

# KEVYTSAVEN PURISTUSLUJUUS

Toni Siltala

Opinnäytetyö  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Insinööri (AMK)  
2023

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Insinööri (AMK)

---

<b>Tekijä</b>	Toni Siltala	<b>Vuosi</b>	2023
<b>Ohjaaja</b>	Matti Moilanen		
<b>Toimeksiantaja</b>	Arkkitehtitoimisto Pääatalo Oy		
<b>Työn nimi</b>	Kevytsaven puristuslujuus		
<b>Sivu- ja liitesivumäärä</b>	50 + 1		

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia kevytsaven puristuslujuutta osana toimeksiantajan kehityshanketta, joka liittyy rakennuksen seinäelementtien eristämiseen kevytsavella. Työssä pyrittiin selvittämään erilaisten raaka-aineiden, niiden seossuhteiden, ympäröivien olosuhteiden sekä tilavuuspainon vaikutusta kevytsaven kuivalujuuteen. Näiden muuttujien vaikutusta tutkittiin testaamalla laboratoriossa sähköhydraulisella koestuspuristimella koekappaleiden lyhytaikainen puristuslujuus.

Tuloksien avulla koekappaleille määritettiin standardin SFS-EN ISO 29469:2022 mukainen puristuslujuus 10 % puristumalle ts. muodonmuutokselle. Lisäksi niille määritettiin 2,5 % puristuman mukainen puristuslujuus, jonka arvioin olevan lähellä materiaalin todellista puristuskapasiteettia käyttötilanteessa.

Lujuusominaisuuksien selvittäminen luo lisäedellytyksiä kevytsavi- ja elementtitekniikan kehittymiselle. Puristuslujuuden avulla on lisäksi mahdollista tehdä alustavaa arviointia materiaalin taivutus- ja vetolujuudesta, joiden testaaminen rajattiin tämän työn ulkopuolelle. Erilaisia seossuhteita testaamalla saatiin hyödyllistä tietoa myös kevytsaven elastisuudesta.

Työn haasteet liittyivät lujuusominaisuuksista saatavaan vähäiseen lähdeaineistoon sekä koekappaleiden valmistukseen. Niiden valmistus kosteasta kevytsavimassasta vaadittavaan mittatarkkuuteen osoittautui haastavaksi. Epähomogeenisen massan tiivistäminen valumuottiin konkretisoi itselleni sen oleellisen puolen kevytsavirakenteesta, että se on aina rakenteeltaan epätasaisesti tiivistynyttä. Tasaisuutta voidaan parantaa massan valmistuksen sekä seinän eristystyön vaikoitua ja laadunvalvontaa kehittämällä.

Tiedonhakuun työssä on käytetty alan kirjallisuutta ja artikkeleja. Työn edetessä selvisi uutta tietoa savilaatujen eriävistä reagoitavoista nesteytysaineena käytetyn soodan kanssa, jonka vuoksi testitulokset jättivät osaltaan tulkinnan varaa. Työn tuloksista voidaan katsoa olevan hyötyä niin myöhemmälle kevytsaven lujuustutkimukselle, kuin kaikille aiheesta kiinnostuneille alan toimijoille.

**Avainsanat** Kevytsavi, puristuslujuus, saviliuos, kuituhamppu, päistäre, eriste, tiksotropia

Degree Programme in Civil Engineering  
Bachelor of Engineering

---

<b>Author</b>	Toni Siltala	Year	2023
<b>Supervisor</b>	Matti Moilanen		
<b>Commissioned by</b>	Arkkitehtitoimisto Päätaalo Oy		
<b>Subject of thesis</b>	Compressive Strength of Light Hemp-Clay		
<b>Number of pages</b>	50 + 1		

---

Examining the compressive strength of light hemp-clay was the goal of this thesis study. The study aimed to find out the effect of different raw materials, their mixing ratios, surrounding conditions and volume weight on the dry strength of the examined material.

The material tests of the study were performed by testing the short-term compressive strength of the test pieces with an electro-hydraulic testing machine in a laboratory. According to the test results, the compressive strength according to the standard SFS-EN ISO 29469:2022 was determined for 10% strain. For the test pieces also compressive strength corresponding to 2,5% strain was determined, which was estimated to be close to the material's compressive capacity in real use.

The most challenging part of the study was to search for information about the strength properties of the material and to produce test pieces. Making them from moist light-clay mass to the required dimensional accuracy proved to be challenging. Compacting the inhomogeneous mass into the casting mold made it concrete that light-clay is always compacted unevenly. The uniformity of composition can be improved by developing mass production and wall insulation work methods and quality control.

As the study progressed, new information was gained about the various reaction abilities of clay grades with soda which is used as a liquefaction agent. That is why the test results left some room for interpretation. The results of the study can be considered useful for the subsequent light hemp-clay strength research and for all operators in this field, who are interested in the researched topic.

**Key words** Light hemp-clay, compressive strength, clay solution, fiber hemp, insulation, thixotropy

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	TOIMEKSIANTAJA JA HANKE .....	8
3	KEVYTSAVI.....	9
3.1	Kevytsavesta yleisesti.....	9
3.2	Käyttökohteet.....	9
3.3	Tekniset ominaisuudet.....	11
3.3.1	Lujuus.....	11
4	KEVYTSAVEN AINESOSAT .....	13
4.1	Vesi.....	13
4.2	Savi.....	14
4.2.1	Saviliuos.....	15
4.2.2	Savilaadut .....	16
4.3	Sooda .....	18
4.4	Kuituhamppu.....	19
4.4.1	Päistäre .....	20
4.5	Sellueriste .....	22
5	KOEKAPPALEIDEN VALMISTAMINEN .....	23
5.1	Muotin ja kevytsavimassan valmistus .....	23
5.2	Koekappaleiden valmistus .....	24
6	KOESTUS JA TULOKSET .....	27
6.1	Koestus.....	27
6.2	Kevytsavi puristettuna.....	28
6.3	Tulokset .....	29
6.3.1	10 % ja 2,5 % puristuma .....	30
6.4	Tulosten analysointi .....	32
6.4.1	Saven laatu .....	32
6.4.2	Päistäreen laatu .....	35
6.4.3	Massan seisotusaika.....	35
6.4.4	Tilavuuspaino .....	36
6.4.5	Kuidun suunta .....	36
6.4.6	Pakkasrasitus.....	37

---

6.4.7	Soodan määrän lisäys.....	38
6.4.8	Lisähuomioita .....	39
6.5	Virhetekijät .....	41
7	KEHITYSKOhteita .....	43
8	RAKENNETEKNIISIÄ HUOMIOITA.....	45
8.1	Elementtitekniikka.....	45
8.2	Kevytsavi osana rakennuksen runkoa .....	45
9	POHDINTA.....	47
	LÄHTEET.....	48
	LIITTEET .....	50

## ALKUSANAT

Tekijälle entuudestaan tuntemattomasta aiheesta toteutettu opinnäytetyö on vaa-  
tinut ohjeistukseen turvautumista niin tiedonhakuun, kuin käytännön toteutuk-  
seenkin liittyen. Haluan kiittää arkkitehtitoimisto Juha Päätaalo Oy:tä todella mie-  
lenkiintoisesta työn aiheesta sekä hyvästä yhteistyöstä ja tuesta matkan varrella.  
Savirakentajat Sami Kiviaho ja Matti Hautala ovat olleet myös isossa roolissa työn  
toteutusta suunniteltaessa. Lehtorit Matti Moilanen sekä Virpi Peitso ovat omalla  
ohjauksellaan tukeneet opinnäytetyön toteutusta, mistä heitä kiittäminen. Läm-  
min kiitos opinnäytetyön toteuttamisen mahdollistamisesta kuuluu myös Aalto-  
yliopiston rakennustekniikan laitoksen yli-insinööri Veli-Antti Hakalalle sekä väi-  
töskirjatutkija Johanna Hyrkäkselle.

## 1 JOHDANTO

Kevytsaven puristuslujuuden tutkimisesta syntyi opinnäytetyöni aihe kiinnostuksestani saven lujuusominaisuuksiin ja kartoittaessani työelämän tarpeita luonnonmukaiseen rakentamiseen liittyen. Työni toimeksiantajalla oli tarjota mielenkiintoinen aihe, joka on ajankohtaisuuden lisäksi hyödyllinen koko toimialalle. Rakennuksia suunniteltaessa materiaalien tekniset ominaisuudet ovat kaiken suunnittelun lähtökohtana, joten yksi tapa edistää luonnonmukaista rakentamista on näitä ominaisuuksia tutkimalla sekä kehittämällä.

Opinnäytetyössä käsitellään kuituhampun päistäreestä valmistettua kevytsavea. Työn sisältö käsittää yleistä tietoperustaa kevytsavesta sekä työssäni tutkitun kevytsaven raaka-aineista. Suurin osa työn resurssoinnista kohdistuu koekappaleiden valmistamiseen, puristuskokeisiin ja koetulosten analysointiin.

Rakennuksen lämmöneristeenä toimivalle kevytsavelle kohdistuu erilaisia rasituksia ja etenkin elementtituotannossa niitä todennäköisesti syntyy lisää varastoinnin ja kuljetuksen yhteydessä. Kevytsaven lämmöneristävyttä voidaan parantaa sitä keventämällä, mutta tämä edellyttää materiaalin lujuuden kehitystyötä, joka lisää tarvetta materiaalin lujuusominaisuuksien tutkimiselle. Työssäni käsitteellä lujuus tarkoitetaan kevytsaven lyhytaikaista puristuslujuutta, ellei toisinkin mainita. Opinnäytetyön loppuosiossa arvioin tutkimustulosten perusteella kevytsaven lujuusominaisuuksien huomioon ottamista rakennesuunnittelussa sekä mahdollisten lisätutkimuksien tarvetta kevytsavelle.

## 2 TOIMEKSIANTAJA JA HANKE

Arkkitehti Juha Päätaalo toimii yrittäjänä ja savirakentamisen edistäjänä. Opinnäytetyö on osa yrityksen vetämää kehityshanketta, jossa pyritään kehittämään tuotantomenetelmä kevytsavielementeille, joista kehitetään eteenpäin konsepti asuinrakentamiseen. Kehityshankkeen yhteistyökumppaneita ovat mm. elementit valmistava Ruukin saha ja höyläämö Ky sekä kuituhampun päistäreerä jalostava Hemka Oy.

Lähtökohtana kevytsaven kehitystyössä on ollut alhaisen savipitoisuuden saavuttaminen kuitenkin säilyttämällä materiaalilla riittävä koossapysyvyys ts. kuivalujuus. Alhaisen vesimäärän saavuttaminen massan valmistuksessa on toinen tärkeä kehitystyön tavoite.

Kevytsavielementti muistuttaa rakenteeltaan pääosin tavanomaista rankarakenteista ulkoseinää, mutta poikkeuksena pintaverhouksen toteutus sekä seinältä vaadittava eristepaksuus. Kantavana runkona toimivan rankarakenteen väleihin kevytsavi sullotaan sekä tiivistetään (kuvio 1) ja elementti kuivataan hyvin tuuletuvassa tilassa. Kevytsavimassan kuivumisella on merkittävä rooli seinäelementin valmistusprosessin suunnittelussa ja kestossa. Massan kuivumisaika sekä kuivumiskutistuma on kevytsaven kuivalujuuden ohella merkittävä tekijä tuotekehityksessä.



Kuvio 1. 20 cm paksu seinäelementti kuivausalustan päällä. (Päätaalo Oy 2023.)



### 3 KEVYTSAVI

#### 3.1 Kevytsavesta yleisesti

Kotimaiseen rakennuskulttuuriin kevytsaven ei katsota perinteisesti kuuluvan ja sen käyttö onkin yleisempää Keski-Euroopassa ja etenkin Saksassa. Luonnollinen selitys tälle on varmasti etelän pidempi kesäkausi, joka mahdollistaa savirakenteille tyypillisen hitaan kuivumisen sujuvammin. Myös erot rakennusmateriaalien saatavuudessa varmasti vaikuttavat osaltaan eri rakennuskulttuurien syntyyn. Kevytsavirakentaminen kehitettiin pohjois-Saksassa 1930-luvulla (Westermarck ym. 1998, 26). Saksalaisissa savirakentamismääräyksissä käsitellään kevytsavea ensimmäisen kerran vuonna 1944 (Volhard & Westermarck 1994, 22–23).

Kevytsavi valmistetaan saviliuoksesta sekä kuidusta, joka on perinteisesti oljen tai muun vastaavan kasvin korsiaimesta. Korsiaines toimii materiaalia keventävänä ainesosana ja etenkin sen huokosten sisältämä ilma tekee siitä lämpöä eristävän rakennusaineen.

#### 3.2 Käyttökohteet

Tyypillisin menetelmä kevytsavirakenteiden toteuttamiselle on sullomismenetelmä, jossa valmistettu massa tiivistetään liukuvalun tapaan rakennuksen kantavan ranka- tai ristikko rakenteiden väliin (kuvio 2). Tämä toteutustapa edellyttää valumuottien ja tukien rakentamista rakennuksen rungon yhteyteen sekä huomattavan pitkän kuivumisajan huomioimista rakennushankkeessa. Menetelmälle ominainen pitkä kuivumisaika rajoittaa ulkoseinän paksuuden noin 30 cm:iin hie-man ympäröivien olosuhteitten mukaan. (Volhard & Westermarck 1994, 54–65.)

Kevytsavirakenteita toteutetaan myös valmiiden kevytsavesta puristettujen rakennuskappaleiden avulla, kuten harkkoja, tiiliä ja laattoja käyttämällä. Kevytsaviharkot muurataan savi- tai kalkkilaastilla tiililimitystä käyttäen. Harkkoja voidaan kuormittaa vain omalla painollaan ja ne on muurattava pystykuorman nähden sen suuntaisesti, miten ne on valmistusvaiheessa puristettu. (Volhard & Westermarck, 1994, 83.)

Usein kevytsavirakenteen ulkopinnan sääsuojaus toteutetaan rappauksella, joka on yleisimmin kuitua sisältävää kalkkilaastia. Kevytsavipinta on toimiva rappausalusta oikein toteutetuilla työmenetelmillä, myös rakennuksen sisäpuolella. (Volhard & Westermarck 1994, 100–104.) Vaihtoehtoisesti sääsuoja voidaan toteuttaa ulkovuorilaudoituksella tai vastaavalla, jolloin kevytsavipinnan tuulenpitävyyttä on mahdollista parantaa esim. savilaastikäsitteilyllä (Volhard & Westermarck 1994, 98).



Kuvio 2. Kevytsavella liukuvalettu seinärakenne. (Timberhomes 2023.)

### 3.3 Tekniset ominaisuudet

Kevytsaven teknisiin ominaisuuksiin kuten lämmönjohtavuuteen, lämpökapasiteettiin, ilmanläpäisevyyteen, vesihöyrynvastukseen, palonkestoon, lujuuteen sekä elastisuuteen vaikuttaa eniten kolme oleellista tekijää. Kevytsaven kuivatiheydellä ja käytetyn kuidun ominaisuuksilla voidaan oleellisesti vaikuttaa materiaalin tekniseen toimivuuteen. (Volhard & Westermarck 1994, 121–136.) Kasvan saven eli ts. saveksen määrän voidaan katsoa lisäävän lujuutta, lämpökapasiteettia ja palonkestoa sekä vähentävän elastisuutta.

Oljesta valmistetun kevytsaven lämmönjohtavuusarvot ovat välillä 0,1–0,47 W/m<sup>2</sup>\*K kuivatiheyden välillä 300–1200 kg/m<sup>3</sup>. (Volhard & Westermarck 1994, 126.) Toimeksiantajan teettämien tutkimusten mukaan hampun päistäreestä valmistetun kevytsaven lämmönjohtavuusarvo on 0,077 W/m<sup>2</sup>\*K luokkaa kuivatiheydellä 320 kg/m<sup>3</sup>. Asuinrakennuksen ulkoseinärakenteelta vaadittu U-arvo 0,17 W/m<sup>2</sup>\*K saavutetaan noin 400 mm:n eristepaksuudella hieman seinän pintarakenteiden vaikutuksesta riippuen.

Kevytsaven lämmöneristävyys voidaan vaikuttaa seinäpinnan ilmatiiveyden sekä tuulensuojauksen ja ulkoverhouksen valinnalla. Lisäksi kun kevytsaven kuivatiheyttä alennetaan huomattavissa määrin, on huomioitava eristeen sisäisen konvektion eli ilmavirtausten lisääntyvä vaikutus todelliseen lämmöneristävyys. TTY:n tutkimuksessa konvektion on todettu heikentävän eristeen lämmöneristyskykyä merkittävästi sen mukaan, miten eristeen rakenne, kuitujen ominaisuudet sekä mahdollinen tuulensuojalevytys mahdollistavat ilmavirtausten liikkeen eristetilassa (Kivioja & Vinha 2020, 8).

#### 3.3.1 Lujuus

Kevytsaven lujuusominaisuuksista on heikosti saatavilla tietoa ja savirakentamisen kirjallisuus käsittää kevytsaven lähes poikkeuksetta oljen sekä saven sekoituksena. Materiaalin lopulliseen kuivalujuuteen on mahdollista vaikuttaa hyvin monella valmistusprosessin muuttujalla, kuten korsiaineksen käsittelyllä. Murskattu korsi puristuu kasaan suhteessa vähemmän kuin pyöreänä säilytetty ja

sisältään ontto korsiaines. Lujuuteen liittyen voidaan tehdä muutamia yleisen tason oletuksia, joita on tosin todennettava materiaalitestauksen avulla.

Olennaisia muuttujia kevytsaven lujuuden kannalta on kuidun lujuus ja koko sekä saven liimautuvuus kuidun kanssa. Liimautuvuuteen vaikuttaa oleellisesti saven koostumus, mikä on todettavissa, kun erilaisia savilaatuja käsittelee ja vertailee niiden kuivumistartuntaa erilaisiin pintoihin. Oleellisena kevytsaven lujuuteen vaikuttavana muuttujana voidaan pitää myös sen lopullista kuivatiheyttä ja kuivumisen aiheuttamaa halkeilua saven mikrorakenteeseen. Työn aikana tekemiäni havaintojen perusteella kevytsaven kuivalujuus syntyy tasapainottelemalla saven plastisuuden, kuivumiskutistuman sekä kuidun laadun, massan tiivistystekniikan ja käytettyjen lisäaineiden välillä. Näitä asioita tuon esille testitulosten analysointiosiossa.

## 4 KEVYTSAVEN AINESOSAT

Tässä työssä käytetty kevytsavi koostuu seuraavista ainesosista. Seossuhteet on ilmoitettu painoprosentteina ja hieman muuteltuna toimeksiantajan tuotekehityksen suojaamiseksi.

- vesi	53 %
- savi	26 %
- sooda	0,1 %
- päistäre	20 %
- sellueriste	0,8 %

### 4.1 Vesi

Vettä esiintyy savessa kolmella eri tavalla. Kidevesi on kemiallisesti sitoutunutta ja kiinnittynyt savihiukkasten kiderakenteisiin. Tämä poistuu vasta kun savea kuumennetaan yli 600 °C:een. Ontelovesi on saven sisäisiin huokosiin ja onteloihin jäänyttä vettä saven kuivuessa ja saavuttaessa tasapainokosteutensa kuivassa olosuhteessa. Savihiukkasten välistä haihtumaan pääsevää vettä kutsutaan vapaaksi vedeksi. Vapaan veden määrä vaikuttaa saven olomuotoon kiinteän, plastisen ja juoksevan olomuodon välillä. Tämän haihtuminen aiheuttaa savirakenteille tyypillistä kuivumiskutistumaa. (Jylhä-Vuorio 2020, 60.)

Kemiallinen vuorovaikutus veden ja saven välillä perustuu niiden sähköiseen varaukseen ja niiden keskinäisen käyttäytymisen katsotaan kuuluvan kolloidikemian alueeseen. Savihiukkasten negatiivinen pintavaraus ja vesimolekyylin positiivisesti varautuneet osat mahdollistavat näiden tarttumisen toisiinsa. Tämä saa aikaan savihiukkasten liikkeen mahdollistavan vesikalvon näiden pinnoille. Saviliuoksen reologiset ominaisuudet kuten viskositeetti ja tiksotropia määräytyvät pitkälti savihiukkasten pinnoilla vallitsevien sähköisten varausten mukaan. (Jylhä-Vuorio 2020, 60–61.)

## 4.2 Savi

Mineraaleista koostuvaa maa-ainesta, jonka raekoko on maksimissaan 0,002 mm, kutsutaan savilajikkeeksi tai savekseksi. Muodoltaan saves on pitkän ja ohuen hiutaleen kaltainen ja se on syntynyt eri kivilajeista kemiallisesti ja fyysisesti rapautumalla. (Volhard & Westermarck 1994, 26.) Savi on veden ja savilajikkeen seos, joka luokitellaan hienorakeiseksi maalajiksi ja usein se voi sisältää savesta karkeampaa silttiä tai hiesua sekä humusta tai kaikkia näitä. Humus on eloperäistä maalajia, turvetta tai liejua. Maalaji, joka sisältää savilajiketta vähintään 30 %, kutsutaan saveksi ja vähintään 50 %, lihavaksi saveksi. (Jääskeläinen 2011, 20–23.)

Maassamme esiintyvien savilajikkeiden syntymiseen ja koostumuksiin on vaikuttanut jääkauden eri vaiheet, kuten jäätiköiden sulamisvirrat ja jäätikön sulamisen jälkeiset maankohoamiset. Maaperässämme lihavimmat ns. sekundäärisavet sijoittuvat rannikkoseudulle. Niiden synty on tapahtunut jääkauden jälkeen syntyneiden maakerrosten ja hiukkasten huuhtouduttua vesipintojen laskeutumisessa. Merkittävä ajanjakso savikerrosten muodostumisessa on ollut ns. Yoldiameren aika noin 11600 vuotta sitten. Tuolloin Baltian jäjäjärvi yhdistyi valtameriin ja veden suolapitoisuus kasvoi. Muutos sai aikaan homogeenisiä savikerrostumia suolaisen veden reagoidessa savihiukkasten kanssa ja saaden ne toisiinsa tarttuen laskeutumaan nopeammin pohjaan. (Jääskeläinen 2011, 329–333.)

Pohjalle laskeutuneet mineraalihiukkaset ovat pinnaltaan negatiivisesti varautuneita ja hiukkasten kärkiosissa varaus on keskiosaa suurempi. Mineraalihiukkasten tarttumistapa toisiinsa on pitkälle menevää kemiaa ja fysiikkaa. Tähän liittyy eri mineraalien kemialliset ominaisuudet, että saostumisvaiheessa vedessä olevat muut ainesosat. Hiukkasten liittymistä tapahtuu vedessä olevien ionien avulla, mutta myös muiden sähköisten ja kemiallisten ilmiöiden vaikutuksesta. (Jääskeläinen 2011, 21.)

Pohjoismaissa yleisimmin esiintyvää jäätikköperäistä savilaatua kutsutaan punasaveksi. Luonnossa harmaana esiintyvässä savilaadussa suhteellisen korkea 5–9 %:n rautaoksidipitoisuus aiheuttaa poltetuissa savituotteissa tälle savilaadulle

tunnusomaisen punaisen värin (taulukko 1). Punasavi on koostumukseltaan pääosin hienontunutta ja lajittunutta graniittia sekä orgaanista ainesta. (Jylhä-Vuorio 2020, 48.) Punasavi kuuluu syntyvaltaltaan sekundäärisiin savilaatuihin, joka on muodostuessaan voinut kulkeutua pitkiäkin matkoja (Jylhä-Vuorio 2020, 38.).

Taulukko 1. Suomalaisen saven keskimääräinen kemiallinen koostumus. (Volhard & Westermarck 1994, 27.)

SiO <sub>2</sub>	58,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,42
FeO	2,95
MnO	0,11
MgO	2,81
CaO	2,17
Na <sub>2</sub> O	2,65
K <sub>2</sub> O	3,27
H <sub>2</sub> O	3,31
TiO <sub>2</sub>	0,69
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,36
Cl	0,01
SO <sub>3</sub>	0,19
S	0,14
Orgaaninen aines	0,87

#### 4.2.1 Saviliuos

Saviliuos toimii kevytsavimassan nestemäisenä sideaineena antaen sille työstettävän olomuodon ja kuivuessaan savi toimii materiaalin liima-aineena. Kevytsaven valmistuksessa käytettävän savilaadun valintaan vaikuttaa käytettävissä olevat valmistusmenetelmät ja saven saatavuus, kustannukset sekä materiaalilta vaadittavat ominaisuudet.

Keskilihavan saven sekä ns. sinisaven etuna on parempi liukenevuus veteen ja pienempi kuivumiskutistuma, mitkä ovat valmistusprosessissa eduksi. Lihavalle savelle ominaista on parempi muovailtavuus eli plastisuus sekä parempi vetolujuus kuivana. Liuokseksi sekoitetun ja sen jälkeen kuivatun saven lujuus on parempi, kuin maakosteana kuivatun valusaven. Sekoitettaessa savihiutaleet

asettavat lujuuden kannalta parempaan järjestykseen. (Volhard & Westermarck 1994, 28.) Saven plastisuuteen vaikuttaa merkittävästi myös sen hiukkasten sähköiset varaukset sekä kationinvaihtokapasiteetti, joidenka vaikutuksesta niiden välillä on joko veto- tai työntövoimia (Jylhä-Vuorio 2020, 64.).

Saviliuoksen toimiessa kevytsaven liima-aineena, voidaan olettaa tämän kemiallisella ja fysikaalisella käyttäytymisellä olevan yhteys kevytsaven lujuusominaisuuksiin. Tämä aihealue vaatiisi oman laajemman tutkimuksensa.

#### 4.2.2 Savilaadut

Erilaiset savilaadut haluttiin työhön yhdeksi tutkittavaksi osa-alueeksi.

Kotimaisen peltosaven lisäksi työhön valittiin teollisesti jalostettua savijauhoa niiden saatavuuden ja oletetun kohtalaisen tasaisen laadun vuoksi. Kotimainen Tiilerin savijauho sekä Virolaisen Ukumaja OÜ:n tuottama savijauho ovat työssä käytettyjä savilaatuja. Peltosavi uunikuivattiin ja jauhettiin ennen seuraaviin työvaiheisiin siirtymistä. Tässä työssä savilaatuja käsitellään termein peltosavi, Tiileri sekä Ukumaja.

Savilaaduille suoritettiin standardin DIN 18952 mukainen vetokoe (taulukko 2). Standardin mukaisesti määritettiin ensin saven plastisuus, minkä jälkeen vetokoe suoritettiin jokaiselle savilaadulle viidellä toistolla oikean tuloksen varmistamiseksi. Tulosten hajonta asettui 5–9 %:n välille suuntaansa, mikä on kokeelle ominaista suoritustavan vuoksi. Kuitenkin riittävillä toistomäärillä saadaan vertailukelpoiset tulokset.

Taulukko 3. Savien jaottelu sitoutuvuuden mukaan.

Savien sitoutuvuus g/cm <sup>2</sup> DIN 18952			
50-110	111-200	201-280	281-360
laiha savi	keskilihava savi	lihava savi	hyvin lihava savi

Kokeessa vetomurron aikaan saaman kuorman ja vetopinnan 5 cm<sup>2</sup>:n pinta-alan avulla määritetään savelle vetolujuus plastisessa olomuodossa (kuviot 3 & 4).



Oikeaan plastisuuteen pääsemiseksi savia oli säilytettävä yön yli nukkaamattomaan liinaan käärittynä liiallisen kosteuden haihduttamiseksi. Oikea plastisuus varmistettiin pallo-, eli pudotuskokeen avulla. Pudotus- ja vetokokeen suorittamista on ohjeistettu myös savirakentamisen kirjassa (Volhard & Westermarck, 1994, 31–32).



Kuvio 3. Koekappale ripustettuna.



Kuvio 4. Vetomurto tapahtunut.

Savilaaduille ei määritetty rakeisuuden jakaumaa, mutta vetolujuuksien tuloksista on mahdollista tehdä tulkintaa eri laatujen savespitoisuudesta. DIN 18952 mukaan peltosavi on hienokseltaan keskilihavaa (taulukko 3). Savijauholla saadut huomattavan suuret vetolujuudet kertovat niiden poikkeuksellisen suuresta savespitoisuudesta. Savijauhon valmistuksessa pyritään käyttämään sopivan sitkeää savea, kuten savitiilien valmistuksessa, vaikkakin jauhon lopullinen koostumus vaihtelee jonkin verran saven ottoapaikan mukaan. Pohjaveden pinnan alapuolisissa osissa esiintyvä sinisavi ei sovellu savijauhon valmistukseen. (Tiileri 2023.)

Taulukko 2. Savilaatujen sitoutuvuus plastisessa tilassa.

Vetolujuus g/cm <sup>2</sup> DIN 18952	
Ukumaja	694
Tiileri	509
Peltosavi	117

### 4.3 Sooda

Sooda eli natriumkarbonaatti on hiilihapon natriumsuola. Sen pH on noin 9 ja sitä käytetään yleisesti esimerkiksi elintarviketeollisuudessa happamuudensäästöaineena. Soodan kemiallinen kaava on Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ja se on rakenteeltaan valkoista kiteistä jauhetta (Jylhä-Vuorio 2020, 71).

Soodaa käytetään saviliuosta notkistavana ainesosana, mikä mahdollistaa kevytsaven valmistuksessa jopa 50 % pienemmän vesimäärän ja sen myötä pienemmän kuivumisajan ja kutistuman. Saviliuoksen viskositeetin mittaamiseen käytetään seuraavanlaista yksinkertaistettua menetelmää. Notkeus on optimaalista, kun sekoitettua liuosta kaadetaan 100 ml lasilevyille ja tämä muodostaa halkaisijaltaan 15 cm ympyrän. (Volhard & Westermarck, 1994, 41–43.) Soodan lisäksi nesteytysaineina voidaan käyttää vesilasia (Na<sub>2</sub>O·4SiO<sub>2</sub>), natriumaluminaattia (Na<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), humushappoa ja parkkihappoa. (Volhard & Westermarck, 1994, 43.)

Massaa notkistavista ainesosista käytetään myös termiä deflokkulantit. Soodaa käytettäessä savihiukkasten pinnalta irtoaa kalsiumioneja ja tilalle tulee natriumioneja. Tämän seurauksena savihiukkasten tasopinnoille muodostuu voimakkaampi negatiivinen varaus ja ne alkavat hylkiä toisiaan. Deflokkulantteja käytettäessä liuoksen tiksotroopisuus ts. lepojähmeys eli taipumus hyytymiseen voimistuu. Liuos pysyy notkeana vain sitä sekoittaessa ja jähmettyy seisoessaan savihiukkasten vetovoimien vaikutuksesta. (Jylhä-Vuorio 2020, 63–64, 69.)

#### 4.4 Kuituhamppu

Hamppu (*Cannabis sativa*) on yksivuotinen viljeltävä korsikasvi, jota viljellään pohjoisissa olosuhteissa joko kuitu- tai siemenkasvina (Turun AMK 2018). Hampua on viljelty Suomessa pitkään, oletettavasti maatalouden harjoittamisen alkamisesta lähtien. Se on ollut maailmanlaajuisesti tärkeä viljelyskasvi korren pintaosan pitkän ja vahvan kuitunsa vuoksi, josta on valmistettu mm. kankaita, köysiä, säkkejä ja purjeita. (Luonnonvarakeskus 2022.)

Hamppu on maaperälle hyödyllinen kasvi, sillä runsas orgaaninen lehtimassa (kuvio 5) ja vahva juuristo parantavat maa-ainesta. Hampu on kasvatettavissa ilman torjunta-aineita ja vuoroviljelyllä sen on todettu parantavan muiden kasvien satoa jopa 30 prosenttia. Rakentamiseen käytettävän hampun korjuu-aika on keväällä ja materiaalin on oltava kuivaa ja mahdollisimman pölytöntä. (Rakennetaan hampusta 2019.) Kevätkorjuun jälkeen hamppu soveltuu jalostukseen ilman erillistä kuivaamista, jolloin se ensin murskataan, minkä jälkeen kuitu ja päistäre erotellaan ravistelupöydällä. Tuotantomenetelmillä on mahdollista vaikuttaa lopputuotteen koostumukseen, kokoon ja kuitupitoisuuteen. (Malvinsalo, T. & Luotola, E. 2020.)



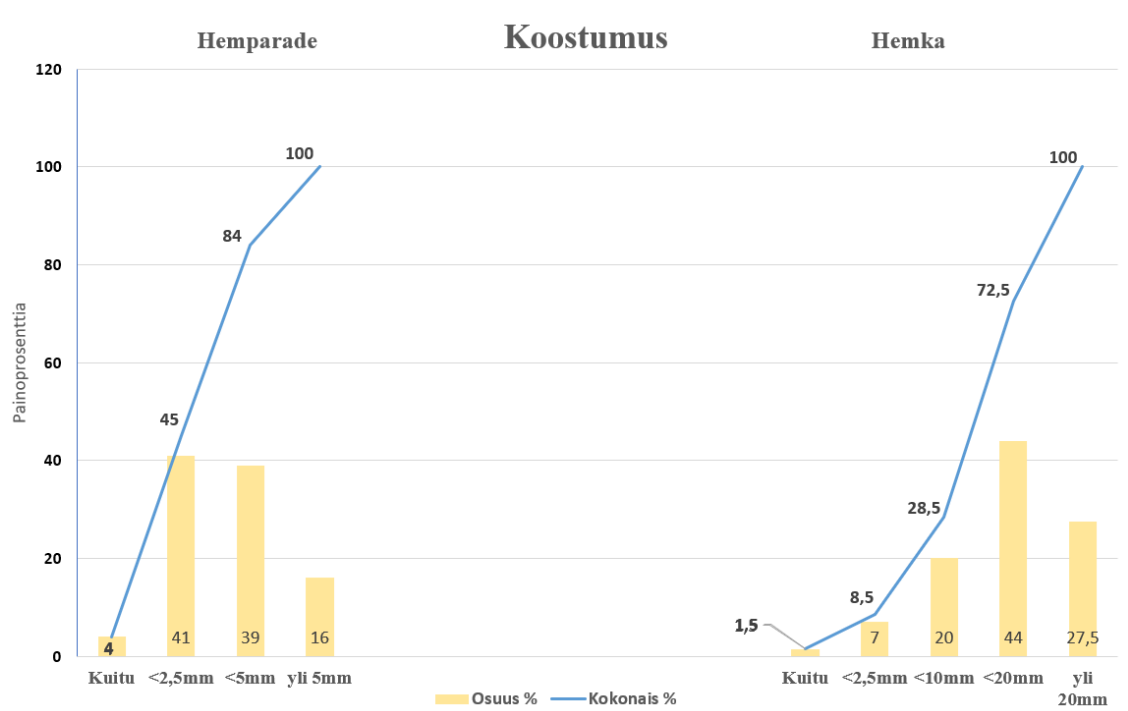
Kuvio 5. Kuituhamppuviljelmä. (Törmänen 2022.)

#### 4.4.1 Päistäre

Kuituhampun korresta noin 30 % on pintaosan pitkää kuitua ja 70 % sisäosan huokoista ja puumaista päistärettä. Keskikokoisen omakotitalon rakentamiseen tarvittavan päistäremateriaalin sato syntyy noin yhdeltä peltohehtaarilta, jonka keskimääräinen sato kuituhampulla on 6–10 tonnia. (Turun AMK 2018.) Hampun korsi on läpimitaltaan n. 4–20 mm paksua ja kasvukauden lopulla se muuttuu ontommaksi ja sitkeämmäksi. Lisäksi korsi omaa heikon vedenimu kyvyn, joten se turpoo kosteana vain vähän. Nämä ominaisuudet ovat hyödyksi rakennustuotteeseen tarkoitettulla raaka-aineella. (Luonnonmukaiset rakennusaineet 1998.) Vedenimukykyä tarkasteltaessa on erotettava hampun pinta- ja sisäosa toisistaan ja arvioitava niitä kahtena erillisenä tuotteena.

Murskattu päistäre toimii kevytsavessa huokoisena runkoaineena mahdollistaen materiaalin keveyden, hygroskooppisuuden sekä lämmöneristävyden. Aistinvaraisten havaintojeni perusteella kuiva päistäre on esimerkiksi kuusihakkeeseen verrattuna koostumukseltaan hieman huokoisempaa ja elastisempaa. Kasvin rungolle tyypilliseen tapaan kyseessä on anisotrooppinen materiaali, jonka voi selkeästi havaita päistärettä käsitellessä.

Työssä käytettiin kahden eri valmistajan toisistaan koostumuksen puolesta poikkeavaa päistärettä. Molemmille laaduille suoritettiin kosteuspitoisuuden mittaus kuivapainon perusteella kuivattamalla niitä 150-asteisessa uunissa, kunnes kuivapaino saavutettiin. Kosteusprosentti molempien laatuojen osalta asettui 7,5–8 %:iin. Lisäksi molempien laatuojen koostumus seulottiin 500 g määrän perusteella (kuviot 6 & 7). Seulakoot ovat 2,5 mm, 5 mm ja isommat lastukoot jaoteltiin pituutensa mukaan 10 mm ja 20 mm osioihin. Tarkoituksena oli määrittää viitteellinen koostumus, sillä muodoltaan pitkulaisen rakeen seulominen luo omat haasteensa.



Kuvio 6. Päistäreiden koostumus.

Ensimmäinen laatu on Alankomaisen HempFlax Group B.V:n jalostama Heparade, jota markkinoidaan kuivikkeeksi eläimille. Tuote valikoitui mukaan tutkimukseen hyvän saatavuuden ja sopivan raekokonsa vuoksi. Toisen laadun on jalostanut Hemka Oy kotimaisesta kuituhampusta. Tämä on selkeästi kooltaan pidempää ja sisältää vähemmän pitkää kuitua sekä hienojakoista pölyä. Pölyn määrään on voinut vaikuttaa tuotteen silppuamisen menetelmä, korsiaineksen kosteus sekä pölynkäsittely tuotannossa.





Kuvio 7. Hemparaden koostumuksen jakautuminen.

#### 4.5 Sellueriste

Kierrätyspaperista valmistettu kotimainen sellueriste valittiin massan valmistukseen mukaan hyvän saatavuuden vuoksi ja se toimii saviliuoksen työstettävyyttä ja kevytsaven kuivaluujutta parantavana tekijänä. Sellueristeen kuitujen voidaan katsoa lisäävän tartuntapinta-alaa savhiukkasille materiaalin rakenteessa. Sellueristeen määrän vaikutusta kevytsaven kuivaluujuteen ei tässä työssä tutkittu ja se vaatii lisätutkimusta. Sellueristeellä on edullisia, mutta hyvin vähäisiä vaikutuksia kevytsaven palonkestoon sekä lämmöneristävyyteen. Sellueriste koostuu 15 paino-%:sta palon- ja homeenestoaineita sekä 85 paino-%:sta kierrätyspaperista ja osin kartongista sekä pahvista (Fibratus Oy 2019). Vaihtoehtoisesti massassa voidaan käyttää puhdasta ja kierrättämätöntä sellua.

## 5 KOEKAPPALEIDEN VALMISTAMINEN

### 5.1 Muotin ja kevytsavimassan valmistus

Valumuotti on sylinterin muotoinen ja sisähalkaisijaltaan 124,5 mm. Tähän ratkaisuun päädyttiin useastakin syystä. Koekappaleiden valmistustavan sekä kuivumiskutistuman vuoksi katsottiin paremmaksi vaihtoehdoksi toteuttaa kappaleet sylinterin muotoisina päästäksemme parempaan mittatarkkuuteen. Näin kappaleisiin ei muodostu kuution muotoisessa kappaleessa olevia kulmia ja myös kuivuminen on tasaisempaa kappaleen pinnan ja sisäosan välillä. Lisäksi muotin rakentaminen valmiista PVC-putkesta oli eduksi. Muotin tukirakenne valmistettiin pinnoitetusta vanerista. Muotti on malliltaan läpipainettava irrotettavalla pohjalevyllä (kuvio 8).



Kuvio 8. Muotti valutyön jäljiltä.

Kevytsavimassan valmistus vakioitiin seossuhteiden, työtilan olosuhteiden, valmistus- ja seisotusajan suhteen. Materiaalit ja työtila olivat 21° asteisia. Saviliuos

valmistettiin lisäämällä soodaveteen savijauho sekä sellueriste ja näitä sekoitettiin laastisekoittimella 2 minuuttia. Sekoittaminen toistettiin 45 minuutin seisottamisen jälkeen, jonka jälkeen liuos kaadettiin päistäresilpun päälle. Massaa sekoitettiin käsin 10 minuutin ajan huolellisesti kahteen otteeseen 45 minuutin välein. Massan tasaiseksi sekoittaminen vaatii huolellista työstämistä verrattain alhaisen vesimäärän takia (kuvio 9). Tämän jälkeen suoritettiin kappaleiden muotitus.



Kuvio 9. Tasaisesti sekoittunut kevytsavimassa.

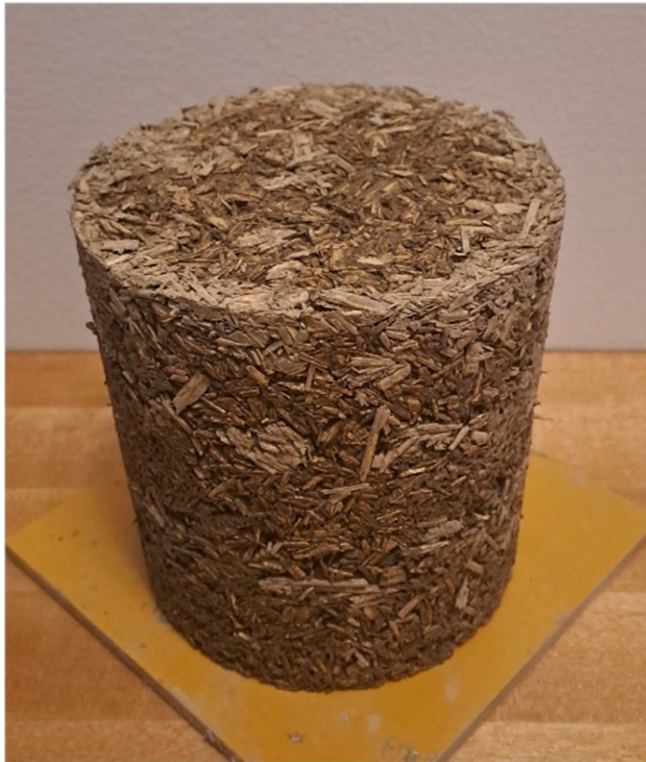
## 5.2 Koekappaleiden valmistus

Kevytsavimassan valmistuksen vakioinnista huolimatta on huomioitava, että koekappaleiden valmistus on suoritettu käsityönä ja sen takia niissä esiintyy pieniä eroja rakenteessa eli massan tiiveyden jakaantumisessa kappaleen sisällä. Muottiin laitettavan massan määrä arvioitiin seinäelementtirakenteen eristystyössä syntyvän massan tiivistymisprosentin sekä koekappaleiden valmistuksen sujuvuuden perusteella. Liian huokoinen koekappale ei kestä muotista irrottamista ja toisaalta liian tiiviiksi painettu koekappale turpoaa muotista irrotuksen jälkeen.

Massa on tiivistetty muottiin lineaarisesti viidessä erässä muodostamatta suoria rajapintoja tiivistysten välille. Näin kappaleen rakenteesta saadaan mahdollisimman tasalaatuinen. Lopuksi massa tiivistetään muotin kansilevyllä ja painetaan



ulos muotista erillisellä paininlevyllä, jonka myötä koekappale saa ulkomuotonsa ja mittansa (kuvio 10). Kuvasta voidaan havaita myös kappaleen pinnan kuivahattavan hyvin pian muotista irrotuksen jälkeen.



Kuvio 10 Muotista irrotettu koekappale.

Kappaleiden kuivaus on suoritettu sisätilassa lämpötilassa 21–22 °C ja ilman suhteellisen kosteuden vaihdella välillä 35–42 %. Kuivumisajaksi tavoiteltiin noin kolmea viikkoa. Tähän tavoitteeseen päästiin tehostamalla tilan ilmanvaihtoa ensimmäisen kuivausviikon jälkeen, jolloin kappaleiden kuiva ulkopinta hidasti sisältä vapautuvan kosteuden siirtymistä. Kuivumista seurattiin keittiövaaka'alla punnitsemalla, joka taarattiin punnuksen avulla ennen käyttöä. Kosteuspitoisuuden ollessa 2 %:n kohdalla kappaleet olivat valmiita säähoneeseen. Kosteuspitoisuus laskettiin lisätyn veden mukaan, jolloin raaka-aineiden sisältämä kosteutta ei huomioitu.

Osassa kappaleista oli havaittavissa muotista irrottamisen yhteydessä syntyneitä kaltevuutta yläpinnassa. Näiden koekappaleiden pinnan mittatarkkuutta ja suoruutta viimeisteltiin päälle valettavalla tasoitteella, joka oli steariinia helpon työstettävyytensä vuoksi. Tasausvalu toteutettiin sellaisella viskositeetilla ja

ainoastaan kappaleen pinnalle siten, ettei valuneste tunkeutunut syvemmälle huokosiin. Laboratoriotestien yhteydessä todettiin steariinin käytön olleen virhearvio ja sen olleen laadultaan liian pehmeää ja sen vaikuttaneet pienissä määrin koetuloksiin.

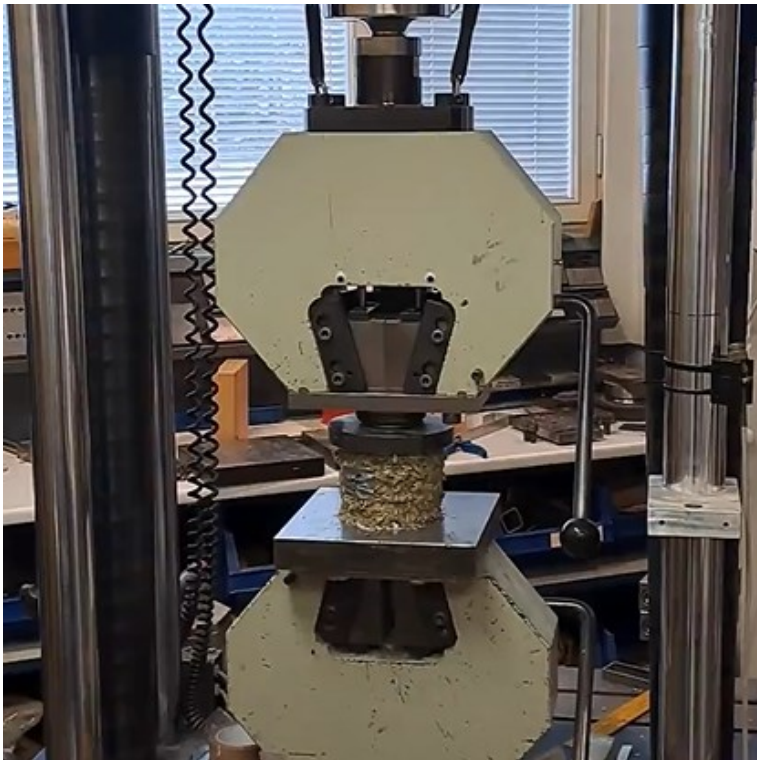
Lopuksi koekappaleet tasapainotettiin seitsemän vuorokauden ajan laboratorion säähuoneessa olosuhteessa 20 °C ja RH 45 %. Ennen koestusta koekappaleet mitattiin ja punnittiin myöhempää tulosten virhearviointia varten. Tasapainotuksen jälkeen voitiin punnitsemalla todeta massassa käytetyn veden haihtuneen koekappaleista. Kosteuden tasaantumisen myötä koekappaleiden painon alaneminenkin pysähtyi. Kosteuden tasaantumista kappaleiden ulko- ja sisäosien välillä ei todennettu millään menetelmällä, mutta tasakuivan rakenteen saavuttamista voidaan pitää hyvin todennäköisenä kappaleiden pienen koon vuoksi. Käsitöinä toteutettu koekappaleiden valmistus sekä savelle ominainen pintoihin tarttuminen aiheutti kappaleiden välille 1–4 % painoeroja, joka on todennäköisesti hienokseltaan vaikuttanut koetuloksiin. Edellä mainituista aiheista tarkemmin luvussa 6.5.

## 6 KOESTUS JA TULOKSET

### 6.1 Koestus

Testaustyöt suoritettiin Aalto-yliopiston rakennustekniikan laboratoriossa yhteistyössä henkilökunnan sekä kevytsaven parissa työskentelevän väitöskirjatutkija Johanna Hyrkäksen kanssa. Koestus tehtiin osalle koekappaleista kolmen ja osalle kahden toiston sarjassa ja tästä löytyy jäljempänä maininta aina koetulosten yhteydessä. Koestuksessa puristusliike suoritettiin 20 mm:n asti. Seuraavassa kuvattuna koestusmenetelmä.

- Standardi	EN ISO 29469:2022
- Koestuslaite	Swick RK250/50
- Voima-anturi	200 kN
- Esikuormitus	20N, 1,66 kPa
- Koestusnopeus	13,5 mm/min
- Koekappaleiden nimelliskoko	D124 mm, H135 mm
- Koekappaleiden mittatarkkuus	D +/- 0,5 mm, H +/- 1,5 mm



Kuvio 11. Koestustilanne 50 mm:n asti.

## 6.2 Kevytsavi puristettuna

Seuraavassa yhteenvetoa siitä, mitä havaintoja kevytsaven käyttäytymisestä puristusrasituksen alaisena voitiin tehdä puristuskokeiden perusteella. Koekappaleita puristettiin noin 15 % puristumaan asti, jonka jälkeen etenkin suuremmasta Hemkan päistäreestä valmistetut kappaleet pysyivät hyvin yhtenä kappaleena. Yhdelle koekappaleelle puristus tehtiin 50 mm:n asti (kuvio 11), josta voitiin todeta materiaalin pysyvän melko hyvin koossa pelkän suoran puristusrasituksen alaisena. Jälkikäteen koekappaleita tarkisteltaessa ja käsin vedettäessä kävi ilmi, että mitä parempi puristuslujuus, sitä selkeämmin kappaleeseen muodostuu tasopinnan kaltainen murtuminen (kuvio 12). Todennäköisesti lujemmassa rakenteessa murto alkaa muodostua enimmäkseen siinä kohtaa, missä rakenteen painuminen ja murtuminen on otollisinta.



Kuvio 12. Murtuminen tasopinnassa.

Mekaanisessa rasituksessa kevytsavessa alkaa muodostua saven ja kuidun välisen kiinnittymisen murtumista. Lisäksi voidaan katsoa materiaalin sisällä ilmaa täynnä olevien onkaloiden edesauttavan kokoonpuristuvuutta. Oletukseni mukaan materiaalilla on nimenomaan kuidun huokoisuuden vuoksi ennakkokäsitystäni parempi elastisuus, eli palautumiskyky rasituksen jälkeen. Kuitukokoa suurentamalla voidaan koossapysyvyyttä ja elastisuutta parantaa. Oletukseni mukaan elastisuutta lisää nimenomaan huokoisen kuidun paksuuden tuoma vaikutus. Kuidun kokoa ja pituutta kasvattamalla saadaan niiden välille enemmän

tartuntapinta-alaa, jonka lisäksi ne ovat pidemmältä matkalta ristikkäin toisiinsa nähden, mikä parantaa materiaalin koossapysyvyyttä.

Tiivistetysti voidaan koetulosten perusteella todeta, että puristuslujuuden kasvaessa kappaleiden korkeussuuntainen palautuminen väheni ja puristuslujuuden heikentyessä oli havaittavissa päinvastaista ilmiötä. Kappaleiden keskimääräinen palautuminen 20 mm puristusliikkeen jälkeen oli noin 11 mm (kuvio 13).



Kuvio 13. Tasainen puristuma.



Kuvio 14. Yläreuna murtunut.

### 6.3 Tulokset

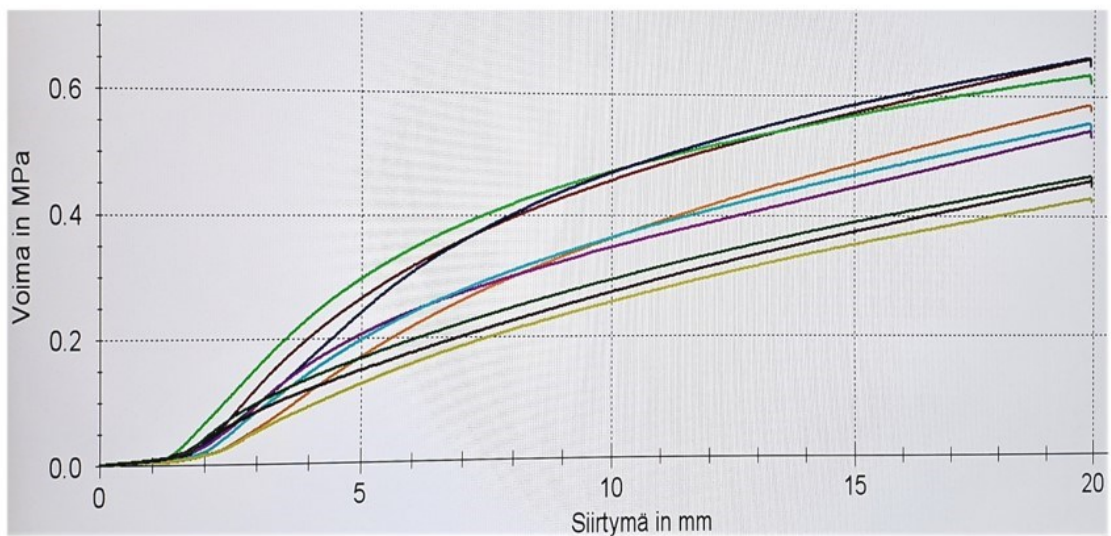
Seuraavassa pyrin selventämään testitulosten antia ja sellaisia niistä tehtyjä havaintoja, jotka esiintyivät johdonmukaisina. Kuvioista 15 nähdään koostumukseltaan kolmen erilaisen koekappaleen tulokset. Niiden välille saatiin selkeät erot tuloksiin ja toisaalta koesarjojen sisäisesti selkeää yhtäläisyyttä. Koekappaleilla 3 ja 6 tapahtui hieman muita suurempaa murtumista reunastaan (kuvio 14), mikä voisi olla yksi heikomman koetuloksen aiheuttajista. Erot kappaleiden reunojen murtumistavassa johtuu todennäköisimmin pienistä eroista massan tiivistämisessä.



### Test results:

Legends	Nr	Specimen identifier	$F_{max}$ kN	$\sigma_M$ N/mm <sup>2</sup>	dL at $F_{max}$ mm	
	4	2	8,02	0,664	19,9	Tiilerin savi & Hemparaden päistäre
	5	3	7,63	0,637	19,9	
	6	4	7,97	0,665	19,9	
	7	5	7,09	0,587	19,9	Ukumajan savi & Hemparaden päistäre
	8	6	6,45	0,543	19,9	
	9	7	6,71	0,556	19,9	
	10	8	5,19	0,429	19,9	Ukumajan savi & Hemkan päistäre
	11	9	5,54	0,458	19,9	
	12	10	5,64	0,467	19,9	

### Series graph:



Kuvio 15. Testiraportti. (Aalto-yliopisto 2023.)

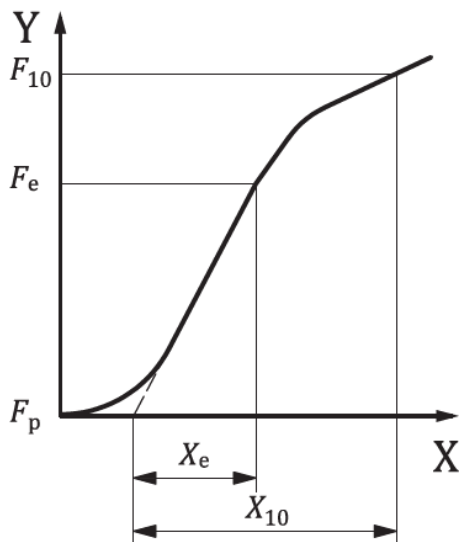
Jännitys-siirtymäkäyrältä voidaan havaita, että tilanteessa, jossa käyrät leikkaavat toisensa, saadaan 10 % puristuman tuloksiin melko pieni hajonta. Muodoltaan logistisen käyrän kulmakertoimen laskevasta muodosta on myös havaittavissa kevytsavelle ominainen käyttäytyminen puristusrasituksen alaisena.

#### 6.3.1 10 % ja 2,5 % puristuma

Koekappaleille määritettiin työssä sovelletun standardin mukaan puristuslujuus 10 % puristumalle (liite 1) testidatasta lineaarisesti ekstrapoloimalla (kaava 1). Laskenta tehtiin hakemalla ekstrapolointipisteitä vastaavat jännityksen arvot kunkin koekappaleen jännitys-siirtymäkäyrän xy-datasta. Näiden arvojen avulla määritetään siirtymäkäyrän laskennallinen lähtöpiste, joka kuviossa esitetty katkoviivalla (kuvio 16). Siinä siirtymä on esitetty voiman suhteen, joka vastaa jännitys-

siirtymäkäyriä. Menetelmässä huomioidaan kappaleiden korkeus sekä pinta-ala ja poikkeavuudet näissä eri koekappaleiden välillä. Menetelmän voidaan katsoa vähentävän koekappaleiden pinnan epätarkkuudesta syntyvää eli jännitys-siirtymäkäyrien alkuosissa nähtäviä eroja. Menetelmästä tarkennusta luvussa 6.5.

Testaushetkellä tehtyjen havaintojen perusteella päätin määrittää vastaavat lujuusarvot myös 2,5 % puristumalle (liite 1). Havaintojen mukaan tämä vastaa lähemmin materiaalin puristuskapasiteettia käyttötilanteessa, jossa eristeen murtumista pyritään välttämään. Käyttötilanteen puristuskapasiteetiksi voidaan ajatella sellaista rajaa, missä kevytsaven veto- tai taivutuslujuus ei vielä heikkene merkittävästi. Tämän alemman puristuman arvon avulla voidaan myös vertailla kappaleiden pintakovuutta testituloksien perusteella.



Kuvio 16. (EN ISO 29469:2022, 7.)

missä,

$X$	on	siirtymä [mm]
$Y$	on	voima [kN]
$F_p$	on	esikuormitusvoima [kN]
$F_{10}$	on	voima 10 % puristumalle [kN]
$X_{10}$	on	siirtymä 10 % puristumalle [mm]
$F_e$	on	$X_e$ :tä vastaava voima [kN]
$X_e$	on	siirtymä konventionaalisella elastisella alueella [mm]

$$\sigma_{10} = 10^3 \frac{F_{10}}{A_0}$$

(1)

missä

$\sigma_{10}$	on	puristuslujuus 10 % puristumalle [Mpa]
$F_{10}$	on	voima 10 % puristumalle [kN]
$A_0$	on	kappaleen poikkipinta-ala [mm <sup>2</sup> ]

#### 6.4 Tulosten analysointi

Tiivistetysti tuloksien antia voidaan lähestyä käytännönläheisesti seuraavalla tavalla. Keskimäärin 2,5 % puristuslujuus koekappaleilla oli noin 0,1 Mpa, mikä vastaa niiden pinnalla noin 120 kg:n kuormaa. Tämän perusteella voidaan todeta, että koostumuksesta riippuen materiaalia on mahdollista kuormittaa esimerkiksi seinäelementtejä päällekkäin varastoimalla tai eristeen päällä kävelemällä.

Tulokset käydään seuraavassa läpi 10 % puristuman mukaan, ellei toisin mainita. Lopuksi käyn vielä läpi pohdintaa sellaisista muuttujista, joita tuloksien yhteydessä ei mainita.

##### 6.4.1 Saven laatu

Saven laadun vaikutusta puristuslujuuteen selvitettiin Hemparaden päistäreen kanssa kolmen ja kahden koekappaleen sarjoina, eli yhteensä koekappaleita oli kahdeksan. Suurimpaan puristuslujuusarvoon 0,552 Mpa päästiin Tiilerin saven ja Hemparaden päistäreen kanssa kanssa. Tämä koesarja tuloksella 0,552 MPa toimii jäljempänä esitettävien tulosten verrokkisarjana. Näihin tuloksiin nähden Ukumajan savi toi keskimäärin 84 %:n ja peltosavi 77 %:n lujuuden. Tulosten hajonta oli 2,4 % Tiilerillä, 5,4 % Ukumajalla sekä 1,4 % peltosavella suuntaansa. Myös Hemkan päistäreen kanssa erot tuloksissa savien välillä oli samaa luokkaa. Eri savien välille saatiin tuloksiin selkeitä eroja, mutta soodan käyttö liuoksen nesteytysaineena ei ollut niin yksiselitteistä, kun lähtötilanteessa oli oletettu.

Teollisilla savijauhoilla havaittiin päinvastainen reagointi soodan kanssa, kun yleisesti on ajateltu. Savijauhojen kanssa liuoksessa syntyy soodan lisäyksen yhteydessä lievää paksuuntumista, mikä jäi massan tekovaiheessa itseltäni huomauttamatta. Paksuuntuminen voisi liittyä jollain tapaa muutokseen savijauhon



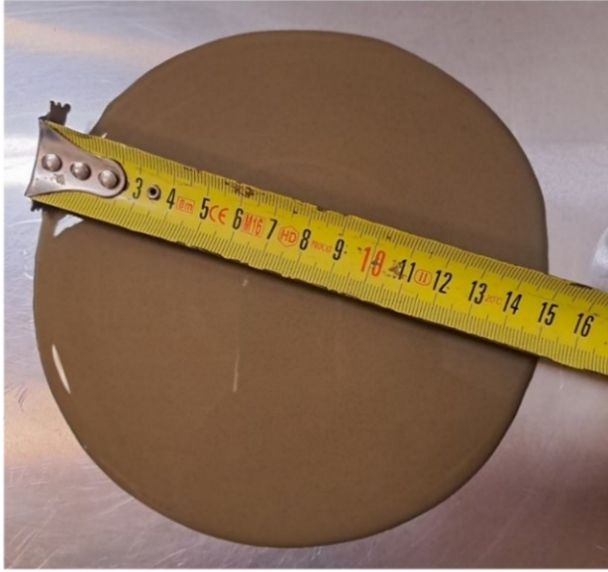
kidevesipitoisuudessa sekä mahdollisesti kemiallisessa koostumuksessa. Savijauhon valmistuksessa jauhettu savi kuljetetaan kuuman ilmakehän läpi, jonka lämpötila on reilusti yli savelle kriittisen  $600^{\circ}\text{C}$ :n (Tiileri Oy 2023.) Tämä johtaa ainakin osittaiseen kideveden poistumiseen savihiukkasten rakenteesta, jolla voisi olla vaikutusta kyseisen laadun reologisiin ominaisuuksiin.

Peltosavella liuoksen notkistuminen oli selkeästi havaittavissa soodaa lisätessä. Edellä mainitusta poikkeavuudesta johtuen testituloksista ei voida suoraan päätellä DIN 18952 mukaisen vetokokeen tai saviliuoksen viskositeetin yhteyttä kevytsaven puristuslujuuteen. Puristustestin tulosten valmistuttua päätin vielä selvittää soodan vaikutusta liuosten viskositeettiin.

Taulukko 4. Savilaatujen viskositeetti liuostestillä.

Savilaatu	pinta-ala $\text{mm}^2$	pinta-alan muutos 1 ‰ sooda
Tiileri	24050	-24,5 %
Ukumaja	10029	-28,0 %
peltosavi	17670	60,0 %

Taulukosta 4 selviää savilaaduille tehdyn viskositeettikokeen tulokset ilman soodaa sekä 1 ‰ soodamäärällä. Kokeessa 100 ml huolellisesti sekoitettua liuosta kaadetaan tasaiselle alustalle ja mitataan alustalle muodostuneen ympyrän pinta-ala (kuvio 17). Saviliuokset on valmistettu samalla vesi-savisuhteella, joten pinta-aloista voidaan havaita merkittävä ero savihiukkasten sitovuudessa ts. vetovoimissa Tiilerin ja Ukumajan välillä. DIN 18952 mukaisessa vetokokeessa ilmi tullut oletettu muita korkeampi savespitoisuus tekee Ukumajan saviliuoksesta viskositeetiltaan korkeampaa, sillä mitä pienempiä hiukkaset ovat, sitä enemmän sitoutuu vettä niiden väleihin (Jylhä-Vuorio 2020, 80). Ja toisaalta korkeampi savespitoisuus johtaa korkeampaan suojakolloidien määrään liuoksessa, mikä osaltaan voimistaa sen hyytymistä (Jylhä-Vuorio 2020, 64).



Kuvio 17. Tiilerin saviliuoksen viskositeetti 1‰ soodamäärällä.

Vasta koekappaleiden valmistuksen jälkeen ilmi tullut merkittävä ero liuosten viskositeetissa aiheutti sen, että testituloksien tulkinnassa on huomioitava myös tämä oleellinen valmistusprosessin muuttuja. Oletukseni on, että Ukumajan saven Tiileriä heikompi menestys puristuskokeessa voisi olla selitettävissä yhden tai useamman tekijän vaikutuksella. Sooda saattaisi reagoida fysikaalis-kemiallisesti poikkeavalla tavalla juuri tämän savilaadun kohdalla tai vaihtoehtoisesti saviliuoksen korkeammalla viskositeetilla voisi olla yhteyttä kyseisten koekappaleiden massan sekoittumiseen ja sen myötä heikompaan puristuslujuuteen.

Hiutaleen muotoiset savihiukkaset asettuvat liuoksessa niiden nesteytysaineella muunnellun pintavarauksen mukaan, joko laminoitumalla päällekkäin tai korttitalomaisesti ristikkäin, mikä vaikuttaa saven mikrorakenteen avoimuuteen, jolla on vaikutuksia sen kuivumisnopeuteen ja kuivalujuuteen (Jylhä-Vuorio 2020, 82–83). Tiiviiksi laminoituneella mikrorakenteella on taipumusta halkeilla, mikäli rakenteen sisä- ja ulko-osien välille syntyy selkeää eroa kosteuspitoisuudessa (Jylhä-Vuorio 2020, 81). Edellä luetelluista syistä saven ja sen myötä myös kevytsaven kuivalujuuteen vaikuttaa niin moni muuttuja, että tätä aihealuetta olisi tarpeen tutkia puristustestattujen savikuutioiden avulla, jotka olisi valmistettu useista erilaisista savimassoista.

#### 6.4.2 Päistäreen laatu

Päistäreen vaikutusta puristuslujuuteen testattiin kolmen + kolmen koekappaleen avulla, josta voitiin todeta tuloksiin muodostuneen selkeät erot laatujen välille. Muotitustekniikan vuoksi Hemparadesta valmistettujen koekappaleiden tilavuuspaino  $370 \text{ kg/m}^3$  on 1,12-kertainen Hemkan vastaaviin, mikä jättää tuloksiin osaltaan tulkinnanvaraa. Kun massassa käytetään suurempaa kuitua, se vaatii enemmän tilavuutta, minkä myötä kevytsaven kuitumäärä ja kuivapaino jää alhaisemmaksi. Em. syystä Hemkan koekappaleissa on painon mukaan noin 12 % vähemmän päistärettä. Molempia savilaatuja käytettäessä tulokset olivat hyvin samansuuntaiset eli selkeästi pienemmän päistärekoon eduksi. Hemkan päistäreellä päästiin keskimäärin 73 % puristuslujuuteen Hemparaden vastaavasta. Ero tilavuuspainossa selittää varmasti osaltaan tulosta, mutta toisena tekijänä oletan olevan sen, että suurempi kuitu heikentää puristuslujuutta päistäreen huokoisen rakenteen vuoksi. Tulosten hajonta näiden osalta vaihteli 2,4 % ja 5,8 % välillä suuntaansa.

Tuloksien perusteella tulkitsin, että tilavuuspainoa pienennettäessä lähelle  $300 \text{ kg/m}^3$ , suuremman kuidun hyödyt tulevat paremmin esiin. Tästä aiheesta tarkemmin luvussa 6.4.4.

#### 6.4.3 Massan seisotusaika

Sekoitetun kevytsavimassan suljetussa astiassa seisottamisen vaikutusta materiaalin kuivalujuuteen tutkittiin kahden koekappaleen avulla. Kappaleiden aineksina toimivat Hemparade sekä Tiileri ja valmistustapa vastasi neljän vuorokauden seisotusta lukuun ottamatta muiden koekappaleiden valmistusta. 10 % puristuslujuus oli 83 % ja 2,5 % puristuslujuus 75 % verrokkikappaleen vastaavista. Tulosten hajonta näiden osalta oli melko suurta, 3,8 % suuntaansa.

Koesarja on sen verran pieni, että tuloksesta ei voida tehdä suoraa johtopäätöstä tapauksesta. Olettaisin kuitenkin että, ainakin seisotuksen aikana kostuva ja laajeneva päistäre voisi vaikuttaa kevytsavirakenteen kuivumiskutistumaa lisäävästi ja kuivalujuutta heikentävästi.

#### 6.4.4 Tilavuuspaino

Yleisesti kevytsaven tilavuuspainoon voidaan vaikuttaa eniten kuitu-savisuhteella sekä massan tiiveydellä. Tilavuuspainon vaikutusta materiaalin kuivalujuuteen tutkittiin kahden koekappaleen avulla. Näidenkin kappaleiden aineksina toimivat Hemparade sekä Tiileri. Tilavuuspaino on määritetty lisätyn veden mukaan kolmen prosentin kosteudessa, mikä voisi arvioni mukaan vastata ulkoseinärakenteessa tasapainottunutta kevytsavea, sillä massassa käytetyt raaka-aineet oli säilytetty kuivassa sisätilassa. Tuloksien perusteella tilavuuspainon laskiessa  $370 \text{ kg/m}^3$ :sta  $270 \text{ kg/m}^3$ :n, puristuslujuus oli enää 33 % lähtötilanteesta.

Pienikokoista Hemparaden päistärettä käytettäessä tulosta voidaan pitää loogisena, sillä pienemmällä tilavuuspainolla kuitujen väliin jää enemmän ilmaa massan tiivistysvaiheessa ja rakenteesta muodostuu huokoisempi. Suurempaa kuitua käytettäessä kuitujen väliset tartuntapinta-alat ovat suurempia ja kevytsaven tilavuuspainoa ts. massan määrää pienennettäessä näiden suurempien pintojen hyödyt tulevat paremmin esille.

#### 6.4.5 Kuidun suunta

Kuidun suunnan vaikutusta materiaalin kuivalujuuteen tutkittiin kahden koekappaleen avulla. Näiden kappaleiden aineksina toimivat Hemka sekä Tiileri. Muotituksessa kuidut asettuvat pääosin vaakasuuntaisesti koekappaleen korkeuteen eli puristussuuntaan nähden. Niiden suuntaa koitettiin muuttaa kahden koekappaleen osalta siten, että massa tiivistettiin muottiin sen sylinterimäisen muodon kylkeen tehdyn reiän kautta. Muilta osin valmistusprosessi vastasi muiden koekappaleiden vastaavaa. Lopputuloksena oli, että puristussuuntaan nähden pystyyn ajatellut kuidut olivat näissä koekappaleissa enemmänkin ristikkäin toisiinsa nähden, mutta kuitenkin selkeä ero rakenteeseen saatiin. Tuloksien perusteella ristikkäisellä kuidun suunnalla ei ollut vaikutusta tämän kevytsaven puristuslujuuteen kuin 2 % heikentävästi. Tulosten hajonta näiden osalta oli puolen prosentin luokkaa.

Merkittävämpää on, että ristikkäin olevilla kuiduilla 2,5 % puristuslujuus parani 17 %. Tämä voisi olla viitettä rakenteen anisotrooppisuudesta. Kun kuitu alkaa rakenteessa painumaan, niin pituussuuntaan se vastustaa puristumaa paremmin kuin säteen suuntaisesti. Kun kuidun ja saven välinen murtuminen on saavuttanut tietyn tason, niin kuidut muuttavat asentoaan ja anisotrooppisuuden merkitys poistuu. Koesarjojen sekä koekappaleen pinta-alan olisi syytä olla suurempia, jotta tästä ominaisuudesta saataisiin varmuutta.

Eroja näiden kappaleiden välille muodostui myös elastisuudessa eli puristusrasituksen jälkeisessä muodon palautumisessa. Ristikkäiset kuidut sisältävät kappaleet palautuivat noin 15 % vähemmän korkeussuunnassa, mikä kieli siitä, että kuidut ovat muuttaneet enemmän asentoaan ja koekappaleet ovat pyrkineet laajenemaan leveyssuuntaansa.

#### 6.4.6 Pakkasrasitus

Pakkasrasituksen vaikutusta materiaalin kuivalujuuteen tutkittiin kahden koekappaleen avulla. Toinen koekappale 370 kg/m<sup>3</sup>:n ja toinen 270 kg/m<sup>3</sup>:n tilavuuspainolla. Näiden kappaleiden aineksina toimivat Hemparade sekä Tiileri. Selvityksen taustalla on oletettavissa oleva tilanne, jossa kevytsavella eristetty seinäelementti varastoidaan ulkotilassa, missä sen on mahdollista altistua kostealle ilmalle sekä jäätymiselle.

Arvioni mukaan ns. ulkokuivan kevytsaven kosteuspitoisuus on lähellä 10 %:a sillä oletuksella, että kuituhampun kosteuskäyttäytyminen on verrattavissa sahatavaraan. Näiden koekappaleiden valmistus poikkesi muista siten, että ne tasapainotettiin sopivan kosteuden hetkellä kelmuun käärittynä noin 10 % kosteuteen, minkä jälkeen saman kosteuspitoisuuden todettiin säilyvän kappaleita säilyttämällä ulkotilassa +3–6° lämpötilassa kolme vuorokautta. Tämän jälkeen niitä säilytettiin -18° asteessa kolme vuorokautta, minkä jälkeen ne sulatettiin kylmälaukussa huoneenlämpöiseksi noin 12 tunnin aikana. Lopuksi koekappaleet kuivattiin sisätilassa ja tasapainotettiin säähuoneessa muiden kappaleiden tapaan.

Tuloksien perusteella ulkokuivan kevytsaven pakkasrasittaminen heikentää puristuslujuutta hieman, mutta koesarjan ollessa pieni, tuloksiin on suhteuduttava varauksella. Olettaisinkin kuitenkin jäätyvällä vedellä olevan hienokseltaan rakennetta haurastuttava vaikutus ulkokuivaan kevytsaveen. 370 kg/m<sup>3</sup>:n koekappaleen 10 % puristuslujuus oli 88 % ja 2,5 % puristuslujuus 75 % verrokkikappaleiden vastaavista. 270 kg/m<sup>3</sup>:n koekappaleen puristuslujuudessa tapahtui hieman lievempää heikentymistä, mikä voisi olla seurausta pienemmästä vesimäärästä kappaleen tilavuuteen nähden.

#### 6.4.7 Soodan määrän lisäys

Suuremman soodamäärän vaikutusta materiaalin kuivalujuuteen tutkittiin kahden tilavuuspainoltaan 370 kg/m<sup>3</sup>:n koekappaleen avulla. Näiden kappaleiden aineksina toimivat Hemparade sekä Tiileri ja soodamäärä kasvatettiin kolmeen promilleen. Tämän selvityksen taustalla on tutkia nesteytysaineen annostelun merkitys lujuuskehitykseen. Tuloksien perusteella 10 % puristuslujuus oli 59 % ja 2,5 % puristuslujuus vain 27 % verrokkikappaleiden vastaavista. Tulosten hajonta oli vain 0,1 %. Kappaleilla oli havaittavissa poikkeuksellisen tasainen puristuma sekä puristuksen jälkeinen koossapysyvyys (Kuvio 18).

Havaintojeni mukaan näillä koekappaleilla kuivuminen tapahtui lähes puolessa ajassa muihin kappaleisiin nähden. Hyvin pian muotituksen jälkeen ne tuntuivat koostumukseltaan selkeästi kevyemmältä ja jossain määrin hauraammalta. Soodan yliannostelulla voi olla liiallisia tiksotropisia vaikutuksia (Jylhä-Vuorio 2020, 71). Oletettavasti näiden koekappaleiden osalta on tapahtunut soodan lisäyksen vaikutuksesta savihiukkasten pintajännitysten ja asentojen muutosta, joka on johtanut heikentyneeseen rakenteeseen ja puristuslujuuteen. Tämän ilmiön syntymistä vahvistaa myös se, että jälkikäteen tekemäni testin mukaan soodamäärän kolminkertaistamalla liuoksessa, saven sedimentoituminen astian pohjalle voimistuu selkeästi. Tämä on havaittavissa jo muutaman tunnin jälkeen veden nousemisena liuoksen pintaan. Myös voimakkaampi kuivumisreaktio voisi aiheuttaa murtumia saven mikrorakenteeseen ja selittää saavutettua testitulosta.

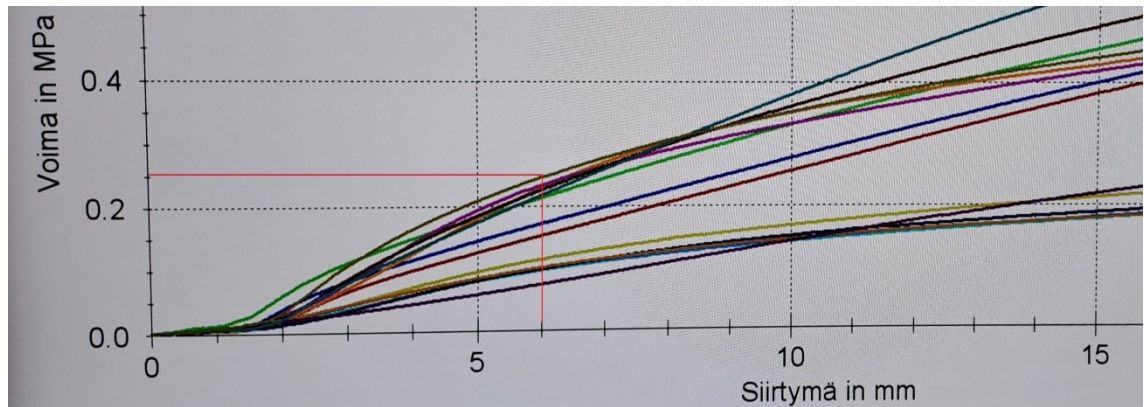


Kuvio 18. Elastinen koostumus.

#### 6.4.8 Lisähuomioita

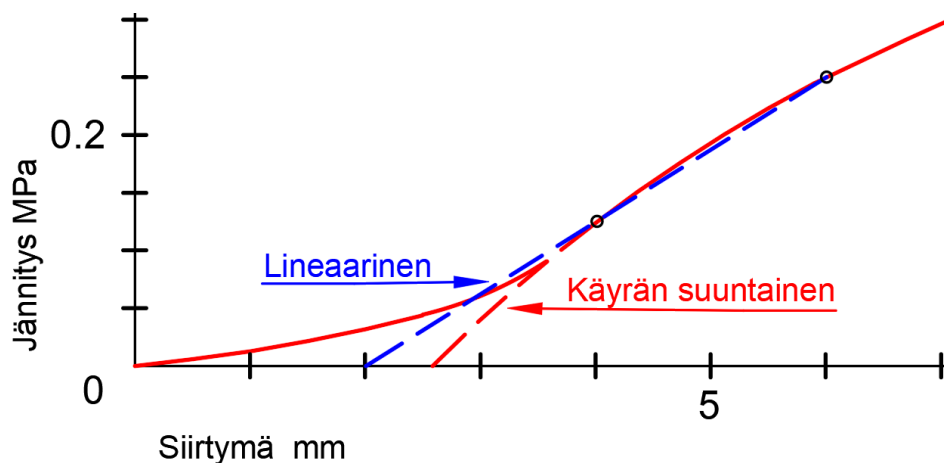
Työssä sovellettuun standardiin nähden tehtiin muutamia poikkeuksia, joista merkittävimmät ovat aikaisemmin mainittu koekappaleen muoto sekä koekappaleiden määrä. Standardin mukainen koko on 150 mm:n kuutio ja koekappaleiden määrän tulisi olla 5 kpl jokaista laatua kohden. Lisäksi koestuksessa käytettiin esikuormitusta 1660 Pa, kun keveiden eristemateriaalien standardissa se on 250 Pa, joka vastaisi käytetyn koekappaleen pinnalla vain 3070 g kuormaa.

Työn tuloksissa on huomioitava lujuusarvojen määrittämisessä käytetyn ekstrapoloinnin merkitys. Punaisella suorakolmiolla rajattu ekstrapoloinnin määrittäminen sekä jännityksen, että siirtymän suhteen (kuvio 19).



Kuvio 19. Ekstrapoloinnin määritysalue.

Kun jännitys-siirtymäkäyrien muodossa esiintyy poikkeavuutta koekappaleiden välillä, niin käyrän laskennallinen lähtöpisteen määrittäminen on tehtävä käyrän suuntaisesti jokaiselle koekappaleelle erikseen. Tässä työssä laskenta on suoritettu lineaarisesti (kuvio 20), mikä madaltaa kaikkien koekappaleiden koetulosta 1–3 %. Mikäli määritysalueita kasvatettaisiin merkittävästi, niin matalien jännitys-siirtymäkäyrien laskennallinen lähtöpiste muodostuisi lähelle nollaa, joka heikentäisi niille määritettyä puristuslujuutta. Määrittämällä on mahdollista vaikuttaa koesarjojen välisiin tuloseroihin. Valitsemalla menetelmällä jännitys-siirtymäkäyrien lähtöpisteet asettuvat 0,5–2 mm välille.



Kuvio 20. Ekstrapolointimenetelmien eroavaisuus.

Koekappaleen muoto ja verrattain pieni koko ei vastaa materiaalin todellista valmistus- ja käyttötilannetta. Käsityönä muotittiin tiivistetty kevytsavi ei täysin vastaa tuotanto-olosuhteiden tiivistysmenetelmää, eikä myöskään kuivumisajaltaan tai olosuhteiltaan. Kevytsaven lopulliseen kuivalujuuteen vaikuttaa aina käytetyt



menetelmät ja ympäröivät olosuhteet. Koekappaleiden avulla kuitenkin pystyttiin tekemään arvokasta vertailututkimusta eri muuttujien välillä.

## 6.5 Virhetekijät

Seuraavassa pohdintaa tulosten virhetekijöistä ja arviota niiden vaikutuksen suuruudesta tulokseen. Käsityönä tehty koekappaleiden valmistus tuo jossain määrin eroja testituloksien välille. Pieniä eroja koekappaleen kokoonpuristuvuuteen tuo kevytsavimassan muottiin tiivistämisen tasaisuus eli ts. materiaalin tasakoosteisuus. Koekappaleiden välillä esiintyi 1–3 % eroja tilavuuspainossa kevytsaven kosteana tarttuvasta ja kuivana melko helposti murenevasta rakenteesta johtuen. Edellä mainittujen muuttujien arvioisin vaikuttaneen tuloksiin enimmillään noin 2–3 prosentin verran suuntaansa.

Niiden koekappaleiden osalta, joissa käytettiin tasausvalua, oli havaittavissa systemaattisesti koetulosten paranemista noin 4–5 %:lla suhteessa verrokkiin ilman tasausvalua. Tämä on huomioitu tuloksissa pienentämällä kyseisten koekappaleiden koetulosta vastaavan määrän. Vaihtoehtona tasausvalulle voisi toimia sopivan huokoisesta materiaalista valmistettu tasauslevy koekappaleen pinnalla. 12 mm:n puukuitulevy voisi olla varteenotettava vaihtoehto tasaamaan koekappaleen pinnan epätasaisuutta.

Koekappaleiden pinnan epätasaisuudella en katso olevan huomioitavaa vaikutusta tuloksiin, sillä materiaalin huokoinen pinta tasaantuu melko kevyen puristuksen alaisena. Pinnan epätasaisuuden vaikutuksen tuloksiin voidaan katsoa vähenevän oleellisesti 10 % puristuslujuutta määritettäessä EN ISO 29469:2022:n mukaisesti. Koekappaleen pinnan kaltevuus on voinut vaikuttaa hienokseltaan koetuloksiin, mutta arvioni mukaan hyvin vähäisessä määrin. Kalteva yläpinta saattaisi aiheuttaa puristusrasituksen epätasaista jakautumista koekappaleen sisäisesti, mikä voisi heikentää koetulosta. Koestuslaitteessa yläpuolinen puristuspinna oli nivelletty, mikä omalta osaltaan pienentää koekappaleen kaltevan yläpinnan vaikutusta koetuloksiin.

Erot koekappaleiden dimensioiden välillä on huomioitu tuloksissa 10 % puristuslujuutta määritettäessä. Tämä huomioi kappaleen todellisen pinta-alan sekä korkeuden. Kuitenkin tuloksia tulkittaessa on huomioitava kevytsavelle ominainen rosainen pinta, mikä tuo dimensioiden mittaamiseen oman haasteensa. Koekappaleen pinta-alaa kasvattamalla on mahdollista tätä virhetekijää pienentää entisestään.

Koekappaleet keskitettiin koestuslaitteen pöydälle 0,5 mm tarkkuudella, jonka katson olevan tarkkuutena sellainen, joka on huokoisen kevytsaven testauksessa riittävä.

## 7 KEHITYSKOhteita

Veden pintajännityksen alentamisella on suoria vaikutuksia savimassan kuivumisnopeuteen, minkä lisäksi se vaikuttaa veden kykyyn imeytyä massan muihin ainesosiin. Pintajännitystä voidaan alentaa saviliuoksessa fosfaattien avulla. (Jylhä-Vuorio 2020, 69, 83). Fosfaattien käyttöä tosin on pyritty yleisesti vähentämään ympäristösyistä. Lisäksi voidaan käyttää sulfaatteja ( $\text{SO}_4$ ), joilla tosin on taipumusta jäykistää saviliuosta (Jylhä-Vuorio 2020, 83), mikä ei ole kevytsaven valmistuksessa toivottavaa. Ei toivottuja vaikutuksia voisi olla myös sillä, jos alentuneen pintajännityksen vaikutuksesta vesi imeytyy kuituun voimakkaammin ja tällä olisi heikentäviä vaikutuksia kevytsaven kuivalujuuteen. Pintajännityksen alentajien käytöllä voisi kuitenkin olla potentiaalia kevytsavirakentamisen läpimenoajan pienentämiseksi. Soveltuvan tuotteen löytäminen vaatisi laajemman tähän aiheeseen kohdistuneen tutkimustyön.

Tämän työn ulkopuolelle rajattiin myös seuraavat saviliuoksen valmistuksen muuttajat. Liuoksessa käytetyn veden kovuuden vaikutusta lopputulokseen ei selvitetty. Veden kovuutta lisäävien magnesiumin ja kalsiumin määrällä on suora yhteys saviliuoksen reologisiin ominaisuuksiin (Jylhä-Vuorio 2020, 61). Veden kovuuden lisääntyessä sen pintajännitys alenee (Jyväskylän yliopisto 2013). Lisäksi saviliuoksen happamuudella on suora yhteys sen olomuotoon. Happamuus määräytyy sen mukaan, kuinka paljon liuoksessa on vapaita vetyioneja. (Jylhä-Vuorio 2020, 65.) Kevytsaven valmistuksessa käytetyn veden sekä saven happamuudella ja nesteytysaineena käytetyn soodan alkalisovalla vaikutuksella voidaan vaikuttaa saviliuoksen pH:een.

Kuituhampun pintaosan pitkän kuidun käyttö kevytsavessa voisi olla varteenotettava vaihtoehto materiaalin koossapysyvyyden parantamiseksi. Pitkän ja vahvan kuidun määrää lisäämällä voisi testata savimäärän alentamista massassa ja tämän vaikutusta lopputulokseen.

Massassa käytetyn päistäreiden kosteuspitoisuuden merkitys koetuloksiin ei työn aika selvinnyt. Tämän muuttujan vaikutusta olisi hyödyllistä tutkia kevytsaven kuivalujuuden kannalta. Alhaisen tasapainokosteutensa vuoksi savella on

taipumusta alentaa myös siihen sidottujen hygroskooppisten materiaalien kosteuspitoisuutta. Näin ollen käytetyn kuidun kosteuspitoisuuden merkitys kevytsaven lopullisiin kuivumismuutoksiin kasvaa.

Tässä työssä käsitelty lyhytaikainen puristuslujuus kertoo vain materiaalin yhdestä ominaisuudesta. Jotta materiaalin käyttöikä ja rasituksen kestoa voitaisiin paremmin arvioida, sille olisi määritettävä tarkempia materiaaliominaisuuksia, kuten pitkäaikainen puristuslujuus sekä taivutus- leikkaus- ja vetolujuus.

## 8 RAKENNETEKNISIÄ HUOMIOITA

### 8.1 Elementtitekniikka

Lujuuden näkökulmasta kevytsavi asettaa uudenlaisia haasteita, jollaisiin seinäelementtien tuotannossa ei yleisesti ole totuttu. Materiaalin on kestettävä elementin nostojen, kuljetuksen ja varastoinnin yhteydessä sille syntyvät rasitukset, kuten mahdolliset hankaus-, puristus-, värinä- ja kosteusvauriot. Materiaalin käyttäytymisestä pidempiaikaisen rasituksen alaisena olisi kartutettava tutkittua tietoa, jotta näiden tietojen avulla elementti- tai harkkotekniikkaa voitaisiin oleellisesti kehittää eteenpäin.

Varteenotettava kehityskohde olisi eristetilassa käytettävät siderimat, joiden myötä voitaisiin vaikuttaa sekä elementin taipumaan, nurjahdukseen kuin kevytsavieristeen jäykkyyteen. Tätä varten olisi tutkittava mm. puuriman tartuntakyky kevytsavimassan sisässä.

Kevytsaven kuivumisen ja elementtien tuotannon läpimenoajan kannalta harkinnan arvoista voisi olla massan tiivistäminen elementtirakenteeseen kahdessa erässä. Näin kuivumisaikaa voisi olla kokonaisuudessaan joudutettavissa ja tämä mahdollistaisi myös kahden erilaisen massan käytön elementissä. Tilanteessa, jossa rakenteelta vaaditaan lämmöneristävyttä sekä pintakovuutta, voisi tiiviimmän ts. lujemman kevytsaven käyttö eristetilan pintaosassa olla eduksi.

### 8.2 Kevytsavi osana rakennuksen runkoa

Työn tuloksien perusteella kevytsavella voisi parhaimmillaan olla rankarunkoisen rakennuksen stabiliteettia hyödyntäviä vaikutuksia. Edellytyksenä on materiaalin vähäinen kuivumiskutistuma sekä riittävä lujuus ja eristepaksuus. Asian tarkastelu vaatisi tutkimusta kevytsaven kestävydestä pitkäaikaisen ja toistuvan kuorituksen alaisena. Lyhytaikaisen puristuslujuuden arvoja ei ole tarkoituksenmukaista käyttää rakenteiden suunnittelussa. Varteenotettava käyttökohte kevytsavelle voisi olla myös välipohjarakenteissa mm. värähtely- ja ääneneristävyysominaisuuksia parantaen.

Arviona toimivan laskennan perusteella yksikerroksisen 100 m<sup>2</sup>:n asuintalon ran-  
karunkoisten ulkoseinien kevytsavieriste tuo rakennukselle painoa lisää keski-  
määrin 13 t, mikä tarkoittaa noin 300 kg seinämetriä kohden. Tämä on raken-  
teissa huomattava massan lisäys, jossa voidaan katsoa olevan hyödynnettävää  
potentiaalia rakennuksen jäykistykseen sopivalla tavalla toteutettuna.

## 9 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia kevytsaven valmistuksen eri muuttujien vaikutusta materiaalin kuivalujuuteen. Tavoitteeseen päästiin siltä osin, että koesarjojen välille saatiin koetuloksiin selkeitä eroja, mutta virhetekijöiden takia tuloksista voidaan arvioida vain muuttujien vaikutusten suuntaa ja arvioida niistä yksittäisen muuttujan vaikutuksen suuruusluokkaa. Kuitenkin havaitut erot koekappaleiden puristuksen jälkeisessä koossapysyvyydessä toivat käyttökelpoista lisätietoa materiaalikehitystä varten. Hyödyllistä tietoa saven lihavuuden vaikutuksesta kevytsaven kuivalujuuteen olisi saatu, mikäli koekappaleita olisi valmistettu myös ilman nesteytysainetta.

Oppimisprosessina työ on ollut itselleni merkittävä ja se on tuonut uusia näkökulmia esiin kevytsaven kaltaisen materiaalin valmistamisesta ja koestuksesta. Näkisin, että massassa käytetyn saven kuivalujuuskokeiden, nesteytysaineen vaikutuksen, kuivumiskutistuman sekä käytetyn kuidun koon, kosteuden ja tartuntapinnan tutkimisen avulla kevytsaven kehitystyötä olisi mahdollista edistää parhaiten. Työni tuloksista on mahdollista tehdä poimintoja kevytsaven kehitystyötä varten. Huomionarvoisena pidän nesteytysaineena käytetyn soodan vaikutuksien yhtenevä toteutuminen käytännön kokeiden ja käytetyn lähdeaineiston välillä. Hyödyllistä lisätietoa saatiin myös koekappaleiden 2,5 % puristuslujuuden arvoja määrittämällä.

## LÄHTEET

Aalto-yliopisto 2023. Rakennustekniikan laitos.

Arkkitehtitoimisto Juha Päätaalo. 2023.

Eeva Törmänen, Hamppubetoni kiinnostaa nyt rakennusalalla – ”Kotimainen hamppu kelpaa monenlaiseen rakentamiseen”. Tekniikka&Talous 22.04.2022. Viitattu 14.12.2022 <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/hamppubetoni-kiinnostaa-nyt-rakennusalalla-kotimainen-hamppu-kelpaa-monenlaiseen-rakentamiseen/c4053117-9374-4eb0-be2b-2e072e3d9fd9>

Fibratus Oy 2019. Sellueriste. Viitattu 14.12.2022 <http://fibratus.fi/sellueriste/>

Jylhä-Vuorio, H. 2020. Keramiikan materiaalit. 1. Painos. Keuruu: Printek

Jyväskylän yliopisto 2013. Lisää tietoa Veden kovuudesta. Viitattu 23.2.2023 <https://koppa.jyu.fi/avoimet/kemia/ako/veden%20kovuus/Veden%20kovuus>

Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. 4. painos. Porvoo: Bookwell Oy

Kivioja, H., Vinha, J. 2020. Hot-box measurements to investigate the internal convection of highly insulated loose-fill insulation roof structures. Energy & Buildings 2020:216. Viitattu 18.1.2023 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109934>

Luonnonvarakeskus. 2022. Kuitukasvit. Viitattu 12.12.2022 <https://projects.luke.fi/futurecrops/fi/elamammekasvit/kasvien-kuvauksia/kuitukasvit/>

Malvinsalo, T. & Luotola, E. 2020. Hampun tuotannon ja käyttömahdollisuuksien esiselvitys. Viitattu 12.12.2022 <https://www.aitomaaseutu.fi/media/Hampun-tuotannon-ja-k%C3%A4ytt%C3%B6mahdollisuuksien-esiselvitys-30-05-2020.pdf>

Rakennetaan hampusta. 2019. Kotimainen kuituhamppu. Viitattu 12.12.2022 <https://rakennetaanhampusta.turkuamk.fi/arkisto/rakennetaanhampusta.turkuamk.fi/kotimainen-kuituhamppu/index.html>

SFS-EN ISO 29469:2022. Thermal insulating products for building applications. Determination of compression behaviour (ISO 29469:2022). Helsinki: SFS.



Tiileri Oy. 2023. Tiedustelupuhelu tekniseen neuvontaan. 3.4.2023.

Timberhomes. 2023. Timber Frame House with Straw Clay Walls. Viitattu 15.1.2023 <https://timberhomesllc.com/our-work/timber-frame-homes/timber-frame-straw-clay-house/>

Turun AMK. 2018. Hampputalo. Viitattu 12.12.2022 <https://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522167026.pdf>

Volhard, F & Westermarck, M. 1994. Savirakentaminen – kevytsavirakentaminen. Helsinki: Rakennusalan kustantajat

Westermarck, M., Heuru, E-R. & Lundsten, B. 1998. Luonnonmukaiset rakennusaineet. Tampere. Tammer-Paino Oy

LIITTEET

Liite 1. Tulokset

Koestuksen sekä laskennallisen puristuslujuuden tulokset. Palautuminen kuvaa koestuksen jälkeistä koekappaleen kohoamista.

Valmistusprosessi			Mittatiedot			Koestus		Puristuslujuus		Keskiarvo		Keskivirhe
Savi	Päistäre	Muuttuja	Tilavuus- paino kg/m <sup>3</sup>	Halkaisija d,mm	Korkeus h,mm	F <sub>max</sub> (20mm) kN	Palautu- minen mm	10% mukaan N/mm <sup>2</sup>	2,5 % mukaan N/mm <sup>2</sup>	10% mukaan N/mm <sup>2</sup>	2,5 % mukaan N/mm <sup>2</sup>	10% mukaan + / -
Tiileri	Hemparade		370	124,0	131,0	8,02	8,5	0,564	0,257	0,552	0,245	2,4 %
Tiileri	Hemparade		370	123,5	131,0	7,63	7,0	0,537	0,258			
Tiileri	Hemparade		370	123,5	128,0	7,97	11,0	0,554	0,219			
Ukumaja	Hemparade		370	124,0	133,0	7,09	9,0	0,490	0,184	0,464	0,195	5,4 %
Ukumaja	Hemparade		370	123,0	130,0	6,45	10,0	0,440	0,202			
Ukumaja	Hemparade		370	124,0	130,0	6,71	10,0	0,463	0,198			
Peltosavi	Hemparade		370	124,0	134,5	5,9	13,0	0,429	0,180	0,423	0,186	1,4 %
Peltosavi	Hemparade		370	124,0	133,0	5,88	10,5	0,418	0,192			
Tiileri	Hemparade	4 vrk. Seisotus	370	124,0	133,0	8,35	15,0	0,485	0,167	0,459	0,184	3,8 %
Tiileri	Hemparade	4 vrk. Seisotus	370	123,5	132,0	6,1	9,0	0,433	0,202			
Tiileri	Hemparade	3‰ soodamäärä	370	124,5	135,0	5,99	13,0	0,326	0,069	0,327	0,068	0,1 %
Tiileri	Hemparade	3‰ soodamäärä	370	124,0	134,0	5,8	14,5	0,327	0,067			
Tiileri	Hemparade		270	124,0	129,0	2,51	11,5	0,170	0,065	0,181	0,071	5,8 %
Tiileri	Hemparade		270	124,0	130,0	2,96	10,0	0,191	0,077			
Peltosavi	Hemparade		270	124,0	131,0	2,59	10,0	0,184	0,070	0,178	0,067	3,3 %
Peltosavi	Hemparade		270	124,0	131,0	2,44	11,0	0,172	0,064			
Tiileri	Hemparade	Pakkasrasitettu	270	124,0	131,0	2,54	8,5	0,171	0,061			
Tiileri	Hemparade	Pakkasrasitettu	370	124,0	133,0	7,22	11,5	0,488	0,183			
Tiileri	Hemka		330	124,0	132,0	5,96	12,5	0,368	0,113	0,388	0,124	5,8 %
Tiileri	Hemka		330	124,0	133,0	6,66	14,0	0,413	0,135			
Tiileri	Hemka		330	124,0	134,0	6,15	14,0	0,384	0,123			
Ukumaja	Hemka		330	124,0	132,5	5,19	10,5	0,350	0,127	0,356	0,128	1,3 %
Ukumaja	Hemka		330	124,0	132,0	5,54	12,5	0,358	0,128			
Ukumaja	Hemka		330	124,0	131,0	5,64	11,0	0,360	0,131			
Tiileri	Hemka	Ristikkäiset kuidut	330	123,5	132,0	5,91	12,0	0,380	0,146	0,381	0,146	0,4 %
Tiileri	Hemka	Ristikkäiset kuidut	330	124,0	133,0	5,41	10,0	0,382	0,145			