



# **PAINUMISEN HUOMIOIMINEN HAKEKASAN TILAVUUDEN MÄÄRITYKSESSÄ**

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Metsätalousinsinööri (AMK)

Kevät 2024

Oskari Tuominen

Metsätalousinsinööri (AMK)

Tekijä Oskari Tuominen

Työn nimi Painumisen huomioiminen hakekasan tilavuuden määrittämisessä

Ohjaaja Miika Näsi

Tiivistelmä

Vuosi 2024

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää hakekasoissa tapahtuvaa painumista ja sen vaikutusta hakekasojen tilavuuden laskemiseen. Painumisella tarkoitetaan hakkeen tiivistymistä kasan eri osissa, kun kasan ylemmissä osissa oleva hake painaa painollaan alempana olevaa haketta tiiviimmäksi. Hakekasoista mitataan aluksi kehystilavuus, joka muutetaan kiintotilavuudeksi erillisellä muuntokertoimella. Muuntokerroin on vakio, joten se ei pysty ottamaan huomioon erikokoisissa kasoissa tapahtuvaa painumisen vaihtelua. Opinnäytetyössä selvitettiin hakekasassa vaikuttavia voimia ja niiden perusteella rakennettiin muuntokertoimen lisäksi kerroin, joka otti huomioon painumisen kasan korkeuden ja leveyden perusteella. Opinnäytetyön toimeksiantaja oli UPM-Kymmene.

Suomessa ei ole aikaisemmin tutkittu hakekasoissa tapahtuvan painumisen suuruutta. Opinnäytetyössä hyödynnettiin kanadalaisen biomassan käsittelyn konsultin Paul Janzèn kehittämää menetelmää painumisen määrittämiseen. Menetelmä perustuu Excel-laskuriin, jonka käyttöä paranneltiin opinnäytetyössä ja laskurissa olevat yksiköt muunnettiin tarkoituksenmukaisemmiksi. Tiedot hakkeen painumisesta hankittiin suorittamalla hydrauliprässin avulla testejä hakkeen painumisesta eri paineilla. Testien mittaustulosten avulla Excel-laskurilla saatiin laskettua kasan painumisprosentti. Laskurilla pystyi laskemaan vain yhden kasan painumisen, joten opinnäytetyössä tehtiin erillinen taulukko, josta näki painumisen eri kokoisille kasoille. Taulukoita tehtiin lopulta kaksi, joista toinen on tarkoitettu yli 40 metriä leveille kasoille ja toinen alle 40 metriä leveille kasoille. Alle 40 metriä leveille kasoille tarkoitettua taulukon tietoja testattiin kasaan, jonka tarkka tilavuus oli tiedossa. Tilavuuslaskenta suoritettiin kasalle sekä vanhalla muuntokertoimella, että uudella muuntokertoimen sekä painumakerroimen yhdistelmällä ja tuloksia verrattiin kasan tarkkaan tilavuuteen.

Uusi muuntokertoimen ja painumakerroimen yhdistelmä oli vanhaa muuntokerrointa tarkempi kasan tilavuuden määrittämisessä. Vanha muuntokerroin laski kasan tilavuuden 11 % kasan oikeaa tilavuutta pienemmäksi. Uusi muuntokertoimen ja painumakerroimen yhdistelmä laski kasan tilavuuden 6 % kasan oikeaa tilavuutta suuremmaksi.

Uutta painumakerrointa testattiin vasta yhteen kasaan. Tulokset olivat lupaavia, mutta kerrointa pitäisi testata useampaan kasaan ennen suurien johtopäätösten vetämistä kertoimen toimivuudesta. Tulevissa testeissä pitäisi antaa korkea prioriteetti suuremmille kasoille, koska niissä mahdollinen virhe kertoimessa aiheuttaa suurempia heittoja lopullisessa kiintotilavuudessa. Hakekasojen kiintotilavuuden mittaaminen kuutiolle on lähes mahdotonta, mutta painumakerroimen ja muuntokertoimen yhdistelmässä on potentiaalia tarkentaa mittausta tulevaisuudessa.

Avainsanat Hake, Painuminen, Muuntokerroin, Tuoreiheys

Sivut 40 sivua

---

The aim of this thesis was to determine the amount compaction in wood chip piles and the effect it has on the calculation of the pile volume. Compaction happens when the mass of the upper part of the chip pile compacts the wood chips below. This leads to changes in density in various parts of the chip pile. Calculation of the chip piles volume starts with measurement of frame volume. Frame volume is converted into solid volume with conversion factor. Conversion factor is always standard, thereby it does not take in to account the changes in density across the pile or the varied sizes of the measured piles. This thesis clarifies the compaction forces acting on wood chip pile and created a compaction factor that is combined with the conversion factor that is currently used. The combination of compaction factor and conversion factor take into account the varied sizes of the piles. Commissioner of this thesis is UPM-Kymmene.

No research about the effect compaction in determining the volume of a wood chip pile has been carried out in Finland. In this thesis, an Excel calculator developed by Canadian biomass handling consult Paul Janzè was used. The Excel calculator provided compaction percent for a chip pile once it was filled with measured data. Calculator was improved for this thesis to provide more accurate data and the units of the calculator were changed to more practical ones. Measured data for the calculator was provided by compaction tests done with hydraulic press. The Excel calculator was only able to provide compaction percent for standard sized chip pile. It was important to be able to measure compaction for various sized piles since pile sizes differ so much. In this thesis, two charts based on the calculator's compaction percent to provide compaction percent easily to different sized piles were built. Chart number 1 was intended for piles less than 40 meters wide. Chart number 2 was intended for piles wider than 40 meters. Number 1 chart's accuracy was tested to a pile, which exact volume was known. The new method's accuracy, which consisted of compaction factor provided by the chart and conversion factor, was compared to the accuracy of the old method consisting of the old conversion factor.

Combination of compaction factor and conversion factor is more accurate in estimating the volume of the known chip pile than just the conversion factor. The sole utilization of the conversion factor resulted in a volumetric estimation of the pile that is 11% below its actual volume. The implementation of the compaction factor in conjunction with the conversion factor yielded a volumetric assessment of the pile that exceed its actual volume by 6%.

The chart that provides the compaction factor was only tested on one pile. The results are promising, but more testing is needed to be sure of its accuracy. Future tests for the compaction factor should involve bigger piles. Measuring the exact solid volume of a wood chip pile is near impossible, but the combination of compaction factor and conversion factor has potential in providing more accurate measurements.

Keywords Compaction, wood chip, conversion factor, basic density

Pages 40 pages

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Teollisuus- ja kuitupuuhake .....	2
2.1	Hakkeen varastointi ja mittaus .....	3
2.2	Painuminen .....	7
3	Aineistot ja menetelmät .....	8
3.1	Painumatesti .....	9
3.2	Hakkeen laatu .....	10
3.3	Painumisen testaus .....	11
3.4	Kertoimen määrittäminen .....	14
3.5	Kertoimen testaaminen .....	18
4	Tulokset .....	19
4.1	Hakkeen laatu .....	20
4.2	Hakkeen painuminen .....	20
4.3	Kerroin .....	22
4.4	Kerrointen vertailu .....	26
5	Johtopäätökset ja pohdinta .....	28
5.1	Painumatesti .....	28
5.2	Painumakerroin ja taulukot .....	30
5.3	Tulokset .....	32
	Lähteet .....	34

## Kuvat, taulukot ja kaavat

Kuva 1. Hakekasa (Crompton, n.d.) .....	4
Kuva 2. 3D-mallinnus hakekasasta (Interpine, 2018) .....	6
Kuva 3. Punnituspalkit (VKT-Tuontanto, n.d.) .....	12
Kuva 4. Testi järjestely .....	13
Kuva 5. Mittauslomake .....	14
Kuva 6. Janzèn Excel-laskuri paunoissa (Paul Janzè, 2014) .....	15
Kuva 7. Janzèn Excel-laskuri prosentteina (Paul Janzè, 2014) .....	16
Kuva 8. Hakekasassa esiintyvä paine .....	17
Kuva 9. Siilossa esiintyvä paine .....	18

Kuva 10. Hakkeen laatu tynnyreissä .....	20
Kuva 11. Mittaustulokset .....	21
Kuva 12. Mittaustulosten skaalaus kuutiokohtaisiksi .....	21
Kuva 13. Viivadiagrammi painumisesta .....	22
Kuva 14. Kasan painuminen prosentteina .....	23
Kuva 15. Hakkeen painuminen siilossa .....	23
Kuva 16. Kasan painuminen eri korkeuksilla ja leveyksillä .....	24
Kuva 17. Kasan painumataulukko .....	25
Kuva 18. Painumataulukko isommille kasoille .....	25
Kuva 19. Siilon painumataulukko .....	26
Kuva 20. Kasaan ajettut kuormat .....	26
Kuva 21. Mitattu hakekasa .....	27
Kuva 22. Laskukaavojen tulokset .....	28

# 1 Johdanto

Kemiallisen metsäteollisuuden keskeinen raaka-aine on hake. Tehtailla varastoidaan suuria määriä haketta ennen niiden käyttöä tuotantoprosessissa. Haketta varastoidaan ulkona kasoissa sekä varastointiin tarkoitetuissa siiloissa. Varastoissa olevan hakkeen määrää mitataan ja seurataan, koska saatavilla olevalla hakkeella on vaikutusta muuan muassa tehtaiden tuotannon suunnitteluun sekä tarvittaviin hakkeen toimitusmääriin. (Fuller, 2004) Hakekasojen mittaus tapahtuu nykyään pääsääntöisesti hyödyntämällä miehittämätöntä ilma-alusta eli dronea tai laserkeilainta, joilla saadaan mitattua varastokasojen kehystilavuus. Kehystilavuus muutetaan kiintotilavuudeksi muuntokertoimella. Kasoissa tapahtuvalla painumisella on vaikutusta muuntokertoimen toimivuuteen. (Marjomaa & Pietarinen, 1996)

Työn toimeksiantaja on UPM-Kymmene. Painumisen vaikutus hakekasojen kiintotilavuuden mittaamisessa on ollut toimeksiantajalla pidemmän aikaa pohdinnassa. Opinnäytetyössä käydään läpi hakekasojen mittauksen yleisiä menetelmiä eri lähteiden avulla sekä hyödynnetään ulkopuolisen tekijän kehittämää menetelmää painumisen määrittelyyn Excel-laskurin avulla. Hakekasojen painumisen määrittämisessä hyödynnetään tutkimuksia, joissa on tutkittu eri partikkeleista koostuvissa kasoissa tapahtuvaa voimien jakautumista. Voimien jakautuminen vaikuttaa painumisen määrään eri puolilla kasaa.

Opinnäytetyön keskeisenä käsitteenä on muuntokerroin, joka tarkoittaa irtotilavuuden ja kiintotilavuuden välistä muuntolukua. Muuntokertoimen ei uskota ottavan kunnolla huomioon hakekasoissa tapahtuvaa painumista. Muuntokerroin on aina vakio eikä se ota huomioon kasan kokoa tai muotoa. (Marjomaa & Pietarinen, 1996) Hakekasoissa painumista tapahtuu luontaisesti, kun hakkeen paino ja painovoima tiivistävät hakepaloja toisiinsa. Painumiseen vaikuttaa mahdollisesti myös hakkeen laatu, kuten palakokojakauma ja kuiva-ainepitoisuus. Kasojen muodot vaihtelevat ja eri korkuisissa ja levyisissä kasoissa painumista tapahtuu eri tavalla ja eri määrä. Painuminen johtaa kiintotilavuuslaskennassa virheeseen, koska saman verran haketta on pakkautunut pienemmälle alueelle. Painumisen mittaamisesta tekee hankalaa juuri sen vaihtelu kasan eri osissa sekä eri korkuisissa ja levyisissä kasoissa. (Paul Janzè, 2014) Parempi ymmärrys painumisesta parantaisi hakekasojen mittauksen tarkkuutta ja tarkentaisi näin tietoa varastojen hakemääristä.

Suomessa painumisen vaikutusta hakekasojen tilavuuden määrittelyyn ei ole tutkittu. Tutkimusta on kuitenkin tehty hakkeen tiivistymisestä autokuljetusten aikana. Opinnäytetyöni tavoitteena on selvittää painumisen määrää eri kokoisissa hakekasoissa ja samalla luoda

pohjatutkimusta hakekasojen painumiselle. Opinnäytetyössäni hakkeen painumista testattiin hydrauliprässin avulla. Hakkeen painuminen prässillä suoritetuissa kokeissa skaalattiin muotoon, jossa sitä pystyi hyödyntämään kokonaiselle kasalle. Kertoimen tarkkuutta testattiin hakekasaan, jonka tarkka tilavuus oli tiedossa. Painumisesta pyrittiin luomaan toimiva kerroin, joka toimii yhdessä jo käytössä olevan muuntokertoimen kanssa. Testien avulla luotu kerroin painumisesta on riippuvainen kasojen korkeudesta ja leveydestä, joten uusi muuntokerroin vaihtelee kasojen kokojen mukaan. Painumakertoimen tarkoitus on tarkentaa käytössä olevaa menetelmää kiintotilavuuden laskennalle ja näin parantaa tehtaiden varastokirjanpitoa.

## 2 Teollisuus- ja kuitupuuhake

Teollisuushake on mekaanisessa metsäteollisuudessa syntyvä sivutuote, joka ohjautuu ominaisuuksien ja laadun perusteella massateollisuuden käyttöön selluhakkeeksi tai vaihtoehtoisesti polttohakkeeksi energiantuotantoon. Selluhakkeella on laatuvaatimuksia, joista tärkeimpiä ovat palakokojakauma, riittävä kosteus, suuri kuiva-ainepitoisuus sekä alhainen kuoripitoisuus. Sahoilta saatava teollisuushake on haluttua haketta sellu- ja paperiteollisuudessa, koska sahat tuottavat haketta kuusi- ja mäntytukkien pintakerroksista. Kuitujen pituus kasvaa havupuiden ytimestä pintaan päin. Sahoilla on jalostettaville tukeille tarkat laatuvaatimukset ja kyseiset laatuvaatimukset mahdollistavat samalla paremman laadun myös sivutuotteena syntyvälle hakkeelle. (Uusitalo & Kivinen, 2023, ss. 25–26) Haketta syntyy sahausprosessin aikana tukkien pyörösievennyksessä, sahauksessa ja särmäyksessä. Haketta valmistetaan vielä kuivauksen jälkeen vioittuneista kappaleista ja tasauspätkistä. (Sipi, 2006, s. 191) Hakkeen osuus sahausprosessista syntyvästä tuotteesta on 28–32 %, sahatavaran osuus prosessista on 45–50 %. Hakkeen ja muiden sivutuotteiden osuus sahojen myyntituotoista on noin 15 %. (Varis, 2017, s. 46)

Kuitupuuhakkeella tarkoitetaan tehtaalle saapuvasta kuitupuusta haketettua haketta. Ennen haketusta kuitupuut kuoritaan tarkasti aiheuttamatta puuhävikkiä. Kuorinnan jälkeen puu haketetaan mahdollisimman tasalaatuisiksi ja tuotannon tarpeiden kannalta oikean kokoisiksi paloiksi. Haketuksen jälkeen kuitupuuhake siirretään varastoon. (Rieppo & Korpilahti, 2001, s. 10) Kuitupuiden laatuvaatimukset perustuvat mahdollisimman laadukkaan hakkeen tuottamiseen ja laatuvaatimuksissa kuitupuulle on pieniä vaihteluja eri toimintaperiaatteilla toimivien tehtaiden välillä. Mekaanisesti kuiduttavan tehtaan laatuvaatimukset kuitupuulle ovat tarkemmat, sillä suuri osa puuaineen vioista siirtyy sellaisenaan valmistettavaan massaan. Mekaanisesti kuiduttaville tehtaille kelpaa ainoastaan täysin terve ja tuore puu. Puutavaran suoruudella on kuorinnan kannalta väliä, sillä mutkainen puu ei kuoriudu toivotulla tarkkuudella. Puun tuoreus on tärkeää, sillä kuivasta

puusta valmistettavasta massasta tulee laadultaan epätasaista ja lujuudeltaan heikkoa. (Uusitalo & Kivinen, 2023, s.25)

Kemiallisesti kuiduttavalla tehtaalla laatuvaatimukset kuitupuulle ovat hieman mekaanisesti kuiduttavia tehtaita löyhemmät. Puun ei tarvitse olla täysin terve, sillä lahoa sallitaan pienissä määrin. Laho kuitenkin lisää tuotantovaiheessa kemikaalien käyttöä ja sillä on alentava vaikutus saantoon. Molemmille jalostustavoille yhteistä on epäpuhtauksien, kuten muovin tiukka kieltä, joka johtaa tuotantovaiheessa taloudellisiin tappioihin. (Uusitalo & Kivinen, 2023, ss. 25–26)

Teollisuus- ja kuitupuuhakkeen lisäksi on vielä metsähake. Metsähaketta käytetään lähinnä lämpö- ja voimalaitoksissa. Metsähake koostuu lähinnä teolliseen puunjalostukseen kelpaamattomasti rungon osista, kuten pienläpimittaisista rangoista, joita korjataan esimerkiksi nuorten metsien hoitotöiden yhteydessä. (Maa- ja metsätalousministeriö, n.d.) Teollisuus- ja kuitupuuhakkeeseen verrattuna metsähakkeen laatuvaatimukset esimerkiksi palakokojakauman ja kosteuden suhteen ovat alhaiset (Uusitalo & Kivinen, 2023, s. 26). Käyttökohteiden ja laadullisten erojen vuoksi metsähakkeen painumista ei käsitelty tässä opinnäytetyössä.

## **2.1 Hakkeen varastointi ja mittaus**

Massa- sekä paperitehtailla hake varastoidaan yleisesti ottaen joko siloihin tai ulkovarastoihin. Hakkeen ulkovarastoinnin käyttöön vaikuttaa pääasiassa sen taloudellisuus sekä ulkovarastoinnin mahdollistama hakkeen käsittelyn helppous. (Uusvaara & Heiskanen, 1975, s. 10) Mänty- ja kuusihake varastoidaan yleensä yhdessä havuhakkeena ja koivu sekä mahdollisesti haapa lehtipuuhakkeena (Rieppo & Korpilahti, 2001, s. 19). Kuvassa 1. näkyy hakekasa, jota täytetään ylhäältä päin kuljettimien avulla.

Kuva 1. Hakekasa (Crompton, n.d.)



Hakevarastojen suuruudessa voi olla suuria tehdaskohtaisia eroja. Haketta varastoidaan tehtailla, koska toimituksia ei ole mahdollista ajoittaa täydellisesti tuotannon tarpeiden kanssa. Toimituksissa voi olla olosuhteitten mukaan suuriakin heittelyjä. Markkinatilanteet vaikuttavat sahojen tuotantomääriin, joka heijastuu sivutuotteena myytävän hakkeen toimitusmääriin. Yksittäiset konerikot vaikuttavat hakkeen toimituksiin sekä tuotantoon. Haketusmääriin tehtaalla vaikuttaa pyöreän puun toimitusmäärät, jotka voivat esimerkiksi kausivaihtelujen takia vaihdella paljonkin. (Fuller, 2004) Suomessa tehdyssä konsortiohankkeessa kyseltiin tehtaiden puunkäsittelyyn liittyviä tietoja. Hankkeeseen osallistuneiden tehtaiden varastojen suuruudet vaihtelivat välillä 10 000 m<sup>3</sup> – 200 000 m<sup>3</sup>. Hakekasat olivat suurimmillaan keväällä ja pienimmillään syksyllä. Hakkeen yleisin varastoinnin kiertoaika oli 1–2 viikkoa, mutta pisimmillään 3 kuukautta ja lyhyimmillään 3 päivää. (Rieppo & Korpilahti, 2001, s. 19–20)

Haketta varastoidessa on monta seikkaa, joilla on vaikutusta varastoitavan hakkeen laatuun. Raskaita työkoneita käytetään usein hakekasojen ylläpidossa. Koneet saattavat painollaan ja liikkeillään vaurioittaa hakkeen kuituja. Hake voi vaurioitua kuljettimissa matkalla varastokasaan tai kuljettimilla matkalla tuotantoon. Pitkät varastointiajat voivat vaikuttaa negatiivisesti hakkeen laatuun. Hakekasoissa tapahtuu varastoinnin aikana lämpenemistä, joka voi sytyttää kokonaisen kasan itsestään. Hakekasaan kohdistuu myös ympäristöstä saasteita, kuten lentotuhkaa, likaa ja puulajien sekoittumista. (Gray & Ingram, 1984)

Ympäristösaasteena voidaan pitää myös muovia. Muovi ei liukene kemiallisen massanvalmistuksen prosessissa, vaan tukkii mahdollisesti prosessissa käytössä olevia koneita, kuten seuloja (Hartler, 1996).

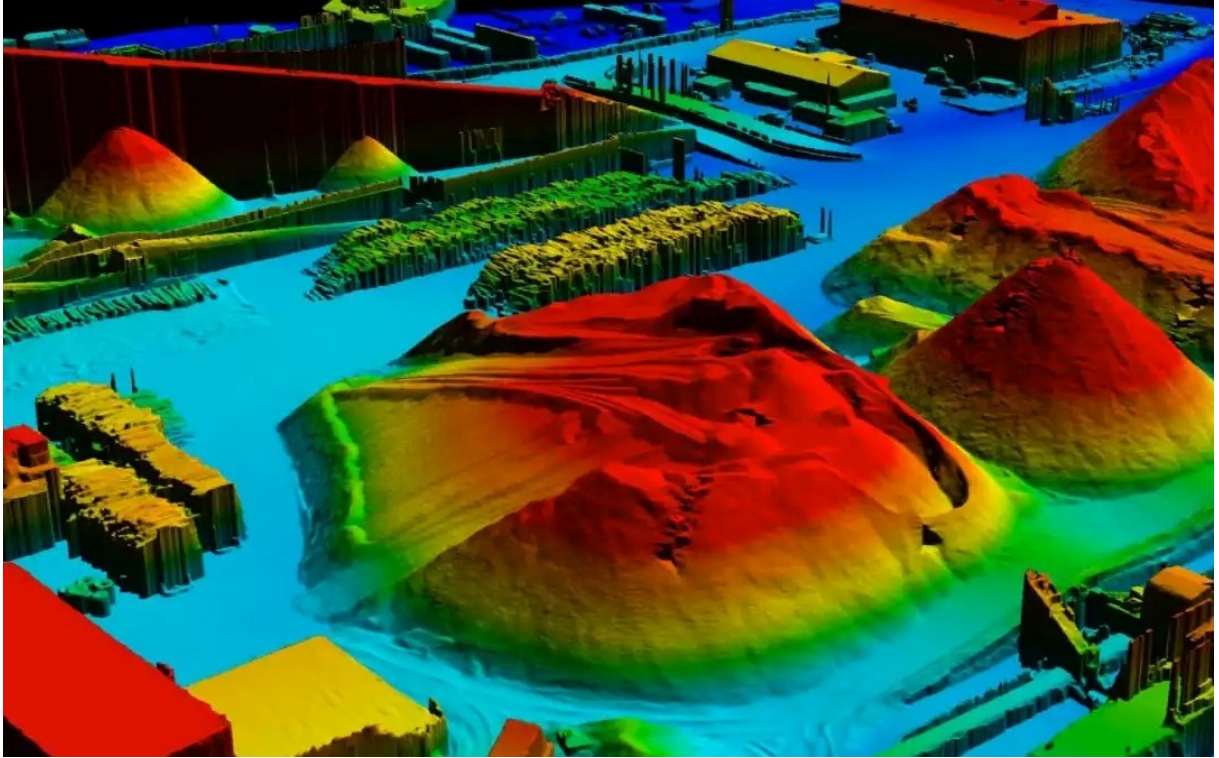
Hakkeen tasaisen laadun varmistamiseksi kasat kierrätetään kokonaan tasaisin väliajoin. Tämä mahdollistaa sen, että kasoihin ei jää suuria määriä vanhempaa haketta, jonka laatu on jo heikentynyt pitkän varastointiajan seurauksena. Hakkeen tasaista käyttöä kasasta helpottaa kasan alla olevat ruuvikuljettimet, joilla kasaa puretaan tehtaan tuotantoon. Ruuvikuljettimien avulla on aikaisempaa helpompi seurata metodia, jossa ensimmäisenä kasaan varastoitu hake myös siirtyy tehtaan tuotantoon ensimmäisenä. (Fuller, 1985)

Massa- ja paperitehtailla inventoidaan hakekasat noin 1–3 kuukauden välein. Tieto hakkeen määrästä varastossa on oleellinen, sillä määrää tarvitaan varastokirjanpitoon, tilinpäätöstä varten sekä tehtaan tuotantoprosessin suunnitteluun ja ohjaukseen. Hakekasojen mittaus tapahtuu yleisesti irtotilavuusmittauksena. Hakekasan irtotilavuus saadaan selville mittaamalla kasan kehystilavuus. Kasan irtotilavuus muunnetaan kiintotilavuudeksi erillisellä muuntokertoimella. (Marjomaa & Pietarinen, 1996)

UPM:n puutavaran mittaus ja terminaalipäällikkö Lauri Talikka on yrityksen sisäisissä tiedostoissa käsitellyt miehittämättömien ilma-alusten eli dronien hyödyntämistä hakekasojen kehystilavuuden mittauksessa. Drone lennätetään ennalta määritettyä reittiä inventoitavan alueen yli. Dronen kamera ottaa useita korkean resoluution kuvia, joista saadaan muodostettua 3D-mallinnus hakekasasta. Kasojen mittaaminen droneilla on aikaisempaa nopeampaa ja turvallisempaa sekä verrattain halpaa. Dronekuvaus ei kuitenkaan tunnista vielä puulajeja ja vaikeat sääolosuhteet voivat estää lentämisen. Inventointitulosten saaminen vaatii aikaisempia menetelmiä suurempaa analysointia. (henkilökohtainen tiedonanto, 12.12.2023) Dronekuvauksen ja kuvien prosessointiohjelmien käytöstä hakekasojen mittaamiseen on tehty tutkimusta Yhdysvalloissa vuonna 2018. Dronekuvauksen sekä kuvien prosessointiohjelmien tarkkuutta verrattiin toiseen mittaustapaan. Toinen mittaustapa suoritettiin GPS- ja tilavuuslaskentavälineillä, joiden käyttäminen vaati hakekasan luona työskentelyä. Dronekuvaus osoittautui toiseen mittaustapaan verrattuna huomattavasti nopeammaksi sekä turvallisemmaksi. Mittaustulokset olivat mittaustapojen välillä vertailukelpoisia keskenään. Dronekuvauksen tulosten huomattiin tarkentuvan, kun kuvauksessa käytettiin eri korkeuksia ja kuvakulmia. Vaihtelevien korkeuksien ja kuvakulmien käyttö auttoi esimerkiksi hakekasojen päällä kulkevien kuljettimien pois rajauksessa, kun 3D mallinnusta muodostettiin. Tutkimuksessa ei kuitenkaan vertailtu mittaustapojen tarkkuutta sellaiseen kasaan, jonka tarkka tilavuus olisi

ollut etukäteen tiedossa. (Howell ym., 2018) Kuvassa 2. näkyy 3D-mallinnus hakekasasta, joka on muodostettu dronekuvauksen avulla.

Kuva 2. 3D-mallinnus hakekasasta (Interpine, 2018)



Hakekasan mittauksessa on monta tekijää, jotka vaikuttavat mittaustarkkuuteen. Hakekasan tarkan kiintotilavuuden selvittäminen on todella vaikeaa tai lähes mahdotonta. Tutkimuksissa ja tehtaiden omista toiminnoista on kerätty dataa virhemarginaaleista. Kuljettimien mittaamisissa painoissa on noin 0,5–1 % virhemarginaali, olettaen kuljettimien olevan laadukkaita ja hyvin ylläpidettyjä. Haketta tuovien autojen punnitsemiseen käytettävien vaakojen virhemarginaali on 1–2 %. Vaakojen mittaustarkkuutta seurataan ja kalibrointeja suoritetaan tietyin väliajoin ja aina tarvittaessa. Hakekasan kuvauksen eli kehystilavuuden selvityksen virhemarginaali on noin 1–3 %. Virhemarginaaliin vaikuttaa kuvaustapa. Hakkeen tiivistymisellä eli painumisella voi olla peräti 25 % virhemarginaali, kun kasojen kiintotilavuutta pyritään selvittämään. Kuiva-aineen määrittämisessä eli tuoremassan muunnossa kuivamassaksi virhemarginaali on 2–7 %. Varastoinnin aikana syntyvät tappiot, joilla tarkoitetaan mekaanisia ja biomekaanisia tappiota, voivat olla peräti 25–50 %. (Fuller, 2004) Mekaanisia ja biomekaanisia tappiota syntyy, kun haketuksen jälkeen elävät solut yrittävät parantaa puuta, joka johtaa hapen kulutukseen sekä lämmön vapautumiseen. Lämpötilan nousu vahingoittaa selluloosaa, joka johtaa hakkeen saannon heikkenemiseen. Lämpötilojen laskiessa puuta lahottavat sienet alkavat esiintyä hakekasoissa. (Fuller, 1985)

Kehystilavuuden muuntamisessa kiintotilavuudeksi on käytössä muuntokerroin. Muuntokertoimen tarkkuuteen vaikuttaa hakkeen palakoon vaihtelu, tiiviiden vaihtelu eli painuminen varastokasan eri osissa, puulaji sekä vuodenaikojen vaihtelu. Saha- ja selluhakkeessa on yleisesti käytetty muuntokertoimena 0,42 m<sup>3</sup>/i-m<sup>3</sup>. Muuntokertoimen alkuperästä ei ole tarkkaa tietoa, mutta todennäköisesti se on lähtöisin sahauksen yhteydessä määritetystä hakkeen ja purun osuudesta sahatusta pyöreästä puusta. Muuntokertoimessa on kuitenkin vaihtelua eri toimijoiden välillä. Suomessa tehdyssä konsortiohankkeessa huomattiin käytössä olevan muuntokertoimen vaihtelevan välillä 0,42–0,60 m<sup>3</sup>/i-m<sup>3</sup>. Varastomuodostelmassa olevan hakkeen tarkkaa muuntokerrointa on hankalaa määrittää, koska kasojen eri osissa tapahtuu painumista. Kirjallisuudesta ei löydy merkkejä, että varastomuodostelmassa tapahtuvaa tiiviiden vaihtelua olisi Suomessa tutkittu. (Marjomaa & Pietarinen, 1996) Lindblad ja Verkasalo mainitsevat teollisuushakkeen kuivatuoretiheyttä käsittelevässä tutkimuksessaan mäntyhakkeen muuntokertoimeksi 0,44 m<sup>3</sup>/i-m<sup>3</sup> (Verkasalo & Lindblad, 1999). Opinnäytetyön toimeksiantajalla on järjestelmässään käytössä mäntyhakkeelle muuntokerroin 0,44 (UPM, henkilökohtainen tiedoksianto, n.d.). Yhdysvalloissa on vuonna 1999 toteutettu kyselytutkimus puuta käyttävien tehtaiden hakekasojen käsittelystä, jossa selvitettiin muuntokerrointen käyttöä ja niiden määrittäytapaa. Kyseisillä tehtailla muuntokertoimella tarkoitettiin lukua, jolla kasan irtotilavuus muutettiin massaksi. Kyselytutkimus lähetettiin yhteensä 152 tehtaalle ja lopulta 80 erillistä tehdasta vastasi. Vastanneiden tehtaiden vuosittaisissa puun käyttömäärissä oli suuria eroja. Tutkimuksessa kysyttiin, miten tehtaalla käytössä oleva muuntokerroin oli määritelty. Vastanneista 80 % käytti muuntokerrointa varastokirjanpidossa. Puolet muuntokerrointa käyttävistä tehtaista raportoivat käyttävänsä historiallista arvoa kertoimena. Loput muuntokerrointa käyttävistä tehtaista olivat määritelleet kertoimensa kokemuksen ja omien testien perusteella. Omat testit pitivät sisällään varastomäärien oikaisuja hakkeen käyttötietojen perusteella sekä kuiva-aineen ja tiheyden mittausta näytteistä. (McDonald & Twaddle, 2000)

## 2.2 Painuminen

Hake on kokoonpuristuvaa, joka johtaa varastoinnissa tapahtuvaan kasojen painumiseen. Hakekassassa alhaalla oleva hake on puristuksessa, kun ylempänä olevan hakkeen massa painaa kasan alemmissa osissa olevaa haketta tiiviimmäksi. Hakkeen painuminen tapahtuu suurimmilta osin siinä vaiheessa, kun kasaa kootaan. Päälle kasattu hake painaa välittömästi alempana olevaa haketta. Hakekasojen painumista lisää, jos kasojen päällä ajetaan kulkuneuvoilla, kuten pyöräkuormaajalla. Painumiseen vaikuttaa myös hakkeen puulaji, palakokojakauma, kuiva-aine, kasan muoto, kasan olemassaolo aika sekä kasaamistapa. (Paul Janzè, 2014) Palakokojakauma kasan eri osissa voi vaihdella. Rakeisista partikkeleista

koostuvissa kasoissa, kuten hakekasoissa, pienimmät partikkelit jakautuvat kasojen keskelle ja tiivistyvät suurempien partikkelin väliin. Suuremmat partikkelit jakautuvat kasojen pohjalle sekä vapaalle pinnalle. (Yu, 2018)

Benjamin Ong on maisteritutkielmassaan "Using Remote Sensing for Quantity Analysis of Chip Pile Inventory in Mill Yards" tutkinut painumisen vaikutusta hakekasojen tilavuuden määrittämisessä. Tutkimuksessaan hän hyödyntää dronekuvausta kasojen mittauksessa. Droneilla hankitut kuvat muunnetaan 3D-malleiksi. Mallinnus muuttaa tilavuuden tarkaksi massa-arvioksi ottamalla samalla huomioon kasassa tapahtuvan painumisen. Benjamin Ong suorittaa tutkimuksessa tynnyrissä olevan hakkeen puristamista myös painoilla. Hän tutkii hakkeen painumista paineen alaisena, mutta myös hakkeen käyttäytymistä, kun paineen määrä laskee. Tutkimuksessa hän vertaa kertoimensa tuottamia tuloksia useampaan kasaan, joiden tarkat tilavuudet ovat tiedossa. Vertailu kasoihin, joiden tarkka tilavuus on tiedossa antaa hänelle myös mahdollisuuden kalibroida kertoimensa tarkkuutta. Tutkimuksen tulos oli, että hakekasoissa tapahtuvan painumisen vaikutus tilavuuteen on maksimissaan 9,46 % ja maksimi painuminen tapahtuu 1977 kg/m<sup>2</sup> paineessa. Tutkimuksen tuottama kerroin osoittautuu myös aikaisemmin käytössä ollutta laskentatapaa tarkemmaksi. (Ong, 2016)

Suomessa suoritettuja tutkimuksia hakekasojen painumisesta ei löydy, mutta metsähakkeen painumista autokuljetuksen yhteydessä on tutkittu. Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia tiiviyteen vaikuttavia tekijöitä sekä tarkentaa käytössä olevia kertoimia, joilla irtotilavuus muunnetaan kiintotilavuudeksi. Tutkimusta varten oli otettu näytteitä 879 metsähakekuormasta. Merkittävimmät seikat painumiseen olivat hakkuri sekä hakelaji eli puulaji. Nämä kaksi tekijää vastasi 49,1 % tiiviyden vaihtelusta ajoneuvon kuormassa, mutta myös hakkeen kosteudella oli merkitystä tiivistymiseen. Kosteuden vaikutus selittyy kuivan ja tuoreen hakkeen erilaisella tiiviydellä. Muuntokertoimeksi selvisi tutkimuksessa 0,36–0,56. Kerroin määritettiin vielä tarkemmin eri hakkurityypeille sekä hakelajeille vuodenajat huomioiden. (Verkasalo & Uusvaara, 1987)

### **3 Aineistot ja menetelmät**

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmäksi valikoitui kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus. Määrällisessä tutkimuksessa on mitattavia ominaisuuksia, joita kutsutaan muuttujiksi. Muuttujien valinnalla on tärkeä vaikutus tutkimuksen onnistumiseen ja muuttujien valinnassa kannattaakin miettiä tarkkaan niiden määrää, ettei tuloksien muodostamisesta tule hankalaa. Määrällisessä tutkimuksessa on riippuvia muuttujia sekä riippumattomia muuttujia. Riippuvat muuttujat ovat muuttujia, jonka vaihtelusta tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita. Riippuvana

muuttujana tässä opinnäytetyössä toimi hakekasoissa tapahtuva painuminen. Riippumaton muuttuja on muuttuja, joka vaikuttaa tutkimukseen ja jonka määrää säädellään.

Riippumattomia muuttujia tässä opinnäytetyössä olivat hakkeeseen kohdistuva paine sekä hakkeen laatu. Molemmilla riippumattomilla muuttujilla oli vaikutusta painumiseen.

Opinnäytetyö tuotti mitattua numeraalista tietoa, joka vastaa määrällisen tutkimuksen periaatteita. (Opinkirjo, n.d.)

Aineistonkeruumenetelmänä tässä opinnäytetyössä oli systemaattinen havainnointi.

Systemaattinen havainnointi on yleensä strukturoitua eli tutkimuksessa esiin tulevat havainnot kirjataan ennalta määritellylle lomakkeelle. Systemaattisella havainnoinnilla voidaan kerätä ja mitata havaintoja eri aistein tai havainnointilaitteilla. (Vilkka, 2007, s. 29)

Testeihin oli tehty ennalta mittausslomake, johon oli kirjattu paineet, jossa mittausta suoritettaisiin. Paineiden määrittäminen ennakkoon oli tärkeää, jotta mittaustulosaineisto olisi riittävän laaja. Mittaus suoritettiin mittanauhalla kahdesta eri kohdasta, jotka pysyivät samana testien ajan.

Aineiston analyysi aloitettiin syöttämällä mittaustulokset Exceliin. Määrällisessä tutkimuksessa kerätty aineisto muutetaan muotoon, jossa sitä voidaan käsitellä tilastollisesti.

Paineiden mittaustuloksista hankitaan aritmeettinen keskiarvo, jolla saadaan kuvattua mittaustulosten keskimääräistä suuruutta. Aritmeettinen keskiarvo sopii havainnollistamaan tuloksia, jos aineistossa ei ole suuria yksittäisiä poikkeuksia vääristämässä keskiarvoa.

(Vilkka, 2007, ss. 122–123)

Tuloksien esittämisessä ja havainnollistamisessa hyödynnettiin taulukkoja, kuvioita ja tekstiä.

Mittaustulokset esitettiin taulukoissa, koska taulukot soveltuivat esittämään paljon numerotietoa yksinkertaisesti. Kuvioilla pyrittiin antamaan helposti luettava yleiskuva mittaustuloksista. (Vilkka, 2007, s. 135)

### **3.1 Painumatesti**

Painumatesteihin valikoitui mäntysahahaketta. Testeihin haluttiin joko kuusi- tai mäntyhaketta. Kuusi ja mänty ovat kaksi yleisintä puulajia, joten tieto niiden painumisesta varastoidessa oli tarkoituksenmukaisinta ja hyödyllisintä. Vuonna 2022 metsäteollisuus käytti tukki- ja kuitupuuta yhteensä noin 64 miljoonaa kuutiometriä. Kuusen ja männyn osuus tästä oli 81,8 %. (Luonnonvarakeskus, n.d.) Mäntysahake valikoitui haketta toimittavan sahan sahausjaksojen perusteella. Sahalta toimitettiin mäntyhaketta, joten testit toteutettiin tarjolla olevalle hakkeelle.

Testit toteutettiin kolmelle identtiselle hakkeella täytetyille tynnyrille. Kaikki tynnyrit oli täytetty mäntysahahakkeella, jotta tuloksia voisi verrata keskenään ja luoda tulosten keskiarvojen perusteella painumista edustava viivadiagrammi. Viivadiagrammin avulla saatiin täytettyä hakekasaa kuvastava laskuri, joka otti huomioon paineen kasvun kasan eri osissa. Laskurin avulla muodostettiin kaksi taulukkoa, joita pystyi nopeasti hyödyntämään painumisen määrittämisessä eri korkuisille ja levyisille kasoille. Painumakertoimen tarkkuuden selvittämiseksi tehtiin kasa, jonka tarkka tilavuus oli tiedossa. Kasan kehystilavuuden mittauksen jälkeen oikeasta taulukosta valittiin painumaprosentti kasan korkeuden ja leveyden perusteella. Painumaprosentti muutettiin hakekasan tilavuuslaskennassa desimaaliluvuksi ja se lisättiin aikaisemmin käytössä olleeseen muuntokertoimeen. Painumaprosentista käytetään nimitystä painumakerroin sen jälkeen, kun se on muutettu desimaaliksi. Painumakertoimen ja muuntokertoimen summa kerrottiin kasan kehystilavuudella, jolloin vastaukseksi saatiin kasan kiintotilavuus. Painumakertoimen ja muuntokertoimen tuottamaa tulosta verrattiin pelkän muuntokertoimen tuottamaan tulokseen.

### 3.2 Hakkeen laatu

Ennen testien aloitusta testeissä käytettävän hakkeen laatu määritettiin tarkasti. Hakkeen laatu mitattiin, koska laadulla voi olla vaikutusta hakkeen painumiseen, varsinkin hakkeen palakokojakaumalla voi olla suuri vaikutus. Mikäli palakokojakauma on jakautunut laajasti erikokoisiin paloihin, voi pienimmät palat täyttää isojen palojen luomia aukkoja ja näin tiivistää haketta (Karjalainen & Bergström, 2018). Pienimmät palat aiheuttavat myös tuotantoprosessissa heikompaa lopputuotteen laatua. Pienet palat pystytään nykyään erottamaan muusta hakkeesta ja käyttämään energiantuotannossa. Ylisuuret palat johtavat jossain määrin heikentyneeseen lopputuotteen laatuun sekä suurempaan puun käyttöön. (Hartler, 1996) Hakkeen vaaleudella ei ole osoitettu olevan vaikutus painumiseen, mutta se vaikuttaa kemikaalien käyttömäärään. Tummunut hake vaatii suurempaa kemikaalien käyttöä tuotantoprosessissa. (Sixta, 2006, s. 100)

Hakkeen laadun selvityksessä käytettiin apuna hakeanalyysointia. Käytössä ollut hakeanalyysointilaitteisto oli TeknoSavon Chipsmart 3D. Hakeanalyysointilaitteisto mittaa hakkeen laatua ja mittoja automaattisesti. Hakenäytteiden analysointi perustuu kameraoptiikkaan ja koneoppimiseen. Hakenäytteitä saa tarvittaessa analysoida myös manuaalisesti. Automaattisessa näytteenotossa analyysointilaitteisto poimii näytteitä automaattisesti hakevirrasta. Analyysointilaitteiston avulla saadaan selvitettyä SCAN-CM 40 standardin mukaisen hakkeen palakokojakauma, pinnan vaaleus, kuoripitoisuus sekä kosteus. (Teknosavo, 2018.) SCAN-CM 40 standardi on Scandinavian Pulp, Paper and Board testing committee:n julkaisema

menetelmä, jolla määritetään hakkeen laatu massateollisuudessa. Menetelmässä hake on jaettu palakokojakauman mukaan kuuteen eri luokkaan:

- Ylisuuri hake > 45 mm
- Ylipaksu hake > 8 mm
- Hyväksytty suuri hake > 13 mm
- Hyväksytty pieni hake > 7 mm
- Tikkuhake > 3 mm
- Puru < 3 mm

(SCAN-CM 40:01:2001, 1.)

Keskimääräinen hakkeen kuivatuoretiheys on Suomessa mäntysahahakkeelle 430 kg/m<sup>3</sup>, kuusisahakkeelle 404 kg/m<sup>3</sup> ja koivuviihahakkeelle 496 kg/m<sup>3</sup>. Kuivatuoretiheydellä tarkoitetaan kiintotilavuuden suhdetta massa. Sahahakkeen kuivatuoretiheydet olivat määritetty hankkimalla aineistoa ympäri Suomea. Sahahakkeen kuivatuoretiheydet oli aineistojen perusteella jaettu vielä tarkemmin pienempiin maantieteellisiin alueisiin. Aineistoa varten otettiin yhteensä 647 hakenäytettä yhdeksältä eri massa- ja paperitehtaalta.

(Verkasalo & Lindblad, 2001)

### **3.3 Painumisen testaus**

Haketta kerättiin kolmeen identtiseen 200 litran tynnyriin. Tynnyrin halkaisija oli 60 cm ja korkeus 86 cm. Tynnyreistä otettiin samalla edustavat näytteet talteen, jotta niiden laatu saatiin määritettyä hakeanalysointorilla. Hakkeella täytetty tynnyri sijoitettiin punnituspalkkien päälle, joilla saatiin selville hakkeeseen kohdistuvan paineen määrä. Punnituspalkit valikoituvat toteutukseen, koska ne olivat helposti siirrettävissä ja ne sopivat mittasuhteiltaan hyvin hydrauliprässin alle. Punnituspalkkien akkukäyttöinen näyttölaite näytti punnituksen 1 kilogramman tarkkuudella. Punnituspalkkien punnituskapasiteetti oli 3000 kilogrammaa. Punnituspalkit oli myös mahdollista taarata, jotta tynnyrin ja tynnyrissä olevan hakkeen paino ei tullut mukaan paineen määrittämiseen. Kuvassa 3. näkyy käytössä olleet punnituspalkit.

(VKT-Tuotanto, n.d.)

Kuva 3. Punnituspalkit (VKT-Tuontanto, n.d.)



Punnituspalkkien päälle sijoitetun tynnyrin päälle laitettiin vanerista tehty kansi, jonka tarkoituksena oli jakaa paine tasaisesti hakkeeseen. Vanerisen kannen halkaisija oli 55 cm. Kannesta tehtiin tarkoituksella tynnyriä selvästi kapeampi, jotta tynnyrin ja kannen välille ei puristaessa syntyisi kitkaa. Kansi oli kuitenkin riittävän leveä, ettei haketta päässyt puristaessa pursuamaan kannen alta. Haketta puristettiin hydrauliprässillä, jonka puristuskapasiteetti oli 250 baaria. Hydrauliprässin toimintaperiaate perustuu männillä luotuun puristusvoimaan, joka tuottaa voimaa hyödyntämällä nesteen puristumattomuutta. Hydrauliprässillä on mahdollista tuottaa eri voimakkuudella painetta tarkasti. Hydrauliprässin vahvuus painumatesteihin on sen kyky tuottaa täysi puristusvoima koko liikeradallaan. (IQS Directory, n.d.) Prässin luomaa puristusvoimaa seurattiin punnituspalkkien näyttölaitteesta. Prässin ja tynnyrin kannen väliin jouduttiin sijoittamaan välikappaleita, jotta prässin männän pituus riitti puristukseen. Välikappaleiden massa otettiin paineen mittauksessa huomioon. Hakkeen painumista tynnyrissä mitattiin rullamitalalla kahdesta eri kohdasta. Mittausväli oli tynnyrin kansi sekä hydrauliprässin kehikko, joka pysyi toteutuksen aikana paikallaan. Mittauskohtia oli kaksi, jotta mahdollinen epätasainen kannen painuminen saataisiin otettua huomioon mittaustuloksissa. Kuvassa 4. näkyy testi järjestely kokonaisuudessaan.

Kuva 4. Testi järjestely



Ennen testien aloitusta oli kirjattu ylös paineet, joilla mittausta suoritettaisiin. Valitut paineet näkyvät kuvassa 5. Mitattavat paineet oli määritetty niin, että mittaustuloksista saataisiin tehtyä kattava kuvaaja painumisesta. Paineiden määrässä oli huomioitu myös niiden riittävyys, jotta tuloksista saataisiin muodostettua kokonaista hakekasaa kuvaava painumaprosentti. Tynnyrin tilavuus ja käytössä ollut paine muunnettiin kuutiokohtaiseksi skaalaamalla. Skaalauksessa alkuperäiset arvot kerrotaan skaalauskerroimella.

Skaalauskerroin on numero tai muuntokerroin, joka muuntaa halutun muodon tai kuvio koon, ottaen huomioon sen alkuperäisen koon ja muodon. Skaalauskerroimena käytettiin yhden kuutiometrin ja käytössä olleen tynnyrin tilavuuden suhdetta. (Cuemath, n.d.) Paineen laskennassa pinta-alan ja voiman suhteella on merkitystä. Voiman pysyessä samana ja pinta-alan kasvaessa paineen määrä laskee. Jos taas pinta-ala pienenee ja voima pysyy samana, paine kasvaa. (Khan academy, n.d.) Pinta-alaa sekä voimaa lisättiin samassa suhteessa.

Tynnyrin tilavuus oli 0,24 m<sup>3</sup>, jolloin tulokset piti kertoa luvulla 4,17, jotta kuutiokohtainen paine ja pinta-ala saatiin selville. Kerroin 4,17 saatiin selville laskukaavalla  $1 \text{ m}^3 / 0,24 \text{ m}^3 = 4,17$ . Paineen mittausta suoritettaisiin korkeimmillaan 2000 kg:n paineessa, joka olisi

skaalauskerroimella 4,17 kertomisen jälkeen 8340 kg. Hakekasassa tuollainen paine esiintyisi 19,4 metrin syvyydessä. Paineen määrittäminen kasan korkeuksille onnistui kaavalla, jossa paine jaetaan kuivatuoretiheysluvulla.  $8340 \text{ kg} / 430 \text{ kg/m}^3 = 19,4 \text{ m}$ . Mittauksen suorituksessa jouduttiin ottamaan huomioon myös punnituspalkkien punnitusalue. Palkkien maksimi punnitusmäärä oli 3000 kilogrammaa, joten hydrauliprässillä puristamisessa piti olla tarkkana.

Kuva 5. Mittauslomake

	1. Tynnyri	2. Tynnyri	3. Tynnyri
0 kg			
100 kg			
300 kg			
500 kg			
700 kg			
1000 kg			
1500 kg			
2000 kg			

Mittaustuloksista tarvitsi laskea jokaiselle mitatulle paineelle senttikohtainen painuminen sekä prosentillinen painuminen. Senttikohtainen painuminen selvisi laskemalla erotus alkuperäisestä hakkeen tasosta ja mitattavan paineen kohdalla olevasta hakkeen tasosta. Prosentillinen painuminen saatiin laskettua, kun jokaiselle mitatulle paineelle oli saatu määritettyä senttikohtainen painuminen. Prosentillisen painumisen laskeminen aloitettiin laskemalla koko tynnyrin tilavuus lieriön tilavuuskaavalla  $V = Ah$ . Käytössä olleen tynnyrin korkeus  $h$  oli 86 cm.  $A$  eli pohjan pinta-ala laskettiin kaavalla  $A = \pi r^2$ . Käytössä olleen tynnyrin halkaisija oli 60 cm, joten säde eli  $r$  oli 30 cm. Tynnyrin tilavuus oli siis kaavalla laskettuna  $243036 \text{ cm}^3 = 0,24 \text{ m}^3$ . Seuraavaksi oli laskettava painumisen osuus tynnyrin tilavuudesta, joka tapahtui senttikohtaisten mittaustulosten avulla. Jokaisella paineella tapahtuneen painumisen tilavuus laskettiin lieriön tilavuuden kaavalla. Kaavassa korkeutena käytettiin tällä kertaa tynnyrin tyhjäksi jääneen eli painuneen osuuden korkeutta. Pohjan pinta-ala oli kaavassa sama, kuin koko tynnyrin tilavuutta laskettaessa. Lopuksi painuneen osuuden tilavuus kerrotaan koko tynnyrin tilavuudella ja tulo kerrottiin sadalla. Laskenta suoritettiin jokaiselle mitatulle paineelle erikseen. (Laskin, 2024)

### 3.4 Kertoimen määrittäminen

Biomassan käsittelyyn erikoistunut konsultti Paul Janzè on nettisivustollaan rakentanut Excel-laskurin hakekasan painumisen määrittämiseen. Kuvassa 6. näkyy kyseinen laskuri.

Laskuri esittää läpileikkausta hakekasasta, joka on 12 jalkaa korkea ja 12 jalkaa leveä. Hakekasan yksi ruutu kuvastaa yhtä kuutiojalkaa. Laskuriin syötetään itse mitattua dataa painumisen osalta. Kuvassa ylhäällä näkyy 10 näytettä, joiden painot ovat merkitty ruutuihin sinisellä paunoissa. Näytteistä on laskettu keskiarvoksi 20 paunaa per kuutiojalka. Keskiarvoa käytetään laskurissa irtotiheytenä ja se sijoitetaan hakekasan läpileikkausta kuvastavassa laskurissa kasan ylimpiin ruutuihin. Kuvassa näytteiden alapuolella näkyy sinisellä 0,6 %, joka on tekijän arvioon perustuva luku jalkakohtaisesta painumisesta hakekasassa. Ruutujen painot lisääntyvät, mitä alemmas kasassa siirrytään. Ruutuun lisätään aina ylemmän ruudun paino sekä sen oma irtotiheyspaino. Tällä tavalla laskuri kuvastaa paineen kertymistä, mitä alempana kasassa ollaan. Kuvassa hakekasan alapuolella on 10 sinisillä luvuilla täytettyä ruutua. Nämä ruudut kuvastavat niiden yläpuolella hakekassa olevien pystyriivien painumista tuumissa. Näiden ruutujen alapuolella on lineaarinen painumisprosentti kyseiselle pystyriiville. Painumisprosentti on laskettu jakamalla tuumakohtainen painuminen kasan korkeudella eli kahdellatoista. Kuvan alimpaan riviin on laskettu pystyriivin painumisprosentti kasan pohjalla eli maanrajassa.

Kuva 6. Janzèn Excel-laskuri paunoissa (Paul Janzè, 2014)

Table 1 - Measure Bulk Density of freshly ground material										
Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Measure Weight (lb) wet basis =	21	22	19	18	18	22	21	21	19	19
Use preliminary compaction per foot estimate =	0,6% by weight		Average Bulk Density =			20 lb/ft <sup>3</sup> [from above data]				

Table 2 - Theoretical Loads at Different Pile Heights of Naturally Compacted Biomass												
Height (ft)	Distance from Center of Pile (ft)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	20											
11	40	20										
10	61	40	20									
9	81	61	40	20								
8	102	81	61	40	20							
7	122	102	81	61	40	20						
6	143	122	102	81	61	40	20					
5	164	143	122	102	81	61	40	20				
4	185	164	143	122	102	81	61	40	20			
3	207	185	164	143	122	102	81	61	40	20		
2	228	207	185	164	143	122	102	81	61	40	20	
1	Total Load at bottom of pile (lb) =											
	249	228	207	185	164	143	122	102	81	61	40	20
(Use these loads for compaction tests)												
Measure Compaction Deflection (in) =	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0,0
Linear Compaction Deflection (%) =	13 %	12 %	10 %	9 %	8 %	8 %	6 %	5 %	4 %	3 %	2 %	0 %
Compaction (by weight) at bottom of pile (%) =	23 %	21 %	18 %	16 %	14 %	13 %	10 %	8 %	7 %	5 %	3 %	0 %

Janzè ehdottaa painumisen selvitykseen testiä, jossa haketta laitetaan säiliöön. Säiliössä olevan hakkeen päälle pitäisi laittaa laskurin mukainen määrä massaa ja mitata hakkeen painuminen massan alla. Jokaista leveyssuunnan jalkaa kohti otetaan yksi testisäiliö, jolle toteutetaan laskurissa sille leveydelle kohdistuva paine. Jokaisesta mitattavasta paineesta tulee siis vain yksi mittaustulos. Jokaisen paineen alla tapahtunut painuminen syötetään tuumissa laskuriin, joka jakaa ne kasan korkeudella eli kahdellatoista. Jakolaskun tulos on painumisprosentti. Kuvassa 7. näkyy laskurin laskema painuminen kasalle. Laskurissa





Kuva 9. Siilossa esiintyvä paine

19 m	430	430	430	430	430	430	430	430	430	430
18 m	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860
17 m	1290	1290	1290	1290	1290	1290	1290	1290	1290	1290
16 m	1720	1720	1720	1720	1720	1720	1720	1720	1720	1720
15 m	2150	2150	2150	2150	2150	2150	2150	2150	2150	2150
14 m	2580	2580	2580	2580	2580	2580	2580	2580	2580	2580
13 m	3010	3010	3010	3010	3010	3010	3010	3010	3010	3010
12 m	3440	3440	3440	3440	3440	3440	3440	3440	3440	3440
11 m	3870	3870	3870	3870	3870	3870	3870	3870	3870	3870
10 m	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300
9 m	4730	4730	4730	4730	4730	4730	4730	4730	4730	4730
8 m	5160	5160	5160	5160	5160	5160	5160	5160	5160	5160
7 m	5590	5590	5590	5590	5590	5590	5590	5590	5590	5590
6 m	6020	6020	6020	6020	6020	6020	6020	6020	6020	6020
5 m	6450	6450	6450	6450	6450	6450	6450	6450	6450	6450
4 m	6880	6880	6880	6880	6880	6880	6880	6880	6880	6880
3 m	7310	7310	7310	7310	7310	7310	7310	7310	7310	7310
2 m	7740	7740	7740	7740	7740	7740	7740	7740	7740	7740
1 m	8170	8170	8170	8170	8170	8170	8170	8170	8170	8170
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m

Mittaustuloksista muodostettiin viivadiagrammi, jonka tarkoituksena oli osoittaa painumisen määrä hydrauliprässillä mitaamattomille paineille. Viivadiagrammissa käytettiin painumatesteissä käytettyjen kolmen tynnyrin mitaustulosten keskiarvoja. Viivadiagrammi valikoitui tähän tarkoitukseen, sillä se soveltuu hyvin kuvaamaan muuttujan muutosta tai trendiä ajan suhteen. Viivadiagrammissa on yleensä kaksi akselia, jotka esittävät eri muuttujia. Viivadiagrammi helpottaa testien tulosten lukemista, antaa hyvän käsityksen trendistä sekä havainnollistaa asioiden välisiä yhteyksiä. (Söderholm, ym. 2022)

Viivadiagrammi vetää viivan mitaustulosten välille, joten painumisprosentti saadaan määritettyä myös paineille, joita ei erikseen mitattu. Viivadiagrammin avulla laskurin ruutujen kuiva-tuoretiheyspainot pystytään korvaamaan painumaprocentilla.

### 3.5 Kertoimen testaaminen

Kertoimen toimivuutta tarvitsi testata kasaan, jonka tarkka tilavuus oli tiedossa, jotta painumakertoimen toimivuus saataisiin selville. Tällainen kasa tehtiin autokuormien perusteella kuivamassa otantamittauksella, joka on yleinen mittausmenetelmä teollisuushakkeelle. Menetelmässä mitataan kuorman tai mittauserän tuoremassa, joka muutetaan kuivamassaksi. Tuoremassa tarkoittaa kuormapunnituksen ja tyhjäpunnituksen erotusta eli nettomassaa. Kuivamassa saadaan selvittämällä kuorman tai mittauserän kuiva-ainepitoisuus, joka selvitetään mittauserästä otetusta näytteestä. (Puuhuolto, 2018)

UPM Pietarsaarella hakekasojen mittaaminen on ulkopuolisen yrityksen vastuulla, jonka työntekijää haastateltiin sähköpostin välityksellä tätä opinnäytetyötä varten. Haastateltu henkilö toimii yrityksessä mittauskonsulttina, jonka vastuulla on hakekasojen mittaus. Hän kertoi, että hakekasat mitataan pääsääntöisesti Riegl VZ400-laserskannerilla. Skanneri on kiinnitetty auton katolle, jolla hakekasoja kierretään. Mittausta suoritetaan auton ollessa pysähdyksissä. Mittauksesta syntyy pistepilvi, johon mittaukset eri kohdista kasaa yhdistetään koordinaattien avulla. Pistepilveä käytetään pohjana, jolla saadaan kasan tilavuus laskettua. Laserskannerin etuna droneen verrattuna on sen tarkka toimivuus eri sääolosuhteissa. Dronea on hyödynnetty myös kasojen mittauksessa, mutta mittaus on siirtynyt 90 % laserskannerilla suoritettavaksi, koska dronella mittaaminen on riippuvaisempaa sääolosuhteista. Sääolosuhteiden ja lämpötilojen vaihtelut eri vuodenaikoina eivät vaikuta laserskannerin käyttöön, mutta lumen määrä tulee talvisin ottaa huomioon mittauksissa. (henkilökohtainen tiedonanto, 8.2.2024)

Hakekasan kehystilavuuden eli irtotilavuuden ollessa selvillä, aloitettiin vertaamaan kasan kiintotilavuutta eri laskentamenetelmillä. Kasan tarkka tilavuus oli niin tarkasti tiedossa kuin vain mahdollista autokuormien ja niistä otettujen näytteiden perusteella. Ensimmäisessä laskukaavassa mitattu kehystilavuus muunnettiin kiintotilavuudeksi tavalliseen tapaan muuntokertoimella 0,44. Toisessa laskukaavassa mukaan tuli muuntokertoimen lisäksi tässä opinnäytetyössä määritelty painumakerroin, jonka suuruus oli riippuvainen kasan korkeudesta ja leveydestä. Painumakerroimella tarkoitetaan painumaprosenttia, joka on muutettu desimaaliksi, jotta se sopii yhteen käytössä olevan muuntokertoimen kanssa. Painumakerroin lisätään muuntokertoimeen, jonka jälkeen summa kerrotaan irtotilavuudella. Molempien laskukaavojen tulosten ollessa selvillä, alettiin tuloksia verrata autokuormista tehtyyn tarkaan tilavuuden kasaan. Tuloksista tehtiin taulukko, johon on laskettu laskukaavojen tulosten erot prosenteissa ja kuutioissa verrattuna kasan tarkkaan tilavuuteen.

## 4 Tulokset

Tulosten läpikäynti alkoi hakkeen laadun selvittämällä sekä painumisen määrän laskemisella testituloksista. Painumatestien tuloksien perusteella muodostettiin viivadiagrammi, jonka avulla Excel-laskurin paineet pystyttiin vaihtamaan painumaprosenteiksi. Excel-laskurin tuloksista tehtiin kaksi painumataulukkoa, joista toisen toimivuutta testattiin hakekasaan, jonka tarkka tilavuus oli tiedossa. Painumataulukoista näkee kasan painumaprosentin kasan korkeuden ja leveyden perusteella.

## 4.1 Hakkeen laatu

Hakkeesta otetut näytteet analysoitiin hakeanalysaattorilla painumatestien jälkeisenä päivänä. Näytteet otettiin tynnyreistä ennen puristamista, joten puristamisella ei ollut niiden laatuun vaikutusta. Kuvassa 10. näkyy tynnyreistä otettujen hakkeiden laatu. Tynnyreiden hakkeiden laaduissa ei ollut merkittäviä eroja. Kuoripitoisuus oli kaikissa kolmessa tynnyrissä 1,62–2,21 % välissä. Kuiva-ainepitoisuus vaihteli 43,95–44,71 % välillä. Palakokojakaumat olivat jakautuneet hyvin tasaisesti. Ainoastaan tynnyrissä 2 oli ylisuurta haketta, mutta ylisuuren osuus oli siinäkin vain 0,46 %. Hakenäytteiden laadusta tehtiin Excel-taulukko, jotta tulosten raportointi olisi selkeämpää.

Kuva 10. Hakkeen laatu tynnyreissä

	Tynnyri 1	Tynnyri 2	Tynnyri 3
Ylisuuri >45mm	0 %	0,46 %	0 %
Ylipaksu >8mm	9,59 %	9,18 %	6,93 %
Iso aksepti >13mm	78,95 %	76,86 %	81,74 %
Pieni aksepti >7mm	10,58 %	12,10 %	10,30 %
Tikut >3mm	0,75 %	1,12 %	0,91 %
Puru <3mm	0,12 %	0,26 %	0,09 %
Vaaleus	37,93 %	37,02 %	38,63 %
Kuiva-aine	44,60 %	43,95 %	44,71 %
Kuoripitoisuus	2,04 %	2,21 %	1,62 %

## 4.2 Hakkeen painuminen

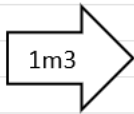
Hakkeen painumista mitattiin ennalta määritetyn mittauslomakkeen mukaisesti. Tynnyreiden mittaustulokset näkyvät kuvassa 11. Hakkeen painuminen kaikissa kolmessa tynnyrissä oli samansuuntaista. Hakkeen korkeus tynnyrissä oli jokaisen testin alussa 45–45,4 cm. 100 kilogramman paineessa mittaustulokset ovat hyvin samankaltaiset kaikissa tynnyreissä. 300 kilogramman paineessa 1. tynnyrin mittaustuloksissa syntyy noin 1,5 senttimetrin poikkeama kahteen muuhun tynnyriin verrattuna. Ensimmäisen tynnyrin mittaustuloksissa on testin loppuun asti eroa kahteen muuhun nähden. Ero mittaustuloksissa ei kuitenkaan kasva enää merkittävästi 300 kilogramman jälkeen vaan ero pysyy noin 1,2–1,9 senttimetrin välillä. Toisen ja kolmannen tynnyrin mittaustulokset pysyvät testin loppuun asti hyvin samankaltaisina. Hakkeen painumista mitattiin kahdesta eri kohtaa, mutta Excel-taulukossa näkyvät kahden mittauskohdan keskiarvot. Keskiarvojen käyttäminen selkeyttää mittaustuloksien eroja sekä samankaltaisuutta.

Kuva 11. Mittaustulokset

	1. Tynnyri	2. Tynnyri	3. Tynnyri
0 kg	45 cm	45,3 cm	45,4 cm
100 kg	49,6 cm	49,5 cm	49,35 cm
300 kg	52,4 cm	53,6 cm	53,55 cm
500 kg	54,8 cm	56,25 cm	56,3 cm
700 kg	57 cm	58,55 cm	58,45 cm
1000 kg	59 cm	60,75 cm	60,9 cm
1500 kg	61,4 cm	63,35 cm	63,6 cm
2000 kg	63,9 cm	65,6 cm	65,7 cm

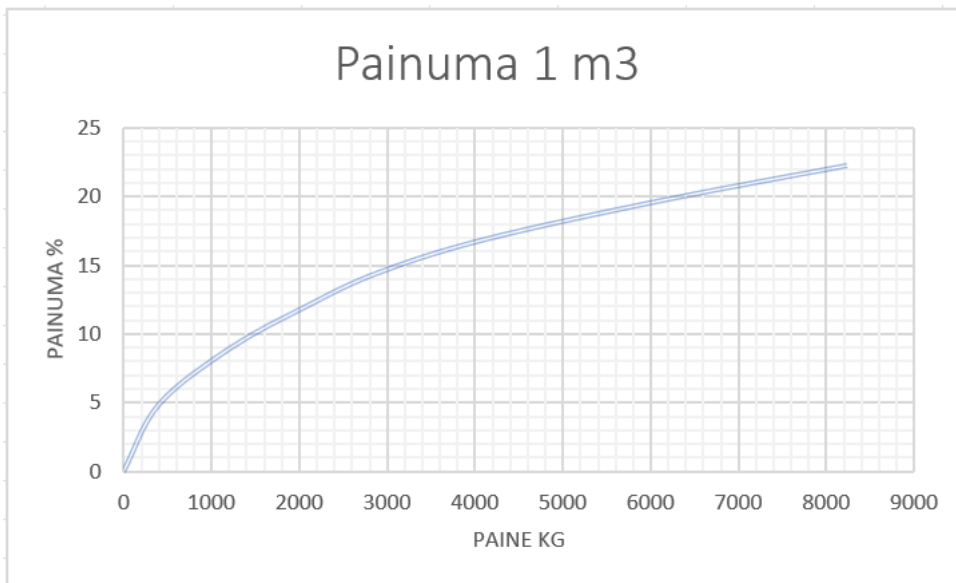
Tynnyrien mittaustulosten keskiarvojen perusteella laskettiin mittaussväleillä tapahtunut painuminen senteissä. Senttikohtaisen painumisen ollessa tiedossa oli mahdollista laskea lieriön tilavuuskaavan avulla painuneen osan osuus tynnyrin tilavuudesta. Painuneen osan osuus tynnyristä oli samalla mittaussvälin painumaprosentti. Tynnyrin tilavuus ja käytössä ollut paine skaalattiin kuutiokohtaiseksi kertomalla käytössä ollut voima ja tynnyrin tilavuus samassa suhteessa kertoimella 4,17. Painumaprosentti pysyi samana skaalauksen jälkeen, koska skaalaus suoritettiin käytössä olleelle voimalle ja pinta-alalle samassa suhteessa. Skaalatut paineet näkyvät kuvassa 12.

Kuva 12. Mittaustulosten skaalaus kuutiokohtaisiksi

kg	Keskiarvo	Painuma cm	Painuma %		kg	Painuma %
0	45,2	0	0,0		0	0,0
100	49,5	4,3	5,0		417	5,0
300	53,2	8,0	9,2		1250	9,2
500	55,8	10,6	12,1		2083	12,1
700	58,0	12,8	14,6		2917	14,6
1000	60,2	15,0	17,1		4167	17,1
1500	62,8	17,6	20,0		6250	20,0
2000	65,1	19,9	22,5		8333	22,5

Kuutiokohtaisiksi skaalatuista mittaustuloksista muodostettiin viivadiagrammi, joka mahdollisesti painumaprosentin määrittämisen paineille, joita ei ollut erikseen painumatesteissä mitattu. Viivadiagrammi näkyy kuvassa 13. Diagrammista sai painuman selville yhden prosentin tarkkuudella ja paineen 200 kilogramman tarkkuudella. Diagrammi havainnollistaa, miten hakkeen painuminen kasvoi paineen lisääntyessä. Painumisen suhteellinen määrä alkoi vähentymään paineen kasvaessa ja hakkeen ollessa jo tiiviimpää. Testien aikana ei kuitenkaan löytynyt pistettä, jossa painuminen loppuisi, vaan painuminen jatkuu testeissä käytettyjen paineiden loppuun asti.

Kuva 13. Viivadiagrammi painumisesta



### 4.3 Kerroin

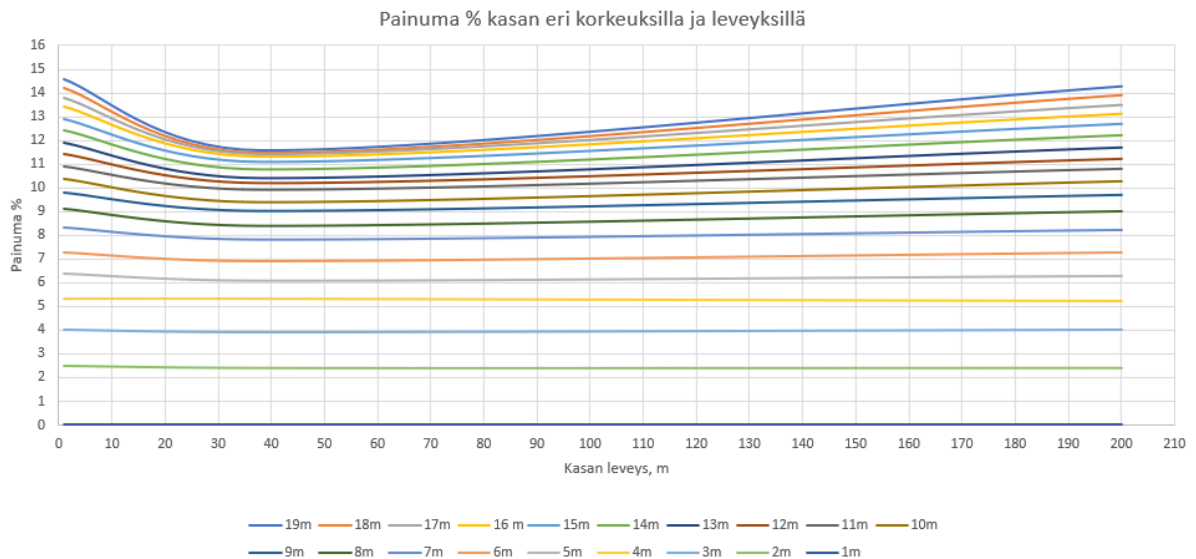
Hakekasalle muodostettavan painumakertoimen määrittäminen onnistui hyödyntämällä viivadiagrammia ja Excel-laskuria. Excel-laskuriin syötetyt painot muutettiin viivadiagrammin avulla painumaprosenteiksi. Laskurin jokaisen ruudun paineelle löytyi viivadiagrammista vastaava painumaprosentti. Viivadiagrammi näytti paineen määrän 200 kg:n tarkkuudella, joten painoja pyöristettiin tarvittaessa. Painumaprosentit määriteltiin yhden prosentin tarkkuudella.

Hakekasan lopullisen painumakertoimen sai muuntamalla kaikki painot viivadiagrammilla painumaprosenteiksi ja laskemalla laskurin prosenttiruutujen keskiarvon. Kuvassa 14. on esimerkkinä toimiva 19 metriä korkea ja 38 metriä leveä kasa. Kasa saavuttaa korkeimmillaan 22 % painumisen kasan keskiosan pohjalla. Laskurin uloimmat osat eli kasan pintaosat ovat painuneet 0 %, sillä painuminen lasketaan aina ylemmän ruudun painon perusteella. Koko kasan painumaprosentti lasketaan laskemalla keskiarvo kaikista prosenttiluvuista laskurissa. Kasan painumaprosentti on 12. Hakekasojen tilavuuslaskuissa käytössä oleva muuntokerroin on desimaaliluku, joten painumakertoimen tarvitsi olla myös desimaaliluku sopiakseen laskukaavaan. Painumaprosentti siis jaetaan sadalla, jotta se sopii laskukaavaan. Esimerkki kasan painumakerroin on 0,12.



Tuloksista muodostettiin kaksi erillistä taulukkoa, joiden tarkoituksena oli nopeuttaa painumakertoimen määrittystä eri kokoisille kasoille. Taulukot muodostettiin tekemällä jokaisesta käytössä olevasta kasan korkeudesta 2 metriä, 38 metriä ja 200 metriä leveä kasa Excel-laskuriin. Kaksi metriä leveän kasan painumaprozentista vedettiin kuvaaja 38 metriä leveän kasan painumaprosenttiin, jota jatkettiin vielä 200 metriin. Kuvassa 16. näkyy jokaisen korkeuden painumaprosentin kehittyminen, kun kasa levenee. Alle yhdeksän metriä korkeissa kasoissa kasan leveys ei vaikuta painumaprosenttiin, lukuun ottamatta 3 metriä korkeaa kasa, jossa painumaprocentti laskee kolmesta kahteen kasan leventyessä. Suurin vaikutus leveyden muutoksella on korkeimpaan eli 19 metriä korkeaan kasaan, jossa painumaprocentti on kahden metrin leveydellä 15 % ja 38 metrin leveydellä puolestaan 12 %. Painumaprocentti lähtee jälleen nousemaan 38 metrin jälkeen ja se on 200 metrissä 14 %. Muissakin yli 8 metriä korkeissa kasoissa tapahtuu suurta painumaprocentin laskua 2 metriä leveästä kasasta 38 metriä leveään kasaan. Painumaprocentti lähtee kuitenkin 40 metrin leveyden jälkeen tasaiseen kasvuun.

Kuva 16. Kasan painuminen eri korkeuksilla ja leveyksillä



Kasan korkeuksissa ja leveyksissä ei ole otettu huomioon kasojen tavallisia mittasuhteita, sillä niitä on vaikea määrittellä kasojen ollessa niin eri mallisia. Kuvan 17. taulukosta saa selville painumaprocentin kasalle, jonka korkeus on 1–19 metriä ja leveys 2–38 metriä. Taulukon kasojen leveydet ovat 2 metrin tarkkuudella. Painumaprocentti pienenee yli 8 metriä korkeissa kasoissa kasojen leventyessä. Kasan leveys vaikuttaa eniten korkeiden kasojen painumaprocenttiin. Korkeissa ja kapeissa kasoissa kasojen kaltevuuskulma on niin jyrkkä, että suurempi osa hakkeesta on paineen alaisuudessa, kuin loivemmissä kasoissa.

Kuva 17. Kasan painumataulukko

19	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	13	13	13	13	13	13	12	12	12
18	14	14	14	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	11	11	11
17	14	14	14	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	11	11	11
16	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11
15	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11
14	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11
13	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10
12	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9
9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9
8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8
7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38

Korkeus m

Leveys m

Kuvan 17. taulukko soveltuu hyvin pienemmille kasoille, mutta suurilla tehtailla on yleensä huomattavasti 38 metriä leveämpiä hakekasoja. Leveämpiä kasoja varten tehtiin taulukko, jossa painumaprocentit on määritetty aina 200 metriä leveille kasoille asti. Taulukko näkyy kuvassa 18. Taulukon leveydet ovat kymmenen metrin tarkkuudella. Kuvien 17. ja 18. taulukoiden väliset erot selittyvät leveyden pyöristyksillä ja käytössä olevalla tarkkuudella.

Kuva 18. Painumataulukko isommille kasoille

19	14	12	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	14	14	14	14	
18	13	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	14	14	14	
17	13	12	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	13	13	
16	13	12	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	
15	12	12	11	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	
14	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	
13	11	11	10	10	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	
12	11	11	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
11	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	
10	10	10	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
9	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	10	10	10	10	
8	9	9	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200

Korkeus m

Leveys m

Painumataulukko tehtiin myös silloille, joka näkyy kuvassa 19. Silloissa kaltevuuskulma on aina sama pystysuorien seinien takia, joten leveydellä ei ole merkitystä. Sillojen

painumaprocentti eri korkeuksille on sama kuin alle 40 metriä leveille kasoille määritetyssä taulukossa kaksi metriä leveillä kasoilla.

Kuva 19. Siilon painumataulukko

Korkeus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
%	0	3	4	5	6	7	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15

#### 4.4 Kerrointen vertailu

Mitattava hakekasa tehtiin kymmenestä autokuormallisesta mäntysahahaketta. Kuormien nettopainot saatiin selville vähentämällä kuormien kokonaispainosta ajoneuvoyhdistelmän paino. Kuormista otettiin näytteitä, jotta hakkeen kuiva-aineprosentti saatiin selville.

Kuormien nettopainot laskettiin yhteen, jotta tiedettiin kasassa olevan hakkeen yhteispaino.

Kuvassa 20. näkyy jokaisen kuorman paino sekä kuormien yhteispaino. Kuormien yhteispaino oli 554,6 tonnia. Yhteispaino tonneissa kerrottiin kuiva-ainepitoisuudella ja muuntokertoimella. Kuormista otettiin yhteensä 7 näytettä, joiden keskiarvo oli 45,27.

Muuntokertoimena käytettiin 2,81, joka kuvaa yhden tonnin suhdetta yhteen

kiintokuutiometriin.  $554,6 \times 0,4527 \times 2,81 = 705,5 \text{ m}^3$ .

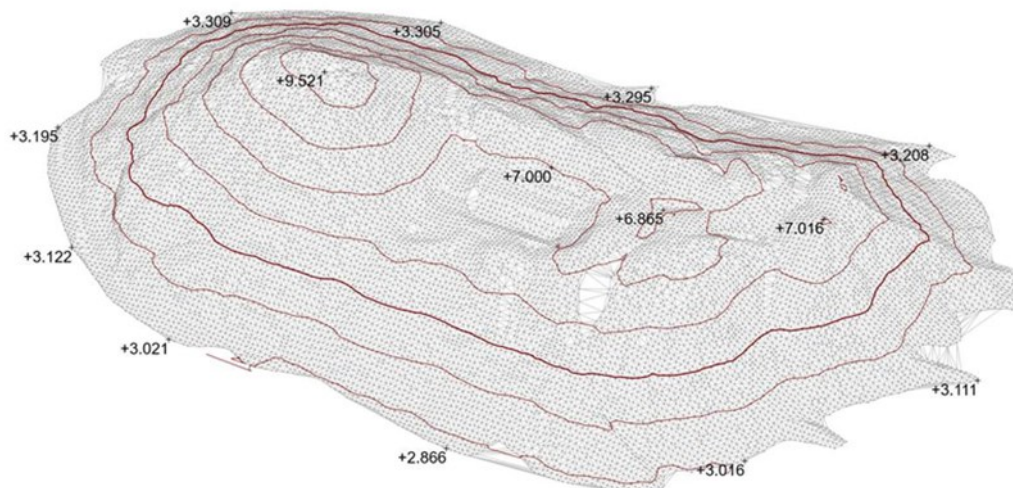
Kuva 20. Kasaan ajetut kuormat

Kuorma	Nettopaino
1.	52700
2.	53900
3.	50800
4.	56600
5.	57200
6.	57800
7.	55600
8.	55800
9.	57500
10.	56700
Yht.	554600
m <sup>3</sup>	705,5

Kasan annettiin painua yhden päivän, jonka jälkeen se mitattiin laserskannerilla. Mittaus suoritettiin hyvissä sääolosuhteissa eikä kasan päällä ollut lunta. Mittaustulokset kasasta saatiin samana päivänä, kun mittaukset oli suoritettu. Kuvassa 21. näkyy mitattu kasa, johon

on lisätty korkeuspisteitä selkeyttämään kasan korkeuden mittausta. Kasan huipun korkeus oli 9,5 metriä ja alimmillaan kasan korkeus huipulla oli 6,8 metriä. Kasan leveämpi sivu oli 27 metriä leveä ja kapeampi sivu 16 metriä leveä.

Kuva 21. Mitattu hakekasa



Kasa ei ollut täysin kartion muotoinen, joten mittaustuloksia piti soveltaa, että painumataulukolla saataisiin määritettyä painumakerroin. Kasan huipun matalimmasta ja korkeimmasta kohdasta laskettiin keskiarvo, joka kuvaisi kasan keskimääräistä korkeutta paremmin. Kasan kapeamman ja leveämmän sivun pituuksista laskettiin myös keskiarvot. Kasan korkeuden keskiarvo oli 8,15 metriä ja kasan leveyden keskiarvo oli 21,5. Korkeuden ja leveyden keskiarvojen perusteella katsottiin kasan painumaprosentti painumataulukosta. Kasan painumaprosentin määrittämiseen käytettiin alle 40 metriä leveillä kasoille tarkoitettua taulukkoa. Painumataulukko on korkeudessa metrin tarkkuudella ja leveydessä kahden metrin tarkkuudella, joten leveys ja pituus pyöristettiin lähimpään taulukon muuttujaan. 8,15 metrille lähin korkeus oli 8 metriä ja 21,5 metrille lähin leveys oli 22 metriä. Mitatun kasan painumaprosentti oli taulukon mukaan 8 %.

Laserskanneri mittasi kasan tilavuudeksi 1444,1 irtokuutiometriä. Mittaustulos kerrottiin muuntokertoimella 0,44, joka muutti tuloksen 635,4 kiintokuutiometriksi. Painumakertoimella määritetty tilavuus laskettiin lisäämällä muuntokertoimeen kasan painumaprosentti eli 8, joka muutettiin desimaaliksi. Muuntokertoimesta tuli 0,52. Kasan mitattu irtotilavuus 1444,1 m<sup>3</sup> kerrottiin muuntokertoimella, jossa painuma oli otettu huomioon. Kasan kiintotilavuudeksi tuli 750,9 m<sup>3</sup>.

Kuvassa 22. näkyy laskukaavojen tulokset, joiden tarkkuutta verrataan kasan tarkkaan tilavuuteen eli autokuormista tehtyyn kasaan. Muuntokerroimella 0,44 ero kasan tarkkaan tilavuuteen oli 70,1 m<sup>3</sup> eli 11 %. Muuntokerroimella, johon olisi lisätty painumataulukon mukainen painumakerroin, eroa syntyi tarkan tilavuuden kasaan 45,4 m<sup>3</sup> eli 6,4 %. Pelkällä muuntokerroimella laskettaessa kasan tilavuus jäi alakanttiin. Painumakerroimella laskettaessa kasan tilavuudesta tuli todellista isompi. Painumakerroimella laskettaessa kasan tilavuus oli kuitenkin tarkempi.

Kuva 22. Laskukaavojen tulokset

Laskentatapa	m <sup>3</sup>	Ero m <sup>3</sup>	Ero %
Autokuormista tehty kasa	705,5	0	0
Muuntokerroin (0,44)	635,4	70,1	11,0 %
Painumakerroin + Muuntokerroin (0,52)	750,9	45,4	6,4 %

## 5 Johtopäätökset ja pohdinta

Johtopäätökset ja pohdinta suoritettiin erikseen testien toteutustavasta, painumakerroimen ja taulukoiden määrittämisestä sekä tuloksista. Testien toteutustavassa käsitellään hakkeen laatua sekä hakkeen painumista hydrauliprässillä suoritetuissa testeissä. Toteutustapojen kohdalla pohditaan myös vaihtoehtoisia tapoja toteuttaa testejä hakkeen painumisesta. Painumakerroimen ja taulukoiden määrittämisestä pohditaan. Tuloksissa käydään läpi painumakerroimen toimivuutta. Toimivuuden kannalta esiin nousee tarve useammille testeille, joilla voitaisiin varmistaa menetelmän toimivuus sekä tarkkuus.

### 5.1 Painumatesti

Painumatestien ensimmäisessä tynnyrissä esiintyvät erot painumisessa eivät selity hakkeen palakokojakaumalla. Ero kahteen muuhun tynnyriin nähden ei kuitenkaan ole niin merkittävä, että se vääristäisi testien tuloksia. Palakokojakauma oli kaikissa kolmessa tynnyrissä hyvin samankaltainen. Hake oli muutenkin laadultaan hyvin samankaltaista. Toisen ja kolmannen tynnyrin testitulokset ovat jopa yllättävän samankaltaiset. Painumatestien toteuttaminen hydrauliprässillä oli odotettua hitaampaa, koska hakkeen tiivistyessä käytössä ollut paine laski. Paineen piti pysyä paikallaan 5 minuuttia ennen kuin voitiin todeta painumisen määrän olevan oikea käytössä olleelle paineelle.

Hakkeen laadun vaikutusta painumiseen ei pystytty tässä opinnäytetyössä tutkimaan, koska testeissä oli käytössä tasalaatuista mäntysahahaketta. Mahdollisten jatkotutkimuksien kannalta hakkeen laadun määrittäminen oli kuitenkin todella tärkeää, koska tiedossa on nyt painuminen tasalaatuisen mäntysahahakkeen osalta. Käytössä olleiden lähteiden perusteella oli vaikeaa arvioida hakkeen laadun vaikutusta painumiseen, mutta omana arvionani on, että hakkeen laadullisista tekijöistä suurin merkitys on hakkeen painolla.

Painumista voisi tulevaisuudessa testata kokeellisesti myös massalla. Massa antaisi mahdollisesti todenmukaisemman aikavälin hakkeen painumiselle kuin puristaminen. Samalla selviäisi vastaako puristaminen massan alla painumista. Hydrauliprässillä puristaessa hakkeen saa tiivistettyä todella tiiviiksi, mutta tiivistyykö hake massan alla samalla tavalla. Massan kanssa voisi pyrkiä käyttämään säiliötä, joka vastaisi yhtä kuutiometriä. Yhden kuutiometrin kokoinen säiliö ei vaatisi mittaustulosten skaalaamista, jos käytössä olisi yhden kuutiometrin ruutuihin perustuva Excel-laskuri. Massan ja yhden kuution säiliön käyttöä harkittiin jo tämän opinnäytetyön suunnitteluvaiheessa, mutta sopivan säiliön löytäminen osoittautui haasteelliseksi. Säiliön päälle olisi saatava vielä noin 8000 kg:n edestä painoa, jotta painumatestit olisivat onnistuneet. Kyseinen määrä massaa vaatisi testeihin avuksi työkonetta, jotta massaa saataisiin lisättyä.

Jatkotutkimusta painumisesta olisi järkevää suorittaa eri puulajeille, jotta niiden väliset mahdolliset erot saataisiin selville. Erot olisivat todennäköisesti kuitenkin verrattain pieniä. Ero aiheuttaisi Excel-laskurissa käytettävä kuutiokohtainen paino. Mäntysahahakkeelle käytettiin painoa 430 kg/m<sup>3</sup>. Kuusisahahake on mäntyä kevyempää, sillä samassa tutkimuksessa sen kuivatuoretiheydeksi määritettiin 404 kg/m<sup>3</sup> ja koivuviuluhakkeelle 496 kg/m<sup>3</sup>. (Verkasalo & Lindblad, 1999) Sahahakkeen lisäksi omat kuivatuoretiheydet on määritetty kuitupuuhakkeelle. Mäntykuitupuuhakkeen kuivatuoretiheys on 409 kg/m<sup>3</sup> Etelä-Suomessa ja 395 kg/m<sup>3</sup> Pohjois-Suomessa. Kuusikuitupuuhakkeen Etelä-Suomen kuivatuoretiheys on 408 kg/m<sup>3</sup> ja Pohjois-Suomen 393 kg/m<sup>3</sup>. Koivukuitupuuhakkeella kuivatuoretiheys on puolestaan 494 kg/m<sup>3</sup> Etelä-Suomessa ja 481 kg/m<sup>3</sup> Pohjois-Suomessa. (Verkasalo & Lindblad, 2001) Kuutioiden painojen muutokset vaikuttavat Excel-laskurissa painumisprosenttiin. Taulukoiden painumaprosentit laskisivat noin 1–2 prosenttia, jos käytössä olevaa kuutiokohtaista painoa laskisi. Ero näkyisi kuitenkin vasta korkeammissa kasoissa, koska painumaprosentit on määritetty yhden prosentit tarkkuudella eikä matalammissa kasoissa ehdi tapahtua merkittävää eroa painon kertymisessä, jos ero kuutiokohtaisissa painoissa on vain noin 1–50 kg. Kuutiokohtaiset painot olisi mahdollista määrittää myös itse testien yhteydessä.

Kasoissa tapahtuvaa painumista työkoneiden alla on hyvin vaikeaa ottaa huomioon. Työkoneiden painot vaihtelevat ja koneiden ajoreitit kasalla voivat vaihdella. Koneiden painon lisäksi koneet aiheuttavat värinää, joka mahdollisesti lisää painumista. Tämän opinnäytetyön tuottamat painumataulukot eivät päde kasaan, jonka päällä ajetaan aktiivisesti työkoneilla.

## 5.2 Painumakerroin ja taulukot

Painumataulukoiden prosentit yritettiin aluksi määrittellä rakentamalla Excel-laskuriin jokaista leveyttä ja korkeutta vastaava kasa. Menetelmä oli hidas ja se antoi vääristyneitä tuloksia. Kasojen kaltevuus pysyy Excel-laskurissa vakiona, joten kasojen leveyden vaihtelua oli vaikea toteuttaa. Leveyden vaihtelu johtikin tällä menetelmällä tilanteeseen, jossa kasojen sivut ja niiden alhaisemmat painumaprosentit muuttivat koko kasan painumaprosenttia alhaisemmaksi. Tällaista ei oikeasti tapahdu, sillä korkeuden pysyessä samana ja kasan kaventuessa kasan kaltevuuskulma jyrkkenee. Kaltevuuskulman jyrkentyessä suurempi osa hakkeesta on suuremman paineen alaisuudessa. Matalammissa kasoissa suuremman leveyden saavuttamiseksi kasoista joutui laskurissa tekemään litteitä. Taulukoiden prosentit määriteltiin lopuksi vetämällä kuvaaja 2 metriä leveästä kasasta 38 metriä leveään kasaan ja lopuksi vielä 200 metriä leveään kasaan. Tämä menetelmä antoi luotettavampia tuloksia. Excel-laskuri ei kuitenkaan sovellu hyvin eri kokoisten kasojen tekoon, koska kasojen kaltevuuskulmat pysyvät vakiona. Painumataulukossa näkee, miten korkeimmilla kasoilla painumaprosentit pienenevät kasojen saavuttaessa 38 metrin leveyden, mutta lähtevät taas tasaiseen nousuun 40 metrin jälkeen. Matalammissa kasoissa painumaprosenteissa ei pääsääntöisesti tapahdu muutosta kasojen leventyessä. Tämä selittyy juuri kasojen kaltevuuskulmilla. Kapeammat kasat ovat huomattavasti pystysuorempia, joka tarkoittaa, etteivät kasat leviä niin paljoa. 40 metrin jälkeen kasoissa on niin paljon haketta paineen alaisuudessa, että painumaprosentti lähtee taas kasvuun. Excel-laskurin heikkous on siis se, ettei siihen rakennettavien kasojen kaltevuuskulmia pysty muokkaamaan.

Painumataulukkoja tehtiin kaksi, koska leveämmille kasoille tarkoitettu taulukko ei anna tarkimpia mahdollisia tuloksia alle 40 metriä leveille kasoille. Yli 8 metriä korkeissa kasoissa tapahtuu verrattain suurta painumaprosentin vaihtelua 38 metriin saakka, jota 10 leveysmetrin tarkkuudella tehty taulukko ei pysty ottamaan kunnolla huomioon. Yli 40 metriä leveille kasoille tarkoitettu taulukko on kuitenkin riittävän tarkka kuvaamaan painumista kasoissa, jotka ovat yli 40 metriä leveitä, koska painumaprosentin kasvu on näissä tasaisempaa. Taulukoita pystyy tarvittaessa jatkamaan leveyssuunnassa, mutta korkeussuunnassa jatkaminen perustuisi lähinnä arvioon, koska hydrauliprässillä suoritetuissa testeissä käytetyt paineet eivät riitä kuvastamaan yli 19 metriä korkeiden

kasojen paineen jakautumista. Taulukoiden perusoletuksena on, että kasat olisivat kartioita. Täysin kartiot hakekasat ovat kuitenkin harvinaisia. Kasan mahdollisten kaltevuuskulmien määrittämisestä ei löytynyt lähteitä, joten painumaprosentti määritettiin taulukoiden jokaiseen ruutuun. Korkeuksissa ja leveyksissä joudutaan käyttämään keskiarvoja, jos kasa ei ole kartio.

Tulevaisuudessa olisi varmasti mahdollista saada kasojen painumisen määrittäminen osaksi kehystilavuuden määrittäystä. Tämä opinnäytetyö on antanut hyvän kuvan painumisesta metrikohtaisesti, kun kasassa siirrytään syvemmälle. Dronekuvauksen ja laserkeilauksen yhteydessä mitataan kasoista aina korkeus. Mittauksen yhteyteen olisi varmasti mahdollista rakentaa järjestelmä, joka määrittäisi painumisen eri mittauspisteistä eri puolilta kasaa, jos kasan korkeus on tiedossa. Riittävä määrä mittauspisteitä mahdollistaisi myös Excel-laskuria paremman määrittämisjärjestelmän kasan muodosta. Painumataulukon käyttöön ei tarvitsisi näin ollen laskea niin paljon keskiarvoja kasan muodosta. Mittauspisteillä saataisiin eri kaltevuuskulmien kasoillekin helposti määritettyä painumaprosenttiä. Tällä menetelmällä mittauspisteitä pitäisi olla niin paljon, että niistä voitaisiin laskea luotettavasti keskiarvo, joka olisi kasan painumaprosentti.

Laskurit ja taulukot tehtiin yhden prosenttiyksikön tarkkuudella, koska desimaaleiksi muutettaessa luvut muuttuvat pieniksi. Eri korkuisten ja levyisten kasojen painumista kuvaava viivadiagrammi tehtiin yhden desimaalin tarkkuudella, jotta taulukko kuvasi kasojen välisiä eroja paremmin. Taulukoiden tarkkuudessa on syytä huomioida myös muut tarkkuutta heikentävät työvaiheet hakekasojen mittauksissa. Mahdollisia virheitä voi tulla monessa eri vaiheessa kasan mittauksista, joten painumataulukko on riittävän tarkka yhden prosenttiyksikön tarkkuudella. Kasan mittauksista on mahdotonta tai lähes mahdotonta saada kuutiometrillään oikein, joten painumaprosentin pääasiallisena tarkoituksena onkin päästä aikaisempaa lähemmäs kasan oikeaa tilavuutta.

Siiloon määritettyä painumista ei päästy kokeellisesti testaamaan, mutta siiloille tarkoitettun taulukon voi olettaa olevan tarkkuudeltaan verrattavissa kasoille tehtyihin taulukoihin. Siilojen inventointi tapahtuu eri tavalla kuin hakekasojen. Siilojen tyhjentäminen hakkeesta ja uudelleen täyttäminen tiedetyllä määrällä haketta ei ollut mahdollista. Siilot eivät myöskään ole niin ympyrälieriöitä kuin Excel-laskurissa näyttää. Siilojen pohjat ovat yleensä suppilomaisia ja siiloissa olevan hakkeen yläraja ei ole niin tasainen. Siiloihin syötetään haketta yläkautta niin, että päälle muodostuu jonkin verran kasamuodostelmaa. Siiloissa on myös valmistaja- ja mallikohtaisia eroja.

### 5.3 Tulokset

Muuntokerroin, johon oli lisätty painumakerroin, tuotti vertailussa tarkemman tuloksen, kuin aikaisemmin käytössä ollut muuntokerroin. Pelkän muuntokertoimen tuottama tilavuus kasalle jäi kasan tarkkaa tilavuutta alhaisemmaksi. Muuntokertoimessa ei ole huomioitu kasan kokoa, joka vaikuttaa hakkeen tiivistymiseen. Muuntokertoimen ja painumakertoimen yhdistelmällä päästiin tarkempaan tulokseen, mutta tulos oli suurempi kuin kasan oikea tilavuus. Ero ei ole suuri, mutta se voi selittyä joko muuntokertoimen epätarkkuudella tai virheellä painumakertoimen määrittämisessä. Käytössä olevan muuntokertoimen paikkaansa pitävyyden olisi hyvä tarkistaa tuoreilla tutkimuksilla. Painumakertoimen toimivuutta pitäisi testata useampaan kasaan ennen kuin sen toimivuudesta voi olla täysin varma. Varsinkin suurempien kasojen mittaamiseen sen toimivuutta tarvitsisi vielä tarkemmin kokeilla. Suuremmissa kasoissa painumaprosentti kasvaa entisestään, mikä voi johtaa suurempiin virheisiin, jos painumataulukko ei pidä paikkaansa. Jatkotutkimuksilla voisi ottaa selvää myös eri puulajeista koostuvien hakekasojen painumisesta. Testit voisi toteuttaa samalla tavalla, mutta mäntyhakkeen tilalla olisi esimerkiksi koivu- tai kuusihaketta.

Laskukaavojen vertailuun käytetyn kasan annettiin painua noin vuorokauden ajan. Kasan varastointiaika ennen mittausta ei ollut siis pitkä. Pidempi varastointiaika olisi voinut antaa kasalle enemmän aikaa painua, jolloin painumakertoimen ja muuntokertoimen tuottama tulos olisi ollut vielä tarkempi. On vaikeaa arvioida minkä aikavälin painumista painumataulukko kuvastaa, koska painuminen on määritetty taulukkoon puristamalla. Suurin osa painumisesta tapahtuu kuitenkin heti, kun kasa muodostetaan (Janzè, 2014). Hakkeen tiivistymisen seuraaminen massan alla antaisi tarkemman kuvan painumiseen tarvittavasta ajasta. Huomioitavaa on myös hakkeen varastointitavassa. Kasa, johon lisätään jatkuvasti kuljettimilla haketta ja josta samanaikaisesti puretaan syöttöruuvilla haketta, ei painu ajan kanssa samanaikaisesti, kuin kasa, johon ei kosketa sen tekemisen jälkeen. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa olisi kuitenkin järkevää ottaa selvää tarkentuuko painumakertoimen ja muuntokertoimen yhdistelmä, jos kasa saa painua pidemmän aikaa.

Tarkan tilavuuden kasa tehtiin 10 autokuorman perusteella. Kuormista otettiin yhteensä 7 näytettä, joiden keskiarvon perusteella määritettiin koko kasan kuiva-aineprosentti. Tarkan tilavuuden kasasta puhuttaessa on tärkeää muistaa, että kasan tilavuus autokuormien perusteella on niin tarkka kuin tällä menetelmällä on mahdollista, mutta absoluuttisena totuutena sitä ei voi pitää. Menetelmässä on monta vaihetta, joissa voi esiintyä pieniä kiintotilavuuteen vaikuttavia heittoja. Kasan kuiva-aineprosentti voisi olla hieman pienempi tai suurempi, jos näytteet olisi otettu toisesta kohdasta kuormia. Menetelmä on riippuvainen autojen punnitukseen käytettävien siltavaakojen tarkkuudesta. Heitot kuorma- tai

tyhjöpunnituksissa vaikuttavat kuormien nettopainoon. Menetelmä on riippuvainen myös siinä käytettävän muuntokertoimen 2,81 tarkkuudesta, jolla hakkeen massa muunnetaan kiintotilavuudeksi. Menetelmä on kuitenkin riittävän tarkka, jotta sitä voi pitää vertailukohtana kasan tilavuuden muuntokertoimien toimivuudelle.

Opinnäytetyön tuloksissa käytettiin toimeksiantajalla käytössä olevaa muuntokerrointa 0,44. Muuntokerroin toimii perustuksena painumakertoimen toimivuudelle, joten sen oikeellisuus on tärkeää. Muuntokertoimen oikeellisuudesta olisi hyvä tehdä jatkotutkimuksia, koska kertoimen suuruus vaihtelee eri lähteissä ja viimeisimmät tutkimukset löytyvät 1980-luvulta. Opinnäytetyössä olisi saatu tarkempia tuloksia pienemmällä muuntokertoimella, kuten 0,42, joka mainittiin Marjomaan ja Pietarisen raportissa. Opinnäytetyötä tehdessä päädyttiin kuitenkin käyttämään toimeksiantajalla käytössä olevaa muuntokerrointa 0,44, josta löytyi myös sitä tukeva lähde Lindbladin ja Verkasalon tekemästä tutkimuksesta. Muuntokertoimien alkuperää ei kuitenkaan pystytty yhdessäkään lähteessä nimeämään kovin tarkkaan, joka vahvistaa tarvetta uusille tutkimuksille aiheesta.

Painumakertoimen ja muuntokertoimen yhdistelmällä on mahdollista tarkentaa hakekasojen kiintotilavuuslaskentaa. Tässä opinnäytetyössä saadut tulokset olivat lupaavia, mutta laskukaavan toimivuutta testattiin vasta yhteen kasaan. Yhdistelmä vaatii vielä enemmän testaamista useampaan kasaan, ennen kun sen toimivuudesta voi olla varma. Yhdistelmän testaamisessa pitäisi priorisoida suurempia kasoja, joissa virheet aiheuttavat suurempia heittoja kiintokuutioissa.

## Lähteet

Brockbank, R. Huntley, J. Ball, R. (1997) *Contact Force Distribution Beneath a Three-Dimensional Granular Pile*. [tutkimusaineisto] <https://hal.science/jpa-00248530/document>

Cuemath. (n.d.). *Scale Factor*. <https://www.cuemath.com/geometry/scale-factor/>

Crompton. (n.d.). *Hakekasa* [kuva]. <https://crompton.com/industries/pulp-paper/>

Fuller, W. (1985). *Chip pile storage – a review of practices to avoid deterioration and economic losses* [tutkimusaineisto].

[https://www.researchgate.net/publication/255091186\\_Chip\\_pile\\_storage\\_-\\_a\\_review\\_of\\_practices\\_to\\_avoid\\_deterioration\\_and\\_economic\\_losses](https://www.researchgate.net/publication/255091186_Chip_pile_storage_-_a_review_of_practices_to_avoid_deterioration_and_economic_losses)

Fuller, W. (2004). *Chip preparation*

<https://enviro2.doe.gov.my/ekmc/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=84446>

Gray, K. & Ingram, R. (1984) *Control and measurement of chips* [tutkimusaineisto]

<https://www.bing.com/ck/a?!&&p=1b72d5e9664c6a51JmltdHM9MTcwNzk1NTlwMCZpZ3VpZD0xMWRhNDhiOS03ZGU4LTY2ODMtMTE5Yi01OTk4N2MzNzY3MGQmaW5zaWQ9NTE5MQ&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=11da48b9-7de8-6683-119b-59987c37670d&psq=kyle+gray+ron+ingram&u=a1aHR0cHM6Ly9pci5saWJyYXJ5Lm9yZWd1bnN0YXRILmVkdS9kb3dubG9hZHMvOTU5M3YxMTI5&ntb=1>

Hartler, N. (1996). Achievement and significance of optimal chip quality. *Tappi Journal*. 72(2), 259–263. <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/96/FEB/96FEB259.aspx>

Howell, T. Singh, K. Smart, L. (2018) *Structure from Motion Techniques for Estimating the Volume of Wood Chips* [tutkimusaineisto]

[https://www.researchgate.net/publication/326234920\\_Structure\\_from\\_Motion\\_Techniques\\_for\\_Estimating\\_the\\_Volume\\_of\\_Wood\\_Chips](https://www.researchgate.net/publication/326234920_Structure_from_Motion_Techniques_for_Estimating_the_Volume_of_Wood_Chips)

IQS Directory. (n.d.). Hydraulic Press.

<https://www.iqsdirectory.com/articles/hydraulic-press.html>

- Interpine. (2018). *3D-mallinnus hakekasasta* [kuva]. <https://interpine.nz/make-a-difference-with-technology/>
- Karjalainen, M. & Bergström, D. (2018). *Particle size analysis of wood chips* <https://biofuelregion.se/wp-content/uploads/2018/12/Infosheet-No-37-Particle-Size-Analysis-of-Wood-Chips.pdf>
- Khan Academy. (n.d.). *What is pressure?* <https://www.khanacademy.org/science/physics/fluids/density-and-pressure/a/pressure-article>
- Laskin.fi. (2024). *Lieriön tilavuus ja pinta-ala*. <https://www.laskin.fi/lierion-tilavuus-ja-pinta-ala>
- Liffman, K. Nguyen, M. Metcalfe, G. Cleary, P. (2001) *Forces in piles of granular material: an analytic and 3D DEM study*. [tutkimusaineisto] [https://www.researchgate.net/publication/225417593\\_Forces\\_in\\_piles\\_of\\_granular\\_material\\_An\\_analytic\\_and\\_3D\\_DEM\\_study](https://www.researchgate.net/publication/225417593_Forces_in_piles_of_granular_material_An_analytic_and_3D_DEM_study)
- Luonnonvarakeskus. (n.d.) Tilastotietokanta. Metsäteollisuuden puunkäyttö toimialoittain. [https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE\\_04%20Metsa\\_04%20Talous\\_07%20Puun%20kaytto\\_08%20Metsateollisuuden%20puunkaytto/02\\_metsateol\\_puunk\\_toimiala.px/table/tableViewLayout2/](https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_04%20Metsa_04%20Talous_07%20Puun%20kaytto_08%20Metsateollisuuden%20puunkaytto/02_metsateol_puunk_toimiala.px/table/tableViewLayout2/)
- Maa- ja metsätalousministeriö. (n.d.). *Puupolttoaineet energian tuotannossa*. <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/puun-energiakaytto>
- Marjomaa, J. & Pietarinen, H. (1996) *Hakkeen mittaustilasto varastomuodostelmassa*. Metsätehon raportti 6.
- McDonald, T. & Twaddle, A. (2000) *Industry trends in chip storage and handling* [tutkimusaineisto] [https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/uncaptured/ja\\_mcdonald010.pdf](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/uncaptured/ja_mcdonald010.pdf)
- Ong, B. (2016). *Using Remote Sensing for Quantity Analysis of Chip Pile Inventory in Mill Yards*. [pro gradu -tutkielma, Lakehead University]. <https://knowledgecommons.lakeheadu.ca/handle/2453/826>
- Ooi, J. Ai, Z. Zhong, Z. Chen, J.F. Rotter, J.M. (nd.) *Progressive pressure measurements beneath a granular pile with and without base deflection*. [tutkimusaineisto] <https://era.ed.ac.uk/bitstream/handle/1842/4616/Appendix.pdf>

Opinkirjo. (n.d.). *Aineiston kerääminen ja tutkimusmenetelmät*.

<https://opinkirjo.fi/tutkimuksen-perusteet/aineiston-kerääminen-ja-tutkimusmenetelmät/>

Paul Janzè. (2014) *Determining the natural compaction of a biomass pile*.

(<https://www.advancedbiomass.com/determining-the-natural-compaction-of-a-biomass-pile/>)

Paul Janzè. (2014). *Pile compaction calculation, 2*. [kuva].

<https://www.advancedbiomass.com/determining-the-natural-compaction-of-a-biomass-pile/>

Puuhuolto. (2018). *Kuivamassan otantamittaus* <https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus->

[tehtaalla/muut-otantaan-perustuvat-menetelmat/kuivamassan-otantamittaus/](https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus-)

Rieppo, K. & Korpilahti, A. (2001) *Kuitupuun tehdaskäsittely ja sen kehittäminen*. Metsäteho

SCAN CM 40:01. (2001). *Wood chips for pulp production*. Kemesta ry.

Sipi, M. (2006) *Sahatavara-tuotanto*. Opetushallitus

Sixta, H. (2006) *Handbook of pulp*. Wiley-VCH

Söderholm, M. Hynynen, L. & Muukkonen, P. (2022) *Erilaisia diagrammityypppejä*.

[tutkimusaineisto] <https://www.finna.fi/L1Record/aoe.2404?sid=3484953628>

Teknosavo. (2018). *TEKNOSAVO UUDISTI CHIPSMART™ 3D:N*.

<https://teknosavo.fi/2018/07/06/tekno-savo-uudisti-chip-smart-3dn/>

Uusitalo, J. & Kivinen, V. (2023) *Metsäteknologian perusteet*. Tapio

Uusvaara, O. & Heiskanen, V. (1975) *Sahanhakkeen valmistus, käsittely, mittaus ja laadun määrittäminen Suomessa*. Metsäntutkimuslaitos

Uusvaara, O. & Verkasalo, E. (1987) *Metsähakkeen tiiviys ja muita teknisiä ominaisuuksia*.

[tutkimusaineisto] <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/522266>

Varis, R. (2017) *Sahateollisuus*. Kirjakaari Oy

Verkasalo, E. & Lindblad, J. (1999) Teollisuushakkeen kuiva-tuoretiheys ja painomittauksen muuntokertoimet. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/521378>

Verkasalo, E. & Lindblad, J. (2001). *Kuitupuuhakkeen tiheys*. [tutkimusaineisto] <https://jukuri.luke.fi/bitstream/10024/522592/1/metla-201211127130.pdf>

Vilka, H. (2007). *Tutki ja mittaa – Määrällisen tutkimuksen perusteet*. Tammi.

VKT-Tuotanto. (n.d.). Punnituspalkit [kuva]. <https://www.vkt-tuotanto.fi/tuotteet/vuokraus/>

VKT-Tuotanto. (n.d.). *Vuokraus*. <https://www.vkt-tuotanto.fi/tuotteet/vuokraus/>

Yu, Y. Zhang, J. Zhang J. Saxèn, H. (2018) DEM and experimental studies on pellet segregation in stockpile build up. [tutkimusaineisto] <https://research.abo.fi/ws/portalfiles/portal/25123826/DEM+and+experimental+studies+on+pellet+segregation+in+stockpile+build-up.pdf>