testin aloituksesta. 50 mm/min testinopeuksilla murtuminen tapahtuu puolestaan suunnilleen alle sekunnissa. Hajonnat murtumisajoissa ovat hyvin suuria myös murtumisajoissa. Tässäkin poikkeuksena on Kurun harmaan graniitin iskunopeuden 1 mm/min kokeet, joiden hajonta on selkeästi pienempi.

#### 4.2.2 SHPB

Split Hopkinson Pressure Bar –laitteistolla suoritettavat kokeet antavat tuloksensa etutangkoon asennetun venymäliuskan jännitteen arvoina ajan suhteen. Nämä arvot on johdettava muotoon, jossa jännityksen arvoja verrataan aikaan. Tällä tavoin tuloksista saadaan vertailukelpoisia Instron-kokeiden tulosten kanssa.

*Kuva 14* on esitettyä esimerkki etutangon venymäliuskan tuottamasta datasta. Ensimmäinen negatiivisia arvoja saava pulssi on iskutangon aiheuttama iskupulssi, joka etenee kohti vielä toistaiseksi rikkoutumatonta näytettä. Ensimmäinen positiivisia arvoja saava pulssi puolestaan on heijastuva pulssi näytteen pinnasta, kun tangon isku on osunut siihen ja rikkonut sen. Laitteistosta puuttuvan momenttiansajärjestelmän vuoksi heijastunut isku aiheuttaa laitteistossa ketjureaktion, jonka vuoksi laitteisto lyö näytettä useamman kerran heijastuneiden pulssien voimalla. Tässä työssä tarkastellaan kuitenkin vain iskupulssia ja ensimmäistä heijastunutta pulssia. Niitä vertailemalla on mahdollista selvittää kiven murtumisominaisuuksia ja vertailla niitä.

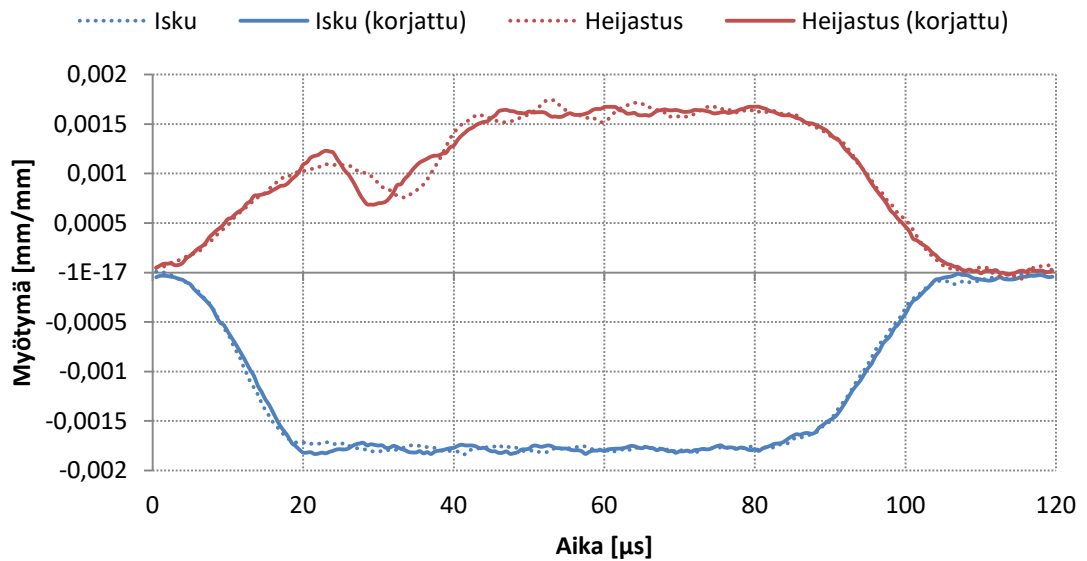




**Kuva 14:** Esimerkki SHPB-testin etutangon venymäliuskan tuottamasta datasta

**Kuva 15** on leikattu **Kuva 14** iskupulssi ja ensimmäinen heijastunut pulssi sekä asetettu ne alkamaan samalla hetkellä. Venymäliuskan antamat jännitearvot on muunnettu todelliseksi venymäliuskan myötymän arvoiksi. Lisäksi molemmille pulseille on tehty dispersiokorjaus.

Hokan [21] esittämän perusteella dispersiokorjauksella tarkoitetaan jännituspulssin väliaineessa ja rajapinnoissa tapahtuvan vääristymisen korjaamista. Pääsyyinä näihin vääristymiin ovat epätäydelliset näyte-tanko-rajapinnat, tankojen sivuttaissuuntaiset myötymät ja jännituspulssin taajuusjakaumat.

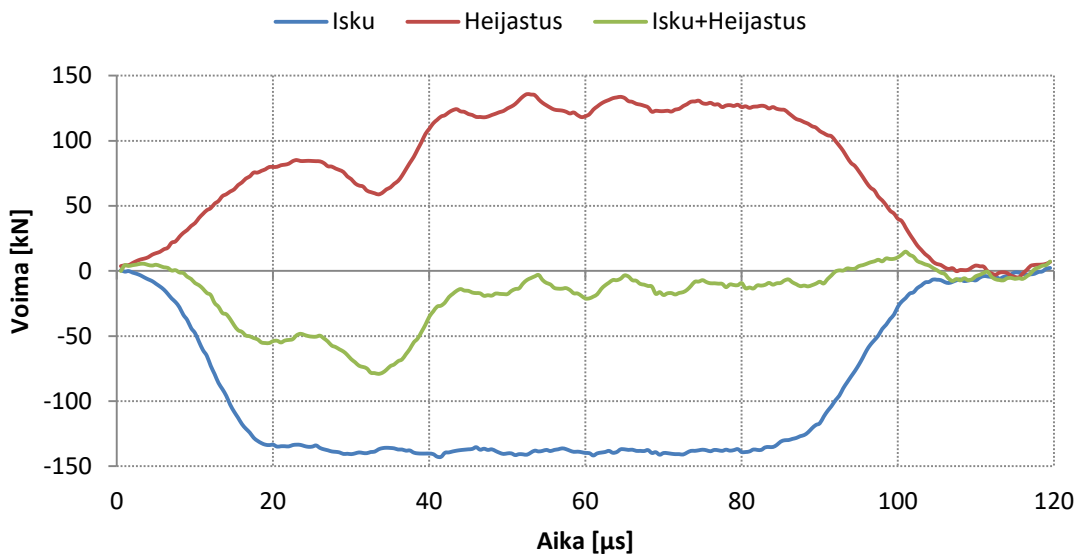


**Kuva 15:** Kohdistetut iskupulssi ja heijastunut pulssi, sekä niiden dispersiokorjatut muodot

**Kuva 16** on laskettu venymäliuskan myötymää hyödyntäen iskutankoon kohdistuneet voimat iskupulssin ja ensimmäisen heijastuspulssin aikana. Pulssien synnyttämät voimat saadaan laskettua kaavalla

$$F(t) = E_b A_b \varepsilon_c(t), \quad (12)$$

missä  $F(t)$  on näytteeseen kohdistunut voima ajan funktiona,  $E_b$  on tangon kimmomoduuli,  $A_b$  on tangon poikkipinta-ala ja  $\varepsilon_c(t)$  on dispersiokorjattu näytteen myötymä ajan funktiona. Laskemalla nämä voimat yhteen saadaan tulokseksi näytteeseen kohdistunut voima, joka on myös esitetty kuvassa.

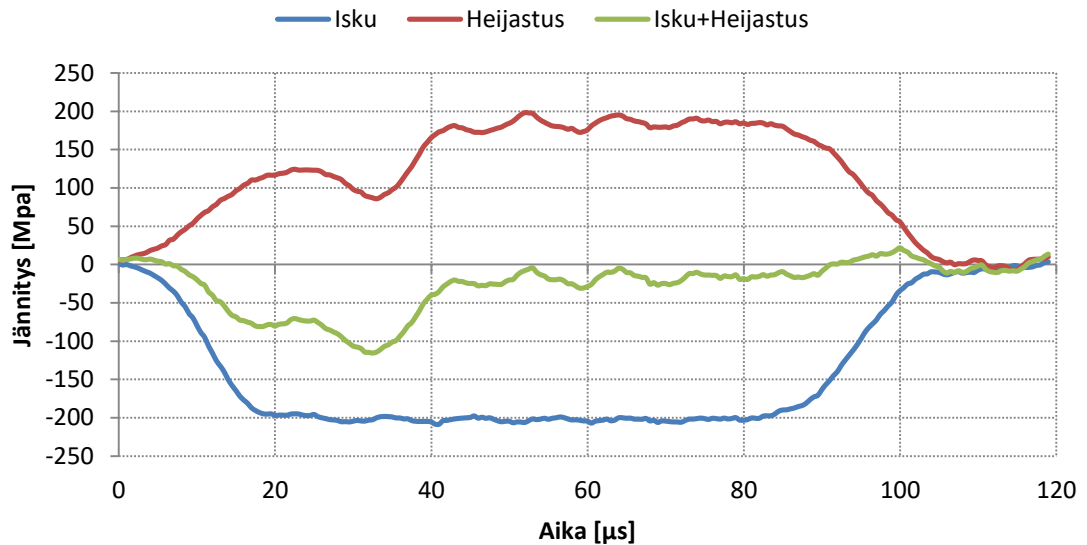


**Kuva 16:** Etutankoon kohdistuneet voimat iskupulssin ja heijastuneen pulssin aikana, sekä niiden summavoima

**Kuva 17** esittää etutangon leikkausjännityksen arvoja ajan suhteen tarkasteltavien pulssien osalta. Niiden summa kuvaa näytteeseen kohdistunutta jännitystä. Leikkausjännityksen arvot saadaan ratkaistua kaavalla

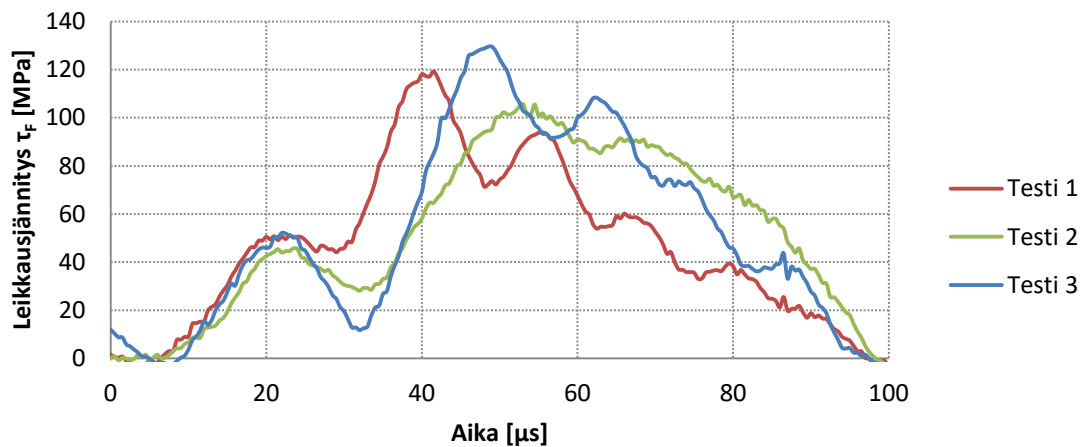
$$\tau(t) = \frac{F(t)}{2\pi r_b B_s}, \quad (13)$$

missä  $\tau(t)$  on leikkausjännitys ajan funktiona ja  $r_b$  on tangon poikkisäde.



**Kuva 17:** Etutankoon kohdistuneet jännitykset pulssin aikana, sekä niiden summajännitys

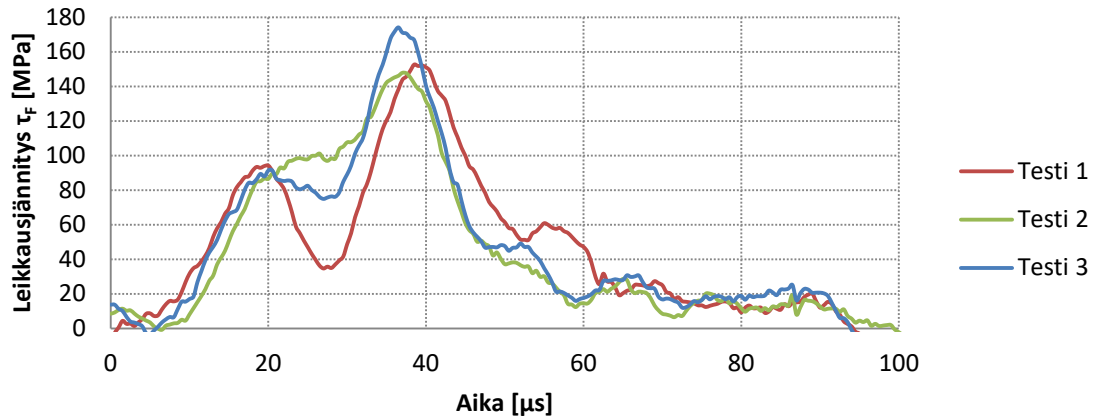
**Kuva 18** on esitetty Kurun harmaan graniitin SHPB-kokeiden leikkausjännitykset ajan suhteen 1,0 barin iskutangon paineella.



**Kuva 18:** Kurun harmaan graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 1,0 barin iskutangon paineella

Kuvan kaikki kolme käyrää käyttäytyvät Instron-kokeisiin verrattuna monimutkaisella tavalla. Ensin leikkausjännitys nousee. Hieman 20 mikrosekunnin jälkeen tapahtuu lasku leikkausjännityksessä. Laskun jälkeen alkaa jyrkkä nousu aina murtojännitykseen asti, minkä jälkeen jännityksen lasku tapahtuu nousuja hitaammin ja pykälittäin. Testit 1 ja 3 muistuttavat muodoltaan enemmän toisiaan verrattuna testiin 2. Testin 2 leikkausjännityksen nousut ja laskut ovat toisia testejä hitaampia ja tasaisempia. Testien murtumisjännitys vaihtelee noin 105 ja 130 megapascalin välillä. Murtumat tapahtuvat noin aikavälillä 42-49 mikrosekuntia.

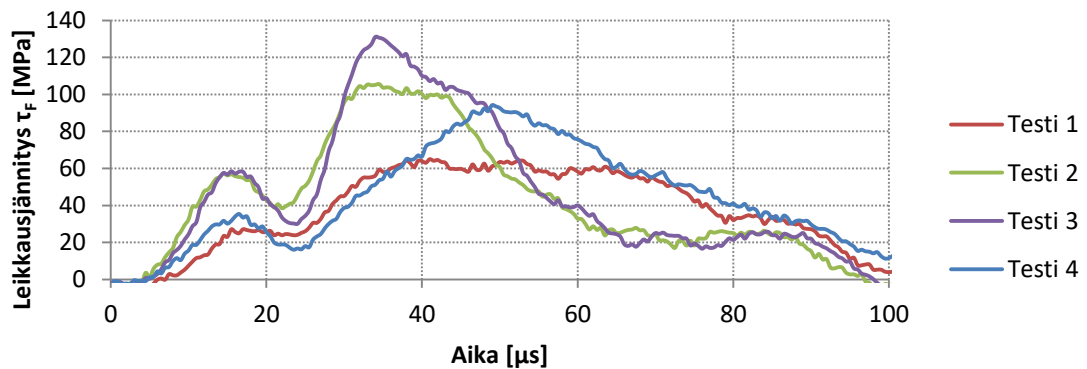
**Kuva 19** on esitetty Kurun harmaan graniitin SHPB-kokeiden leikkausjännitykset ajan suhteen 2,0 barin iskutangon paineella.



**Kuva 19:** Kurun harmaan graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 2,0 barin iskutangon paineella

Kuvan käyrät käyttäytyvät pääosin samalla tavalla kuin **Kuva 18** käyrät, mutta leikkausjännityksen nousut ja laskut ovat jyrkempiä. Merkittävimpänä toisistaan eroavana piirteinä testeissä on poikkeamat ensimmäisessä leikkausjännityksen pudotuksessa, jotka vaihtelevat melko huomattavasti kokeiden välillä. Kokeiden alhaisin murtojännitys on noin 148 megapascaliala ja korkein puolestaan noin 174 megapascaliala. Murtoajat ovat hyvin lähellä toisiaan: noin 37 ja 39 mikrosekunnin välillä.

**Kuva 20** on esitetty Taivassalon punaisen graniitin SHPB-kokeiden leikkausjännitykset ajan suhteen 1,0 barin iskutangon paineella.

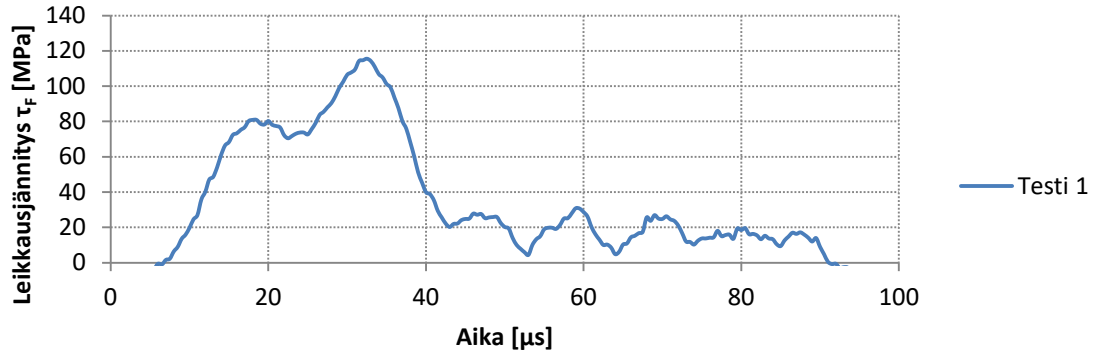


**Kuva 20:** Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 1,0 barin iskutangon paineella

Kokeiden tulokset poikkeavat toisistaan huomattavasti. Kaikissa kokeissa on edellä mainittujen testien piirteitä, mutta testien 1 ja 4 leikkausjännityksen muutokset ovat huomattavasti hitaampia eikä murtojännityksen piste ole niin huomattava. Myös testin 2

leikkausjännityksen huippu on epätavallisen tasainen. Saadut murtojännitykset vaihtelevat 65 ja 131 megapascalin välillä ja murtoaajat 35 ja 49 mikrosekunnin välillä.

**Kuva 21** on esitetty Taivassalon punaisen graniitin SHPB-kokeen leikkausjännitys ajan suhteen 2,0 barin iskutangon paineella.



**Kuva 21:** Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännitys ajan suhteen 2,0 barin iskutangon paineella

Näitä testejä suoritettiin vain yksi ajan puutteen vuoksi. Tämä koe käyttäytyy hyvin samalla tavalla kuin monet edellä mainitut testit. Ensimmäinen leikkausjännityksen pudotus tapahtuu niistä poiketen melko suurella jännityksen arvolla. Murtojännitys kokeessa on noin 116 megapascalialia ja murtoaika noin 33 mikrosekuntia.

Yleisesti ottaen näyttää siltä, että SHPB-kokeissa koekappaleen leikkausjännitys kasvaa aluksi hieman, minkä jälkeen tapahtuu jännityksen lasku. Laskun jälkeen jännitys alkaa nousta aiempaa hieman jyrkemmin ja saavuttaa maksimiarvonsa, minkä jälkeen tapahtuu jännityksen nopea ja mahdollisesti hieman poukkoileva lasku.

**Taulukko 3** on kerätty **Kuva 18-Kuva 21** testien murtojännitykset ja murtumisajat.

**Taulukko 3:** Murtojännitykset ja murtumisajat **Kuva 18** **Kuva 21** testeistä

Kivilaji ja iskutangon paine	Murtोजännitys [Mpa]	Murtumisaika [μs]
Kuru, 1 bar	118 ± 12	48 ± 6
Kuru, 2 bar	158 ± 14	37 ± 1
Taivassalo, 1 bar	99 ± 27	40 ± 7
Taivassalo, 2 bar	116 ± 0	33 ± 0

Taulukosta voidaan havaita, että samalla iskutangon paineella Kurun harmaan graniitin murtojännitykset ovat Taivassalon punaisen graniitin murtojännityksiä suuremmat. Myös Kurun harmaan graniitin murtoaajat ovat Taivassalon punaista graniittia suuremmat. Molemmilla kivilajeilla suurempi iskutangon paine johtaa suurempiin murtojännityksiin ja aikaisempiin murtumisaikoihin.

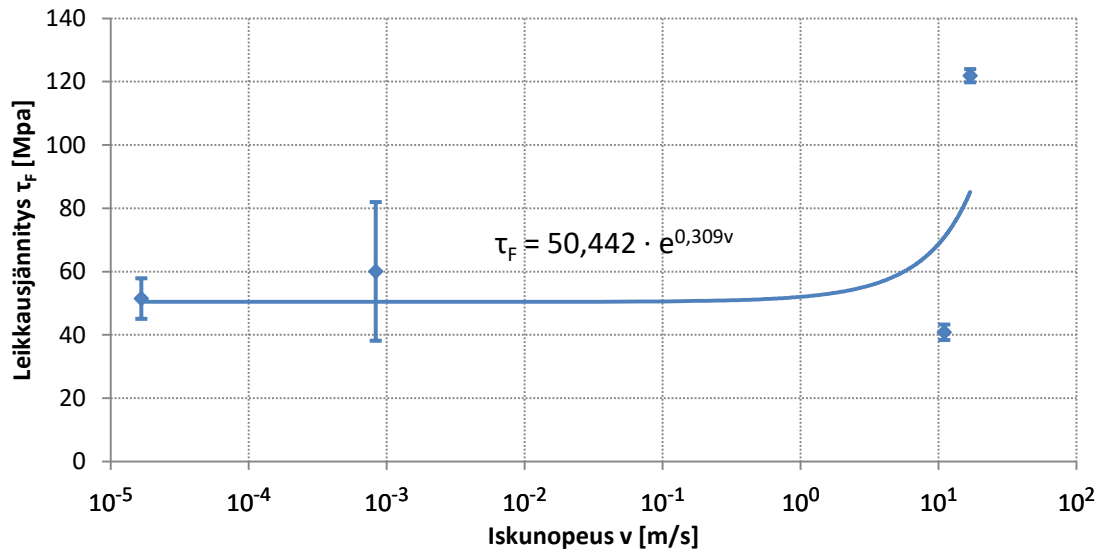
### 4.3 Myötönopeuserkkyys

**Taulukko 4** on koottu Kurun harmaan ja Taivassalon punaisen graniitin murtojännitysten keskiarvot suoritetuilla koenopeuksilla. Nopeudet on esitetty eksponenttimuodossa niiden suuren keskinäisen vaihteluvälin vuoksi.

**Taulukko 4:** Kurun harmaan ja Taivassalon punaisen graniitin murtojännitysten keskiarvot ja keskihajonnat eri koenopeuksilla

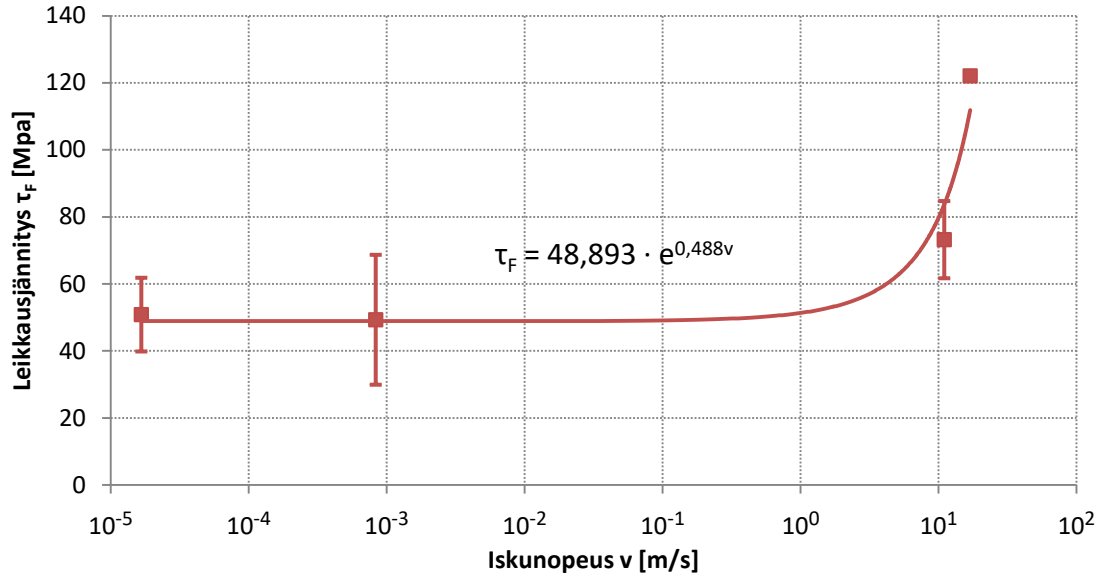
Nopeus (m/s)	Kurun harmaa Murtojännitys (MPa)	Taivassalon punainen Murtojännitys (MPa)
$1,7 \cdot 10^{-5}$	$51 \pm 6$	$51 \pm 11$
$8,3 \cdot 10^{-4}$	$60 \pm 22$	$49 \pm 19$
$1,1 \cdot 10^1$	$41 \pm 2$	$73 \pm 12$
$1,7 \cdot 10^1$	$122 \pm 2$	$122 \pm 0$

**Kuva 22** on havainnollistettu **Taulukko 4** esitettyjä Kurun harmaan graniitin tietoja. Lisäksi siihen on sovitettu eksponenttifunktiomuotoinen trendiviiva. Huomaa x-akselin logaritminen asteikko!



**Kuva 22:** Kurun harmaan graniitin leikkausjännitysten keskiarvot ja -hajonnat iskunopeuden suhteen sekä niistä muodostettu eksponentiaalinen trendikäyrä

**Kuva 23** on vastaavalla tavalla havainnollistettu **Taulukko 4** esitettyjä Taivassalon punaisen graniitin tietoja. Vastaavanlainen trendiviiva on sovitettu myös tähän kuvaajaan. Huomaa myös tässä kuvassa x-akselin logaritminen asteikko!



**Kuva 23:** Taivassalon punaisen graniitin leikkausjännityksen keskiarvot ja –hajonnat iskunopeuden suhteen sekä niistä muodostettu eksponentiaalinen trendikäyrä

Kuvaajiin sovitettujen trendikäyrien tarkoitus on havainnollistaa koetulosten pohjalta kivilajien leikkausjännityksen riippuvuutta iskunopeudesta kokonaisuudessaan. Sovitettu eksponentiaalinen trendikäyrä vaikuttaa saatujen tulosten pohjalta parhaalta vaihtoehdolta, vaikka etenkin Kurun harmaan graniitin tulokset eivät osukaan käyrälle kovinkaan hyvin. Trendikäyrän kaavan eksponentin vakio-osa kuvastaa kivilajin leikkausjännityksen riippuvuutta iskunopeudesta. Mitä suurempi vakion arvo on, sitä voimakkaammin kivilaji reagoi iskunopeuden muutokseen. Kaavan vakio-kerroin puolestaan kuvaa lähestyttävää leikkausjännitystä, kun iskunopeus lähenee nollaa. Sillä voidaan havainnollistaa kivilajin näennäisstaattista leikkauslujuutta.

Näin ollen Taivassalon punaisen graniitin näennäisstaattiseksi leikkauslujuudeksi saadaan näiden kokeiden perusteella noin 49 megapascalialia ja Kurun harmaan graniitin vastaavaksi arvoksi tulee 50 megapascalialia. Tähän pohjaten molempien kivilajien näennäisstaattiset lujuusarvot ovat hyvin lähellä toisiaan. Trendikäyrän kaavan eksponenteissa on sen sijaan suurempaa vaihtelua kivilajien välillä. Taivassalon punaisen graniitin kyseinen kerroin on noin 1,6-kertainen Kurun harmaan graniitin vastaavaan arvoon. Tämä vuoksi Taivassalon punaisen graniitin voidaan näiden tietojen pohjalta päätellä olevan huomattavasti herkempi iskunopeuden muutoksille kuin Kurun harmaa graniitti.

Näitä päätelmiä tehtäessä on kuitenkin huomioitava saatujen tulosten keskihajonta. Etenkin Instron-laitteistolla saatujen koetulosten keskihajonta on aivan liian suurta, jotta tuloksista voitaisiin vetää lopullisia johtopäätöksiä kivilajien ominaisuuksista. Taivassalon punaisen graniitin SHPB-mittauksia 2,0 barin iskutangon paineella ei suoritettu kuin yksi kappale, minkä vuoksi sen tarkkuudesta ei voida olla varmoja. Kurun harmaan graniitin tulokset kokonaisuudessaan osuvat erittäin huonosti trendikäyrälle. SHPB-

kokeiden hitaamman nopeuden leikkausmurtojännityksen arvo jää alhaisemmiksi kuin näennäisstaattisten kokeiden vastaavat arvot, mikä ei vastaa alkuperäisiä oletuksia. Kyseisen datapisteen vaikutus etenkin asetetun trendiviivan eksponenttivakioon on merkittävä.

#### 4.4 Menetelmän soveltuvuus ja sen arviointi

Tämän työn tarkoituksena oli vertailla kahden graniittilajin myötönopeuserkkyyttä näennäisstaattisilla ja dynaamisilla iskunopeuksilla. Saadut tulokset olivat jossain määrin realistisia, mutta myös erinäisiä virhetekijöitä oli havaittavissa. Lopullisia johtopäätöksiä kivilajien ominaisuuksista ei siten tuloksien pohjalta voida vetää, vaan jatkotutkimuksia on tehtävä. Seuraavaksi tarkastellaan koejärjestelyssä havaittuja ongelmakohtia ja niiden korjaustoimia mahdollisten jatkotutkimusten varalta.

Näennäisstaattisten ja dynaamisten testien välisten vertailukelpoisten tulosten tuottamisessa on aina omat haasteensa. Kahdella täysin eri periaatteella toimivalla laitteistolla aikaan saadut tulokset ja niiden vertaileminen mahdollistaa monien virhetekijöiden läsnäolon. Näin suurien myötönopeuserojen tuottaminen yksittäisellä laitteistolla on kuitenkin nykyteknologialla mahdotonta. Tämän vuoksi koejärjestelyä ja siihen liittyviä virheriskejä on tarkasteltava kriittisesti.

Instron-laitteistossa suurimpana haasteena oli saada kohdistettua laite oikein, jotta työntötanko osui tasaisesti koko näytteeseen kokeen alusta asti. Kohdistaminen on tehtävä manuaalisesti, joten virheriski on suuri. Jos kohdistus olisi automatisoitavissa, virheriski laskisi tai olisi vähintäänkin paremmin ennakoitavissa.

Etenkin Split Hopkinson Pressure Bar –laitteistolla tehdyissä kokeissa kohdattiin odottamattomia ongelmia. Suurimpana yksittäisenä virhelähteenä voidaan olettaa olevan näytteenpidikkeen aiheuttama jännityspulssin dispersio, jonka vuoksi takatankoon asennetun venymäliuskan antama data on suorastaan lukukelvotonta. Yksityiskohtaisemmin dispersiota voitaisiin tutkia simuloimalla tilannetta elementtimenetelmän keinoin.

Kivinäytteiden ominaisuudet voivat poiketa paljon toisistaan niissä vaihtelevien sisäisten rakennevirheiden vuoksi. Nämä rakennevirheet ovat saattaneet kasvaa entisestään näytteitä poratessa aiheuttaen suurempaa hajontaa molemmissa koejärjestelyissä. Lisäksi Kurun harmaan graniitin ja Taivassalon punaisen graniitin näytepaksuudet poikkesivat toisistaan. Näytepaksuus on huomioitu laskuissa, mutta paksuuserosta johtuvia muita vaikutuksia voi olla vaikea ennustaa. Esimerkkinä tällaisesta vaikutuksesta on mahdollisuus suurempiin rakennevirheisiin näytteen tilavuuden ollessa suurempi.

Tulosten tarkkuutta ja luotettavuutta voitaisiin helpoiten parantaa kasvattamalla otantaa. Kokeita tulisi tehdä enemmän sekä tässä työssä käytetyillä iskunopeuksilla että muilla iskunopeuksilla. Kurun harmaan graniitin tuloksista on nähtävissä, että etenkin suu-



remmilla iskunopeuksilla murtojännitys voi muuttua paljonkin, vaikka iskunopeutta on nostettu vain vähän. Tästä johtuen SHPB-mittauksia tulisi tehdä lisää eri iskunopeuksilla. Siten voitaisiin määrittää tarkemmin, millä nopeudella myötönopeuserkkyyden vaikutukset alkavat näkymään.

Näytteiden jälkitarkastelu päätettiin jättää pois näistä kokeista. Näytteen poistaminen näytteenpidikkeestä vahingoittamatta näytettä kokeen jälkeen oli vaikeaa etenkin suuren nopeuden kokeissa. SHPB-kokeissa olisi lisäksi jouduttu käyttämään momenttiansatekniikkaa, jotta näytteeseen olisi kohdistunut vain yksi isku monien iskujen sijaan.

SHPB-laitteistossa käytettiin pulssimuokkausmateriaalina ohuita kertakäyttöisiä kuparilevyjä isku- ja etutangon välissä. Käytetty levy materiaali ja -paksuus oli kuitenkin summittainen. Tarkemmalla perehtymisellä pulssimuokkaukseen olisi voitu mahdollisesti saavuttaa vähäisempää dispersiota iskupulssin osalta.

## 5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli määrittää Kurun harmaan ja Taivassalon punaisen graniitin leikkausmyötönopeusheikkyys ja selvittää näiden kivilajien välisiä eroavuuksia. Työn kokeellisen osuuden aluksi suunniteltiin koelaitteisto, jolla voi tarkastella kiven myötönopeusheikkyysominaisuutta. Laitteistoon sopiva korkillinen näytteenpidike valmistettiin ja tarvittava määrä kivinäytteitä porattiin pylväsporakoneella.

Kokeellinen osuus suoritettiin kahdessa osassa: näennäisstaattisilla myötönopeuksilla ja dynaamisilla myötönopeuksilla. Näennäisstaattisten nopeuksien kokeet suoritettiin Instron 8801-servohydraulisella aineenkoetelaitteistolla pystysuorassa asennossa. Kokeet suoritettiin molemmille kivilajeille työntötangon nopeuksilla 1 mm/min ja 50 mm/min. Dynaamisilla myötönopeuksilla suoritettavat kokeet suoritettiin puolestaan Split Hopkinson Pressure Bar -laitteistolla vaakasuuntaisessa asennossa. Kokeet suoritettiin molemmille kivilajeille iskutangon paineen arvoilla 1,0 bar ja 2,0 bar.

Kokeiden tulokset vahvistivat, että tarkasteltavien kivilajien murtojännitys kasvoi myötönopeuden kasvaessa. Taivassalon punaisella graniitilla suoritettavat kokeet vaikuttivat johdonmukaisilta myötönopeusheikkyuden puolesta. Murtojännityksen suhde iskunopeuteen noudatti eksponenttifunktiota  $\tau_f = 48,893 \text{ MPa} \cdot e^{0,0488\varepsilon'}$  missä  $\tau_f$  on leikkauksmurtolujuus ja  $\varepsilon'$  on iskunopeus kokeessa. Kurun harmaan graniitin tulokset sen sijaan noudattivat huomattavasti huonommin niiden pohjalta luotua eksponenttifunktiota  $\tau_f = 50,442 \text{ MPa} \cdot e^{0,0309\varepsilon'}$ . Tulosten suuren hajonnan vuoksi jatkotutkimuksia on suositeltavaa tehdä, ennen kuin saatuja kivilajien ominaisuuksia voidaan pitää yleisesti pätevinä. Näitä jatkotutkimuksia toteutettaessa on suositeltavaa ottaa huomioon luvussa 4.4 mainittuja korjauksia ja lisäyksiä virhetekijöiden minimoimiseksi.

## LÄHTEET

- [1] J. Zhao, "An overview of some recent progress in rock dynamics research," tekijä: *Advances in Rock Dynamics and Applications*, vuosik. III, Boca Raton, CRC Press, 2011, pp. 5-33.
- [2] J. Zhao, H. Li ja Y. Zhao, "Dynamic Strength Test of the Bukit Timah Granite," Nanyang Technological University, Singapore, 1998.
- [3] K. Fukui, S. Okubo ja A. Ogawa, "Some aspects of loading-rate dependency of sanjome andesite strengths," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vuosik. VII, nro 41, pp. 1215-1219, 2004.
- [4] J. Zhao, "Applicability of mohr-coulomb and hoek-brown strength criteria to the dynamic strength of brittle rock," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vuosik. VII, nro 37, pp. 1115-1121, 2000.
- [5] T. Kazerani, *Micromechanical Study of Rock Fracture and Fragmentation under Dynamic Loads Using Discrete Element Method*, Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2011.
- [6] T. Kazerani ja J. Zhao, "Micromechanical parameters in bonded particle methods for modelling of brittle material failure".
- [7] T. Kazerani ja J. Zhao, "Simulation of dynamic fracturing in brittle materials using discrete element method and a full rate dependent logic for cohesive contact," *Engineering Fracture Mechanics*, 2011.
- [8] S. H. Cho ja K. Kaneko, "Influence of applied pressure waveform on the dynamic fracture process in rock," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, vuosik. V, nro 41, pp. 771-784, 2004.
- [9] S. Huang, X.-T. Feng ja K. Xia, "A Dynamic Punch Method to Quantify the Dynamic Shear Strength of Brittle Solids," *The Review of scientific instruments*, pp. 157-163, Toukokuu 2011.
- [10] J. Rösler, H. Harders ja M. Bäker, *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*, New York: Springer, 2007.
- [11] W. Soboyejo, *Mechanical Properties of Engineering Materials*, New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.

- [12] L. B. Freund, *Dynamic Fracture Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [13] C. E. Inglis, Kirjoittaja, *Stresses in a Plate due to the Presence of Cracks and Sharp Corners*. [Performance]. Institution of Naval Architects, 1913.
- [14] A. A. Griffith, "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, nro A221, pp. 163-198, 1921.
- [15] M. Meyers ja K. Chawla, *Mechanical Behavior of Materials*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [16] W. M. Telford, L. P. Geldart ja R. E. Sheriff, *Applied geophysics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [17] H. King, "https://geology.com," Geology.com, [Online]. Available: <http://geology.com/>. [Haettu 30 Elokuu 2017].
- [18] Tampereen Kovakivi Oy, "suomalainenkivi.fi," Kiviteollisuusliitto ry, [Online]. Available: [https://www.suomalainenkivi.fi/kivet/kuru\\_grey\\_tampereen\\_kovakivi](https://www.suomalainenkivi.fi/kivet/kuru_grey_tampereen_kovakivi). [Haettu 4 Marraskuu 2017].
- [19] Palin Granit Oy, "suomalainenkivi.fi," Kiviteollisuusliitto ry, [Online]. Available: [https://www.suomalainenkivi.fi/suomalaiset-luonnonkivilajit/https://www.suomalainenkivi.fi/kivet/balmoral\\_red\\_palin\\_granit](https://www.suomalainenkivi.fi/suomalaiset-luonnonkivilajit/https://www.suomalainenkivi.fi/kivet/balmoral_red_palin_granit). [Haettu 4 Marraskuu 2017].
- [20] Illinois Tool Works Inc., "www.instron.com," 16 5 2017. [Online]. Available: <http://www.instron.us/-/media/literature-library/products/2013/10/wb1103c-8801-fatigue-testing-system.pdf?la=en-US>. [Haettu 12 Marraskuu 2017].
- [21] M. Hokka, *Effects of Strain Rate and Temperature on the Mechanical Behavior of Advanced High Strength Steels*, Tampere: Tampere University of Technology, 2008.
- [22] P. L. P. Wasantha, P. G. Ranjith, J. Zhao, S. S. Shao ja G. Permata, "Strain Rate Effect on the Mechanical Behaviour of Sandstone with Different Grain Sizes," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vuosik. 48, nro 5, pp. 1883-1895, 2015.