

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

Tommi Mäkelä

**SEULAMURSKAIMEN MURSKAUSOMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN JA
KEHITTÄMINEN**

Työn tarkastajat:

Professori Aki Mikkola

TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Tommi Mäkelä

Seulamurskaimen murskausominaisuuksien tutkiminen ja kehittäminen

Diplomityö

2014

65 sivua, 35 kuvaa, 3 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Professori Aki Mikkola
TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: Seulamurskain, murskaus, murtuminen, halkeaminen, kuluminen ja lohkeaminen

Keywords: Screener crusher, crushing, shattering, cleavage, attrition and chipping

Työn tavoitteena oli kehittää seulamurskaimen murskausprosessia selvittämällä murskaukseen vaikuttavia tekijöitä. Murskausprosessin sisäistämisen myötä voidaan saavuttaa parempi jaekoon hallinta, parantaa kapasiteettia sekä luoda tehokkaampia murskaussovelluksia. Murskausprosessia tutkittiin aluksi murskaukseen vaikuttavien teorioiden kautta. Teoriapohjaista tietoa ja murskaustapahtumaa tutkittiin käytännön testeillä, joissa testattiin seulamurskainta useilla eri materiaaleilla ja erilaisilla tuotevariaatioilla. Testeissä kerättiin näytteitä jaekoon jatkotutkimusta varten sekä saatujen tulosten pohjalta vertailtiin eri tuotevariaatioiden keskeisiä eroja. Saavutettuja tuloksia analysoitiin ja kehitettiin uusia potentiaalisia ratkaisuja seulamurskaimiin.

Seulamurskaimen nykyinen rakenne on kehitetty ennen kaikkea seulontasovelluksiin ja sen toiminta perustuu rungon sisällä materiaalin pyörivään liikkeeseen. Murskausprosessissa on kuitenkin oleellista pyrkiä vähentämään sisäistä pyörintäliikettä, joka on hidasteena kappaleiden murskaukselle. Lisäksi seulamurskaimessa on useita rakenteita, jotka on kehitetty erityisesti seulontaa varten ja niiden uudentlaisella rakennesuunnittelulla voitaisiin saavuttaa huomattavasti parempia tuloksia murskauksen kannalta. Nämä tekijät kuitenkin vaativat huomattavan paljon tehoa, mikä puolestaan saattaa asettaa uusia haasteita suunnitteluun, sillä seulamurskaimessa käytettävissä oleva teho on varsin rajallinen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of technology
Department of Mechanical Engineering

Tommi Mäkelä

Research and development of screener crusher crushing capacity

Master's thesis

2014

65 pages, 35 figures, 3 tables and 3 appendices

Examiners: Professor Aki Mikkola
D. Sc. (Tech) Kimmo Kerkkänen

Keywords: Screener crusher, crushing, shattering, cleavage, attrition and chipping

The objective of this thesis was to develop screener crushers crushing process by finding out affecting crushing factors. Better understanding for the crushing process creates possibilities to control for the current fragment sizes, improve the capacity and create more effective crushing applications. The crushing process was examined at first through the crushing theories. The theory based crushing information and the crushing process was examined in experimental tests where tested screener crushers in many different kind of materials and product variations. In these tests were collected material samples for the fragment size analysis. The results were analyzed for comparing between different kinds of product variations. Based on achieved results were developed new potential solutions for screener crushers.

Screener crushers current structure is developed primarily in screening applications and the operational principle is based on materials rotating movement inside the frame. In crushing process it is essential try to reduce the materials rotating movement which usually slows down the whole crushing process. In addition there are many structures which are developed in screening applications and with the new structural design could be achieved much better results in crushing applications. These factors however require a lot of power which on the other hand may set new challenges for the design because the disposable power is quite limited in screener crushers.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Allu Finland Oy:lle Pennalaan. Haluan kiittää Lappeenrannan teknillisen yliopiston ohjaajiani Kimmo Kerkkämästä ja Aki Mikkolaa ohjeista tämän diplomityön valmiiksi saattamisessa. Kiitos myös kaikille muille tässä työssä auttaneille henkilöille. Erityisesti haluan kiittää Allu Finland Oy:n tuotekehitysjohtaja Sami Arolaa kaikesta tähän työhön liittyvistä asioista; työn tilaamisesta, aiheesta sekä useista käytännön neuvoista ja ohjeista tätä työtä varten.

Pennalassa 21.09.2014

Tommi Mäkelä

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	8
1.1	Tausta.....	9
1.2	Tavoitteet	9
1.3	Rajaus.....	10
2	MURSKAUSTEKNIIKAN TUTKIMUS.....	11
2.1	Murskausilmiö	11
2.1.1	Murtuminen	12
2.1.2	Halkeaminen	13
2.1.3	Kuluminen ja lohkeaminen.....	13
2.1.4	Puristusjännityksen vaikutus.....	14
2.1.5	Kuormitustilanteiden vaikutus murskaukseen	16
2.1.6	Murskaukseen vaadittava energia.....	19
2.2	Jaekoko	21
2.3	Kapasiteetti	23
2.4	Erilaiset murskauslaitteet ja -menetelmät	23
2.4.1	Puristusvoimalla toimivat murskaimet	23
2.4.2	Iskuperiaatteella toimivat murskaimet.....	25
2.4.3	Murskaintyyppien vertailu.....	25
2.4.4	Erityyppisiä seulamurskaimia.....	26
2.5	Seulamurskaimen toimintaperiaate.....	28
2.6	Murskausrummun suunnitteluun vaikuttavat parametrit	29
3	TESTITULOKSET	32
3.1	Testien tavoitteet.....	32
3.2	Testisuunnitelma.....	32

3.3	Mittausten suorittaminen	33
3.4	Rakennusmateriaalijätteen murskaustestien tulokset.....	33
3.5	Lecaharkkojen murskaustestien tulokset	39
3.6	Jaekoon tutkimus	43
4	MURSKAUKSEEN VAIKUTTAVIEN TEKIJÖIDEN ANALYSOINTI	45
4.1	Seulamurskaimen pinta-ala ja työkierto	45
4.2	Rummut	46
4.2.1	Testeihin kehitetyt rummut	47
4.2.2	Lisäteräpalarakenne	48
4.3	Pyörimisnopeus.....	49
4.4	Kidan vaikutus	50
4.5	Teräpalan muoto	53
4.6	Vastaterä rakenne.....	55
4.7	Murskaukseen soveltuvan maa-aineksen kovuusluokittelu	56
4.8	Jatkokehitysideat.....	58
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	60
	LÄHTEET	63
	LIITTEET	
	LIITE I: Murskaukseen vaadittavan tehon laskeminen.	
	LIITE II: Mittaustaulukko.	
	LIITE III: Kiviainestutkimukset.	

SYMBOLILUETTELO

A	[mm ²]	Teräpalan iskupinta-ala
C	[-]	Murskausvakio
D	[mm]	Loppujaekoko
d	[mm]	Kiven halkaisija
dD	[mm]	Alkujaekoko
dE	[J/kg]	Murskaukseen vaadittu energia
E	[J]	Kokonaisenergia
F	[N]	Teräpalan iskuvoima
K	[-]	Materiaalivakio
K_K	[-]	Kickin materiaalivakio
L	[mm]	Rumpujen välinen etäisyys
M	[Nm]	Momentti
M_F	[tn/h]	Kapasiteetti
m	[kg]	Massa
n	[-]	Materiaalin hienontamisvakio
r	[mm]	Rummun säde
x_1	[mm]	Lopputuotteen jaekoko
x_2	[mm]	Syötemateriaalin jaekoko
μ	[-]	Kitkakerroin
σ_p	[MPa]	Puristuslujuus
θ	[°]	Puristuskulma

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan seulamurskaimen murskaustapahtumaa ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Työssä tutkitaan erityisesti murskaavien rumpujen toimintaperiaatetta. Seulamurskain on kaivamiseen tai materiaalin lastaamiseen tarkoitettu lisälaitte, jolla peruskone voidaan muuntaa monipuoliseksi seulonta-, murskaus- ja sekoitusasemaksi. Näin ollen voidaan säästyä kalliilta investoinneilta kiinteisiin laitteisiin. Seulamurskainta on lisäksi helppo kuljettaa työkohteesta toiseen pienen koon ansiosta.

Seulamurskain on lisälaitteena kiinnitettävä hydraulitoiminen työlaite esimerkiksi kaivukoneisiin ja pyöräkuormaajiin. Seulamurskaimessa on teräksestä hitsattu runko, joita on saatavilla useita erikokoisia vaihtoehtoja. Rungon sisällä on tyypillisesti mallista riippuen kahdesta neljään kappaletta rumpuja, joiden päättehtävä on seuloa tai murskata työstettävä materiaali. Rumpujen malli valitaan aina asiakkaan käyttökohteen mukaan. Vaakasuurtaiset rummut pyörivät samansuuntaisesti ja pyörimissuuntaa voidaan vaihtaa peruskoneen ohjaamosta käsin. Kuvassa 1 on esitetty Allu seulamurskain.



Kuva 1. ALLU seulamurskain (Allu Finland, 2014).

Seulamurskain soveltuu moniin erilaisiin käyttökohteisiin materiaalista riippuen. Seulamurskaimen etu on, että työtoimenpiteitä voidaan suorittaa samanaikaisesti. Tämä tarkoittaa esimerkiksi samanaikaista seulontaa, murskausta ja lastausta yhdessä työvaiheessa. Näin voidaan säästää aikaa ylimääräisiltä työvaiheilta ja parantaa tuottavuutta. Mahdollisia käyttökohteita on monenlaisia kuten putkilinjan täyttö, maa-aineksen seulonta jätteen seasta, biojätteen kompostointi, asfaltin murskaus ja lasin murskaus. (Allu Finland, 2014.)

1.1 Tausta

Lähtökohtana on tarve kehittää uusia innovatiivisia ratkaisuja seulamurskainmarkkinoille. Uusien tuotteiden lisäksi tärkeä tekijä on myös omien mallien suojaaminen sekä uusien mallien myötä uusien sovellusten ja asiakkaiden saavuttaminen. Tässä työssä käsitellään yksittäisen kappaleen murskaukseen vaikuttavia tekijöitä ja seulamurskaimen rumpujen toimintaa, joiden tehtävä on murskata käsiteltävät materiaalit.

Käytössä olevien rumpujen toiminnasta on paljon oletuksia ja murskaukseen vaikuttavat tekijät ovat osittain epäselviä. Seulamurskainten toiminnan kehittämiseksi pyritään selvittämään murskaukseen vaikuttavia tekijöitä ja eri suureiden vaikutuksia lopputulokseen. Selvityksen tukena käytetään työn yhteydessä tehtäviä kokeellisia rumputestejä, joissa verrataan nykyisiä malleja sekä mahdollisia uusia ratkaisuja havaintojen tekemiseksi.

1.2 Tavoitteet

Tutkimuksen avulla pyritään kehittämään seulamurskaimiin ratkaisuja, jotka ovat entistä tehokkaampia ja kestävämpiä. Tärkeimmät tavoitteet ovat parempi jaekoon hallinta, kapasiteetin parantaminen, murskausominaisuuksien kehittäminen ja kulutusosien kulumiskestävyyden parantaminen.

Tärkeimpänä tavoitteena on pyrkiä hallitsemaan paremmin seulamurskaimella saavutettava jaekoko. Jaekoko muodostuu seulamurskaimen läpäisevästä materiaalivirrasta ja siihen vaikuttaa koneessa käytetyt osavaihtoehdot. Tavoitteiden kannalta on oleellista selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat saavutettuun jaekokoon ja millä vaihtoehdoilla saavutetaan jaekoon helppo hallinta.

Tuottavuuden kannalta katsottuna oleellinen tavoite on kapasiteetin parantamistarve. Tavoitteena on parantaa nykyisten seulamurskainten kapasiteettiä 30 %. Kapasiteetillä tarkoitetaan seulamurskaimen tuotantokykyä tietyllä materiaalilla aikayksikössä [t/h]. Parempi kapasiteetti tarkoittaa yhdelle kauhalliselle työstettävää materiaalia nopeampaa tyhjenemisaikaa, joka puolestaan tarkoittaa parempaa tuottavuutta. Asiakkaat voivat asettaa tavoitteeksi tietyn kapasiteetin tuntia kohden, joten seulamurskaimen kapasiteetillä on merkittävä vaikutus. Työssä tutkitaan millä eri keinoilla kapasiteettia voidaan parantaa. Kapasiteetin parantaminen liittyy läheisesti jaekoon tutkintaan, sillä pienempi jaekoko usein pienentää samanaikaisesti kapasiteettia. Näin ollen tavoitteena on löytää ratkaisuja, joilla voitaisiin saavuttaa haluttu jaekoko, kapasiteetin pysyessä tavoitteiden sisällä.

Testeissä keskitytään myös tutkimaan nykyisten rumpuratkaisuiden kulumiskestävyyttä. Kulutusosien kulumiskestävyyttä on tavoitteena parantaa 100 %. Kulumiskestävyys tarkoittaa kestävyyttä etenkin abrasiivista eli hankaavaa kulumista vastaan. Työssä pyritään löytämään uusia tai korvaavia ratkaisuja kulumiskestävyuden parantamiseksi. Erityisesti huomiota kiinnitetään teräpalojen kulumiskestävyuteen. Nykyiset teräpalapalaratkaisut kuluvat kovan materiaalin murskauksessa voimakkaasti ja kulumista vastaan yritetään löytää uusia ratkaisuja, joiden myötä tavoitellaan teräpaloille pidempää käyttöikää.

1.3 Rajaus

Tämä diplomityö sisältää tutkimuksen seulamurskainten murskausominaisuuksien kehittämiseksi. Työ sisältää teoriakatsauksen murskauksen periaatteen selvittämiseksi. Seulamurskainten nykytilaa tutkitaan aluksi testeillä, joiden tarkoituksena on selvittää nykyisten rumpujen tuottama jaekoko ja kapasiteetti sekä tutkia kulumiskestävyyttä. Testeissä havaittujen tulosten pohjalta analysoidaan nykyisen rakenteen toimintaa ja pohditaan potentiaalisia kehityskohteita.

Työ on luonteeltaan konseptitutkimus, jossa pyritään selvittämään tuotteiden soveltuvuus markkinoille. Tutkimuksessa pyritään löytämään oikeat menetelmät tehokkaaseen murskaamiseen. Työn tarkoituksena ei ole tuottaa lopullista tuotantomateriaalia ja työ sisältää tutkimuksen ainoastaan liittyen seulamurskaimen murskauskehitykseen ja seulontasovellukset jätetään tämän diplomityön ulkopuolelle.

2 MURSKAUSTEKNIIKAN TUTKIMUS

Materiaalin murtuminen on satunnainen prosessi ja yksittäisen kappaleen murtumiseen vaikuttavat monet tekijät. Etukäteen ei tiedetä murtuuko yksittäinen kappale iskun vaikutuksesta, mutta tiedetään kuitenkin, että murtuman todennäköisyys liittyy energian määrään, joka kohdistuu kappaleeseen iskun aikana. Kun yksittäinen kappale on iskun kohteena, se pystyy vastaanottamaan tietyn määrän energiaa ennen kuin se murtuu. Tämä tunnetaan kappaleen murtoenergiana ja se on yksi kappaleen ominaisuuksista. Murtoenergia on materiaaliominaisuus, johon vaikuttaa kappaleen koko, muoto ja suunta, joka kohdistuu kappaleeseen iskun voimasta. (King, 2001, s.133.)

2.1 Murskausilmiö

Tietyt materiaalit murtuvat ensisijaisesti puristusjännityksen vaikutuksesta, mikä tapahtuu iskun vaikutuksesta. Tämä johtaa kappaleen halkeamiseen ja murskautumiseen. Toinen murtuman aiheuttaja on kappaleen pinnan leikkausjännitys. Sen johdosta murskattava kappale altistuu väsymiselle ja kulumiselle. Kaikki materiaalit vastustavat murtumista tiettyyn pisteeseen asti ja kappaleen murskaus vaatiikin paljon energiaa. (King, 2001, s.127.)

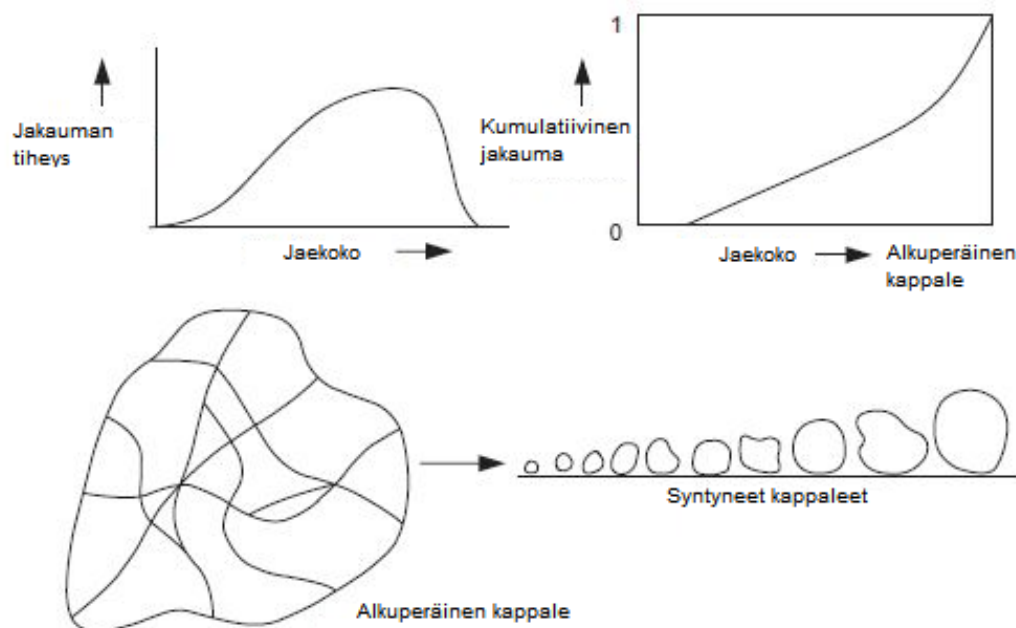
Puristusperiaatteella toimivat murskaimet puristavat syötemateriaalin koneen kiinteiden ja liikkuvien kulutusosien väliin. Iskutyypisten murskainten toiminta puolestaan perustuu pyörievien kulutusosien iskuvoimaan. Näin syötemateriaali saadaan murtumaan, mutta toisaalta se on hyvin kuluttavaa koneen kulutusosille. Kulutusosien kulumiseen vaikuttavat monet tekijät, suurimpina vaikuttavina tekijöinä ovat kulumistyyppi, ympäristötekijät, murskaimelle asetetut käyttöparametrit ja syötemateriaalin sekä kulutusosien materiaaliominaisuudet. (Metso, 2011.)

Murskauksen kannalta on oleellista ymmärtää kovuuden ja sitkeyden välinen ero. Materiaalin kovuus kuvastaa kykyä vastustaa muodonmuutosta kun sitkeys puolestaan tarkoittaa materiaalin jännityksen sietokykyä ilman murtumista. Kovuustaulukoita on useita erilaisia ja yksi usein käytetty on Mohin asteikko, joka kuvaa materiaalin kovuutta naarmuuntumisessa tai hankauksessa eli kuinka helposti materiaalin pinnasta pystytään

raapimaan palasia (King, 2005). Yleensä kovuuden ja sitkeyden välillä on selvä riippuvuus, mutta sitkeys on pääasiallinen tekijä tarkasteltaessa kappaleiden murtumista. (King, 2001, s.127.)

2.1.1 Murtuminen

Kappaleen murtuminen tapahtuu puristusjännityksen vaikutuksesta ja yksittäisen kappaleen murtuminen saa aikaan laajan kirjon eri jaekokoja. Uudet syntyneet yksittäiset kappaleet ovat välittömästi alttiita uudelle murtumiselle. Todellisessa murskaustapah- tumassa murtuminen etenee askel askeleelta niin, että aluksi yksittäinen pääkappale murtuu pienempiin osiin ja nämä puolestaan murtuvat yhä edelleen pienempiin kappaleisiin. Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen murtumisprosessin periaate eli alkuperäisestä kappaleesta muodostuneet uudet jaekoot.

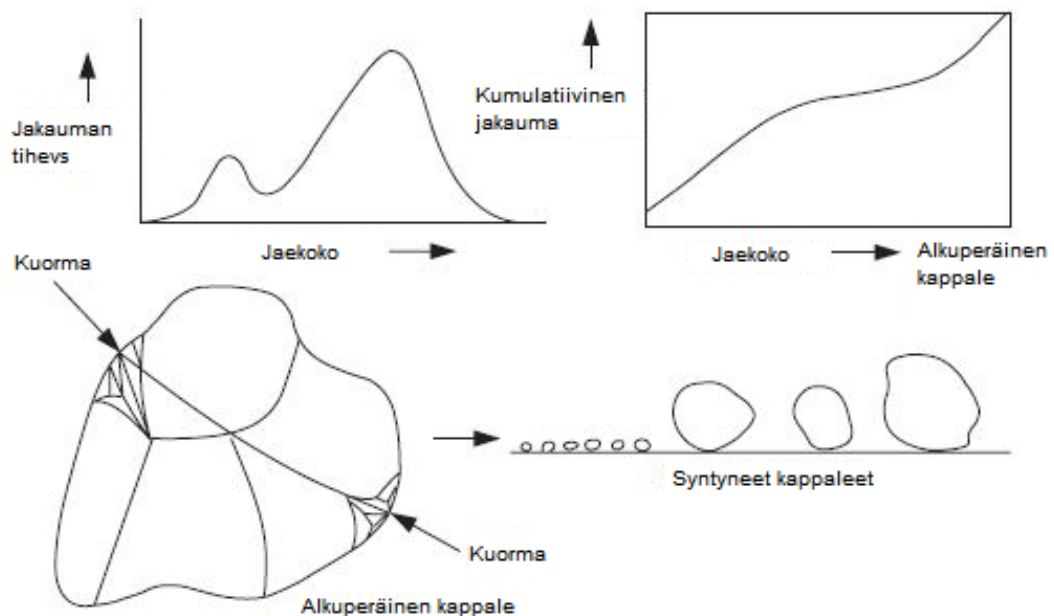


Kuva 2. Murtumisprosessi tuottaa laajan kirjon eri jaekokoja tasaisella jakaumalla (King, 2001, s.131).

Tämä on tyypillinen murtuneiden partikkeleiden kokojakauma. Lopputuloksena yhdestä kappaleesta muodostuu pienempiä partikkeleita kuvan 2 mukaisesti. Edellä esitetyn mukainen kappaleen murtuminen on yleisin murtumistyyppi teollisuussovelluksissa. (King, 2001, s.129–130.)

2.1.2 Halkeaminen

Mikäli tutkittavalla partikkelilla on tiettyjä pintoja missä alkuperäinen kappale todennäköisesti murtuu, kappaleen halkeaminen tapahtuu kyseisillä pinnoilla. Mikäli murtumismenetelmällä saavutettavia useita murtumia pienempiin tasaisen jakauman partikkeleihin ei tapahdu, tapahtuu halkeaminen, joka aikaansaa useita suhteellisen isoja jaekokoja sekä vastaavasti hyvin pieniä jaekokoja, jotka ovat peräisin puristusjännityksen aiheuttamasta halkeamasta. Tämän tyyppin tuottama jaekokojakauma on melko kapea verrattuna murtumisen tuottamaan jaekokojakaumaan. Kuvassa 3 on esitetty halkeamisen tuloksena syntyvät jaekoot.



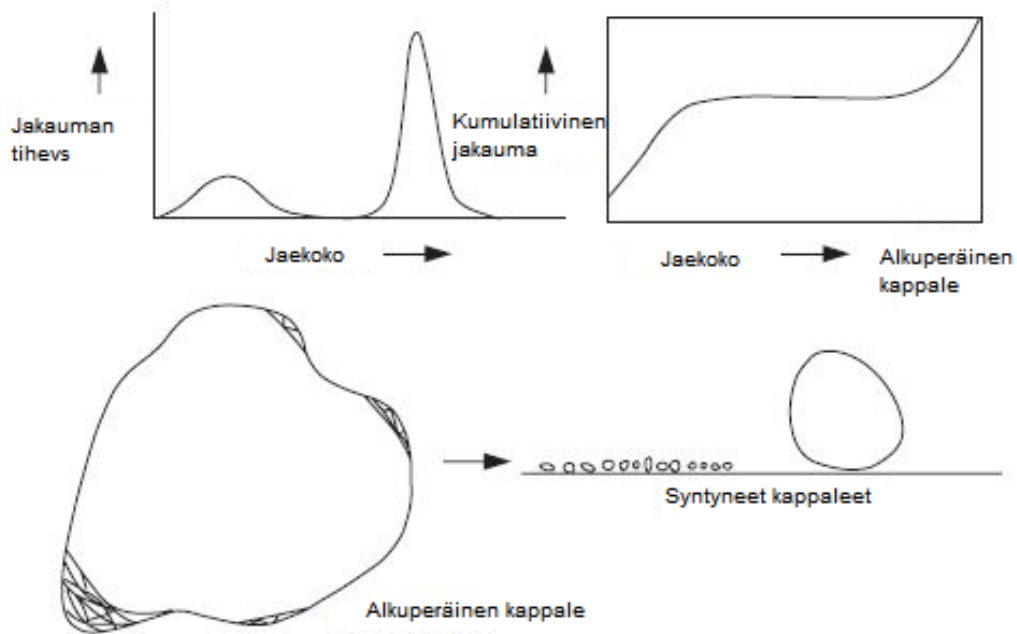
Kuva 3. Halkeaminen tuottaa kapean kirjon jaekokoja, jotka voidaan erottaa suuriin ja pieniin kappaleisiin (King, 2001, s.131).

Halkeamisen tuloksena syntyy näin ollen suhteellisen vähän eri jaekokoja, jotka ovat halkaisijaltaan erikokoisia. Lopputuloksena voi syntyä kahta tai useampaa eri jaekokoa. (King, 2001, s.130.)

2.1.3 Kuluminen ja lohkeaminen

Kulumisen ja lohkeaminen tapahtuvat kun alkuperäinen partikkeli on suuri ja jännitykset eivät ole tarpeeksi suuria aiheuttaakseen murtuman. Alkuperäisen kappaleen koko tuskin edes muuttuu, mutta kuluminen tuottaa silti lukuisan määrän partikkeleita, jotka ovat

jaekoolta huomattavasti pienempiä kuin alkuperäinen kappale. Toista vastaavaa prosessia ei ole, jossa alkuperäinen kappale säilyy lähes alkuperäisessä koossaan, mutta silti siitä saadaan suuri määrä pieniä kappaleita. Kuvassa 4 on esitetty tyypilliset jaekoot kappaleen kulumisen ja lohkeamisen seurauksena.

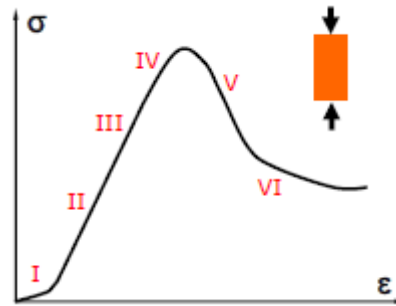


Kuva 4. Kulumisesta ja lohkeamisesta syntyvät uudet kappaleet ovat jaekoolta pieniä kappaleita, jotka ovat peräisin alkuperäisestä isosta kappaleesta (King, 2001, s.132).

Loppujaekokojakaumassa on selvästi erotettavissa huippu pienellä jaekoollla. Tämä huippu johtuu alkuperäisen kappaleen kulumisen tuloksena syntyneistä pienistä partikkeleista. (King, 2001, s. 130–132.)

2.1.4 Puristusjännityksen vaikutus

Puristusjännitys kertoo materiaalin kyvystä vastustaa aksiaalisia puristusvoimia. Yleisin käytetty jännitys on yksiakiaalinen puristusjännitys. Puristusjännitys on yksi tärkeimmistä kivimateriaalien mekaanisista tekijöistä suunnittelussa, analyyseissä ja mallinnuksessa. Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen jännitys-venymäkäyrä kivimateriaalin murskauksessa puristusjännityksen vaikutuksesta. Täydellinen jännitys-venymäkäyrä voidaan jakaa 6 osaan, mihin kivimateriaali altistuu murskauksen aikana.



Kuva 5. Täydellinen jännitys-venymäkäyrä ja sen 6 vaihetta (Zhao, 2010).

Vaihe 1: Tutkittava kappale on alun perin jännityksen alaisena. Alkuperäiset mikrohalkeamat kohdistuvat yleensä murskattavan kappaleen kulmiin vaikuttavan jännityksen kasvaessa ja kappaleessa voi tapahtua pieniä muodonmuutoksia. Tämä aiheuttaa epälineaarisuutta jännitys-venymäkäyrään. Epälineaarisuus on näkyvämpää heikoilla ja paljon huokosia sisältävillä kappaleilla.

Vaihe 2: Kappale käyttäytyy periaatteessa lineaaris-elastisesti jännitys-venymäkäyrällä. Ensisijaisesti kappaleelle tapahtuu elastista muodonmuutosta pienien halkeamien kulkiessa kappaleen sisällä. Mikrohalkeamat alkavat loppuosissa tutkittavaa vaihetta, noin 35 - 40 % jännityshuipusta. Tässä vaiheessa jännitys-venymäkäyrä on vielä enimmäkseen korjattavissa oleva ja alkuperäinen kappale sisältää vain pieniä pysyviä vahinkoja.

Vaihe 3: Kappale käyttäytyy lähes lineaaris-elastisesti jännitys-venymäkäyrällä. Kappaleessa on havaittavissa hieman kasvua sivuttaissuuntaisessa jännityksessä kappaleen muodonmuutoksen johdosta. Mikrosäröjen eteneminen tapahtuu vakaisissa pisteissä ja särönkasvu on paikallista. Tämän vaiheen ylin kohta on rajana maksimaaliselle tiivistymiselle ja tilavuus pysyy vakiona puristusjännityksen ollessa noin 80 % maksimijännityksestä.

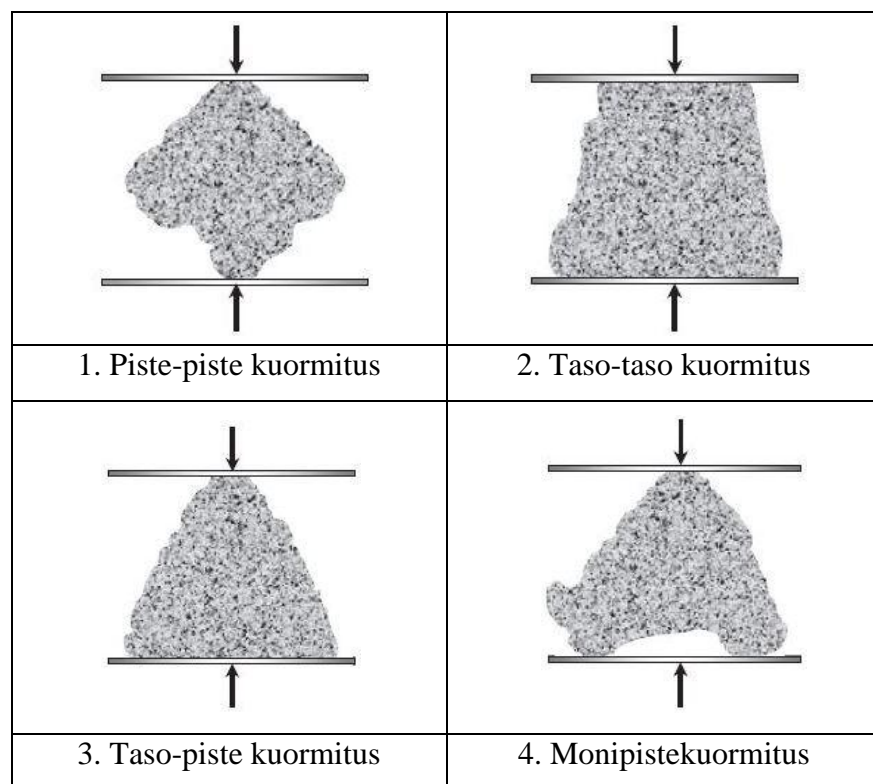
Vaihe 4: Kappale on läpikäynyt nopean mikrohalkeamien tapahtuman ja tilavuuden kasvun. Mikrohalkeamien sijainti ei ole enää yksittäistä ja ne pyrkivät kasaantumaan maksimijännityksen alueille sekä yhdistymään ja näin ollen pyrkien saamaan aikaan murtuman tai leikkauspinnan kappaleen kovuudesta riippumatta.

Vaihe 5: Maksimijännitys on saavutettu, mutta kappale on silti koossa, vaikka sisäinen rakenne on pahoin vaurioitunut. Tässä vaiheessa murtuma hajaantuu järjestelmällisesti ja kasvaa yhdeksi murtumaksi. Koekappale on kokenut murtuman ja maksimijännitys heikkenee venymän kasvaessa.

Vaihe 6: Kappale on jakautunut olennaisesti muodostaen erillisiä lohkareita ennemmin kuin koossa olevan kappaleen. Nämä lohkarit liukuvat poikittain ja vallitseva muodonmuutosmekanismi on lohkareiden välinen kitka. Uusia murtumia voi tapahtua vaihtelevan hiertymän johdosta. (Zhao, 2010.)

2.1.5 Kuormitustilanteiden vaikutus murskaukseen

Yksittäiseen kappaleeseen kohdistuu tietty kuormitus. Kuormitustilanteet ovat samat riippumatta siitä onko tutkittavaan kappaleeseen kohdistettu puristusvoima peräisin suoraan murskauslaitteesta vai toisiin murskattaviin kappaleisiin osumisesta. Erilaisia kuormitustilanteita on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Kappaleita neljässä eri kuormitustilanteessa (Tang et al., 2004, s.132).

Piste-piste kuormitustilanteessa murskattava kappale on kahden pistemäisen voiman puristuksessa. Puristusjännityksen aiheuttama murtuma syntyy kappaleen kahden kuormituspisteiden välille ja tutkittavassa tapauksessa kappale yleensä halkeaa. Kappale halkeaa näin ollen kahteen osaan ja pienempiä murtumia syntyy kuormituspisteiden lähetyville.

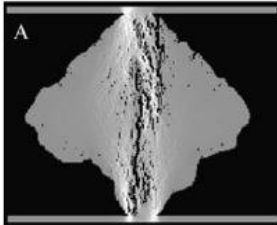
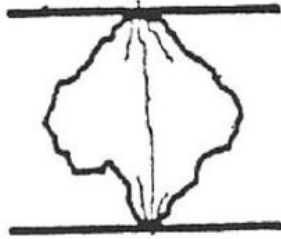
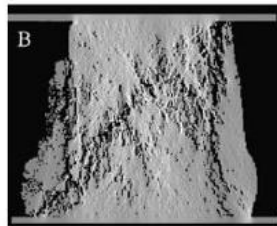
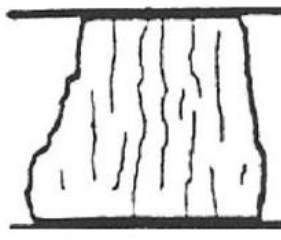
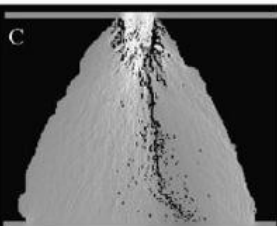
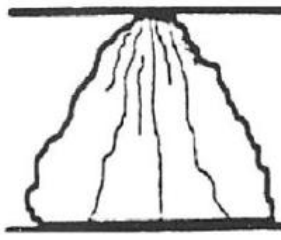
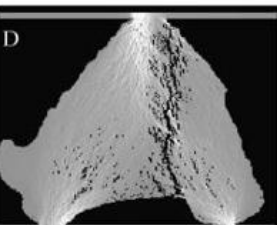
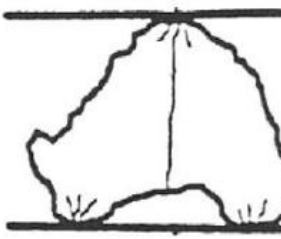
Taso-taso kuormitustilanteessa kappaletta kuormitetaan kahden likimäärin suoran tason välillä. Aluksi useita pieniä murtumia saa alkunsa satunnaisissa kulmissa. Tason kuormituspinoilta alkaa syntyä paikallisia halkeamia ja pienet murtumat puolestaan johtavat niiltä kohdilta kappaleen lohkeiluun. Lopuksi kappaleen keskiosassa muodostuu leikkausmurtuma, joka aikaansaa koko kappaleen halkeamisen.

Mikäli kappaletta kuormitetaan pisteen ja tason välillä, siihen kohdistuu yhdistelmä kahta aiemmin esitettyä kuormitustilannetta. Murtuma lähtee pistemäisen voiman kuormituspisteestä ja laajenee kohti tasopintaa. Pistemäisen kuormituspisteiden ympärillä on useita halkeamia ja ne laajenevat kohti tasopintaa. Murtumat haarautuvat myös laajemmalle alueelle kulkiessaan kappaleen läpi.

Monipistekuormituksessa, erityisesti kolmipisteisessä kuormitustilanteessa, päämurtuma alkaa monipistetuen keskeltä ja etenee sieltä kohti vastakkaista tuentapistettä. Tässä tapauksessa monipistetuen keskellä esiintyy vetojännitystä ja vastaavasti vastakkaisella puolella pistetuen kohdalla puristusjännitystä. Monipisteiden välinen vetomurtuma on yleensä ainut tärkeä näkyvä murtumatyyppejä tämän tyyppisessä kuormitustapauksessa. Kuormituspisteiden ympärille muodostuu myös pieniä halkeamia, jotka suuntautuvat kohti vastakkaisen puolen kuormituspistettä.

Kappaleen murtumisessa hallitsematon vetoalkeaminen ja kehittyvä puristusjännitys ovat päätyypit murtumisen aiheuttajina. Näiden murtumistyyppien vaikutuksesta kappale murtuu pienempiin osiin, joilla voidaan saavuttaa kaksi erityyppistä jaekokoa; karkea ja hieno. Karkeat kappaleet syntyvät vetoalkeamisen johdosta ja hienot kappaleet muodostuvat puristusjännityksen vaikutuksesta tai leikkausjännityksestä kuormituspisteiden lähellä. Taulukossa 1 on esitetty edellä mainitut kuormitustilanteiden murtumistapaukset neljässä eri kuormitustilanteessa. (Tang et al., 2004, s.138-139.)

Taulukko 1: Kappaleen murtuminen eri kuormitustilanteissa. Vasemmalla murtuma simuloitussa tapauksessa, oikealla murtuma todellisessa kuormitustilanteessa (Tang et al., 2004, s.139).

Kuormitus	Murtuman eteneminen	
Piste-piste		
Taso-taso		
Taso-piste		
Monipiste		

Kappaleen murtumisen tarkastelussa tulee huomioida yksilöllisesti kappaleen koko ja muoto, mutta silti tuloksissa on nähtävillä selkeä linja tulosten välillä. Tasojen välinen murskaus vaatii eniten voimaa murtaakseen kappaleen, kun vähiten voimaa tarvittiin tasopiste murskauksessa. Energian hyötyasteen kannalta pisteiden välinen murskaus puolestaan on kaikista tehokkainta. Murtumiseen vaikuttavat tekijät yllä oleville kappaleille on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2: Murtumaan johtaneet arvot kuormitustapauksissa. (Tang et al., 2004, s.141).

Kuormitustyyppi	Piste-piste	Taso-taso	Taso-piste	Monipiste
Maksimivoima (N)	5488,0	25097,0	4533,4	8323,5
Vetolujuus (MPa)	23,3	106,5	37,0	35,3
Lujuuskerroin K	1,165	5,325	1,850	1,765
Jäykkyys (MPa)	63,0	62,9	44,7	67,3
Jäykkyyskerroin K	1,050	1,048	0,745	1,122
Työ (J)	0,934	7,524	1,847	1,887
Kimmoenergia (J)	0,127	0,482	0,155	0,211
Energian hyötyaste (%)	13,6	6,4	8,4	11,2

Yleisesti kuvaava määritelmä kappaleen murtumisesta voidaan tiivistää seuraavasti: Kuormitustilanteen alussa kappale on puristusjännityksen alaisena ja kimmoenergiaa varastoituu kappaleeseen. Kappaleeseen syntyy paikallisia halkeamia heterogeenisyyden johdosta. Kuormituksen kasvaessa erillään olevista halkeamista syntyy mikroskooppisia murtumia, jotka heikentävät koko kappaleen rakennetta. Kuormituspisteen läheisyydessä mikroskooppiset murtumat etenevät epätasaisesti kuormitusvoiman suuntaisesti haarautuen. Lopullinen murtuma etenee koko kappaleen halki ja näin syntyy useita erillisiä kappaleita. Syntyneiden kappaleiden lukumäärä ja koko määräytyvät sisäisten murtumien koon, sijainnin ja murtopinta-alan mukaan. (Tang et al., 2004, s.142.)

2.1.6 Murskaukseen vaadittava energia

Murskausprosessin suunnittelussa on kaksi päätekijää murskattavuuden kannalta; murskaukseen vaadittavan tehon määrä ja sopivan murskaimen valinta. Tarvittavan tehon tai energian määrä muodostuu kappaleen murskaukseen vaadittavasta energiasta ja rumpujen pyörittämiseen vaadittavan energian määrästä. Tehon määrään vaikuttaa murskattavan materiaalin kovuus, syötteen lähtökoko ja vaadittu loppujaekoko. (Gupta & Yan, 2006, s.65-67.)

Kiven murtamiseksi tarvittavan energian määrää on tutkittu jo pitkään. Näistä on muodostunut kolme peruslakia; Ritteringerin, Kickin ja Bondin laki. Yleisesti tiedetään, että murskausprosessissa yksittäisen kappaleen murskautuessa uudet syntyneet kappaleet

muodostavat suuremman murskauspinta-alan. Murskaukseen käytetty energia dE , saadaan ratkaistua kaavasta:

$$\frac{dE}{dD} = KD^n \quad (1)$$

Kaavassa 1, dE on vaadittu energia, dD on murskattavien kappaleiden alkujaekoko, K on murskausvakio, joka kuvaa kiven materiaalilujuutta ja D on loppujaekoko. (Meech, 2014.)

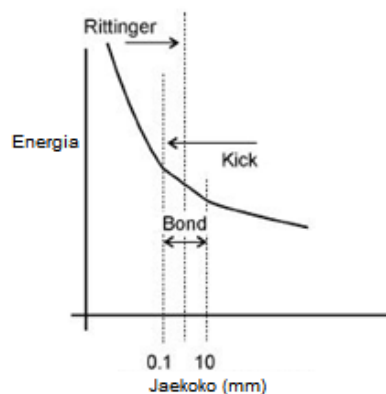
Käsiteltäessä tapausta eri lakien mukaan jokaisella lailla on omat arvot eksponentille n :

$$n = -2 \text{ (Rittinger)}$$

$$n = -1 \text{ (Kick)}$$

$$n = -1,5 \text{ (Bond)}$$

Kickin lukuarvoa käytetään lähinnä karkeille kappaleille, jotka ovat jaekooltaan suuria. Rittingerin lukuarvoa puolestaan käytetään hyvin hienoille kappaleille, jotka ovat yleensä syntyneet esimerkiksi hionnan tuloksena ja ovat jaekoolta erittäin pieniä kappaleita. Bondin lukuarvoa voidaan pitää käyttökelpoisena tutkittaviin tilanteisiin kahden edellä mainitun teorian välistä. Suurten kappaleiden murskauksessa vaadittavaa energiaa käsitellään yleensä Kickin lukuarvojen pohjalta, joten seuraavassa käsitellään vaadittavan energian määrää perustuen Kickin lakiin. Kuvassa 7 on esitettyä eri murskauskäytökelpoisuutta kuvaava jaekokotaulukko.



Kuva 7. Murskauskäytökelpoisuutta kuvaava jaekokotaulukko (Holdich, 2002).

Sijoittamalla kaavaan 1 Kickin vakio ja integroimalla, saadaan Kickin lauseke vaadittavan energian laskemiseksi murskauksessa seuraavalla kaavalla:

$$E = C \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (2)$$

Kaavassa 2, C on murskausvakio, x_1 on lopputuotteen jaekoko ja x_2 syötemateriaalin jaekoko.. Tästä puolestaan saadaan lopullinen kaava:

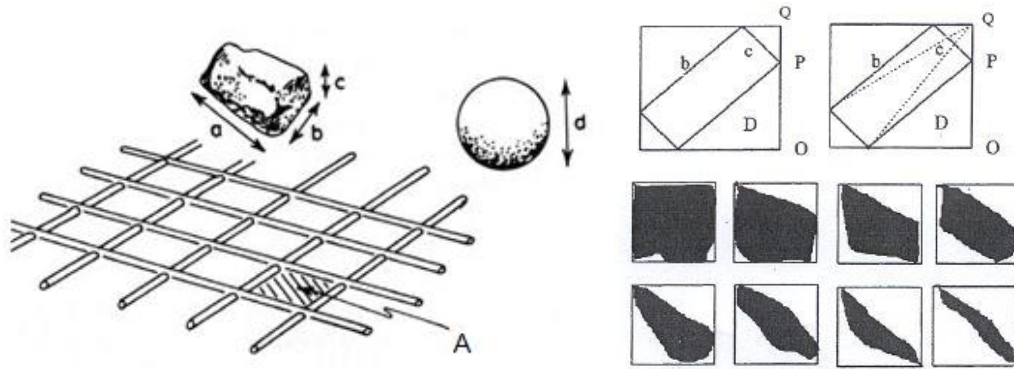
$$E = K_k \sigma_p \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (3)$$

Kaavassa 3, K_k on Kickin materiaalivakio, σ_p on tutkittavan materiaalin puristuslujuus. (Zámostný P, 2012)

Käytännössä syötemateriaalin jaekoon sijasta jaekoon hajonta kuitenkin määrittää yhtälön erityisesti kaivostoiminnassa. Näin pystytään määrittämään lopputuotteen hajonta murskauksen jälkeen. Kaivosteollisuudessa käytetään yleisesti jaekokoa, jossa 80 % syötemateriaalista läpäisee jaekokoseulan ja vastaavasti 80 % lopputuotemateriaalista läpäisee jaekokoseulan. Liitteessä 1 on esitetty laskentaesimerkki Kickin yhtälön käytöstä todellisessa murskaustilanteessa seulamurskaimella. (Gupta & Yan, 2006, s.65-67.)

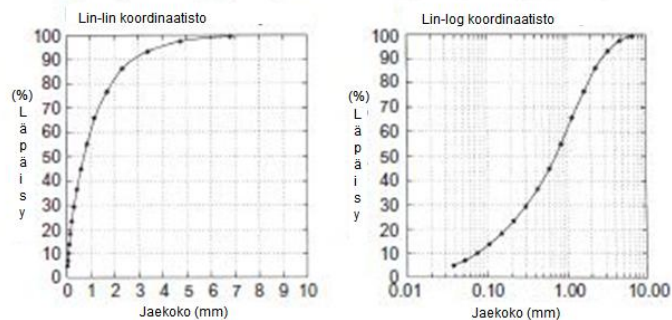
2.2 Jaekoko

Yksittäisen kappaleen koon määrittäminen on melko hankalaa. Yleensä tutkittavat kappaleet ovat monimuotoisia, eikä niiden koon määrittäminen onnistu yksikäsitteisen kappaleen kuten kuution sivun pituuden määrittämisellä. Tärkeimmät tekijät tutkittaessa jaekokoa ovat kappaleen koko ja muoto. Koon määrittämisessä käytetään yleisesti seulontamenetelmää, jossa kappaleen koko määritellään seulaverkon läpäisytestillä. Tässä menetelmässä tutkittavan kappaleen koko määritellään halkaisijan mukaan, olettaen tutkittava kappale pallomaiseksi. Kuvassa 8 on esitetty koon tutkimiseen tarkoitettu perinteinen seulaverkko ja kappaleiden muoto-ominaisuuksien vaikutuksia tutkittavaan kappaleeseen. (King, 2001, s. 6.)



Kuva 8. Kappaleen koon ja muodon välinen suhde tutkittaessa jaekokoa (Smith & Collis, 1993; Wang & Stephansson, 1996).

Tiettyyn jaekokoon kuuluvat kappaleet voivat olla todellisuudessa hyvin erikokoisia, koska kuvan 8 mukainen perinteinen seulaverkko ei huomioi kappaleen muotoa. Näin ollen pitkät ja kapeat kappaleet pääsevät seulaverkon läpi kohdatessaan verkon tietyissä kulmassa. Seulonnan tuloksista voidaan tehdä kuvaajia, jotka kertovat jaekokojakauman. Kuvassa 9 on esitetty tavallisia jaekoon kuvaajatyyppejä. (King, 2001, s. 12.)



Kuva 9. Tyypillisiä jaekoon kuvaajia (King, 2001, s. 12).

Tutkittaessa jaekokoa tulee kiinnittää huomiota myös syötemateriaalin jaekoosta, sillä jokaiselle laitteelle on ennalta määritetty tietyt murskausparametrit, joita kyseisellä laitteella pystytään murskaamaan tuottavasti. Koneen tekniset ominaisuudet vaikuttavat siihen kuinka suuria syötettäviä kappaleita pystytään murskaamaan. Ensimmäinen materiaalin esiseulontavaihe tapahtuu siis jo materiaalin syötön yhteydessä. (King, 2001, s. 81.)

2.3 Kapasiteetti

Perinteinen murskaimen tuottavuuden arviointimenetelmä on kapasiteetin mittaaminen. Se tarkoittaa kykyä käsitellä materiaalia tiettyä aikayksikköä kohden. Yleisesti käytetty tuotantokyvyn mittayksikkö on materiaalin käsittely tonneissa tuntia kohden [t/h]. Yksi tärkeimmistä oletuksista kapasiteetin määrittämiseen on koko seulamurskaimen pinta-ala, joka vaikuttaa saavutettavissa olevaan kapasiteettiin. Huomioitavia tekijöitä ovat myös syötettävän materiaalin materiaaliominaisuudet, jotka vaihtelevat käyttökohteen mukaan. Helpolla materiaalilla kapasiteetti on standardiarvoa parempi, mutta vastaavasti vaikealla materiaalilla kapasiteetti on standardia heikompi. (King, 2001, s. 82.)

2.4 Erilaiset murskauslaitteet ja -menetelmät

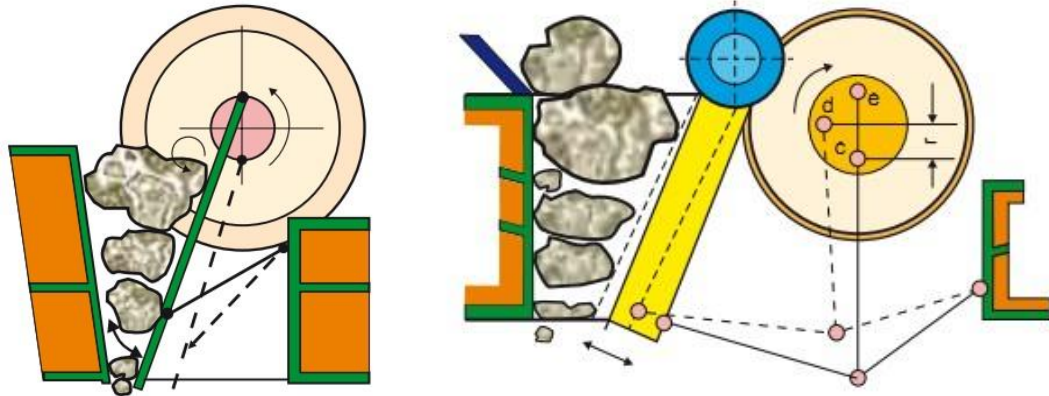
Murskaimet voidaan jakaa kahteen pääluokkaan; puristus- ja iskumurskaimiin. Puristusperiaatteella toimivat murskaimet puristavat materiaalia kunnes murskattava kappale murtuu. Iskumurskaimien toiminta puolestaan perustuu nopeaan pyörimisliikkeeseen, jossa kappaleet murtuvat pyörimisliikkeen aiheuttamista erittäin voimakkaiden iskujen vaikutuksesta. (Metso Minerals, 2006.)

2.4.1 Puristusvoimalla toimivat murskaimet

Puristusperiaatteella toimivat murskaimet puristavat syötemateriaalin koneen kiinteiden ja liikkuvien kulutusosien väliin. Kulutusosat altistuvat kulumiselle murskauksessa ja näin ollen niitä on vaihdettava säännöllisesti. Syötettävän- ja murskatun materiaalin kokoa pystytään säätelemään muuttamalla puristusosien etäisyyttä. Etäisyyden muuttaminen määrittää näin ollen murskaimen läpäisevän jaekoon. Puristusperiaatteella toimivia murskaimia ovat esimerkiksi leukamurskaimet, karamurskaimet, kartiomurskaimet ja valssimurskaimet.

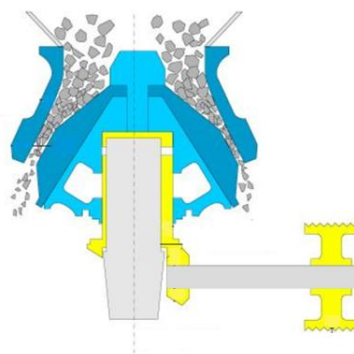
Leukamurskaimia käytetään yleisesti esimurskauksessa. Murskaimella pyritään näin ollen tuottamaan loppujaekokoja, jotka voidaan siirtää hihnakuuljettimilla seuraaville murskausvaiheille. Murskaus tapahtuu kiinteän ja liikkuvan leuan välissä. Leukamurskaimia on kahdentyypisiä; kierto- ja heilurimurskain. Leukamurskaimissa epäkeskon pyörivä liike saa aikaan puristussyklin. Heilurimurskaimessa on laakeroitu epäkeskoakseli, joka aikaansaa leukojen liikkeen akselin pyöriessä ja tämän lisäksi leuka liikkuu alaosastaan työnninlaattojen avulla. Liikkuva leuka kulkee edestakaisin kiinteää leukaa

vasten ja puristaa näin kappaleita. Kuvassa 10 on esitetty leukamurskaimien periaate. (Metso Minerals, 2006.)



Kuva 10. Vasemmalla kiertomurskaimen ja oikealla heilurimurskaimen toimintaperiaate (Metso Minerals, 2006).

Kartiomurskaimessa ja karamurskaimessa materiaali murskataan murskauskammiossa, kiinteän ulkoisen seinän ja sisällä epäkeskon akselin avulla pyörivän vaipan välissä. Epäkesko akseli saa aikaan värähtelevän liikkeen syötettävän materiaalin ja lähtömateriaalin välillä. Epäkeskisyyden on myös yksi merkittävimmistä tekijöistä, joka vaikuttaa murskaimen kapasiteettiin. Materiaalin murtuminen pienempiin palasiin tapahtuu laippojen välisen jatkuvan puristuksen seurauksena murskauskammiossa. Kuvassa 11 on esitetty kartiomurskaimen toiminta. (Metso Minerals, 2006.)

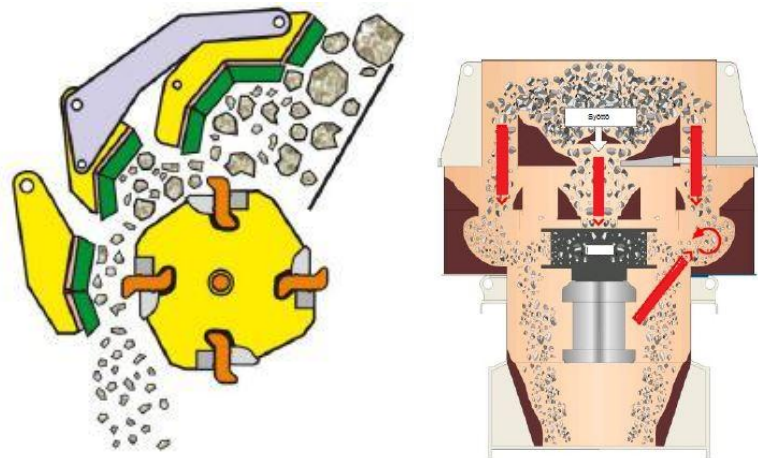


Kuva 11. Kartiomurskaimen periaate (Northstone Materials, 2014).

2.4.2 Iskuperiaatteella toimivat murskaimet

Iskumurskaimet voidaan jakaa vaak- ja pystysuuntaisiin murskaimiin. Niille on luonteenomaista suuri materiaalin pienennyssuhde ja kuutionmuotoinen loppujaekoko. Vaakasuuntaisia murskaimia voidaan käyttää myös seulovaan murskaukseen, mikäli halutaan erottaa tietyt materiaalit toisistaan. Murskaimelle syötettävä materiaali murskaataan erittäin voimakkaiden iskujen vaikutuksesta. Murskaus tapahtuu murskapalkkien avulla, jotka iskevät murskattavia kappaleita nopeasti pyörivän akselin pyöriessä. Kappaleet murtuvat murskapalkkien iskuista ja lisäksi murtumista tapahtuu, kun kappaleet törmäävät toisiinsa murskaimen sisällä.

Pystysuuntainen murskain toimii keskipakoisvoiman avulla. Syötemateriaali syötetään roottorin keskelle, jossa kappaleisiin kohdistuu suuri kiihtyvyyys ja ne sinkoutuvat kehän sivuja vasten. Kappaleet murskautuvat osuessaan seinämiin suurella nopeudella, mutta murskautuminen voi tapahtua myös kappaleiden osuessa toisiaan vasten. Kuvassa 12 on esitetty vaak- ja pystysuuntaiset murskaimet. (Metso Minerals, 2006.)



Kuva 12. Vasemmalla kuvassa vaakasuuntainen murskain ja oikealla pystysuuntainen murskain (Metso Minerals, 2006).

2.4.3 Murskaintyyppien vertailu

Puristus- ja iskumurskaimia käytetään niiden erilaisten murskausominaisuuksien johdosta eri vaiheissa murskausprosessia. Tämä vaikuttaa myös saavutettavissa olevaan murskaimen syöte- ja loppumateriaalin jaekokoon. Taulukkoon 3 on koottu edellä esiteltyjen murskaimien välinen vertailu teknisistä ominaisuuksista. Taulukkoon kootut arvot ovat

keskimääräisiä arvoja ja joidenkin murskainten kohdalta ominaisuudet voivat vaihdella enemmän murskaintyyppistä riippuen.

Taulukko 3: Murskainten tekniset ominaisuudet (Metso Minerals, 2006).

Päätyyppi	Tyypillinen prosessivaihe	Syöte- materiaali (mm)	Loppu- jaekoko (mm)	Kapasiteetti (t/h)	Pyörimis- nopeus (rpm)
Karamurskain	Esimurskain	1500	200 - 300	yli 1200	500 - 600
Leukamurskain	Esimurskain	1400	200 - 300	1600	200 - 350
Vaakasuuntainen murskain	Esimurskain/ jälkimurskain	1300	200 - 300	1800	500 - 800
Kartiomurskain	Jälkimurskain	450	60 - 80	1200	700 - 1200
Kartiomurskain	Hienomurskain	300	0 - 30	1000	-
Pystysuuntainen murskain	Hienomurskain/ jälkimurskain	150	0 - 30	500	1300 - 1900
Pystysuuntainen murskain	Hienomurskain	40	0 - 30	600	800 - 5300

Taulukon 3 pyörimisnopeuden taulukoissa käytetty pyörimisnopeus kuvaa puristus-periaatteella toimivien murskaimien murskaustapahtuman työtä tekevän akselin pyörimisnopeutta. Esimerkiksi leukamurskaimessa akselin pyörimisnopeus saa aikaan leukojen edestakaisen liikkeen ja määrittää näin ollen puristussyklin tiheyden. Iskuperiaatteella toimivissa murskaimissa pyörimisnopeudella on merkittävä vaikutus murskaukseen, sillä pyörimisnopeus vaikuttaa saavutettavissa olevien iskujen määrään. Murskausta tekevien osien iskutiheys perustuu pyörivän akselin aikaansaamaan liikkeeseen.

2.4.4 Erityyppisiä seulamurskaimia

Markkinoilla on suuri määrä erilaisia seulamurskaimia ja uusien toimijoiden määrä alalla lisääntyy voimakkaasti koko ajan. Seuraavassa käsitellään kaksi erityyppistä ratkaisua. Remu on suomalainen seulakauhoja valmistava yritys. Remu seulakauhoja käytetään työkoneissa lisälaitteena. Seulakauhan teräkiekkoja vaihtamalla seulakauha voidaan

muuntaa murskaukseen soveltuvaksi. Remun erimalliset teräkiekot kiinnitetään suoraan akselin ympärille ja terävaihtoehtoja on useita erimallisia riippuen seulakauhan käyttökohteesta. Remu seulamurskaimia voidaan käyttää hienontamiseen ja kevyeen murskaamiseen. Kuvassa 13 on esitetty yhdentyypinen Remu seulakauha. (Remu, 2012.)



Kuva 13. Remu seulakauha (Remu, 2012).

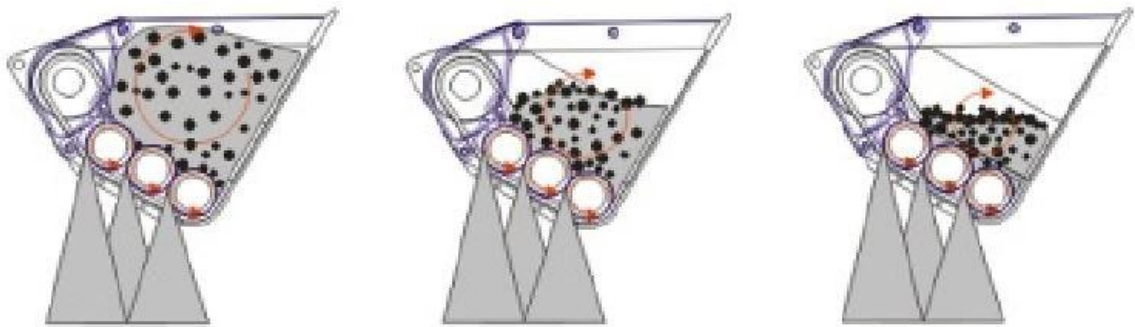
Italialainen Meccanica Breganzese puolestaan edustaa puristusperiaatteella toimivia laitteita ja MB on leukamurska-typinen murskain. Murskaimen rungon sisällä on leuat, jotka puristavat syötemateriaalia niin, että ne murtuvat pienemmiksi palasiksi. Lämpäisevän murskeen kokoa pystytään säätelemään 20 – 120 millimetrin väliltä. Kauha soveltuu hyvin esimerkiksi betonijätteen murskaukseen. MB murskaimeen on myös saatavilla erikseen kiinnitettävä magneettierotin, joka tuo lisää monipuolisuutta kauhan toimintaan. Kuvassa 14 on esitetty MB leukamurskain. (Europörssi, 2008)



Kuva 14. MB leukamurskain (MB, 2014).

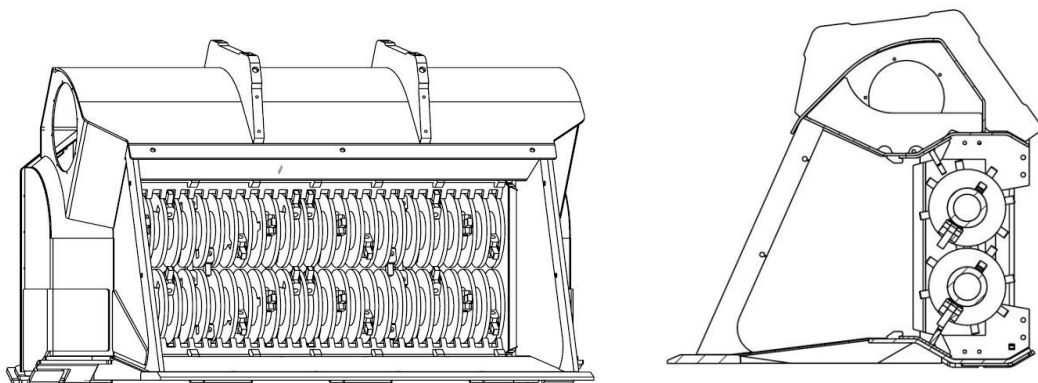
2.5 Seulamurskaimen toimintaperiaate

Peruskoneen ohjaamosta säädellään rumpujen pyörimisnopeutta ja rumpujen pyöriessä seulotaan aluksi hieno materiaali. Oikea kallistuskulma saa materiaalin pyörivään liikkeeseen, jolloin hieno materiaali liukuu tai putoaa vapaapudotuksella rumpujen välissä olevien rakojen välistä. Kuvassa 15 on esitetty seulamurskaimen työasento ja toiminnan periaate.



Kuva 15. Seulamurskaimen toimintaperiaate, käynnistyksestä noin 10 sekunnin seulontatyön tulokseen (Allu Finland, 2014).

Rumpujen väliset raot määrittelevät seulamurskaimella saavutettavissa olevan jaekoon ja halkaisijaltaan suuremmat kappaleet jäävät rumpujen päälle. Rumpujen teräpalat pyrkivät iskemään murskattavia kappaleita, jolloin niihin kohdistuu suuri energia ja kappaleet murtuvat pienemmiksi palasiksi. Murskattu materiaali pääsee putoamaan seulamurskaimen läpi. Murskauksessa periaatteena on, että jokaisella kappaleella on mahdollisuus tavoittaa murskaavat rummut, jolloin jokaisella kappaleella on mahdollisuus murskautua (King, 2001, s. 81). Kuvassa 16 on esitetty seulamurskain murskaavilla teräpaloilla.



Kuva 16. Vaihdettavilla teräpaloilla varustettu seulamurskain (Allu Finland, 2014).

Seulamurskaimessa materiaalin murtuminen voi tapahtua usealla eri tavalla. Rumpujen normaali työskentelysuunta on kuvan 16 mukaisesti ylöspäin, kuvassa oikealla myötöpäivään. Murskauksessa kauha kallistetaan vaakatasoon niin, että rummut ovat 0 - 45° kulmassa vaakatasoon nähden. Kauhan sisällä oleva materiaali toimii painona murskattavien kappaleiden päällä ja teräpalat iskevät rumpujen päällä oleviin kappaleisiin, jolloin ne murtuvat puristusjännityksen vaikutuksesta. Työstettävä materiaali voi murtua rumpujen välissä, jolloin alemman rummun teräpalat iskevät kappaleita ylempää rumpua vasten. Suuri osa materiaalista murtuu kun ylimmän rummun teräpalat iskevät tai puristavat materiaalia runkoon kiinnitettyä vastaterärakennetta tai runkoa vasten. Materiaali voi murtua myös osuessaan toisiin kappaleisiin. Tietyissä sovelluksissa on tavoitteena murskata kaikki kauhassa oleva materiaali, mutta useimmiten on kuitenkin tavoitteena erotella kaksi materiaalia toisistaan, jolloin kaikkea materiaalia ei edes pyritä murskaamaan.

2.6 Murskausrummun suunnitteluun vaikuttavat parametrit

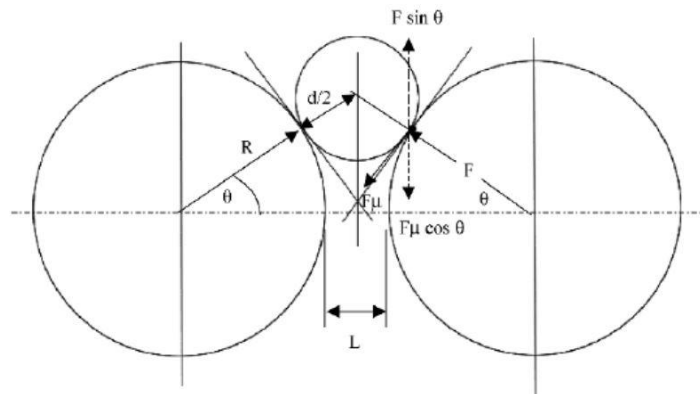
Murskausrummun suunnittelun lähtökohtana on mahdollisimman tehokas murskaus. Mikäli syötemateriaalin jaekoko tiedetään, on tärkeää arvioida murskaavien rumpujen halkaisijaa oikean pienennysuhteen aikaansaamiseksi. Yleinen oletus on, että murskattava kappale on pallomainen ja rummun ulkopinta on tasainen. Rummuille, joilla on sama säde ja pituus, rummun ja murskattavan kappaleen kohtauspisteeseen rumpujen kehille piirretyt tangentit muodostavat puristuskulman, θ . Geometrian avulla saadaan laskettua tietyn halkaisijan d kokoiselle kivelle vaadittu murskauskulma θ , rumpujen säteen avulla seuraavasti:

$$\cos\theta = \frac{\left(R + \frac{L}{2}\right)}{\left(R + \frac{d}{2}\right)} \quad (4)$$

Kaavassa 4, R on rummun säde, L on rumpujen välinen etäisyys ja d on murskattavan kappaleen halkaisija. Tästä saadaan johdettua kaava rummun säteen R laskemiseksi:

$$R = \frac{L - d \cos \theta}{2(\cos \theta - 1)} \quad (5)$$

Kuvassa 17 on esitetty tilanne, jolloin murskattava kappale on kulkeutumassa rumpujen väliin murskaussektorille ja puristuksen alaiseksi.



Kuva 17. Rumpujen koon suunnittelun geometria (Gupta & Yan, 2006, s.144).

Puristuskulma on riippuvainen myös kitkakertoimesta rumpujen ja murskattavan kappaleen pinnan välillä. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon rumpujen tuottama puristusvoima F ennen murskausta, ohjauskulma rumpun pinnalle kohtauspisteessä ja rumpun ja kappaleen välinen kitkakerroin. Mikäli tarkastellaan voimien pystysuuntaisia komponentteja ja jätetään painovoima huomioimatta, niin voidaan havaita, että rumpujen kohtauspisteessä on tasapainoasema, jossa:

$$F \sin \theta = F \mu \cos \theta \quad (6)$$

Tästä puolestaan saadaan johdettua kitkakerroin μ :

$$\mu = \tan \theta \quad (7)$$

Tasapainoaseman kaavasta saadaan johdettua puristuskulma θ :

$$\theta = \tan^{-1} \mu \quad (8)$$

Kitkakerroin on tyypillisesti 0,2 ja 0,3 välillä, jolloin ihanteellinen murskauskulma on 11 - 17°. Rumpujen pyöriessä kitkakerroin on riippuvainen murskattavan kappaleen ominaisuuksista sekä rumpujen pyörimisnopeudesta. Puristuskulma on myös riippuvainen rumpujen pinnan muodoista ja edellä esitetty ihanteellinen kitkakulma on tasaisen pinnan rummuille laskettu kulma. Yleensä kitkakulma saattaa vaihdella 20 - 30° välillä ja suuren halkaisijan rummuilla kulma voi olla jopa 40°. Mikäli kulma ylittää nämä arvot, kappaleesta ei saada otetta ja se lipeää pois murskaussektorista. Joissain sovelluksissa käytetään hammastettuja rumpuja, joiden tyypillinen teräpalojen muoto on pyramidi-mainen. Rumpujen ja teräpalojen pinnat ovat tärkeässä roolissa, jotta kappaleesta saadaan ote ja se pystytään kuljettamaan murskaussektorille. Rummun hampaiden sijoittelulla ja koolla voidaan tehostaa murskausta, jolloin murskattavista kappaleista saadaan parempi ote ja niiden kuljettaminen murskaussektoriin helpottuu, mikä tarkoittaa, että puristuskulma voi olla suurempi. Epätasaiset hampaan pinnat ja sahamaiset pinnat muodostavat suuremman kitkan. Teräpalojen avulla voidaankin saavuttaa entistä parempi murskaus-kapasiteetti. (Gupta & Yan, 2006, s.142-159.)

Tasapintaisia rumpuja käytetään yleensä hienomurskaukseen, missä materiaalin murskaus tapahtuu usein aaltoilevilla pinnoilla tai pienillä kantapaloilla, jotka on sijoitettu rihlakuvion mukaisesti. Murskausrummut puolestaan on varustettu limittäin hampailla tai rummusta ulkonevilla pinnoilla. Niiden tehtävä on kaivautua kiveen niin, että ne puristavat ja saavat otteen murskattavasta kappaleesta, jolloin rumpujen halkaisijaan nähden suuretkin kappaleet pystytään käsittelemään. Tämän tyyppisiä ratkaisuja käytetään pääsääntöisesti karkeamurskauksessa ja pehmeiden tai takertuvien materiaalien murskauksessa.

Puristuskulman ollessa suuri rumpujen pyörimisnopeutta tulee hidastaa, jotta kappaleesta voidaan saada ote. Vastaavasti pienemmällä kulmilla pyörimisnopeutta voidaan kasvattaa ja näin ollen parantaa kapasiteettia. Rumpujen kehänopeus vaihtelee tyypillisesti 1-15 m/s välillä riippuen edellä esitetystä ominaisuuksista. (Wills, 2006.)

3 TESTITULOKSET

Nykyisten rumpuratkaisujen lisäksi tavoitteena oli kehittää uudentyyppisiä ratkaisuja. Tarkoituksena oli täydentää nykyisten tunnettujen ratkaisujen välisiä aukkoja ja tehostaa murskausta. Tällä hetkellä murskaukseen käytetään kahdenlaisia erityyppisiä rumpuratkaisuja. Merkittävä ero ratkaisujen välillä liittyy rumpujen teräpalarakenteeseen. Testeissä käytettyihin rumpuihin kehiteltiin myös uusia teräpaloja sekä erilaisia murskausratkaisuja terän päähän. Näin tavoiteltiin entistä parempaa jaekoon hallintaa sekä yritettiin parantaa rumpujen aggressiivisuutta.

Testien avulla pyrittiin hakemaan tietoja ja kehittämään uusia seulamurskaimien soveltuvia rumpu- ja teräpalaratkaisuita, jotka täyttäsivät asiakkaiden asettamat vaatimukset. Testejä järjestettiin eri vaiheissa suunnitteluprosessia, joihin asetettiin ennalta määritetyt tavoitteet valittujen osa-alueiden tutkintaan.

3.1 Testien tavoitteet

Murskaustestien päätavoite oli selvittää seulamurskaimella tuotettava jaekoko ja kapasiteetti kokeellisten mittausten avulla. Testien avulla pyrittiin havaitsemaan seulamurskaimen murskausprosessin kehitystarpeita. Testeissä tutkittiin myös kulutusosien kulutuskestävyyttä pitkäkestoisilla murskaustesteillä. Tärkeä tekijä testitulosten selviytyksessä oli etukäteen asetetut vaatimukset seulotun materiaalin loppujaekoon osalta:

- 100 % < 65 mm
- 96 % < 50 mm

Erityishuomiota kiinnitettiin kulutuskestävyyteen, sillä valittujen ratkaisujen haluttiin kestävän myös kovan ja kuluttavan materiaalin murskausta. Eri materiaaleilla testattiin seulamurskaimen soveltuvuutta tietyn kovuuden materiaaleille.

3.2 Testisuunnitelma

Kaikissa testeissä käytettiin saman levyistä seulamurskainta, jolloin rumpujen murskauspinta-ala oli yhtä suuri. Testien välillä vaihdettiin rumpuja ja teräpalayhdistelmiä tulosten tarkastelua varten. Ensimmäisten testien jälkeen suunniteltiin uusia ratkaisuja

järjestelmällisen tuotesuunnittelun periaatteiden pohjalta. Uusilla ratkaisuilla murskattiin vastaavia materiaaleja, jolloin nähtiin niiden vaikutus tuloksiin.

3.3 Mittausten suorittaminen

Jokaisen kauhan tyhjennysaika mitattiin kellon avulla. Mittaukset suoritettiin käsin, kirjaten tulokset erilliseen taulukkoon. Testeissä käytetyn mittaustaulukon pohja on esitetty liitteessä 2. Taulukkoon kirjattiin esiseulonta-aika sekä kappaleiden lopulliseen murskaukseen kulunut aika. Kappaleet, joita ei kyetty murskaamaan, kerättiin yhteiseen paikkaan, josta muodostettiin ylittemateriaalin kasa. Tämä materiaali punnittiin ja tutkittiin ylittemateriaalin osuus eri tuotevariaatioilla.

Jaekoon tutkintaa varten näytteitä seulottiin erillisiin laatikkoihin, jotka lähetettiin jatkotutkimuksiin jaekoon selvittämiseksi. Näin pystyttiin määrittämään saavutettu jaekoko kaikilla tutkittavilla variaatioilla. Samalla murskatuille näytteille tehtiin Los Angeles-testi iskukestävyuden määrittämiseksi, jotta saatiin tarkka tieto murskatun materiaalin kovuudesta.

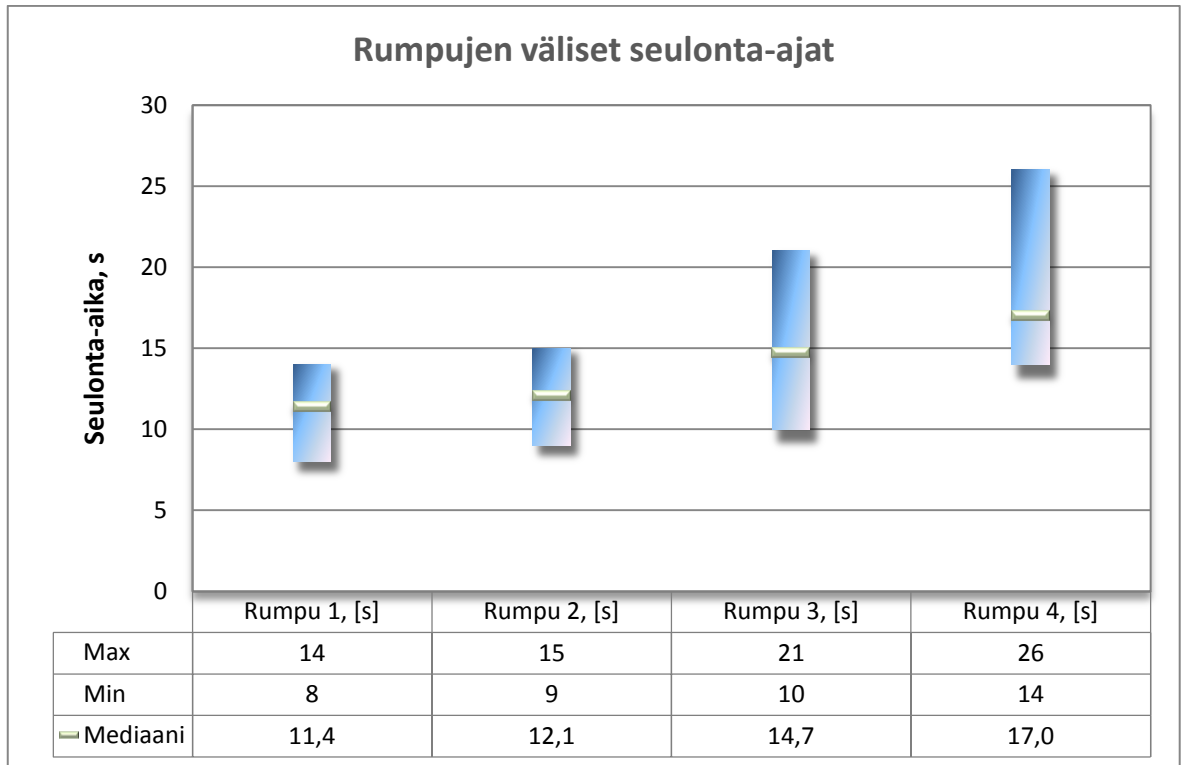
3.4 Rakennusmateriaalijätteen murskaustestien tulokset

Testin aluksi seulamurskaimissa käytettiin nykyisiä rumpuja, minkä jälkeen testattiin uusia rumpuratkaisuja. Lisäksi testiohjelmaan kuului nykyisten ja uusien teräpalojen testaus. Testien viimeisessä vaiheessa seulamurskaimella murskattiin noin 40 työtunnin ajan materiaalia kulutuskestävyyden tarkastelua varten käyttäen uusia teräpaloja, jotta nähtiin teräpalojen toimivuus pitkäaikaisessa murskaustilanteessa. Kuvassa 18 on esitetty testipaikan lähtömateriaali.



Kuva 18. Murskaustestien ensimmäinen testipaikka ja etualalla oleva testimateriaali. Käsiteltävän testimateriaalin määrä noin 400 m³.

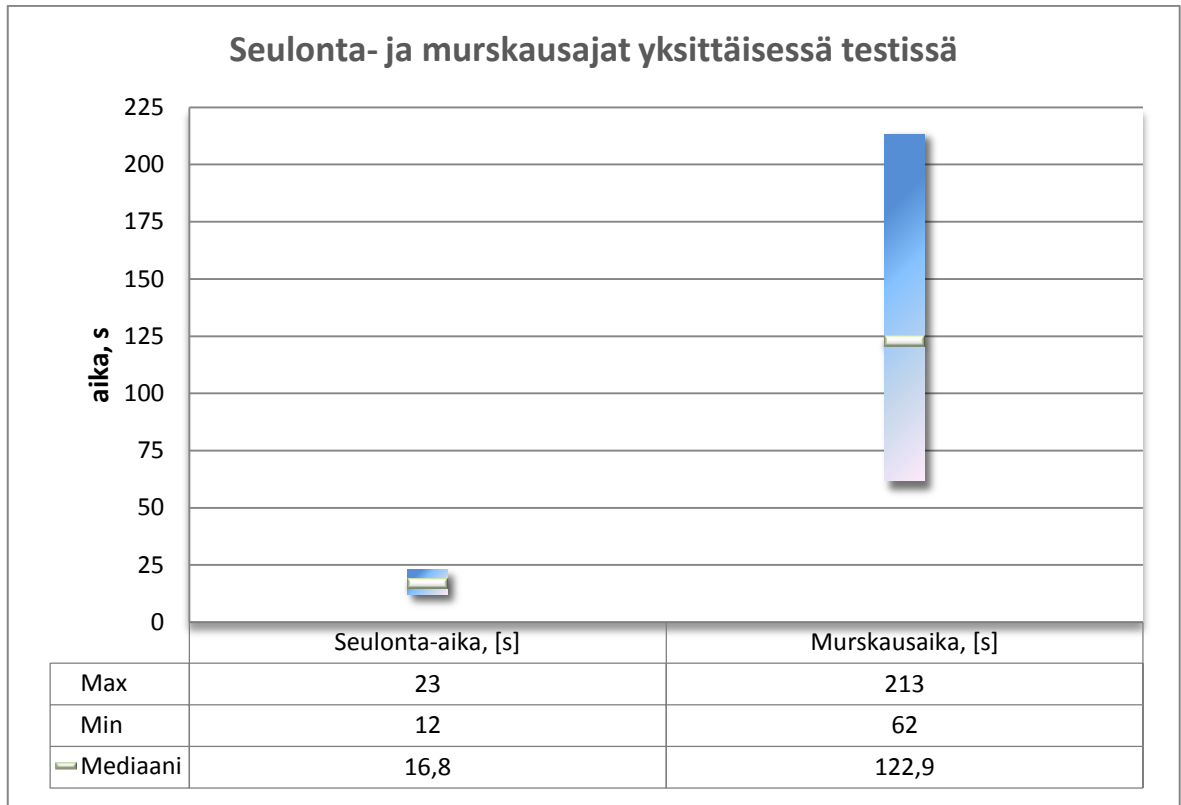
Murskaukseen käytettävä aika testeissä oli pitkälti riippuvainen siitä, kuinka suuri osuus materiaalista haluttiin murskata. Normaaleissa työtilanteissa murskaukseen käytettävä aika voi olla hyvinkin lyhyt, sillä murskauksesta saatava hyöty ei välttämättä nouse kovin korkealle tuottavuutta tarkasteltaessa. Testitilanteessa jälkimurskauksen osuus oli kuitenkin merkittävä, koska jälkimurskauksessa teräpalat ja rummut joutuvat kovalle rasitukselle, jolloin voidaan nähdä mahdollisia heikkoja kohtia rakenteesta. Testituloksissa tutkittiin aluksi kauhojen välisiä seulonta-aikoja ja kuvassa 19 on esitetty jokaisella rummulla saavutetut seulonta-ajat. Seulonta-aikojen tuloksissa on esitetty minimi- ja maksimijat sekä mediaanityhjennysajat. Mediaaniaikoja käytettiin tulosten tarkastelussa, jotta tulokset vastaisivat paremmin todellisuutta, kun yksittäiset poikkeamat eivät aiheuta niin suurta muutosta verrattuna keskiarvoaikojen käyttöön. Työssä esitetyt tulokset käsitellään anonyymeinä kirjaten esimerkiksi Rumpu 1.



Kuva 19. Seulonta-ajat ensimmäisissä testeissä. Vaakasuuntaisella akselilla rumputyypin ja pystysuuntaisella akselilla seulontaan käytetty aika sekunteina.

Seulonta-ajat mitattiin rumpujen käynnistyksestä siihen hetkeen, kun seulottava materiaali oli tippunut rumpujen läpi ja kauhan sisällä oli ainoastaan suuremmat murskausta vaativat kappaleet. Näin ollen tulokset olivat melko vertailukelpoisia kaikilla tuotevariaatioilla. Seulottavan materiaalin määrä vaihteli joka kauhallisen välillä, mutta se vastaa hyvin todellista työskentelytilannetta.

Yksittäisen kauhan kappaleiden murskaukseen kulunut aika on puolestaan vaikeammin tutkittava tapaus. Kauhasta seulotaan ensin hieno materiaali ja sen jälkeen aloitetaan kappaleiden murskaus. Murskaukseen kulunut aika on suurilta osin riippuvainen kauhan sisällä olevien murskattavien kappaleiden määrästä, muodosta, koosta ja materiaaliominaisuuksista. Tämä vaikuttaa jokaisen kauhan tulokseen merkittävästi, eikä niistä voida käytännössä tehdä vertailukelpoista taulukkoa, ellei lähtömateriaali ole samanlaista. Kuvassa 20 on esitettyä yhden testin seulonta- ja murskausajan tulokset, jossa murskattavaa materiaalia ajettiin rummun 4 mukaisella rakenteella.

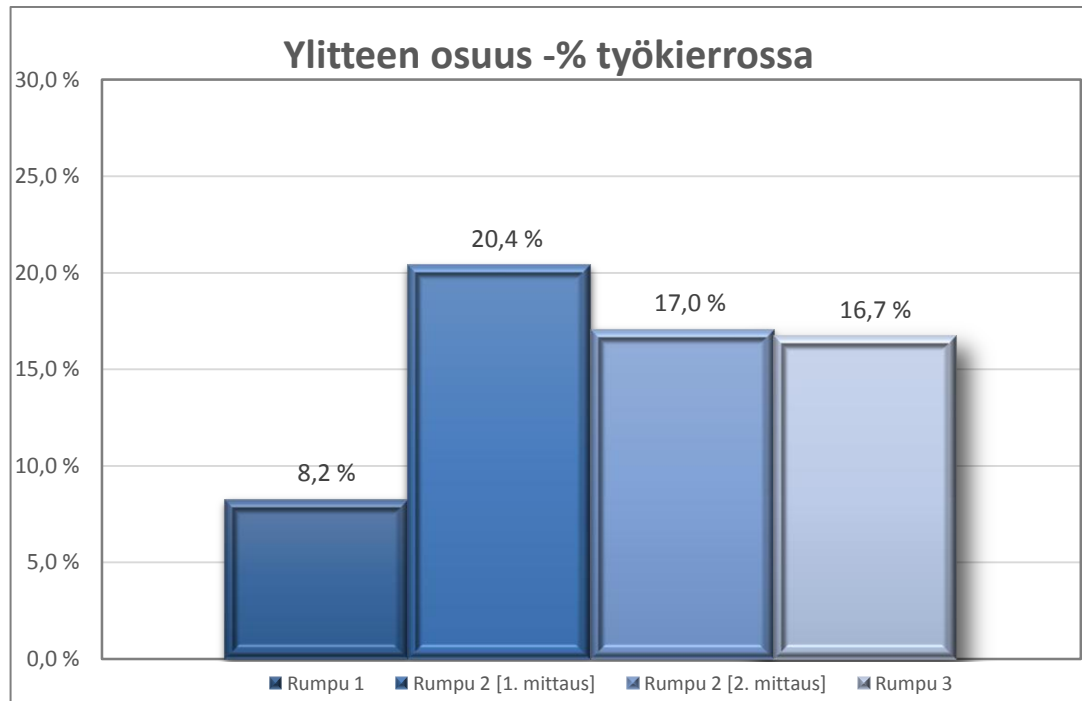


Kuva 20. Seulontaan ja murskaukseen käytetyt ajat yksittäisessä testissä rummulla 4.

Tuloksista voidaan nähdä, että seulontaan käytetty aika ei juurikaan vaihtelee kauhallisten välillä. Vastaavasti kauhaan jääneiden kappaleiden murskaukseen kulunut aika on huomattavan suuri seulonta-aikoihin verrattuna ja käytetty aika vaihtelee erittäin voimakkaasti samassa testissä. Pienimmillään koko kauhan kappaleiden murskaukseen käytetty aika oli noin 60 sekuntia, mutta pisimmillään yhden kauhallisen murskaukseen käytettiin aikaa yli kolminkertainen määrä, noin 200 sekuntia. Näin ollen murskaustestistä ei voida tehdä riittävän tarkkoja johtopäätöksiä tällä tutkimusmenetelmällä.

Murskaustapahtumaa voidaan parhaiten vertailla, kun jokaisella tuotevariaatiolla murskataan kappaleita yhtä pitkä aika. Testissä murskaukseen käytettäväksi ajaksi valittiin 60 sekuntia ensimmäisten testitulosten havaintojen pohjalta. Lisäksi jokaiselle tuotevariaatiolle pyrittiin saamaan mahdollisimman samanlaista materiaalia niin, että testimateriaalia otettiin aina testipaikan ulkoreunasta kohti keskustaa aloittaen jokaisella kauhalla työnteko aina uudelleen reunasta, koskemattomasta kohdasta. Ulkoreunaan sijoittui yleensä suurimmat kappaleet ja materiaali helpottui keskelle kasaa siirryttäessä. Näin ollen testiolosuhteisiin nähden pyrittiin saavuttamaan mahdollisimman tasaiset

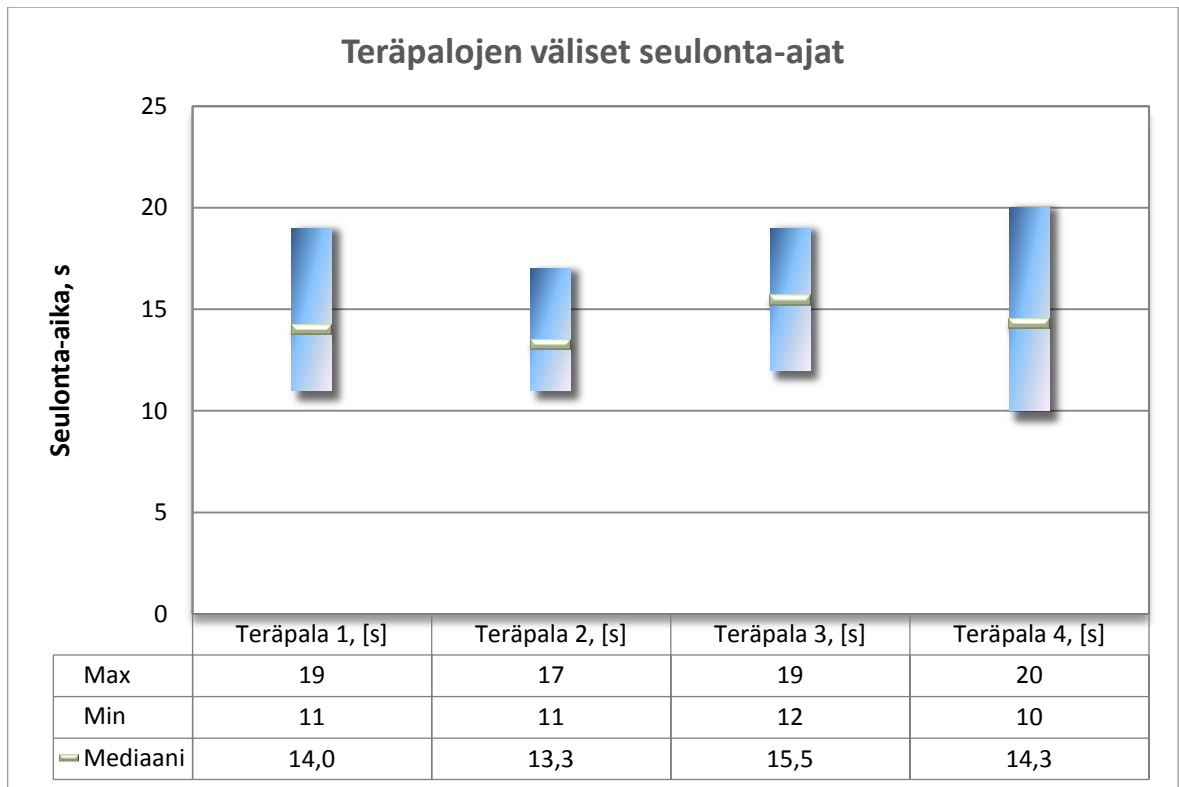
olosuhteet. Kaikkea kauhaan lastattua materiaalia ei kyetty murskaamaan käytetyillä testivariaatioilla ja tästä materiaalista muodostui ylittemateriaalin osuus. Kuvassa 21 on esitetty ylittemateriaalin osuus vertailussa käytetyillä rummuilla, kun murskaukseen käytetty aika on yksi minuutti.



Kuva 21. Ylitteen keskiarvomäärät prosentteina, kun murskaukseen käytettiin aikaa minuutti.

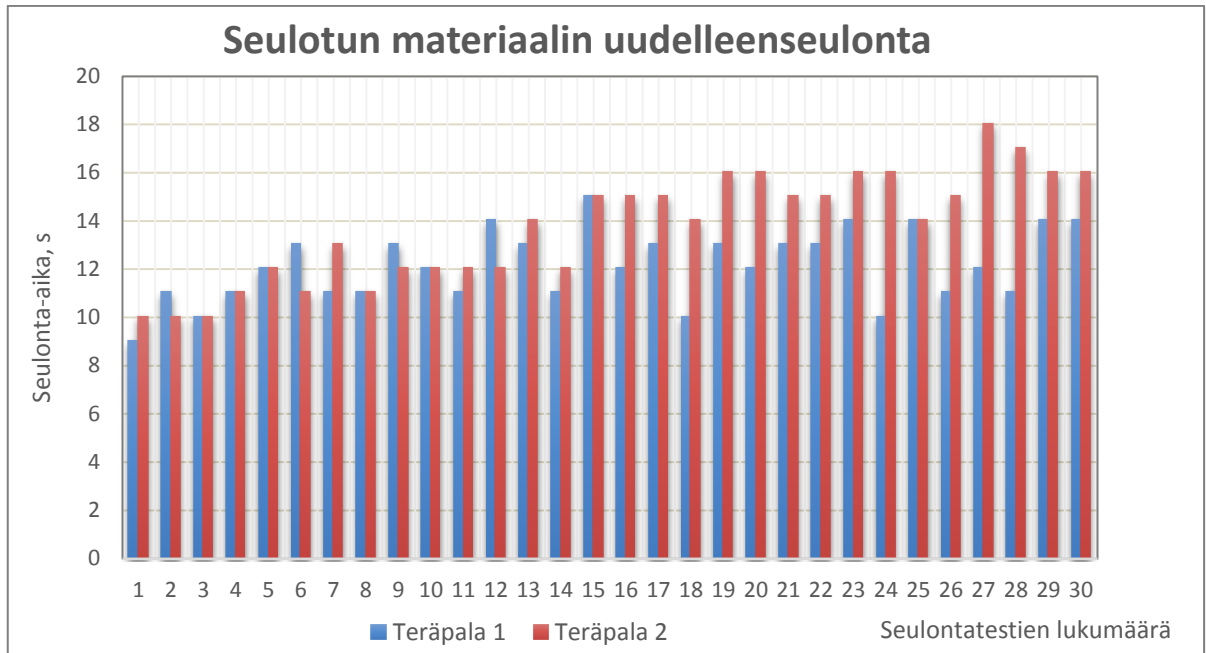
Ylitteen määrää tutkittaessa testissä käsiteltiin kolme tuloksissa esitettyä rumpua. Rumputyyppejä 4 käytetään harvemmin suurten kappaleiden murskaukseen ja se jätettiin tämän testin ulkopuolelle. Toisen rumpun mittaus toistettiin kahteen kertaan, jotta nähtiin erot testipaikan materiaalin välillä. Ensimmäisessä mittauksessa testimateriaali oli hyvin haastavaa ja vastaavasti toisessa testissä materiaali oli murskauksen kannalta helpompaa. Tämä näkyi yli 10 % pudotuksena ylitteen määrässä ja tulos ylitteen määrässä on lähes vastaava vertailun kannalta kriittisen kolmosrummun kanssa.

Lisäksi testejä suoritettiin rumpujen teräpalojen vertailua varten. Teräpalayhdistelmistä muodostettiin neljä erilaista vaihtoehtoa, jotta nähtiin niiden vaikutus seulonta- ja murskausaikoihin. Kuvassa 22 on esitetty tulokset erilaisilla teräpalayhdistelmillä, kun jokaisesta kauhasta mitattiin seulonta-ajat.



Kuva 22. Seulonta-ajat neljällä eri teräpalayhdistelmällä.

Paras seulonta-aika saavutettiin, kun käytettiin teräpalayhdistelmää 2. Vastaavasti heikoin läpimenoaika saavutettiin teräpalayhdistelmällä 3. Erot ovat kuitenkin suhteellisen pieniä, sillä seulonnan mediaaniajat tulosten välillä ovat noin kahden sekunnin sisällä toisistaan. Uusien teräpalojen hyöty tuli puolestaan esille, kun jo kertaalleen seulottua materiaalia seulottiin uudelleen. Tässä testissä seulottua materiaalia lastattiin aina uudelleen kyytiin ja seulottiin, jolloin lähtömateriaali muuttui testin edetessä märäksi ja lähes savimaiseksi. Testin alussa materiaali oli täysin identtistä edellisessä testissä seulottuun materiaaliin nähden, mutta noin 10 kauhallisen jälkeen materiaali alkoi muuttua märäksi, mikä hankaloitti seulontaa. Testin tulokset on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Seulotun materiaalin uudelleenseulontaan käytetyn ajan vertailu nykyisillä ja uusilla teräpaloilla.

Kuvassa 23 on esitetty kahden teräpalaratkaisun tulokset, mutta tulokset olivat vastaavat edellisen testin muillakin teräpalavaihtoehdoilla. Alussa seulonta-ajat olivat lähes identtisiä, mutta uusien teräpalojen käytöstä saatava hyöty tuli ilmi, kun materiaali muuttui märeäksi. Materiaalin muuttuminen ei juurikaan vaikuttanut uusien teräpalojen seulonta-aikoihin, kun puolestaan nykyisillä teräpaloilla seulonta-ajoissa oli havaittavissa selkeästi kasvua.

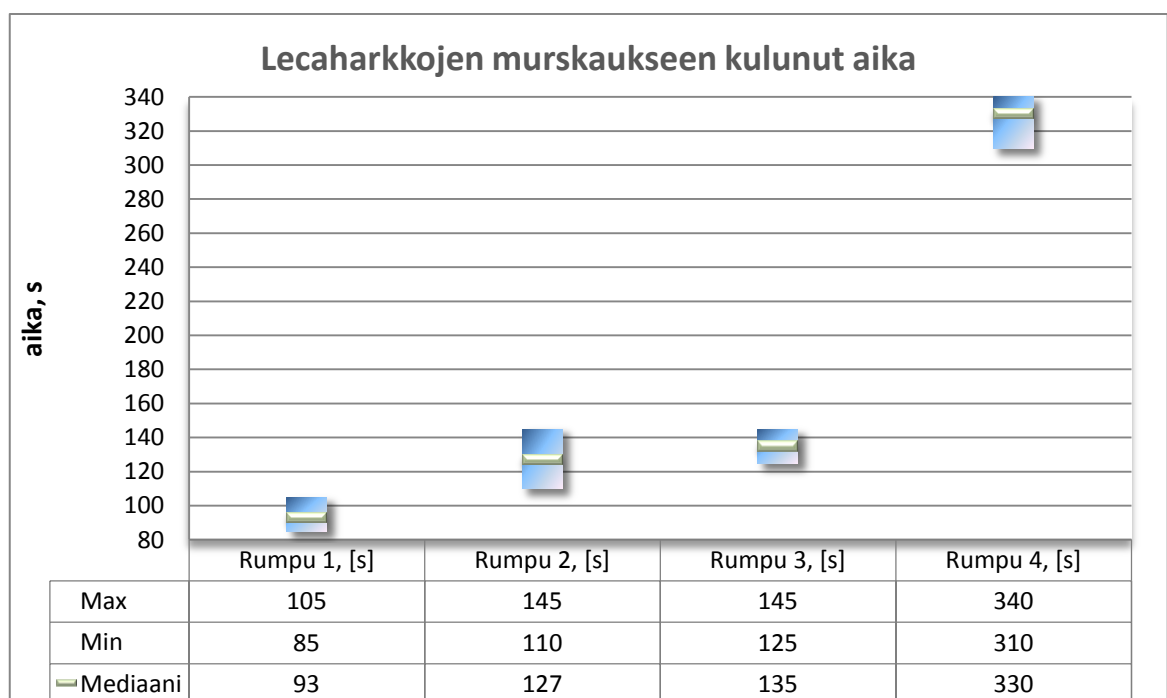
3.5 Lecaharkkojen murskaustestien tulokset

Murskaukseen tarkoitetut testit suoritettiin toisella testipaikalla, jossa murskattava materiaali koostui lecaharkkoista. Näin ollen testimateriaali oli täysin identtistä jokaisessa tutkittavassa kauhassa. Testeissä käytetyn lecaharkon ulkomitat oli 150x200x400 millimetriä. Jokaista mittausta varten seulamurskaimeen lastattiin yhtä monta harkkoa; 35 kappaletta yhtä kauhallista kohden ja lastaus suoritettiin käsin, jolloin sekaan ei päässyt ylimääräistä materiaalia vääristämään testituloksia. Kuvassa 24 on esitetty kauhaan lastattu testimateriaali ennen murskausta.



Kuva 24. Kauhaan asetetut lecaharkot murskaustestejä varten.

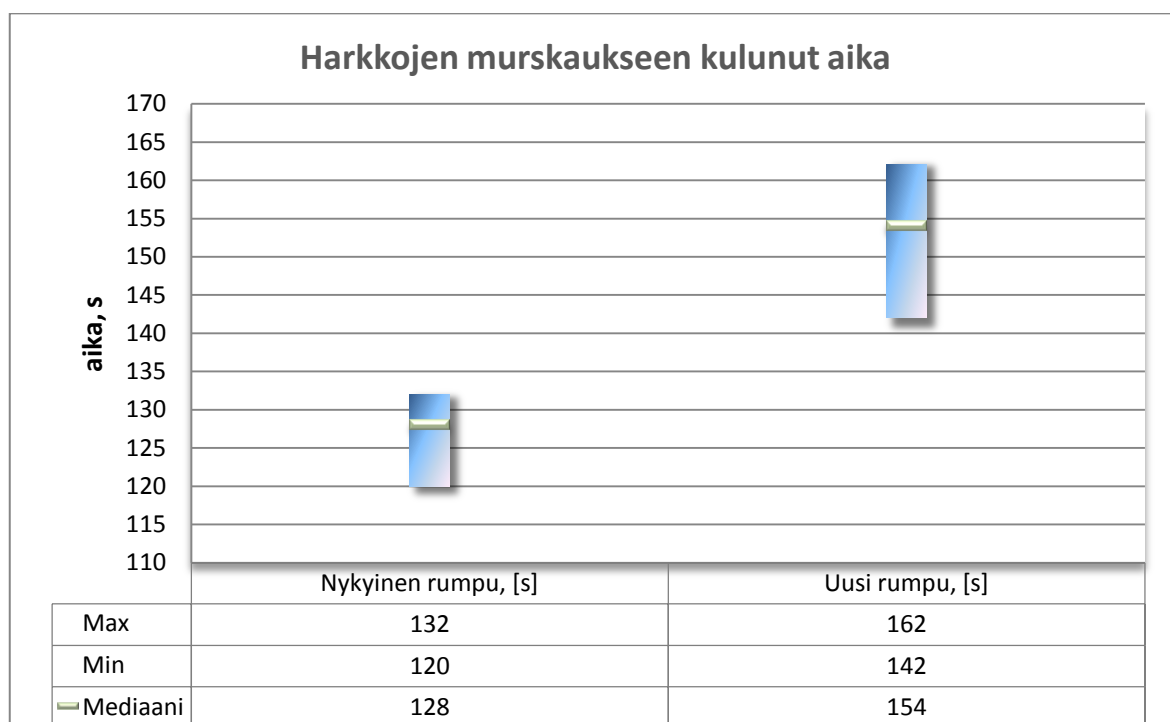
Aluksi testeissä käsiteltiin kaikkia rumpuja. Edellisten testien tulosten perusteella murskaustestit suoritettiin käyttäen uusia teräpaloja. Ensimmäisten testien myötä nähtiin rummun 4 selvästi heikoin kapasiteetti ja toisaalta rumpujen 1 ja 2 erittäin hyvä toiminta verrattaessa tuloksia keskenään. Näillä rummuilla pystyttiin saavuttamaan jopa nykyistä parempi kapasiteetti lecaharkkojen murskauksessa käyttäen samaa rumpujen pyörimisnopeutta kaikissa testeissä. Kuvassa 25 on esitetty vertailutaulukko ensimmäisen testin murskaukseen käytetyn ajan mittaustuloksista.



Kuva 25. Lecaharkkojen murskaukseen käytetyt ajat eri rummuilla.

Testitulosten pohjalta jatkotesteihin suunniteltiin uusia rumpuja. Uuden rumpun myötä myös teräpalojen kehänopeus muuttui. Tämä tarkoittaa, että saman pyörimisnopeuden aikaansaamiseksi hydrauliiikan virtausasetuksia tulee muuttaa niin, että nopeus on yhtä suuri kuin aiemmissa testeissä. Uuden rumpun myötä testeissä käytettävään runkoon pystyttiin kiinnittämään vain kaksi rumpua, kun aiemmin käytetyn rakenteen mukaisia rumpuja pystyttiin kiinnittämään kolme kappaletta.

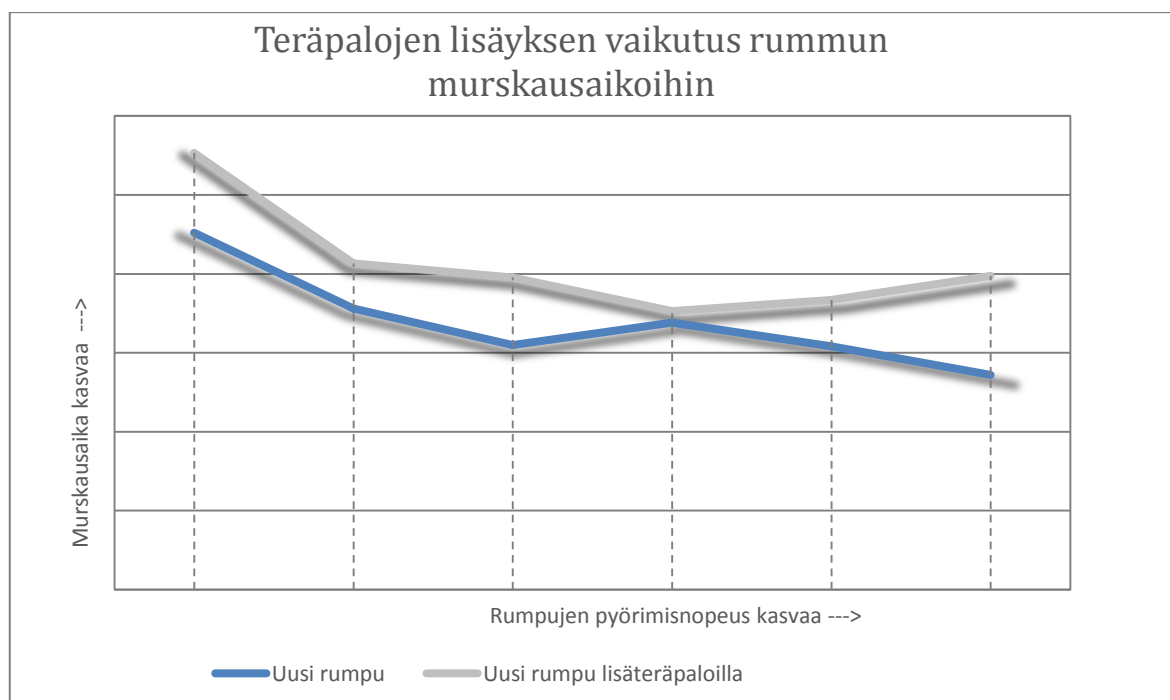
Uutta rumpua verrattiin aiemmin samassa testipaikassa käytettyihin kahteen rumpuun, joista saatiin parhaat testitulokset. Rumpu on suunniteltu uusia sovelluksia varten ja myös ennen koko testien aloittamista määritelty tavoite alle 50 millimetrin jaekoon saavuttamiseksi muodostui tärkeäksi kriteeriksi testituloksia tarkasteltaessa kyseisellä rummulla. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi testeihin valittiin rummut, joilla pystyttiin tuottamaan mahdollisimman lähelle tavoitteen mukaista loppujaekokoa. Kuvassa 26 on esitetty keskimääräiset tyhjennysajat testin rummuille.



Kuva 26. Murskaukseen käytetyn ajan vertailussa nykyinen rumpu sekä murskaustesteihin suunniteltu uusi rumpu.

Uusi rumpu ei yltänyt testituloksissa samoihin tuloksiin kuin nykyinen rumpu. Tähän

kuitenkin merkittävä tekijä on rumpujen lukumäärä, sillä testirunkoon ei pystytty laittamaan kolmea rumpua, jolloin tulokset olisivat olleet täysin vertailukelpoisia. Todelliset erot rumpujen välillä näkisi näin ollen vasta, mikäli rumpuja olisi yhtä suuri määrä, mutta toisaalta myös murskaimen pinta-ala kasvaisi samalla. Silmämääräisesti seurattuna uusi rumpu vaikutti kuitenkin toimivan varsin hyvin. Testejä jatkettiin suunnittelemalla uusi malli, jonka avulla pyrittiin saamaan testistä enemmän vertailukelpoinen. Tässä ratkaisussa teräpalojen määrää lisättiin niin, että iskujen määrä minuuttia kohden on yhtä suuri kuin vertailukohteenä käytössä olevassa kolmirumpuisessa seulamurskaimessa. Tällä ratkaisulla pyrittiin saamaan vertailukelpoisia tuloksia sekä näkemään tämän rakenteen potentiaali. Lisäksi testissä vertailtiin eri pyörimisnopeuksien vaikutusta murskaukseen käytettyyn aikaan, jotta saatiin tuloksia optimaalisesta pyörimisnopeudesta. Kuvassa 27 on esitetty testitulokset, kun edellä testattuun uuteen rumpuun lisättiin teräpaloja niin, että iskujen määrä muutettiin vastaamaan nykyisen kolmirumpuisen mallin iskujen määrää.



Kuva 27. Murskausajat uudella rummulla ja vastaavalla rummulla, johon on lisätty ylimääräiset teräpalat. Pystyakselilla murskaukseen käytetty aika ja vaaka-akselilla rumpujen pyörimisnopeus.

Tuloksista oli selkeästi nähtävillä, että vaikka teräpalojen määrää lisättiin, niin erityisesti pyörimisnopeutta kasvatettaessa tulokset heikentyivät. Murskaukseen kulunut aika oli jokaisella testin pyörimisnopeudella parempi ilman lisäteräpaloja.

3.6 Jaekoon tutkimus

Kaikista tehdyistä testeistä kerättiin näytteitä erillisiin laatikkoihin. Näytteitä kerättiin seulomalla suoraan materiaalia laatikkoihin sekä keräämällä seulamurskaimella seulotun materiaalikasan reunoilta yksittäiset suurimmat murskatut kappaleet. Näin ollen saatiin kahdet eri tulokset jaekoosta; todellinen jaekoko sekä maksimijaekoko. Kuvassa 28 on esitetty testeissä laatikkoihin seulottuja kappaleita.



Kuva 28. Jaekoon tutkimusta ja iskukestävyystestiä varten laatikkoihin kerätyt näytteet lähetettiin jatkotutkimuksiin Tampereen teknilliseen yliopistoon.

Laatikkoihin kerätyt näytteet lähetettiin Tampereen teknilliseen yliopistoon maa- ja pohjarakenteiden laboratorioon tutkittaviksi. Kuivaseulonnat tehtiin standardin SFS-EN 933-1:2012 mukaisesti. Testissä materiaali jaettiin seulasarjan avulla jaekooltaan pieneneviin luokkiin. Suurin yksittäinen käytetty seula-aukko oli 150 mm ja pienin seula-aukko 16 mm. Seulamurskaimella saavutettavissa olevan jaekoon vuoksi pienempiä seuloja ei katsottu tarpeelliseksi käyttää. Menetelmässä materiaalinäyte pestiin ja kuivattiin, jonka jälkeen suoritettiin kuivaseulonta. Näytteille suoritettiin lisäksi

kiviaineksen iskukestävyystesti, viralliselta nimitykseltään Los Angeles-testi. Los Angeles-testi suoritettiin standardin SFS-EN 1097-2:2010 mukaisesti. Testissä mitattiin 10/14 mm kiviaineslajitteen hienontumista myllyssä, johon laitettiin 5 kg käsiteltävää kiviainesta ja 11 kuulaa. Kiviainestutkimusten tulokset kokonaisuudessaan on esitetty liitteessä 3. (SFS-EN 933-1:2012 & SFS-EN 1097-2:2010)

4 MURSKAUKSEEN VAIKUTTAVIEN TEKIJÖIDEN ANALYSOINTI

Testituloksissa havaittiin useita tekijöitä, jotka vaikuttavat seulamurskaimen kappaleen murskausominaisuuksiin. Seuraavassa esitellään vaikuttavia tekijöitä ja pohditaan niiden merkitystä lopputuloksen kannalta sekä esitetään vaihtoehtoisia ratkaisuja. Aiemmin tiedossa olleiden tekijöiden lisäksi havaittiin uusia murskaukseen vaikuttavia tekijöitä, joita on käsitelty seuraavissa alaluvuissa.

4.1 Seulamurskaimen pinta-ala ja työkierto

Pinta-alalla on suuri merkitys saavutettavissa olevaan kapasiteettiin. Kapasiteettiin vaikuttaa merkittävästi leveyssuunnassa pidemmät rummut eli leveämpi runko, joka mahdollistaa suuremman kapasiteetin. Rungon suurempi tilavuus mahdollistaa suuremman materiaalmäärän käsittelemisen yhdessä työkierrossa, johon kuuluu materiaalin lastaus, seulonta, murskaus ja ylit materiaalin poisto.

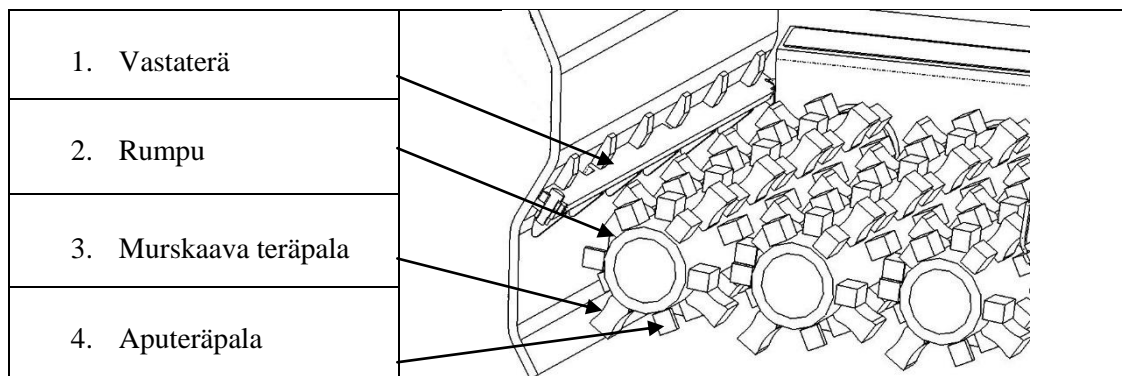
Työkierron välinen lastausaika puolestaan pienentää saavutettavissa olevaa kapasiteettia. Testeissä käytetyllä seulamurskaimella ylit materiaalin poistoon ja uudelleenlastaukseen kului yhden työkierron aikana keskimäärin 15 sekunnin aika. Pelkästään materiaalin käsittelyyn käytetty työskentelyaika jälkimurskauksen johdosta oli noin 60 sekuntia, mikä tarkoitti keskimäärin 48 kauhallista tuntia kohden. Mikäli lastausaikaa voitaisiin pienentää, kapasiteettia pystyttäisiin parantamaan sen osalta. Lastausaika on kuitenkin jo nykyisellään melko optimaalinen, eikä sitä voida juurikaan pienentää tällä työmenetelmällä. Mahdollisuus kehitykseen kohdistuukin seulonta- ja murskausajan parantamiseen, mikä tarkoittaa käsiteltävän materiaalin nopeampaa seulontaa ja murskausta.

Suurempi pinta-ala ei välttämättä suoraan johda parempaan kapasiteettiin, sillä peruskoneen ominaisuuksilla ja asetuksilla on olennainen vaikutus seulamurskaimen toimintaan. Mikäli käytössä oleva peruskone on liian pieni tehon tai hydraulikka-järjestelmän osalta, ei seulamurskaimen koko tuotantokapasiteettia pystytä hyödyntämään. Käytettävä peruskone on mitoitettava niin, että saavutetaan optimaalinen virtaus seulamurskaimen täyden tuotantopotentiaalain aikaansaamiseksi. Ylisuuren peruskoneen hankinta ei tuo lisähyötyjä, sillä sen avulla ei voida saavuttaa ylimääräistä kapasiteettia.

4.2 Rummut

Kapasiteettiin merkittävästi vaikuttava tekijä on rumpujen lukumäärä. Jokainen rumpu tekee työtä materiaalin seulonnassa ja murskauksessa, mikä tarkoittaa, että mitä enemmän rumpuja koneessa on, sitä suuremman kapasiteetin se periaatteessa mahdollistaa. Testituloksissa oli kuitenkin havaittavissa eroavaisuuksia liittyen murskaukseen. Silmämääräisesti tarkasteltuna oli nähtävillä, että murskauksessa usein ainoastaan ylin rumpu tekee murskaustyötä. Alimmat rummut lähinnä kuljettivat materiaalia ylimmälle rummulle, jossa murskaus lähes yksinomaan tapahtuu. Tähän yksi todennäköisistä tekijöistä on vastavoiman puute alimmissa rummuissa.

Ylin rumpu murskaa materiaalia lähes kohtisuoraan vastassa olevaa vastaterää tai runkoa vasten ja rummun teräpalat pääsevät puristamaan murskattavia kappaleita niitä vasten. Alemmat rummut puolestaan pyrkivät murskaamaan kappaleita ylempänä olevaa rumpua vasten. Niissä tilanteissa murskattavat kappaleet ovat harvoin tilanteessa, jolloin niihin kohdistuisi vastavoima. Murskaustapahtuma rumpua vasten kohdistuu rumpuputkea tai teräpalaa vasten, joka aikaansaa helposti murskattavan materiaalin kulkeutumisen vain eteenpäin ylärummulle. Kuvassa 29 on esitetty murskausrumpujen ja vastaterän asema murskattavuuden ongelman havainnollistamiseksi.



Kuva 29. Ainoastaan ylin rumpu murskaa materiaalia vastaterää tai runkoa vasten ja alemmat rummut useimmiten vain kuljettavat materiaalia ylärummulle.

Tietyissä tilanteissa materiaali voi jäädä vierekkäisten rumpujen väliin ja näin ollen murskautua, mutta saman pyörimissuunnan johdosta ylemmän rummun teräpalat pyrkivät liikkumaan pois päin murskaustilanteesta. Optimaalisessa murskauksessa rumpujen tulisi

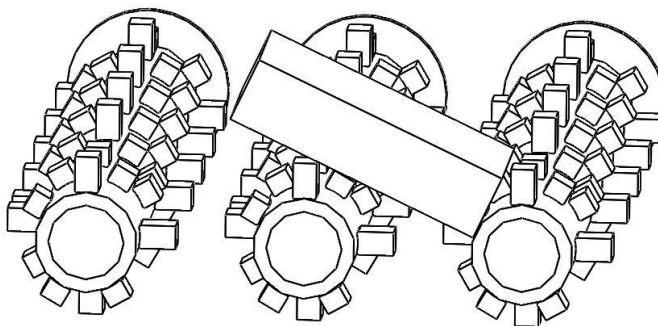
pyöriä vastakkaiseen suuntaan, jolloin teräpalat puristaisivat kahdesta suunnasta murskattavia kappaleita vastakkain.

Samansuuntainen rumpujen pyöritys on kuitenkin hyödyllistä seulontavaiheessa, jolloin materiaali saadaan pyörivään liikkeeseen, mutta murskauksessa pyörimissuunnan vaihdolla voitaisiin mahdollisesti saavuttaa parempia tuloksia. Kuitenkin pyöritettäessä rumpuja samaan suuntaan kauhan kallistus jyrkempään murskauskulmaan voisi myös edesauttaa murskausta, jolloin materiaali ei pääsisi kulkeutumaan ylärummulle niin helposti. Liian jyrkkää murskauskulmaa on kuitenkin vältettävä, sillä muutoin materiaali voi kasaantua pohjalle, eikä näin ollen pääse murskautumaan kuin alarumpua vasten ja ylempien rumpujen murskausteho voi kokonaan jäädä hyödyntämättä.

4.2.1 Testeihin kehitetyt rummut

Ensimmäinen suunniteltu rumpumalli ei tuonut parannuksia seulonta- tai murskausprosessiin. Rakennusmateriaalijätteen murskauksessa rumpu toimi lähes muiden vertailurumpujen tavoin, eikä siitä voitu juurikaan nähdä eroja nykyisiin rumpuihin. Lecaharkkojen murskaustesteissä oli nähtävillä selkeä ero ja suunniteltu rumpu ei toiminut nykyisten rumpujen tavoin. Yksi syy tähän saattoi olla, että rummussa käytetyt teräpalat olivat koko matkalta suorat ja niiden välinen etäisyys oli pienempi kuin vertailun alkuperäisillä rummuilla ja näin ollen teräpalat eivät päässeet kunnolla iskemään murskattavia harkkoja.

Teräpalojen puristusvoima kohdistui murskattavan harkon sivureunaa vasten ja teräpalat raapivat vain harkkojen reunoista pieniä palasia eli murskausprosessissa tapahtui ainoastaan kulumista. Kulumisen johdosta murskausprosessissa oli havaittavissa suurimmaksi osaksi vain pölyä sen sijaan, että seulamurskaimen olisi läpäissyt murskattuja harkon palasia. Kuvassa 30 on pyritty havainnollistamaan ongelmatilannetta murskauksessa.



Kuva 30. Havainto murskaustesteistä, joissa murskattava kappale ei pääse tippumaan murskausalueelle ja tapahtuu ainoastaan murskattavan materiaalin kulumista.

Toinen suunniteltu rumpu suunniteltiin erilaisten vaatimusten pohjalta. Testitulokset eivät olleet täysin vertailukelpoisia, sillä testirungossa pystyttiin käyttämään vain kahta rumpua, mutta saatujen tulosten perusteella rumpu vaikutti toimivan hyvin. Tässä rakenteessa käytettiin leveämpiä teräpalakiekkvoja, mikä saattaa toisaalta heikentää murskausprosessia, mikäli murskattavat kappaleet jäävät kantamaan kiekkojen päälle ja näin ollen teräpalat eivät saa kunnolla otetta murskattavista kappaleista. Kapeampi kiekkorakenne loisi mahdollisesti myös pistemäisen vastavoiman, jonka johdosta kappaleita voitaisiin myös halkaista teräkiekkoja vasten. Nykyisten teräkiekkojen rakennetta voisi kuitenkin pyrkiä muotoilemaan esimerkiksi tekemällä päihin viisteet, jolloin kiekon rakenne olisi yhä kestävä, mutta kiekon pään terävämpi muotoilu edesauttaisi murskausta.

4.2.2 Lisäteräpalarakenne

Murskaustesteihin kehitettiin lisäteräpalarakenne, jonka avulla lisättiin iskujen määrää rumpujen pyöriessä. Iskujen määrää mitattiin iskujen määrässä minuuttia kohden. Usein ajatellaan, että iskujen määrän kasvu tarkoittaa parempaa kapasiteettiä. Testitulosten perusteella murskauksessa tämä asia kumottiin varsin selkeillä tuloksilla. Iskujen määrän kasvu ei yksinään parantanut kapasiteettiä. Erityisesti rumpujen pyörimisnopeuden kasvaessa ero nykyiseen teräpalarakenteeseen kasvoi merkittävästi ja lisäteräpalarakenteen murskausajat kääntyivät nousuun nopeuden kasvaessa. Esitettyjä testituloksia suuremmilla pyörimisnopeuksilla ei saatu lainkaan tuloksia, sillä murskaukseen käytetyt ajat kasvoivat lähes eksponentiaalisesti, eikä mittauksia jatkettu loppuun saakka.

Murskausaikojen kasvu johtui todennäköisesti siitä, että lisäteräpalojen myötä harkot jäivät kantamaan kokonaan teräpalojen päälle. Näin ollen uusi teräpala ehti kiertyä harkkojen alle ennen kuin harkko oli päässyt laskeutumaan rummun päälle edellisen teräpalan jäljiltä. Murskattavan materiaalin tulee päästä tippumaan alas rummun päälle, jotta teräpalat voivat saada siitä otteen, mutta mikäli käytössä on liikaa teräpaloja murskattavat kappaleet eivät välttämättä kaikissa tilanteissa pääse murskausprosessiin, jolloin teräpalat saisivat otteen kappaleista. Tämän tekijän osuutta heikkoihin tuloksiin puoltaa myös pyörimisnopeuden kasvun myötä heikentyneet murskausajat, sillä pyörimisnopeuden kasvaessa teräpalat kulkevat murskausprosessin läpi nopeammassa tahdissa, mikä hankaloittaa entisestään murskattavien kappaleiden kulkeutumista murskausprosessiin niin, että teräpalat saisivat niistä otteen. Tämän myötä harkot pääsevät tipahtamaan teräpalojen väliin yhä harvemmin nopeuden kasvaessa.

4.3 Pyörimisnopeus

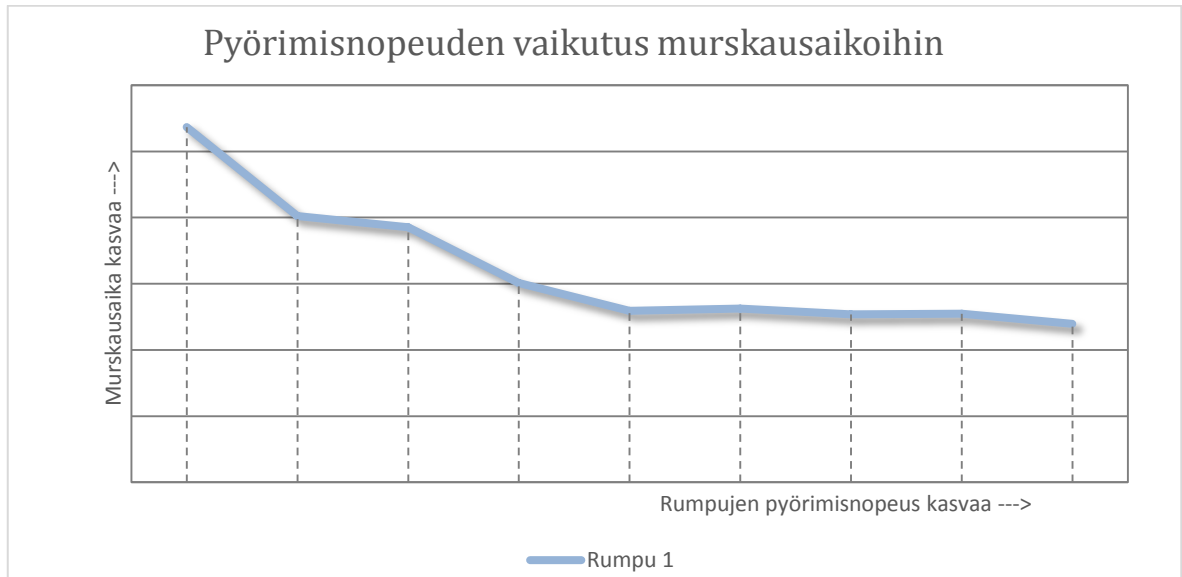
Pyörimisnopeutta tutkittiin testeissä useilla eri nopeuksilla kaikilla rumpuvariaatioilla. Tutkittaessa murskausta eri halkaisijan rummulla teräpalan kehänopeus kasvoi samalla, mikäli käytettiin samaa pyörimisnopeutta, joten vertailutestiä varten laskettiin rummun teräpaloille sama kehänopeus. Kehänopeuden ollessa yhtä suuri molemmilla rummuilla murskaustestin tulokset olivat huomattavasti heikompia suuremmalla rummulla ja tulokset oli havaittavissa myös silmämääräisesti. Tämä saattoi olla seurausta siitä, että teräpalan iskuvoima on pienempi suuremmalla rummulla. Iskuvoima F saadaan laskettua kaavasta:

$$F = \frac{M}{l} \quad (9)$$

Kaavassa 9, M on vääntömomentti yhdelle rummulle ja l on rummun säde. Tämä tarkoittaa, että terän iskuvoima on suurempi pienemmällä rummulla käytettäessä samaa pyörimisnopeutta. Koko prosessin kannalta pyörimisnopeudella on suuri merkitys ja pelkkä iskuvoima ei riitä koko prosessin tarkasteluun, mutta se on kuitenkin tärkeä yksittäinen tekijä, joka tulee ottaa huomioon suunniteltaessa uusia ratkaisuja.

Pyörimisnopeutta tutkittaessa nykyisessä rakenteessa havaittiin piste, jonka jälkeen nopeuden kasvattaminen ei enää juurikaan tuonut parannusta murskausaikoihin. Jokaisella

testin rumputyypillä nähtiin kierrosnopeuden kasvaessa tietyn rajan yli, että sen jälkeen ei saavutettu enää parempia tuloksia murskausaikoihin. Kuvassa 31 on esitetty testitulokset yhden tyyppisellä rumputyypillä.



Kuva 31. Rumpujen pyörimisnopeuden vaikutus murskausaikoihin.

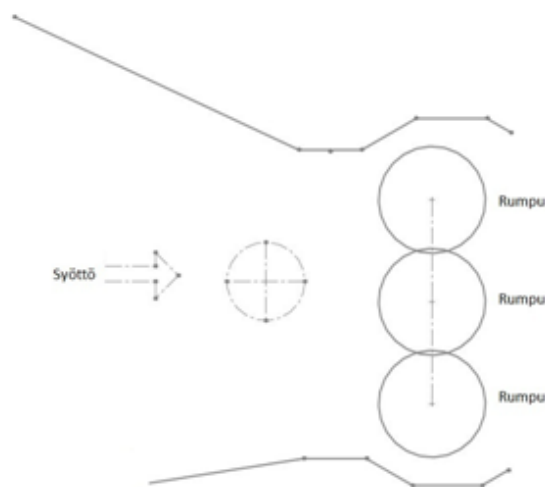
Nopeuden kasvattaminen muodostui ongelmalliseksi todennäköisesti aikaisemmin esitetyn materiaalin kantamisen johdosta. Mikäli rumpujen välinen keskinäinen etäisyys olisi selvästi suurempi kuin nyt, myös pyörimisnopeudesta voitaisiin mahdollisesti saada hyvin erilaisia tuloksia. Teoriaosan kappaleessa 2.6 esitetty puristuskulman teoria on merkittävä tekijä tutkittaessa tätä ongelmaa. Näin ollen materiaalia olisi koko ajan rumpujen välissä alempana ja teräpalat saisivat paremman otteen murskattavista kappaleista ja pystyisivät kuljettamaan ne murskaussektorille. Lisäksi teräpalat iskisivät murskattavia kappaleita ylempään kohtaan ja tekisivät työtä näin ollen suoraan murskattavia kappaleita vasten. Suurempi pyörimisnopeus tarkoittaisi myös huomattavasti suurempia terävoimia nykyiselle rakenteelle, joka puolestaan edesauttaisi kappaleiden murskausta. Pyörimisnopeuden kasvattaminen toisaalta aiheuttaa koko seulamurskaimen rakenteelle huomattavia rasituksia, mikä saattaa puolestaan aiheuttaa ylimääräisiä vauriotapauksia.

4.4 Kidan vaikutus

Kidalla tarkoitetaan seulamurskaimen sisärakennetta, jonka läpi materiaali kulkee murskauksessa. Seulamurskaimissa kita on merkittävässä roolissa murskauksen kannalta,

sillä kita-aukon koko vaikuttaa siihen kuinka suuria kappaleita pystytään käsittelemään. Kita-aukon koon lisäksi kidan muotoilulla on merkittävä vaikutus. Oikeanlaisella kidalla voidaan tehostaa huomattavasti kappaleiden murskausta. Kidan muotoilussa tulisi myös pyrkiä siihen, ettei hieno materiaali kerääny yhtenäiseksi ja pääse tiivistymään, mitä kutsutaan holvaantumiseksi. Siinä tapauksessa materiaalin kulkeutuminen pysähtyy.

Nykyisessä rakenteessa kidan särmätty rakenne sijaitsee juuri rumpujen keskilinjan yläpuolella ja kappaleiden murskauksessa vastaterää vasten ne pyrkivät estämään kappaleita kulkeutumasta ylöspäin. Mikäli runko olisi suora tästä kohdin, kappaleet todennäköisesti pyörähtäisivät helpommin puristusjännityksen alla ylöspäin ja jäisivät pyörimään entistä helpommin rumpujen päälle. Tämänhetkinen rakenne toimii kuitenkin vain pienillä kappaleilla, jotka ovat halkaisijaltaan alle 100 mm ja suuret kappaleet pyörähtävät suoraan tämän rakenteen yli ja niiden murskaus muodostuu entistä hankalammaksi. Näin ollen suurten kappaleiden murskauksessa koko rakenteen paikkaa tulisi pohtia uudelleen ja sitä voisi olla mahdollista muuttaa eri kohtiin kiinnitettävillä vastaterärakenteilla, jolloin vastaterärakenteen sijaintia voitaisiin muuttaa vaaditun jaekoon mukaan. Esimerkiksi suoraan sisärunkoon kiinnitettävä murskausta edistävä vastaterärakenne mahdollistaisi jokaiseen kohteeseen erikseen tehtävän rakenteen, joka voitaisiin valita esimerkiksi asiakkaan haluaman jaekokovaatimusten mukaan. Kuvassa 32 on esitetty seulamurskaimen rungon rakenne tilanteen havainnollistamiseksi.



Kuva 32. Seulamurskaimen kidan muoto, jossa näkyy nykyisen kitarakenteen haastavuus murskauksessa.

Kidan vaikutusta murskaukseen olisi hyvä tehostaa lisäämällä käytettäviin kulutusosiin hampaita, jotka tehostaisivat murskausta. Hampaiden sijoittelussa tärkeää on, että ne eivät sijaitse liian lähellä toisiaan ja hampaiden pystysuuntainen asema, jolloin kappaleen kulkiessa rungon sisällä voidaan saada aikaan suurempi kitkavoima. Näin ollen myös murskattavan kappaleen ja rumpujen välinen kitkavoima kasvaa entisestään. Hampaiden avulla voidaan lisäksi saada aikaan murskattaville kappaleille vastavoima, joka kohdistuu pistemäisesti murskattavaa kappaletta vasten. Mikäli hampaat ovat liian lähellä toisiaan, puristusjännitys voi kohdistua enemmän niiden aikaansaamaa tasopintaa vasten, mikä vaatii enemmän työtä, eikä hampaiden tuottamaa hyötyä voida enää mahdollisesti saavuttaa. Kuvassa 33 on esitetty vastaavan tyyppisiä Metson murskainten kulutusosia.



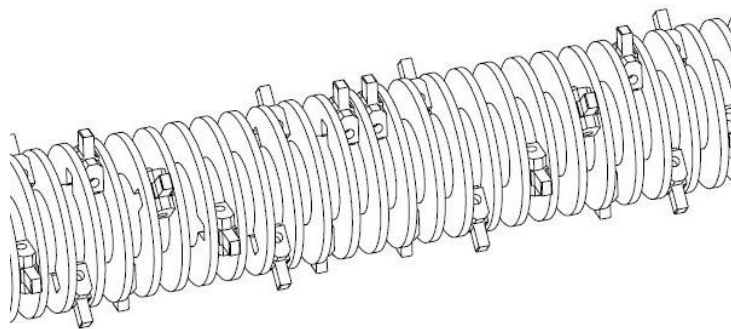
Kuva 33. Eri käytännön sovelluksiin suunniteltuja leukamurskaimen kulutusosia. (Metso, 2010).

Nykyisessä seulamurskaimen rakenteessa kappaleita pyritään usein murskaamaan suoraa tasopintaa vasten, missä ei ole kiinnitetty tarpeeksi huomiota vastavoiman tuottamiseen. Hampaiden pituuden ei tarvitsisi olla suuria, sillä jo esimerkiksi pieni hammastus kuvan 33 mukaisesti voi olla tarpeeksi suuri aikaansaamaan suuremman kitka- ja pistevoiman murskaukseen. Lisäksi hampaiden avulla voitaisiin mahdollisesti estää murskattavien kappaleiden kulkeutumista sivuttaissuuntaisesti seulamurskaimen sisällä, sillä seulamurskaimessa murskattavat kappaleet pyörivät ja liikkuvat usein paljon rumpujen päällä.

4.5 Teräpalan muoto

Nykyisissä murskausterissä teräpalan kärjen muodossa on useita kehityskohteita eri sovellusten näkökulmasta. Murskauksen kannalta merkittävä tekijä on puristava isku, jolloin teräpala pääsee puristamaan kunnolla murskattavia kappaleita ja näin ollen kappale todennäköisemmin murtuu. Murskaustilanteissa, joissa teräpala pääsee kosketuksiin vain murskattavien kappaleiden alaosiin, se todennäköisesti raapii nurkista vain pieniä palasia ja aikaansaa ainoastaan kulumista. Tämä ei kuitenkaan ole tavoiteltavaa murskausprosessissa.

Teräpalojen murskausominaisuuksien kannalta tutkittavana asiana on osassa malleista nykyinen kiekkorakenne, joka rajoittaa käytettäviä teräpaloja leveyden ja pituuden osalta. Kiekkorakenteen käytössä murskauksen kannalta voisikin olla hyödyllistä, mikäli teräpalat pystyttäisiin sijoittamaan esimerkiksi haarukkaliitoksella teräkiekkojen päälle. Näin ollen koko saavutettavissa oleva terän pituus voitaisiin hyödyntää ja samalla voitaisiin saada aikaan terän alla olevasta kiekkorakenteesta rumpuun vastavoiman tuottaja. Myös teräpalan kiinnitysratkaisua voitaisiin kehittää helpommin tämän myötä ja se antaisi vapauksia useille ratkaisuille. Kiinnityspisteen sijainnin muuttaminen tarkoittaa sitä, että rumpujen akseliväliä tulee kasvattaa tai pienentää rumpujen halkaisijaa, jotta esitetty teräpalarakenne mahtuisi pyörimään. Kuvassa 34 on esitetty kiekkorakenteinen rumpumalli.



Kuva 34. Nykyinen kiekkorakenne, jossa teräpalat on sijoitettu kiekkojen väliin (Allu Finland, 2014).

Murskausprosessia helpottaisi teräpalan kärjen terävämpi iskupinta, jolloin kappaleen murtamiseen vaadittava voima pienenee. Terävä kärki puolestaan vaikuttaa niin, että

kappaleita pyrittäisiin ennemmin halkaisemaan kuin murtamaan. Murtuminen vaatii huomattavasti suuremman puristusvoiman, mikä puolestaan aiheuttaa haasteita tehon puolelle seulamurskaimen rakenteen johdosta. Lisäksi seulamurskaimen käyttökohteissa harvoin pyritään murskaamaan kappaleita erittäin suuresta syötemateriaalin jaekoosta kerralla pieneen loppujaekokoon eli pienennyssuhde on usein varsin maltillinen yhdellä koneella. Näin ollen teräpalan terävä kärki voisi mahdollistaa kappaleiden halkaisun ja tavoiteltava jaekoko voitaisiin saavuttaa yhdellä tai kahdella halkaisulla, eikä murskaukseen vaadittava voima kasvaisi liian suureksi. Tämä sopisi hyvin seulamurskaimen työmenetelmiin sekä mahdollisuuksiin kiven murskauksessa käytettävän tehoon nähden. Teräpalan kärjen puristusjännitys σ saadaan laskettua kaavasta:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10)$$

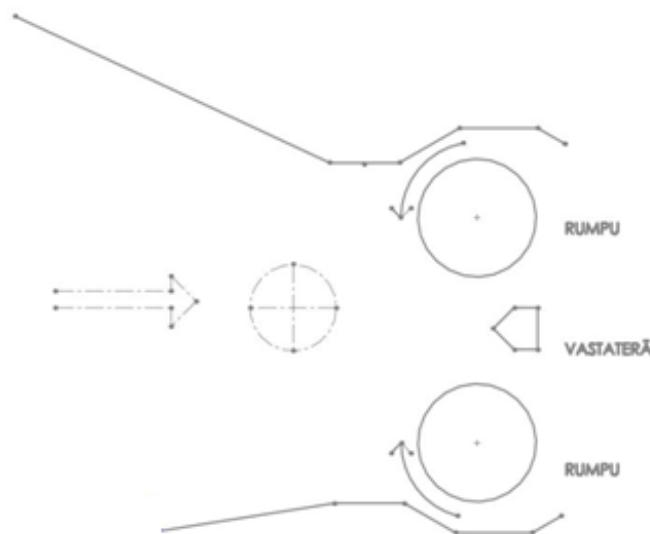
Kaavassa 10, F on teräpalan iskuvoima ja A on teräpalan iskupinta-ala. Terävän teräpalan mahdollista käyttöä tulee kuitenkin tutkia kokeellisesti, sillä se soveltuu mahdollisesti hyvin kovemille kiville, mutta ei välttämättä ole hyvä ratkaisu pehmeillä materiaaleilla. Hyvin pehmeillä materiaaleilla terävä kärki saattaa upota murskattavan kiven sisään ja jäädä jumiin sinne. Näin ollen kyseisissä sovelluksissa voisikin olla tarpeen käyttää leveämpää teräpalaa, jolloin puristusjännityksen avulla kappaleet murtuvat. Pehmeän materiaalin myötä käytettävä teho saattaisi riittää paremmin myös koko kappaleiden murskaukseen halkaisun sijasta.

Käytettävien teräpalojen määrää tulee tarkastella kokeellisten testien avulla tarkemmin. Suurten kappaleiden murskauksessa ei saavuteta hyötyjä nykyisillä hyvin tiheään sijoitetuilla teräpaloilla, sillä niiden myötä tarvittava voima kappaleen murskaukseen kasvaa entisestään. Vähentämällä teräpalojen määrää voitaisiin kohdistaa voima paremmin työtä tekeville teräpaloille ja saada näin ollen aikaan suurempi iskuvoima yksittäiselle teräpalalle. Tämä edesauttaa suurten kappaleiden murskausta ja toisaalta parantaisi seulontaprosessia kun hieno aines pääsee kulkeutumaan seulamurskaimen läpi entistä vapaammin.

4.6 Vastaterärakenne

Nykyinen vastaterärakenne on ensisijaisesti seulontaa ja pienten kappaleiden murskausta varten suunniteltu rakenne. Sen avulla materiaali pysyy rumpujen päällä ja vastaterät sijaitsevat rumpujen keskilinjan yläpuolella, jolloin kappaleet jäävät helposti vastaterän päälle. Murskauksessa etenkin vastakkain pyörivien rumpujen kanssa vastaterä voisi olla ennemmin rumpujen keskilinjan alapuolella, jolloin pyörimisliikkeessä olevat rummut iskisivät murskattavia kappaleita vastaterää vasten.

Tällä hetkellä murskauksessa käytettävä vastaterärakenne on useimmissa käyttökohteissa suora vastaterärakenne. Murskauksen kannalta olisi hyvä kuitenkin kehittää pieniä vastinpintoja juuri vastaterään, joita vastaan murskattavat kappaleet olisivat kosketuksissa ja näin ollen saisivat kiinteitä pisteitä, joita vasten murskaus tapahtuu. Kuvassa 35 on esitetty yhdentyypisiä ratkaisuja vastakkain pyörivien rumpujen ja vastaterän sijoittelussa.



Kuva 35. Vastakkain pyörivien rumpujen ja vastaterärakenteen sijainnin ideointia.

Nykyinen vastaterärakenne on kuitenkin hyvin joustava murskauksen kannalta, sillä erityisesti suuremmat kappaleet pääsevät useimmiten myös pyörähtämään pois puristavan teräpalan kärjen alta. Tämä tarkoittaa, että kappaleet jäävät pyörimään rumpujen päälle, mutta myös sitä, että seulamurskaimen rummut pyörivät usein melko hyvin koko ajan ilman jumiutumista. Tästä saa helposti käsityksen, että murskausprosessin ajatellaan toimivan hyvin, koska rummut pyörivät koko ajan ja materiaalia kulkeutuu läpi.

Todellisuudessa rummut kuitenkin saattavat tehdä vain kulumistyötä murskattaviin kappaleisiin koko ajan. Sen myötä murskauskapasiteetti voi heikentyä merkittävästi, eikä asetettuihin tavoitteisiin kapasiteetin suhteen yllätä, koska murskausprosessi on niin hidas. Lisäksi hydrauliiikan mittaustuloksissa voidaan nähdä käytettävän lähes maksimiteho, mutta todellisuudessa tehoa saatetaan käyttää lopputuloksen kannalta epäoleelliseen asiaan eli ainoastaan kappaleiden pyörittämiseen seulamurskaimen sisällä.

Vastaterän sijoittelu rumpujen keskilinjan alapuolelle tarkoittaisi sitä, että rummut ja teräpalat joutuvat vastakkain murskattavia kappaleita vasten ja lopputuloksena on kaksi vaihtoehtoa; murskausprosessi onnistuu tai rummut pysähtyvät. Oikeanlaisella suunnittelulla on tähän hyvin merkittävä osuus ja mikäli rakenne olisi toimiva, seulamurskaimen murskauskapasiteetti voisi parantua huomattavasti. Suurena riskitekijänä on kuitenkin tehon puute, sillä tämä rakenne asettaa suuria haasteita tarvittavan murskaustehon aikaansaamiseksi. Samoin uudet riskitekijät rakenteen kestävyudessa asettavat suuria haasteita suunnittelun näkökulmasta. Kriittisiä kohtia tulisikin mahdollisesti vahvistaa nykyisestä rakenteesta ja suorittaa käytännön testejä, jolloin nähtäisiin tämän rakenteen todellinen vaikutus ja potentiaali.

4.7 Murskaukseen soveltuvan maa-aineksen kovuusluokittelu

Murskauksen kannalta yksi merkittävä tekijä on materiaaliominaisuuksien vaikutus. Osa materiaalista on niin kovaa, ettei seulamurskaimen teho yksinkertaisesti riitä materiaalin murskaukseen. Näin ollen murskaukseen valittavia materiaaleja seulamurskaimella tämänhetkisin ratkaisuilla ovat niin kutsutut pehmeät kivet. Pehmeiden kivien joukkoon kuuluu muun muassa liuskekivet ja kipsi. Murskauksessa on useita erilaisia taulukoita, joiden avulla voidaan vertailla eri materiaalien kovuus- ja sitkeysarvoja ja näin ollen haastavuutta murskauksen kannalta. Yksi käytetty taulukko on Mohin taulukko, mutta arvoja voidaan vertailla keskenään myös työssä esitettyjen teorioiden välillä. Kuvassa 36 on esitetty Mohin taulukon ja työssä esitellyn Bondin murskauslain materiaalivakioiden välinen suhde.

Materiaali	Mohin kovuus	Bondin työindeksi (kWh ton ⁻¹)
Talkki	1	
Kipsi	2	7
Kalsiitti	3	
Fluoriitti	4	10
Lasi	Naarmuuntumisen yläpuolella	11
Apatiitti	5	
Ortoklaasinen maasälpä	6	12
Kvartsi	7	14
Topaasi ja berylli	8	
Piikarbidi	9	26
Timantti	10	

Kuva 36. Mohin ja Bondin kovuusindeksien välinen vertailutaulukko (Holdich, 2002).

Taulukoiden arvoja ei kuitenkaan voida suoraan hyödyntää suunnittelun apuna, sillä usein murskattavat materiaalit sisältävät myös sivukiviä, joiden materiaaliominaisuudet voivat poiketa merkittävästi hankaloittaen näin ollen murskausprosessia. Mikäli kyseessä on jokin yksittäinen materiaali, voidaan seulamurskaimen sopivuutta tiettyyn kohteeseen tarkastella melko hyvin näiden teorioiden pohjalta. Lisäksi esitetyllä Kickin murskauskain pohjalta tehtyjen laskujen perusteella voidaan saada suunnittelun lähtökohdaksi arvokkaita suunnitteluparametreja, joiden avulla voidaan pohtia tehon riittävyttä käyttökohteeseen. Kickin lain avulla lasketut arvot ovat kuitenkin vain suuntaa antavia parametreja eikä niiden varaan tule luottaa koko suunnitteluprosessia. Parhaiten murskausparametrien käyttöä voitaisiin hyödyntää kun seulamurskaimen käyttökohteista kerättäisiin näytteitä, joista tehtäisiin laboratoriotutkimuksia kiven materiaaliominaisuuksien määrittämiseksi. Vertailemalla kiven ominaisuuksia ja seulamurskaimen toimintaa voitaisiin määrittää tarkemmin seulamurskaimelle soveltuvat kivilajit ja niiden kuluttavuus koko rakennetta kohtaan.

4.8 Jatkokehitysideat

Seulamurskaimen murskausominaisuuksien kehittämiseksi olisi hyvä pyrkiä soveltamaan työssä esitettyjä teorioita suunnittelun apuna. Näitä hyödyntämällä voitaisiin todennäköisesti huomattavasti tehostaa murskausta ja näin ollen parantaa kapasiteettia kiven murskaukseen liittyvissä kohteissa. Murskausta käsitellään usein vastakkain pyörivien rumpujen kautta ja sen vuoksi olisikin hyvä testata käytännön testeillä seulamurskaimen ominaisuuksia suunnittelemalla rakenne niin, että rumpuja pyöritetään vastakkain.

Vastakkain pyörivien rumpujen välinen etäisyys määrittää saavutettavissa olevan jaekoon. Rumpujen halkaisija yhdessä rumpujen etäisyyden kanssa määrittää syötemateriaalin jaekoon eli sen kuinka suurista kappaleista on mahdollista saada ote. Rumpujen välistä etäisyyttä kasvattamalla voidaan käsitellä suurempia kappaleita, mutta samalla lopputuotteen jaekoko kasvaa. Jaekoko voitaisiin koittaa säännöstellä, mikäli rumpujen väliin keskelle asennettaisiin vastaterä, joita vasten rummut puristavat materiaalia. Tämä kuitenkin lisää voiman tarvetta ja vastaterärakennetta tulisikin koittaa ensin pehmeille materiaaleille. Vastaterärakenteen paikkaa olisi myös hyvä olla mahdollista siirtää tarpeen mukaan, jotta voitaisiin havaita optimaalinen paikka rakenteen sijainnille, missä murskaus on mahdollisimman tehokasta.

Materiaalin murskauksessa kiinteiden ratkaisujen rumpujen halkaisijat ovat yleensä huomattavan suuria verrattuna seulamurskainten rumpuratkaisuihin. Tämä asettaa suuria haasteita seulamurskaimen rakenteelle, mutta mahdollisuuksien mukaan suurten kappaleiden murskauksessa rumpujen halkaisijaa olisi hyvä pyrkiä kasvattamaan. Kaivos-teollisuudessa rumpujen halkaisijat ovat totutusti olleet hyvin suuria, joten pienillä rummuilla voi olla haastavaa vakuuttaa asiakkaita kyseisillä markkinoilla. Samoin samansuuntainen rumpujen pyörytys voi aiheuttaa haasteita murskauksessa, joten ennakkoluulot niiden toimivuudesta voivat olla yllättävän suuria ja luoda hankaluuksia asiakkaiden ennakkoluulojen myötä.

Kiinteisiin murskaimiin verrattuna seulamurskaimissa suuren haasteen aiheuttaa myös käyntiinlähtömomentti. Seulamurskaimissa materiaali lastataan kauhaan sisään ja vasta sen jälkeen siirrytään murskaamaan materiaalia, joten käynnistyshetkellä kaikki kauhassa oleva materiaali on rumpujen päällä painona aiheuttaen suuren haasteen rumpujen

käynnistymiselle. Kiinteissä murskaimissa materiaali syötetään valmiiksi pyöriville rummuille, joten niissä ei ole vastaavaa ongelmaa ja lisäksi niissä käytetään usein suuria vauhtipyöriä helpottamaan murskausta. Seulamurskaimissa voitaisiin myös käyttää vauhtipyörää murskauksen helpottamiseksi, mutta sen koko potentiaalin hyödyntäminen vaatii vielä runsaasti kehitystyötä. Mikäli murskettava materiaali saataisiin pysymään rumpujen yläpuolella niin, että rummut saataisiin pyörimään kevyemmin, voisi tämä tuoda paljon uusia mahdollisuuksia kiven murskaukseen.

Rumpujen jumiutumista käyntiinlähöhetkellä voisi kuitenkin yrittää helpottaa niin, että rumpuihin suunniteltaisiin teräpalat, jotka ovat teräviä puristuspuoleltaan ajettaessa rumpuja vastakkain, mutta pyöreät toiselta puolelta, jolloin teräpalat eivät edes pyrkisi murskaamaan materiaalia vaan niiden avulla voitaisiin ensin seuloa pois hieno aines ja näin ollen keventää rumpujen päällä olevaa kuormaa. Kuorman keventyessä ei voitaisi taata siltikään riittävää voimaa rumpujen käynnistämiseksi vastakkain, mutta sen avulla voitaisiin ainakin helpottaa lähtötilannetta ja luoda parempia mahdollisuuksia onnistuneeseen murskaukseen.

Kidan suunnittelussa olisi hyvä kokeilla useita erilaisia rakenteita, joissa kiinnitettäisiin huomiota puristuskulmaan ja kohtaan missä teräpalat saavat otteen kappaleista. Näin ollen voitaisiin määrittää omien kokemusten pohjalta lähtökohdat seulamurskaimen rakenteessa soveltuville puristuskulmille. Kulmia tulisi kokeilla sekä vastakkain pyöritettäessä, että samaan suuntaan vastaterää vasten pyöritettäessä. Vastaterää vasten kulmia olisi myös hyvä tutkia rumpuja vastakkain pyöritettäessä sekä pyöritettäessä rumpuja eri suuntiin rungon sivuja vasten.

Voimansiirron toteutus aiheuttaa kuitenkin suuria haasteita vastakkaisuuntaiselle rumpujen pyörittämiselle. Lisäksi tehon puute voi muodostua ongelmaksi vastakkaisuuntaisessa rakenteessa, mutta työssä käsiteltyjen teorioiden perusteella vastakkaisuuntainen pyöritys ja sen myötä murskaukseen vaikuttavia tekijöitä olisi kannattavaa kokeilla jatkotesteissä.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Murskaukseen vaikuttavien tekijöiden ymmärtäminen ja oikeanlainen käyttö on merkittävässä roolissa onnistuneeseen murskaustapahtumaan. Kokeellisissa testeissä saatiin tuloksia nykyisten rumpujen tuottamasta jaekoosta sekä nähtiin seulamurskaimen nykyinen tilanne murskauksen näkökulmasta. Eri rumpuvaihtoehtojen välisistä kapasiteettieroista saatiin lisätietoa murskaustestien yhteydessä. Saatujen tulosten pohjalta analysoitiin nykyisen rakenteen soveltuvuutta murskaukseen. Työn alussa asetettuihin numeerisiin tavoitteisiin ei päästy, sillä pääpaino työn edetessä keskittyi niiden asioiden tutkimiseen, joiden avulla aluksi asetetut tavoitteet voitaisiin saavuttaa. Työn edetessä havaittiin aluksi asetetut tavoitteet hyvin haastaviksi ja niiden saavuttamiseksi tulee tehdä vielä huomattavia rakenteellisia parannuksia, jotta ne voidaan saavuttaa. Tässä työssä käsiteltiin niitä tekijöitä, joiden avulla numeeriset tavoitteet voidaan jatkossa saavuttaa. Lisäksi kulumiskestävyys jätettiin työssä hyvin pienelle huomiolle pääpainon kohdistuessa murskausteknisten asioiden tutkimiseen sekä jaekoon ja kapasiteetin tutkimiseen. Kulumiskestävyyttä ei koettu tässä vaiheessa prosessia vielä niin tärkeäksi tekijäksi vaan ensin keskityttiin itse murskaustapahtuman kehittämiseen.

Seulamurskaimen nykyinen rakenne on kehitetty ennen kaikkea materiaalin seulontaa varten. Rumpujen samansuuntainen pyöritys saa käsiteltävän materiaalin pyörivään liikkeeseen, mikä tehostaa seulontaprosessia. Murskauksessa puolestaan rungon sisällä tapahtuva materiaalin pyörintäliike on usein hidasteena murskaukselle, kun kappaleet pyörähtävät ulos murskaussektorilta. Murskausrumpujen suunnittelussa tulisi keskittyä siihen miten murskattavista kappaleista saadaan parempi ote. Lisäksi tulisi huomioida tarkemmin yksittäisen sovelluksen vaatima jaekoko rumpujen välisen sijainnin ja yksittäisen rummun halkaisijan suhteen. Mikäli materiaalia murskataan runkoa tai vastaterää vasten, tulisi vastinpintojen kitka- ja vastavoiman tuottamiseen keskittyä nykyistä enemmän.

Nykyisessä rakenteessa ei saavuteta koko tuotantopotentiaalia murskauksen kannalta. Teräpalat joutuvat harvoin tilanteisiin, joissa ne murtaisivat tai halkaisisivat kappaleita. Murskausprosessin kannalta tulisi pohtia, onko seulamurskaimella kannattavaa tavoitella

kappaleiden murtamista vai tulisiko tavoitteeksi asettaa murskattavien kappaleiden halkaisu. Murtuminen tuottaa suuremman pienennyssuhteen, mutta vaatii enemmän tehoa. Seulamurskaimen rajoitteet huomioon ottaen halkaisu voisi olla ratkaiseva tekijä, jolla saavutetaan oikeanlainen kompromissi pienennyssuhteen ja vaaditun tehon välillä.

Teräpalojen määrä yksittäisessä rummussa on tällä hetkellä hyvin suuri murskauksen kannalta ja niiden sijoittelu johtaa suurten kappaleiden kantamiseen rumpujen päällä. Lisäksi rumpujen välinen etäisyys on melko pieni, jolloin suurilla kappaleilla ei ole juurikaan mahdollisuuksia päästä murskaussektoriin ja murskaantua. Rumpujen nykyinen rakenne johtaa usein tilanteisiin, jolloin murskattaviin kappaleisiin ei kohdistu vastavoimaa, mikä aiheuttaa ainoastaan kappaleen pyörimisen rumpujen päällä. Näin ollen suurin osa käytetystä tehosta kuluu pelkästään kappaleiden pyörittämiseen eikä murskaukseen. Seulamurskaimen teho on varsin rajallinen, joten tehon kohdentaminen oikeaan kohteeseen on merkittävää onnistuneen lopputuloksen kannalta. Teräpalojen määrän vähentämisen lisäksi murskausta voidaan tehostaa teräpalojen geometriaa muuttamalla, lisäämällä kärkeen terävä iskupinta. Näin ollen tuotettaisiin suurempi voima murskattavaan kappaleeseen ja sillä olisi suurempi todennäköisyys murskaantua. Lisäksi terävämpi pää helpottaisi paremman otteen saamisesta murskattavista kappaleista ja niiden kuljettamista murskaussektorille.

Pyörimisnopeuden havaittiin olevan juuri optimaalinen nykyisessä ratkaisussa, eikä sen kasvattaminen tuonut parannusta kapasiteettiin. Kuitenkin kasvattamalla rumpujen välistä etäisyyttä ja halkaisijaa pyörimisnopeutta tulee tarkastella uudelleen. Näin ollen suuret kappaleet saataisiin rumpujen väliin ja käytettäessä suurempaa pyörimisnopeutta saataisiin lisää iskuvoimaa mikä edesauttaisi puolestaan murskausta. Pyörimisnopeuden kasvattaminen kuitenkin johtaa jälleen useisiin uusiin toimenpiteisiin, sillä koko rakenteeseen kohdistuvat rasitukset kasvavat merkittävästi pyörimisnopeutta kasvatettaessa.

Edellä esitetyt asiat vaikuttavat koko työn lähtökohtana tavoitteiksi asetettuihin asioihin eli parempaan jaekoon hallintaan ja kapasiteetin parantamiseen. Jaekokoa pystytään hallitsemaan murskauksessa paremmin, mikäli rakenne suunnitellaan murskaukseen vaikuttavien teorioiden mukaisesti. Tämä puolestaan tarkoittaa parempaa kapasiteettia, kun

prosessissa käytetty teho kohdistuu kappaleiden murskaukseen. Työssä löydettiin useita murskaukseen vaikuttavia tekijöitä, joita hyödyntämällä on mahdollista parantaa seulamurskaimen murskausprosessia. Näiden yhdistäminen käytännön tilanteeseen vaatii kuitenkin vielä erittäin paljon työtä, sillä työssä käsiteltyjen asioiden lisäksi monien muiden osien rakenteeseen on myös tehtävä muutoksia, jotta esitetyt asiat voitaisiin toteuttaa seulamurskaimissa. Yksi suurimmista haasteista kohdistuu seulamurskaimen tehoon, mikä ei välttämättä riitä rumpujen käynnistämiseen kuorman alaisena ja näin ollen onnistuneeseen murskaukseen. Kaiken kaikkiaan seulamurskaimessa on kuitenkin suuri potentiaali murskausprosessin kannalta ja järjestelmällisen sekä pitkäjänteisen kehitystyön tuloksena voidaan saada aikaan merkittäviä tuloksia.

LÄHTEET

ALLU Finland. Allu seulamurskain D-sarja esite. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 24.02.2014]. Saatavissa: http://www.allu.net/fi/tuotteet/seulamurskain/seulontaa-murskausta/item/download/74_3c74c3c8215900befca5a04ff28c0fd7

Allu Finland. 2012. Allu material processing attachment. One step screening & crushing to perfection. [Viitattu 06.03.2014.]

Europörssi. 2008. Murskaustehoa "saapasmaasta". No. 8/2008, s.62.

Gupta, A. & Yan, D.S. 2006. Mineral processing design and operations an introduction. s.65-66, s.142-159.

Holdich, R. G. 2002. Fundamentals of particle technology. Loughborough University, U.K. Department of Chemical Engineering. s.114-122.

Jankovic, A. et. al. 2010. Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore [verkkotietokanta]. [Viitattu 27.05.2014.] Saatavissa: <http://www.saimm.co.za/Journal/v110n03p141.pdf>

King, H. 2005. Mohs hardness scale. A rapid hardness test for field and classroom use. [verkkodokumentti]. [Viitattu 04.06.2014.] Saatavissa: <http://geology.com/minerals/mohs-hardness-scale.shtml>

King, R. P. 2001. Modeling & simulation of mineral processing systems. Department of metallurgical engineering University of Utah, USA. s.6-210.

MB. 2014. Meccanica Breganzese tuote-esite. 140319161770 MB Product data sheep 90.3.

Meech, J. A. 2014. Introduction to mineral processing. Lecture slides. Energy use in comminution.

Metso Minerals. 2010. Nordberg C-sarjan leukamurskaimet. Kulutusosaopas. Brochure No: 2655-08-11-SBL/Tampere-Finnish

Metso Minerals. 2006. Crushing and screening handbook. Tampere: Metso Minerals Crushing and screening.

Metso Minerals. 2011. Metso's Mining and Construction Technology Wear parts application guide. Brochure No: 2654-08-11-SBL/Tampere-Finnish

Northstone Materials. 2014. Quarrying process and quarry products [verkkodokumentti]. [Viitattu 20.03.2014.] Saatavissa: <http://www.northstonematerials.com/about-us/education/quarrying-process-and-quarry-products/>

Remu. 2012. Remu seulakauhat esite [verkkodokumentti]. [Viitattu 21.03.2014.] Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.remu.fi/remubucketfinnish.pdf>

SFS-EN 933-1:2012. Kiviainesten geometrysten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä.

SFS-EN 1097-2:2010. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: Iskunkestävyyden määrittämismenetelmät.

Smith, M.R. & Collis, L. 1993. Aggregates – Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. 2. Painos. The Geological Society, Lontoo. 339 s.

Tang, C.A et al. 2004. Numerical approach to particle breakage under different loading conditions. Center of rock instability and seismicity research, Northeastern University, Sjemyang, China. Teoksessa: Powder technology. s.130-143.

Tuunila, R. 2014. Murskaukseen vaadittava energia [yksityinen sähköpostiviesti]. Lähetetty 19.05.2014 klo 10.47 (GMT +0200). Liitetiedostot: "Esimerkki murskauksen energiankulutus" & "LH10_2011_T2". Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Wang, W.X. & Stephansson, O. 1996. Comparison between sieving and image analysis of aggregates. Teoksessa: Franklin J.A. & Katsabanis T. Measurement of blast fragmentation. s.141-149

Wills, B. A. 2006.. Will's Mineral Processing Technology. 7. Painos. s.126-139

Zámostný, P. 2012. Engineering in Chemical and Pharmaceutical Processes. Lecture slides. Particle sizing Comminution. Institute of chemical technology, Praha.

Zhao, J. 2010. Rock mechanics for civil engineers. Chapter 4: Properties of rock materials. Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland.

MURSKAUKSEEN VAADITTAVAN TEHON LASKEMINEN

Kalkkikiveä halutaan murskata 300 tn/h ja 80 % syötemateriaalista läpäisee 200 mm jaekokoseulan ja loppujaekoon halutaan läpäisevän 80 %:sesti 75 mm jaekokoseulan. Mitoituksen pohjaksi määritettiin materiaalivakio testimateriaalille koemurskauksessa, jossa laboratorioissa murskattiin 200 kg kalkkikiveä 100 mm jaekoosta loppujaekokoon 16 mm, jolloin kokonaisenergiankulutukseksi mitattiin 800 kJ.

Koemurskauksessa: (Tuunila, 2014.)

$$m = 200 \text{ kg}$$

$$x_1 = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$$

$$x_2 = 16 \text{ mm} = 0,016 \text{ m}$$

$$E = 800 \text{ kJ}$$

$$E_{ktest} = \frac{800 \text{ kJ}}{200 \text{ kg}} = 4000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Murskausprosessissa käyttökohteessa:

Lopputuotteen 80 % seulan läpäisevä jaekoko $P = 75 \text{ mm}$

Syötemateriaalin 80 % seulan läpäisevä jaekoko $F = 200 \text{ mm}$

Vaadittu kapasiteetti $M_F = 300 \text{ tn/h}$

Energiantarveyhtälö Kickin lain mukaan:

$$E_k = K_k \sigma_p * \ln * \left(\frac{x_1}{x_2} \right)$$

$$K_k \sigma_p = \frac{E_{ktest}}{\ln * \left(\frac{x_1}{x_2} \right)}$$

$$K_k \sigma_p = \frac{4000 \frac{J}{kg}}{\ln * \left(\frac{0,1 m}{0,016 m} \right)} = 2182,7 \frac{J}{kg}$$

Energiankulutus murskauksessa käyttökohteessa:

$$E_k = 2182,7 \frac{J}{kg} * \ln * \left(\frac{0,20 m}{0,075 m} \right) = 2141 \frac{J}{kg}$$

Tehontarve tunnissa:

$$1 kWh = 3,6 * 10^6 J$$

$$P = E_k * M_F = 2141 \frac{J}{kg} * 300000 \frac{kg}{h}$$

$$P = 0,642 * 10^9 \frac{J}{h} = 178,42 kW$$

Käsitellään kaksi vertailutilannetta, jossa murskataan eri jaekoon materiaalia samalla seulamurskaimella. Oletetaan, että kapasiteetin halutaan pysyvän samana 300 tn/h, mutta syötämateriaalin jaekoko on 600 mm ja loppumateriaalin jaekoko halutaan olevan 300 mm. Tästä voidaan laskea:

Energiankulutus:

$$E_k = 2182,7 \frac{J}{kg} * \ln * \left(\frac{0,60 m}{0,30 m} \right) = 1513 \frac{J}{kg}$$

Kalkkikiven murskaukseen tehontarve tunnissa:

$$P = E_k M = 1513 \frac{J}{kg} * 300000 \frac{kg}{h}$$

$$P = 0,454 * 10^9 \frac{J}{h} = 126,08 \text{ kW}$$

Toisessa tilanteessa käytetään samaa kapasiteettia 300 tn/h ja syötemateriaalin jaekkoa 600 mm, mutta nyt halutaan loppumateriaalin jaekoon olevan 100 mm. Tästä voidaan laskea:

Energiankulutus:

$$E_k = 2182,7 \frac{J}{kg} * \ln * \left(\frac{0,60 \text{ m}}{0,10 \text{ m}} \right) = 3911 \frac{J}{kg}$$

Kalkkikiven murskaukseen tehontarve tunnissa:

$$P = E_k M = 3911 \frac{J}{kg} * 300000 \frac{kg}{h}$$

$$P = 1,173 * 10^9 \frac{J}{h} = 325,91 \text{ kW}$$

Lopputuloksena saadaan murskaukseen vaadittavan tehon tarve. Tätä tulosta puolestaan verrataan seulamurskaimen tehoon, joka esimerkin mukaisessa sovelluksessa voi olla 130 kW. Tämä puolestaan tarkoittaisi sitä, että edellä esitetyn teorian perusteella kyseisellä seulamurskaimella soveltuvaksi käsitelty materiaali on toisena esitetty materiaali, jossa murskattiin 600 mm lähtöjaekosta 300 mm loppujaekokoon materiaalia.

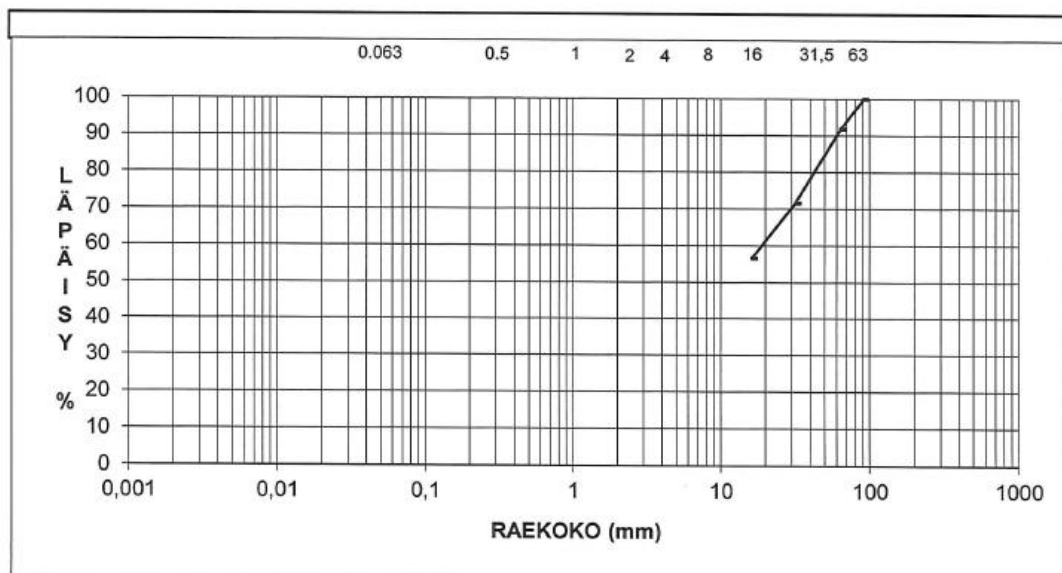
MITTAUSTAULUKKO

Rumpu 1	Tilavuus [m ³ /kauha]	Lastausaika [s]	Ajoaika alkaa [s]	Ajoaika loppuu [s]	Jälkimurskaus loppuu [s]	Kapasiteetti [m ³ /s]	Huom!
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							

KIVIAINESTUTKIMUKSET

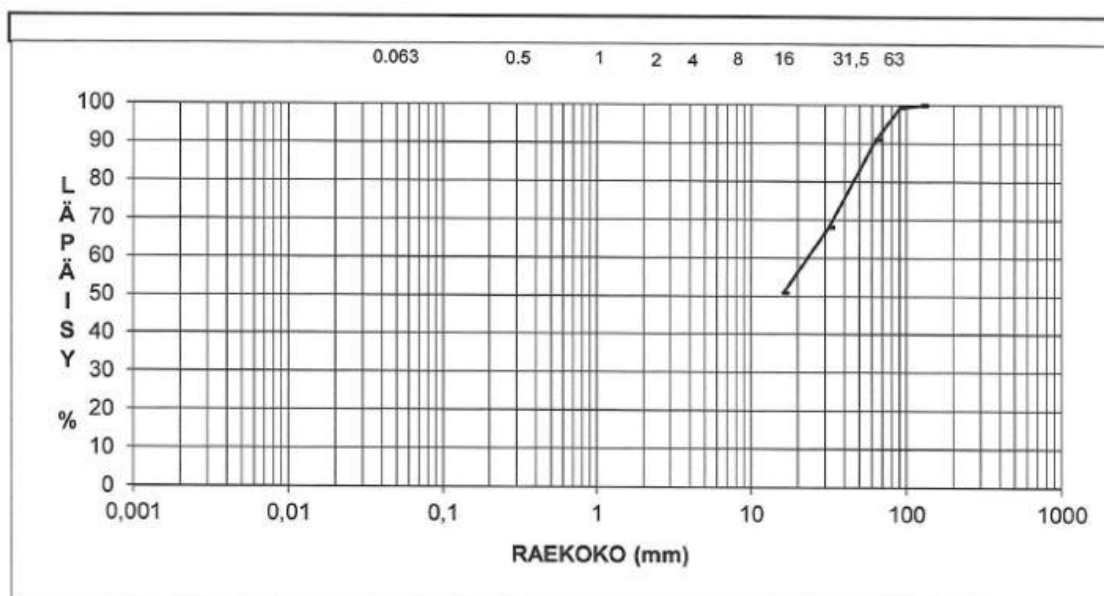
Rumpu 1. Rakennusmateriaalijätteen testitulokset; Jaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)	174620		
- PAINO KUIVANA (g)	174620		
- KOSTEUSPITOISUUS (%)	0,0		
- H-LUKU	0		
- Hienoainesmäärä (%)	0,0		
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
90	0,0	0,00	100
63	14420,0	8,26	92
31,5	35060,0	20,08	72
16	26340,0	15,08	57
8			
4			
2			
1			
0,5			
0,25			
0,125			
0,063			
POHJA	98800,0	56,58	
YHT.	174620,0		H=



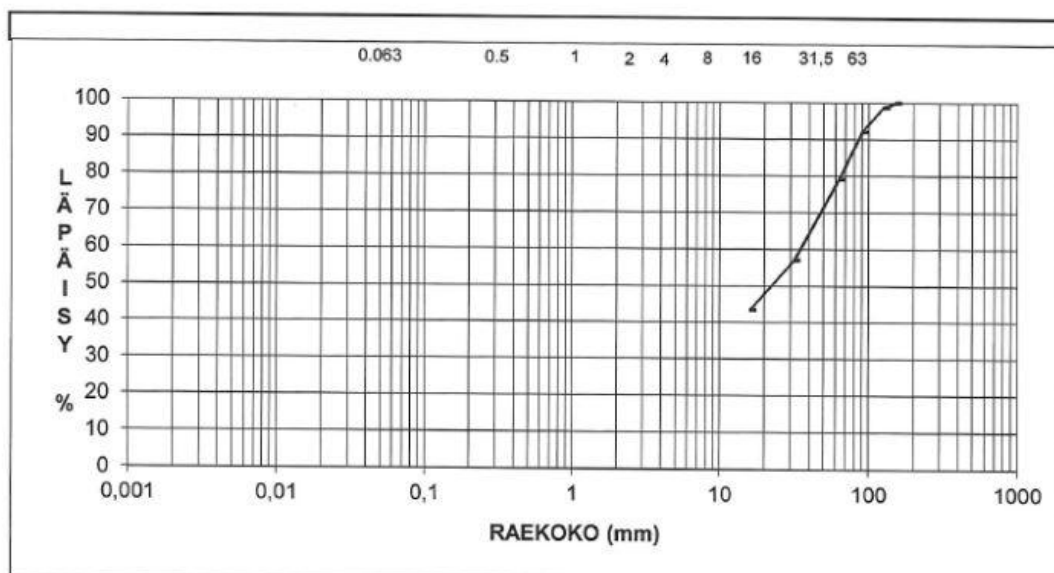
Rumpu 2. Rakennusmateriaalijätteen testitulokset; Jaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)	166669		
- PAINO KUIVANA (g)	148812		
- KOSTEUSPITOISUUS (%)	12,0		
- H-LUKU	0		
- Hienoainesmäärä (%)	0,0		
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
125	0,0	0,00	100
90	850,0	0,57	99
63	12450,0	8,37	91
31,5	34100,0	22,91	68
16	25750,0	17,30	51
POHJA	75661,8	50,84	
YHT.	148811,8	H=	



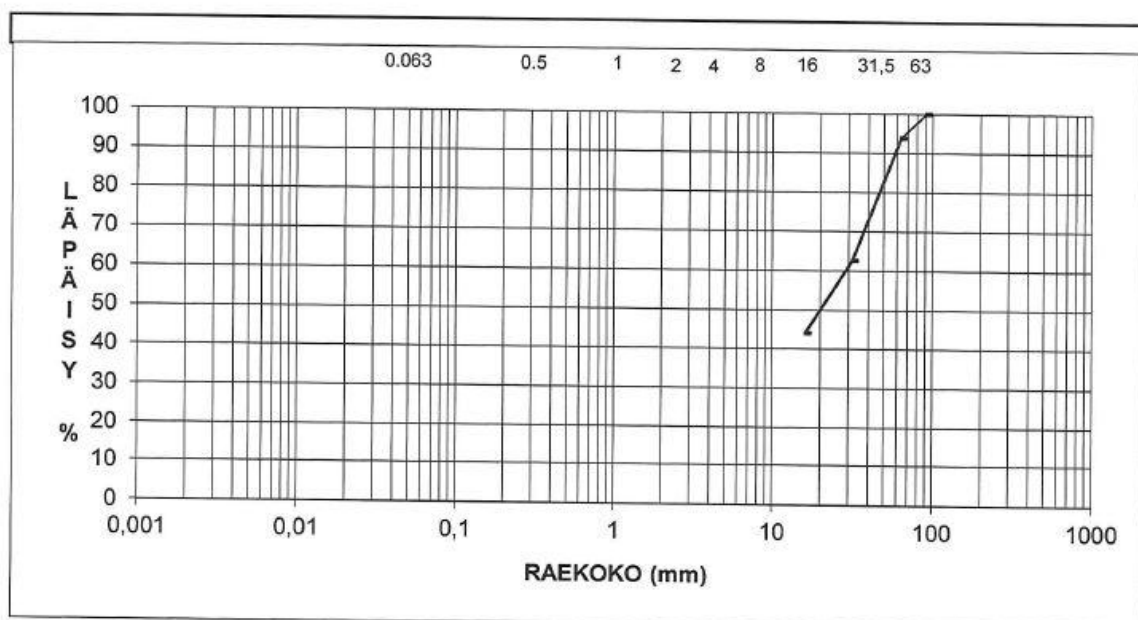
Rumpu 3. Rakennusmateriaalijätteen testitulokset; Jaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)			155050
- PAINO KUIVANA (g)			155050
- KOSTEUSPITOISUUS (%)			0,0
- H-LUKU			0
- Hienoainesmäärä (%)			0,0
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
150	0,0	0,00	100
125	1900,0	1,23	99
90	10250,0	6,61	92
63	20100,0	12,96	79
31,5	34400,0	22,19	57
16	20850,0	13,45	44
POHJA	67550,0	43,57	
YHT.	155050,0		H=



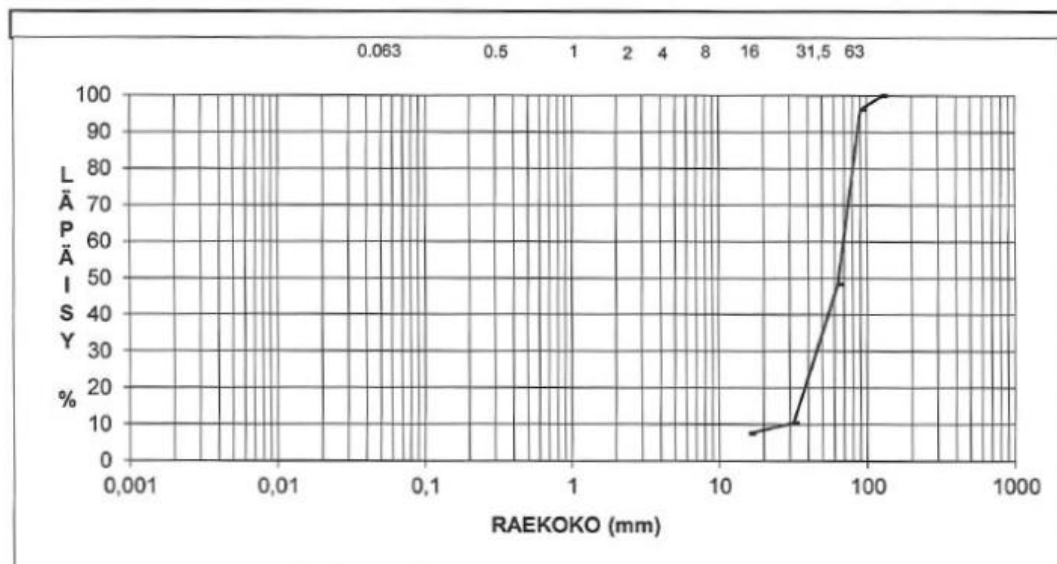
Rumpu 4. Rakennusmateriaalijätteen testitulokset; Jaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)	146320		
- PAINO KUIVANA (g)	146320		
- KOSTEUSPITOISUUS (%)	0,0		
- H-LUKU	0		
- Hienoainemäärä (%)	0,0		
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY %
	g	%	
90	0,0	0,00	100
63	9050,0	6,19	94
31,5	45480,0	31,08	63
16	27140,0	18,55	44
POHJA	64650,0	44,18	
YHT.	146320,0	H=	



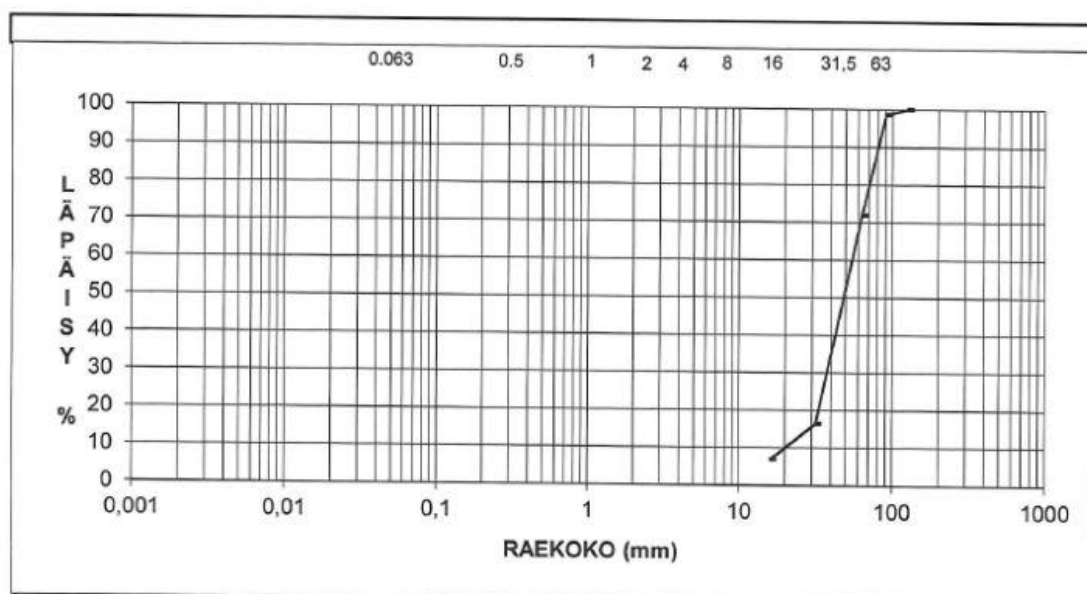
Rumpu 5. Rakennusmateriaalijätteen testitulokset; Maksimijaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)			136161
- PAINO KUIVANA (g)			136161
- KOSTEUSPITOISUUS (%)			0,0
- H-LUKU			0
- Hienoainemäärä (%)			0,0
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
125	0,0	0,00	100
90	5089,8	3,74	96
63	65147,5	47,85	48
31,5	51686,2	37,96	10
16	3856,5	2,83	8
POHJA	10380,8	7,62	
YHT.	136160,8		H=



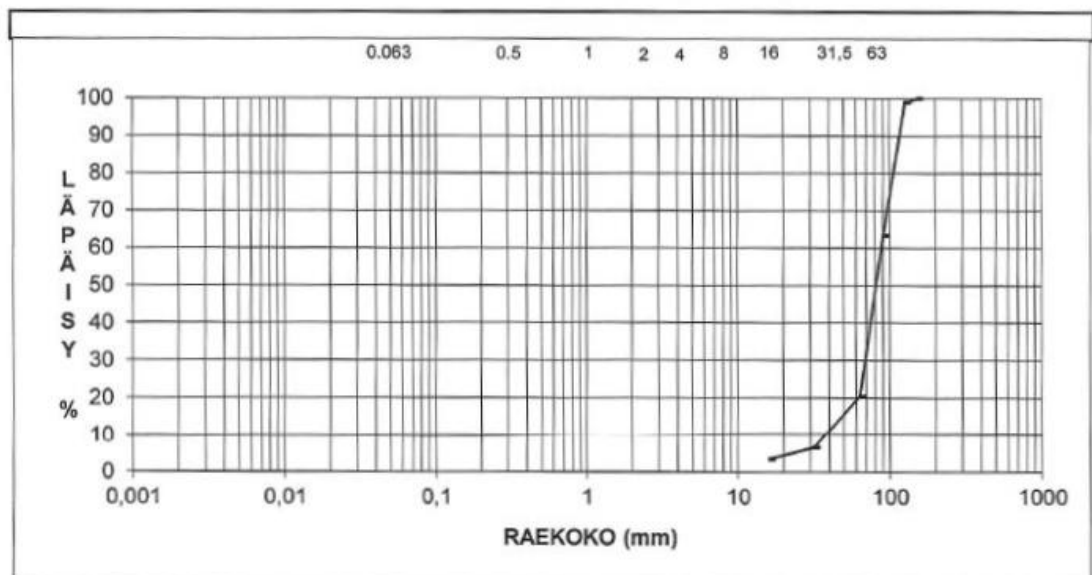
Rumpu 6. Rakennusmateriaalijätteen testitulokset; Maksimijaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)			109110
- PAINO KUIVANA (g)			109110
- KOSTEUSPITOISUUS (%)			0,0
- H-LUKU			0
- Hienoainesmäärä (%)			0,0
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
125	0,0	0,00	100
90	1450,0	1,33	99
63	29200,0	26,76	72
31,5	60400,0	55,36	17
16	10420,0	9,55	7
POHJA	7640,0	7,00	
YHT.	109110,0		H=



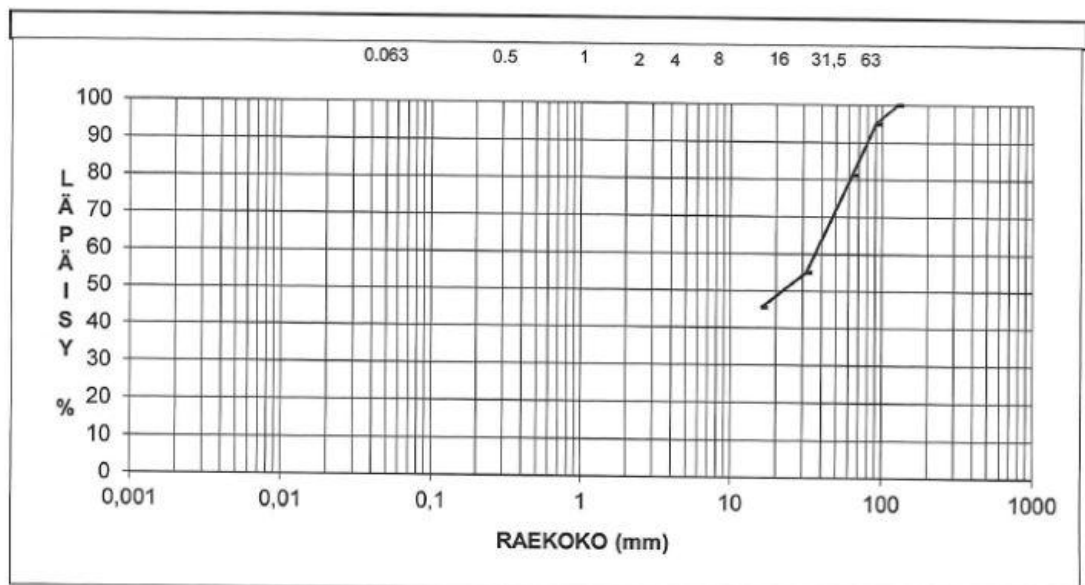
Rumpu 7. Rakennusmateriaalijätteen testitulokset; Maksimijaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)	151280		
- PAINO KUIVANA (g)	151280		
- KOSTEUSPITOISUUS (%)	0,0		
- H-LUKU	0		
- Hienoainesmäärä (%)	0,0		
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
150	0,0	0,00	100
125	1540,0	1,02	99
90	53850,0	35,60	63
63	64700,0	42,77	21
31,5	21020,0	13,89	7
16	4850,0	3,21	4
POHJA	5320,0	3,52	
YHT.	151280,0	H=	



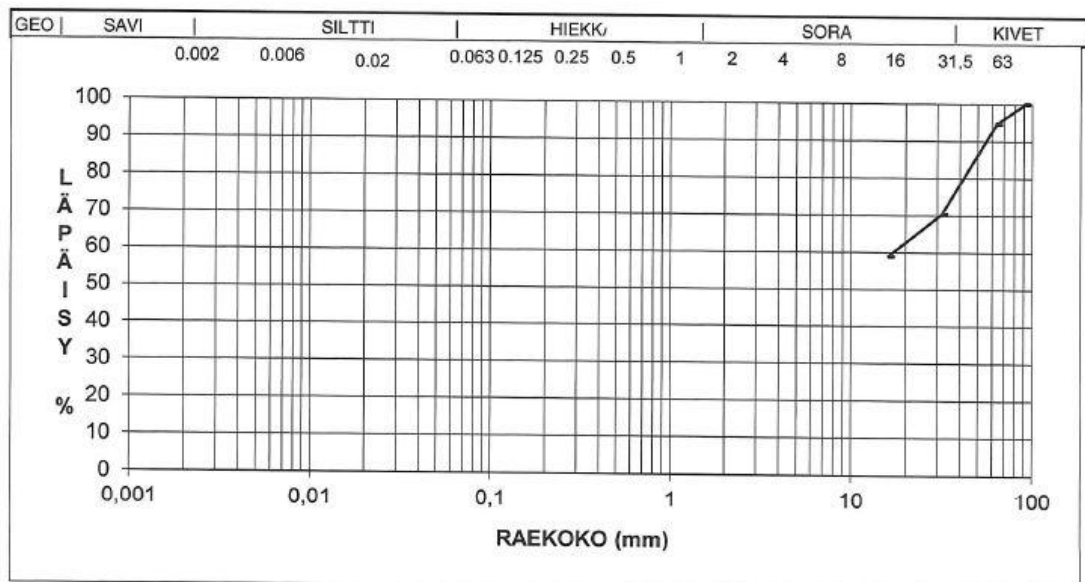
Rumpu 8. Lecaharkkojen murskaustestin tulokset; Jaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)	85518,4		
- PAINO KUIVANA (g)	75747		
- KOSTEUSPITOISUUS (%)	12,9		
- H-LUKU	0		
- Hienoainesmäärä (%)	0,0		
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
125	0,0	0,00	100
90	3713,4	4,90	95
63	10511,5	13,88	81
31,5	19829,1	26,18	55
16	7150,8	9,44	46
POHJA	34542,6	45,60	
YHT.	75747,4	H=	



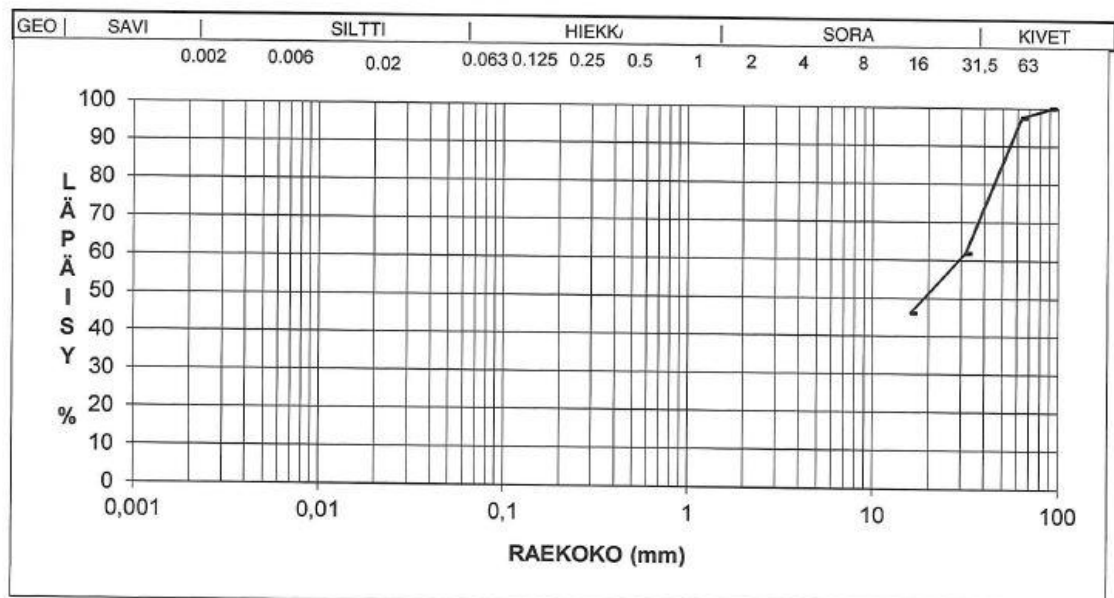
Rumpu 9. Lecaharkkojen murskaustestin tulokset; Jaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)			94706,5
- PAINO KUIVANA (g)			81363
- KOSTEUSPITOISUUS (%)			16,4
- H-LUKU			0
- Hienoainesmäärä (%)			0,0
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
90	0,0	0,00	100
63	4328,5	5,32	95
31,5	19797,4	24,33	70
16	9225,6	11,34	59
POHJA	48011,2	59,01	
YHT.	81362,7	H=	



Rumpu 10. Leca-harkkojen murskaustestin tulokset; Jaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)			81545
- PAINO KUIVANA (g)			74031
- KOSTEUSPITOISUUS (%)			10,2
- H-LUKU			0
- Hienoainemäärä (%)			0,0
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
90	0,0	0,00	100
63	1764,9	2,38	98
31,5	26428,2	35,70	62
16	11645,8	15,73	46
POHJA	34191,9	46,19	
YHT.	74030,8		H=



Rumpu 11. Leca-harkkojen murskaustestin tulokset; Jaekoko:

KARKEA-AINES			
- PAINO MÄRKÄNÄ (g)			90670
- PAINO KUIVANA (g)			82204
- KOSTEUSPITOISUUS (%)			10,3
- H-LUKU			0
- Hienoainesmäärä (%)			0,0
SEULONTA			
SEULA mm	SEULALLE JÄI		LÄPÄISY
	g	%	%
90	0,0	0,00	100
63	0,0	0,00	100
31,5	13461,2	16,38	84
16	19753,6	24,03	60
POHJA	48989,0	59,59	
YHT.	82203,8		H=

