

Mineraalivillajätteestä uusioeristeeksi

Sementtipohjaisella massalla pinnoitetun mineraalivillan uudelleenkäytön tutkimus

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

2023

Kalle Löppönen

Tiivistelmä

Tekijä(t) Kalle Löppönen	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 44	Valmistumisaika 2023
Työn nimi Mineraalivillajätteestä uusioeristeeksi Sementtipohjaisella massalla pinnoitetun mineraalivillan uudelleen käytön tutkimus		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka		
Toimeksiantajaorganisaatio (jos opinnäytetyöllä on toimeksiantaja) Hiilineutraalin rakentamisen kehityskeskus		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä esiselvitystä vähähiilisellä betonimassalla pinnoitetun mineraalivillan uusiokäytöstä esimerkiksi rakennuksen ulkopuolisena lämmöneristeinä. Opinnäytetyön tilaajana toimi Hiilineutraalin rakentamisen kehityskeskus. Opinnäytetyön tulosten myötä kehityskeskus saa tietoa mineraalivillan pinnoituksen mahdollisuuksista, jotta ongelmalliselle mineraalivillajätteelle löydettäisiin uusia kierrätysmahdollisuuksia.</p> <p>Tutkimus suoritettiin Lappeenrannan LAB-ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa. Tutkimussuuntia oli kaksi: notkea betonimassa, johon upotettiin mineraalivillapaloja sekä maakostea massa, johon sekoitettiin mineraalivillakuitua.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin, että mineraalivillapaloja on mahdollista pinnoittaa betonimassalla. Pinnoite on mahdollista saada yhtenäiseksi massakerrokseksi mineraalivillakappaleen ympärille. Maakostean massan ja mineraalivillakuidun sekoituksesta on mahdollista saada aikaan eristepalloja.</p> <p>Opinnäytetyön tulosten pohjalta tulisi jatkaa tutkimuksia. Jatkotutkimuksissa olisi syytä tutkia tuotteen lämmöneristävyys sekä mineraalivillapinnoitteen paksuuden vaikutusta kappaleen vedenimukykyyn ja kuormituksen keston.</p>		
Asiasanat mineraalivilla, kierrätys, uudelleen käyttö		

Abstract

Author(s) Kalle Löppönen	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2023
	Number of Pages 44	
Title of Publication New insulation from mineral wool waste Research on the reuse of mineral wool coated with cement-based pulp		
Degree, Field of Study Engineer (UAS), Civil and Construction Engineering		
Organisation of the client (if the thesis work is commissioned by another party) Carbon Neutral Construction Development Center		
Abstract <p>The purpose of the thesis was to make a preliminary study on the reuse of mineral wool coated with a low-carbon concrete mass, for example as thermal insulation outside the building. The carbon neutral construction development center was the client of the thesis. With the results of the survey, the Development Center will receive information about the possibilities of mineral wool coating, in order to find new recycling opportunities for problematic mineral wool waste.</p> <p>The research was carried out in the concrete laboratory of Lappeenranta LAB University of Applied Sciences. There were two research directions. Flexible concrete mass into which pieces of mineral wool were embedded and ground moist mass into which mineral wool fiber was mixed.</p> <p>As a result of the thesis, it was found that it is possible to coat mineral wool blocks with concrete mass. It is possible to get the coating as a uniform mass layer around the mineral wool piece. It is possible to create insulating balls from the mixture of ground moist mass and mineral wool fiber.</p> <p>Research should be continued based on the results of the thesis. In further studies, it should be investigated the thermal insulation of the product and the effect of the thickness of the mineral wool coating on the water absorption capacity of the piece and the duration of the load.</p>		
Keywords mineral wool, recycling, reuse		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Tutkimuksessa käytetyt materiaalit	2
2.1	Mineraalivilla.....	2
2.1.1	Käyttö	3
2.1.2	Ympäristövaikutukset ja kierrätys.....	4
2.2	Sementtituotteet	5
2.2.1	Kierrätysbetoni.....	5
2.2.2	Sementti	6
2.2.3	Masuunikuona	7
2.2.4	Maakostea betoni	8
3	Ympäristövaikutukset.....	9
4	Tutkimusselostus	10
4.1	Tutkimussuunnitelma.....	10
4.2	Tutkimusmenetelmät ja toteutus	10
4.2.1	Reseptiikan tutkimukset.....	15
4.2.2	Notkealla massalla pinnoitetun mineraalivillan tutkimukset	16
4.2.3	Maakostean massan tutkimukset.....	21
5	Tulokset.....	24
5.1	Koemassojen testitulokset	24
5.2	Mineraalivillan pinnoitus.....	27
5.3	Notkealla massalla pinnoitettujen mineraalivillapalojen testitulokset	28
5.4	Maakostean massan testitulokset	31
5.5	Levymäinen tuote	32
6	Hiilijalanjälki	35
6.1	Hiilijalanjäljen laskeminen	35
6.2	Tulokset.....	36
7	Yhteenveto ja pohdinta	40
	Lähteet	42

1 Johdanto

Mineraalivilla on maailman käytetyin eristemateriaali, jonka uusiokäyttö on vielä nykyisin vähäistä. Mineraalivillan hävittäminen maksaa vuositasolla jo pelkästään EU:n alueella useita satoja miljoonia euroja ja kustannusten odotetaan vielä kasvavan merkittävästi lähitulevaisuudessa. Mineraalivillajäte jää massamääräisesti arvioituna usein jätetilastojen pimentoon, mutta jätteiden tilavuutta arvioidessa tilanne on eri. Alhaisen tiheydensä takia mineraalivillajäte vaatii suuret varastointitilat sekä kuljetuskapasiteetin. Tällä hetkellä mineraalivillajätettä ei erotella muusta jätteestä, vaan se läjitetään kaatopaikalle sekä pienissä määrin poltetaan. Jos mineraalivillajätettä haluttaisiin hyödyntää, olisi paras ratkaisu erottaa se muusta jätteestä jo sen synty paikalla. (Yliniemi & Tuorila 2019.)

Opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä esiselvitystä mineraalivillajätteen uudelleenkäytöstä Hiilineutraalin rakentamisen kehityskeskukseen. Työn tilaajalle toive mineraalivillan uudelleenkäytöstä on tullut kasvavasta mineraalivillajätteen määrästä sekä sen kierrätysmahdollisuuksien vähyydestä. Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia, onko mineraalivillaa mahdollista pinnoittaa betonimassalla ja näin ollen käyttää uudelleen esimerkiksi rakennuksen ulkopuolisena lämmöneristeenä. Työn lähtökohtana on toimia esivaiheena varsinaisen myöhemmän tutkimuksen pohjaksi. Työstä laaditaan tilaajalle erillinen raportti, joka löytyy Hiilineutraalin rakentamisen kehityskeskuksesta.

Tutkimuksen päätavoitteena on selvittää mineraalivillajätteen pinnoitusmahdollisuutta betonimassalla, jonka sideaineena on käytetty mahdollisimman vähän sementtiä. Sementtiä korvataan tässä opinnäytetyössä kierrätysbetonista saatavalla sementtijauholla ja masuunikuonalla. Tutkimuksen tavoitteena on käyttää mahdollisimman vähän CE-merkittyä sementtiä ja käyttää tälle korvaava sideainetta mineraalivillan pinnoitusmassassa. Tutkimustyö on rajattu sementtipohjaisen pinnoituksen tutkimiseen, sillä tavoitteena on käyttää vähän energiaa kuluttavaa pinnoitusmenetelmää.

Opinnäytetyössä on kaksi tutkimussuuntaa. Toisessa tutkimussuunnassa tutkitaan mineraalivillapalojen upotusta notkeaan betonimassaan ja näille pinnoitetuille mineraalivillakapaleille tehdään Lappeenrannan LAB-ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa tiheyden, vedenimukyvyn sekä puristuslujuuden mittauksia. Toinen tutkimussuunta keskittyy maakostean massan ja mineraalivillakuidun sekoituksen tutkimiseen. Maakostean massan ja mineraalivillakuidun sekoituksesta pyritään valmistamaan runsaasti ilmaa sisältäviä betonieristepalloja.

2 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit

2.1 Mineraalivilla

Mineraalivillaeristeet ovat orgaanisesta sideaineesta, sekä epäorgaanisista kuiduista muodostuvia lämmöneristeitä. Kivi- ja lasivillat ovat yleisimpiä mineraalivilloja. Muita harvinaisempia mineraalivilloja ovat esimerkiksi kuonavilla, jota valmistetaan masuunikuonasta sekä silikaattivilla, joka on kivi- ja kuonavillan välimuoto. (Siikanen 2001, 217.) Mineraalivillan toiminta lämmöneristeinä perustuu huokoiseen materiaaliin, jonka lämmöneristyskyky pohjautuu paikallaan pysyvän ilman matalaan lämmönjohtavuuteen (Siikanen 2001, 220).

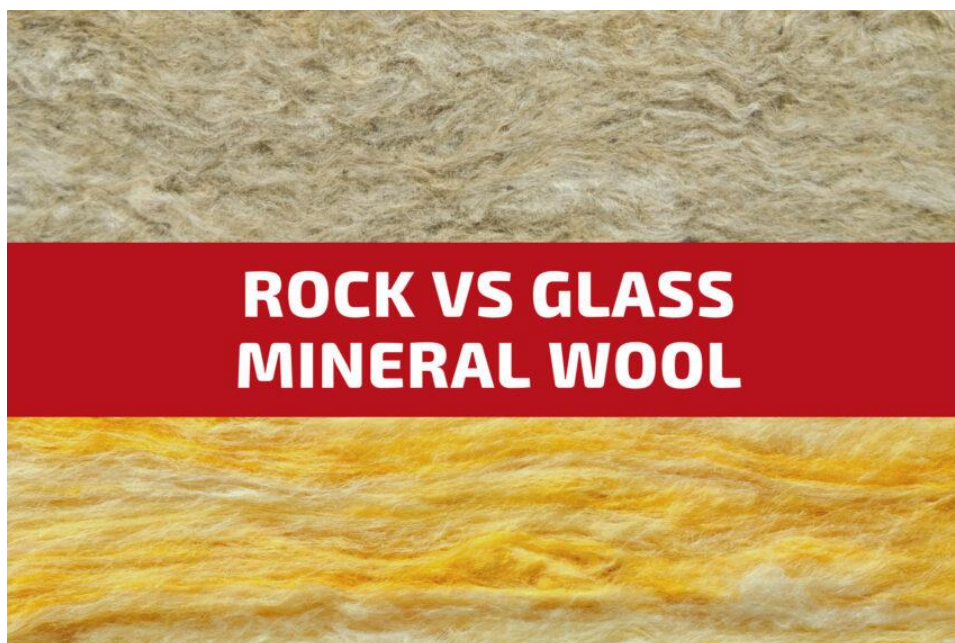
Lasivillan valmistus alkoi vuonna 1935 Ruotsista. Samaan aikaan Suomessa aloitettiin lasivillamattojen valmistus ainoastaan tuontivillasta. Kivivillan valmistus alkoi Suomessa 1940-luvun alussa Vuoksenniska Oy nimisestä yrityksestä tuotenimeltään vuorivanu. (Siikanen 2001, 217.) Kivikuitupuhallusvillan valmistus alkoi Suomessa vuonna 1978 (Oijala 1998, 37).

Kivivillan valmistukseen käytetään pääasiassa emäksisiä kivilajeja. Lasivilla valmistetaan sen sijaan soodasta, kalkkikivestä sekä kvartsihiekkasta. 50–60 % lasivillan raaka-aineesta on kierrätyslasia. (Siikanen 2001, 217.) Mineraalivillan valmistuksessa sulatettu raaka-aine venytetään ohuiksi kuiduiksi, jotka fenoliformaldehydihartsin avulla liitetään toisiinsa. Liittämisen jälkeen levyt tiivistetään, karkaistetaan ja pinnoitetaan, sekä käsitellään öljyllä veden ja pölyn hylkimiseksi. Mineraalivillalevyt ovat tilavuudeltaan noin 95 % ilmaa. (Oijala 1998, 38.)

Tiheydeltään mineraalivillat ovat 10–250 kg/m³ raaka-aineen sekä valmistusmenetelmän mukaan. Tuotteet voidaan tiheyden mukaan ryhmitellä seuraavasti:

- pehmeät eristeet 10–35 kg/m³
- jäykät eristeet 45–250 kg/m³
- tuulensuojalevyeristeet 60–210 kg/m³.

Kivi- sekä silikaattivillatuotteiden tiheys on noin kaksinkertainen verrattaessa toiminnaltaan vastaavaan lasivillatuotteen tiheyteen. (Siikanen 2001, 218.) Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen kellertävä lasivilla sekä vihertävä kivivilla.



Kuva 1. Yläpuolella vihertävä kivivilla ja alapuolella kellertävä lasivilla (Arcbuildingsolutions 2022)

2.1.1 Käyttö

Lasi- sekä kivivillaeristelevyjä käytetään sekä tiili-, teräs- ja puurunkoisten rakenteiden lämmöneristämiseen. Niitä voidaan käyttää eristeenä myös ääni sekä paloteknisesti luokitelluissa seinissä. (Siikanen 2001, 221.) Puhallettavan mineraalivillaeristeen käyttö on pääasiassa yläpohjien lämmöneristämässä uudis- sekä korjausrakentamisessa. Puhallusvilla asennetaan koneellisesti erikoismenetelmällä erityisesti hankaliin kohteisiin, kuten loivakattoisten talojen yläpohjaan. (Siikanen 2001, 222.)

Energiansäästö- ja ympäristövaatimusten painottamisen myötä mineraalivillalla on tärkeä rooli uudessa teollisessa rakentamisessa. Täydessä vauhdissa olevassa rakennusten eristyksessä mineraalivillan käyttö on kasvussa varsinkin viime vuosina, kun polystyreenivaah-tolevyjen eristystiloissa on ajoittain esiintynyt tulipaloja. Varsinkin tulipalojen takia rakennusten eristysteollisuus on kiinnittänyt suurta huomiota eristemateriaalien valintaan. Mineraalivillaa käytetään yhä kasvavissa määrin rakennusten eristysteollisuudessa sen lämmöneristyskyvyn sekä palamattomuuden vuoksi. Palamattomien lämmöneristysmateriaalien sovellusteknologia on keskeinen tutkimus- ja kehityskohde rakennusten energiansäästöteollisuudessa. (Keep insulation 2022.)

2.1.2 Ympäristövaikutukset ja kierrätys

Kivivillan kuituraaka-aineena käytetään kotimaista kiveä, kun taas lasivillassa käytetään soodaa, kvartsihiekkää ja kalkkikiveä. Kaikki edellä mainitut raaka-aineet ovat uusiutumattomia luonnonvaroja. Öljy, jota käytetään mineraalivillan sideaineen kertamuovin raaka-aineena, on myös uusiutumaton luonnonvara. Mineraalivillan ympäristövaikutuksen hyvinä puolina voidaan pitää rakennuksen käytön aikaista lämmitysenergian säästöä, joka on moninkertainen lämmitysenergian valmistusenergiaan verrattaessa. (Siikanen 2001, 222.) Käytetystä mineraalivillasta kertyy jätettä Euroopan alueella vuositasolla arviolta 2,5 miljoonaa tonnia (Kuva 2). Rakentaminen aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä arviolta globaalisti noin 40 %, joten pienetkin päästövähennykset ovat suuressa merkityksessä. (Törmänen 2021.)



Kuva 2. Mineraalivillajäte kaatopaikalla (Yliniemi 2019)

Rakennusaikana tulevat puhtaat ja kuivat hukkapalat voidaan uudelleen käyttää lämmöneristeenä puhallusvillan joukossa (Siikanen 2001, 222). Rakennusalan tavoitteena on edistää kiertotaloutta. Esimerkiksi Parocin REWOOL kierrätyspalvelu-järjestelmällä työmailla ja rakennusteollisuudessa käytettävästä kivivillasta tuleva leikkuuhukka saadaan tehokkaasti uudelleenkäyttöön. REWOOL-järjestelmässä kerätään kuivat ja puhtaat

kivivillapalat. Märät, likaiset tai muuten pilaantuneet villapalat menevät semmoisenaan kaatopaikalle. (Paroc.)

Purettuna mineraalivilla on hankala jättejää, sillä sille ei ole löydetty ekologista loppukäyttöä. Purkuvilla ei käy energijakeeksi, vaan se päättyy kaatopaikalle, jonne se jää maatumattomana pysyvästi. Purkuvillan uudelleenkäyttö on haastavaa, mutta sen uusiokäyttöä on kehitetty jo jonkin aikaa. (vtt2021.)

Ollikainen EcoUp-yrityksestä kertoo tekniikka & talouslehdessä (Törmänen 2021.) heidän tehneen salaisen tuotekehityksen, jonka avulla purkuvillasta saadaan tehtyä uusiotuotetta. Purkuvillan uusiotuotteena saadaan mikrotason partikkeleita, joita voidaan käyttää esimerkiksi asfaltin tai rakennustiilien raaka-aineena tai betonin valmistuksessa. Ollikaisen mukaan lopputuotteen hiilijalanjälki jää pieneksi, koska prosessi säästää erittäin paljon energiaa.

2.2 Sementtituotteet

2.2.1 Kierrätysbetoni

Kierrätysbetoni on betonin runkoainevaihtoehto, joka on murskattu aikaisemmin rakennetuissa ja rakennuksissa käytetystä epäorgaanisesta materiaalista (betonitieto a). Kuvassa 3 on esitetty betonin elinkaari sekä kierrätys.



Kuva 3. Betonin kierrätys (Anre 2021)

Kierrätysbetonia käytetään yleisesti teiden sekä parkkipaikkojen perustuksina, täyttömateriaalina, sekä piennarkivien valmistuksessa. Tämä hienorakeinen materiaali neutraloi pH-tasoa ja sitä käytetään yleisesti ympäristön täyttö- ja kunnostusprojekteissa. (Ozinga.)

Suomessa suurin osa (noin 95 %) kiviaineksesta käytetään maanrakentamiseen. Tästä syystä myös potentiaalisin käyttökohde betonimurskeelle on maanrakennus. Tilanne on kuitenkin toinen useissa muissa maissa, joissa purkumateriaalien kasvavat sijoitusongelmat, laajamittaiset rakennusten uusimistarpeet, sekä infrastruktuurin nopea ajanmukaistuminen nostavat päätään. (Betonikeskus ry 2005.)

Kierrätysbetonin käyttöä ja sen vaikutusta valmiin betonin ominaisuuksiin ei ole vielä tutkittu laajalti Suomessa. Tutkimuksia on kuitenkin tehty kaikkiaan jo 30 vuotta ja tehdään paljon edelleen. Betonirakenteille asetetut tarkat säilyvyys- ja lujuusvaatimukset ovat lisänneet tarvetta tutkimuksille. (Betonikeskus ry 2005.)

Kierrätysbetonin käyttö betonissa on suhteellisen helppoa, jos se valmistetaan ominaisuuksiltaan ja lujuudeltaan tasalaatuisesta ja hyvästä lähdemateriaalista. Tällaisia ovat esimerkiksi purettavat sillat tai muut lujat ja erikoislujat rakenteet, sekä elementtien tuotannossa syntyvä laadukas ja tasalaatuinen hylkymateriaali. Jos kierrätysbetonia käytetään tällöin 10–30 % koko kiviaineksesta, eivät betonin perusominaisuudet merkittävästi muutu. Kierrätysbetonin käyttöä on ohjeistettu suunnattavan rasitusolosuhteiltaan lievempiin betoneihin. Joissain käyttökohteissa ja tapauksissa on mahdollisuus korvata kaikki kiviaines kierrätysbetonilla. (Betonikeskus ry 2005.)

Kierrätysbetonia käytettäessä voidaan vesi-sementti-kiviaines suhteitus tehdä normaaliin tapaan. Veden määrää voi joutua lisäämään, koska tyypillisesti kierrätysbetoni lyhentää työstettävyyttä sekä vaatii normaalia isomman notkistin määrän varsinkin, jos kierrätysbetonin osuus on suuri (yli 50 %). (Betonikeskus ry 2005.)

2.2.2 Sementti

Sementti on epäorgaaninen materiaali, joka on hienoksi jauhettua klinkkeriä. Sementin reagoimassa veden kanssa joko ilmassa tai veden alla muodostuu kestävä ja luja lopputuote. Sementin ja veden reaktiotuotteena syntyvä sementtikivi liittyy betonin muut ainesosat yhteen. Sementtikiveä kutsutaan joskus myös sementtillimaksi. Hydratoitumatonta sementin ja veden sekoitusta kutsutaan sementtipastaksi. (Betonitieto b.)

Sementin valmistuksessa on kolme päävaihetta: kalkkikiven louhinta, murskaus sekä raa-kajauhatus, Portland klinkkerin poltto sekä lopuksi sementin jauhatus (Finnsementti a.).

Kuvassa 4 on näkyvissä sementin valmistuksen kolmen päävaiheen lopputuotteet: louhittu kalkkikivi, poltettu klinkkeri sekä lopputuotteena saatava sementti.



Kuva 4. Kalkkikivi, klinkkeri sekä sementti (Finnsementti a)

Sementtistandardissa SFS-EN 197-1 on määritelty sementtien laatuvaatimukset. Standardissa sementit on jaettu viiteen (CEM 1 – CEM 5) eri päälajeihin niiden sisältämien seosainemäärien ja laatujen mukaan. (Semtu.) Sementin viisi eri päälajia jaetaan vielä eri sementtilajeihin käytetyn seosainemäärien sekä seosaineiden perusteella. Sementtistandardi käsittelee kaikkiaan 27 eri sementtilajia. Sementtilajit voivat sisältää sekä seosaineita että tarvittavan määrän sitoutumisajan optimointiin tarkoitettua kipsiä. (Betonitieto b.)

Lujuusluokkia standardi on määrittänyt sementille kolme, Suomessa näistä on käytössä kaksi: 42.5 sekä 52.5. Standardin mukaisia CE-merkittyjä sementtejä on käytettävä aina rakenteellisessa betonissa. (Semtu.)

Sementin päästöt muodostuvat lähes kokonaan sementtitehtaan valmistusprosessista, joita löytyy Suomesta 2 kpl. Näistä tehtaista syntyy noin 1,6 % Suomen hiilidioksidipäästöistä. (Haatainen 2020.)

2.2.3 Masuunikuona

Masuunikuonaa syntyy raakaraudan tuotannon sivutuotteena kolmea erilaista kuonaa, granuloitua-, pelletoitua- sekä kappalekuonaa. Masuunikuonan sideaineominaisuudet riippuvat sekä kemiallisesta koostumuksesta, että varsinkin kuonan jäähtytystavasta. Varsinkin nopeasti jäähdytetyllä eli granuloidulla masuunikuonalla on samoja ominaisuuksia sementin kanssa. (Suomen Betoniyhdistys 2022, 18.) Kuvassa 5 on nähtävissä masuunikuonajauhe.



Kuva 5. Masuunikuonajauhe (Jfe-mineral)

Masuunikuonan hyvinä puolina voidaan pitää jauheen pieni vedentarve, joka notkistaa betonia ja samalla tekee tästä kestävämpää. Masuunikuonajauhe myös vähentää betonin hydrataatiolämpöä huomattavasti, jonka vuoksi sitä käytetään monesti isojen rakenteiden valuissa. Myöhäisempien lujuuksien kasvua pidetään myös masuunikuonan hyvinä puolina, mutta varjopuolena jauhe samalla yleensä alentaa varhaislujuuksia. Monia muitakin masuunikuonan hyviä puolia on löydetty kuonan käytön yhteydessä. (Suomen Betoniyhdistys 2022, 19.)

2.2.4 Maakostea betoni

Maakostea betoni on rakenteeltaan huokoinen betonilaatu, jossa on vähän vettä. Maakostean betonin ominaisuuksiin kuuluu, että se kuivuu nopeasti pinnoituskuuntoon siinä käytettävän veden vähyden takia, mutta sen pinta jää aina karkeaksi. (Lattiamies.) Olosuhteista riippuen maakostea betoni kuivuu noin puolet märkäbetonia nopeammin (Lappalainen 2020).

Maakostean betonin vesi-sementtisuhde on yleisesti alle 0,45, kun märkäbetonissa suhde on noin 0,6. Vettä maakostea betoni sisältää noin kolme kertaa vähemmän, joka tekee siitä ekologisen vaihtoehdon. (Lappalainen 2020.) Vesi-sementtisuhdeella tarkoitetaan betonissa olevan vesimäärän ja sementin painon suhdetta. Veden lisääminen betonimassaan parantaa työstettävyyttä, mutta liiallinen vesi myös alentaa lujuuutta. (Finnsementti b.) Maakostean betonin ekologisuutta korostaa betonijätteen vähempi määrä verrattuna märkäbetoniin. Maakostea betoni valmistetaan tavallisesti työmaalla tarpeen mukaan, joten betonia on helppo valmistaa tarvittava määrä. (Lappalainen 2020.)

3 Ympäristövaikutukset

Hiilijalanjälki

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan palvelun, toiminnan tai tuotteen aikaansaamaa ilmastokuormaa eli sitä, kuinka paljon kasvihuonekaasuja toiminnan tai tuotteen elinkaaren aikana pääsee ilmaan ja siitä syntyy. Tuotteen aikaansaama hiilijalanjälki ilmoitetaan painoyksikkönä tuotteesta tavallisesti käytettyä mittayksikköä kohden. Hiilijalanjälki ilmoitetaan yleensä kasvihuonekaasujen yhteenlaskettuna määränä eli hiilidioksidiekvivalenteina, joskus se saataan kuitenkin ilmoittaa hiilidioksidin määränä pelkästään. Hiilidioksidipäästöt ovat kaikista kasvihuonepäästöistä 80 %. (Puuteollisuus 2021.) Esimerkkinä keskiverto suomalaisen hiilijalanjälki on 10 300 kg CO₂e. Tämä luku kuvaa, paljonko päästöjä syntyy massana. Käytännössä jokainen suomalainen aiheuttaa yli 10 000 kiloa päästöjä vuodessa. Suomalaisten päästöt muodostuvat pääasiassa asumisesta, ruoasta ja liikkumisesta. Hiilijalanjäljen avulla tiedämme, kuinka pienentää päästöjä suojellaksemme ilmastoa, pysäytämme luonnon monimuotoisuuden heikkenemisen, teemme yhteiskunnasta hiilineutraalimman sekä siirymme kohti kiertotaloutta. (Fortum.)

Hiilikädenjälki

Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan hyötyä, jonka palvelu tai tuote aiheuttaa hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. Termi ei ole standardoitu, joten hiilikädenjäljellä voi tarkoittaa hieman eri asioita. Hiilikädenjälki on kuitenkin aina positiivinen tekijä. (Puuteollisuus 2021.) VTT:n määritelmän mukaan hiilikädenjäljellä tuotetaan asiakkaalle hyöty siitä, että yritys valmistaa palveluita ja tuotteita, joiden avulla asiakas pystyy pienentämään hiilijalanjälkeään. Laskennalla osoitetaan, kuinka suuren hiilikädenjäljen yrityksen tuote aiheuttaa. Mitä suurempi kädenjälki on, sen parempi se on. Kun asiakas korvaa tuotteella aikaisemmin käyttämänsä tuotteen, pienenee asiakkaan hiilijalanjälki ja tätä pienennystä kutsutaan hiilikädenjäljeksi. Energiatohokkuuden parantaminen, materiaalin käytön pienentäminen, ilmastomyönteisten raaka-ainevalintojen tekeminen, tuotteiden kierrätettävyyden kehittäminen, hukkamateriaalin määrän vähentäminen, tuotteiden käyttöiän pidentäminen sekä niiden käytettävyyden parantaminen ovat asioita, joilla jokainen voi vaikuttaa hiilikädenjäljen suuruuteen. (VTT 2020.)

4 Tutkimusselostus

4.1 Tutkimussuunnitelma

Opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä Lahden Hiilineutraalin kehittämiskeskuksen kanssa ja työn tavoitteena oli tehdä esiselvitystä mineraalivillan uudelleenkäytöstä. Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, onko mineraalivillaa mahdollista pinnoittaa materiaalilla, jonka käsittelyyn ei tarvita runsaasti energiaa. Tutkimuksen tavoitteena oli myös selvittää, kuinka saadaan pinnoitettuun eristeeseen jäämään riittävästi ilmaa, jotta tuote toimisi uudelleenkäyttävänä lämmöneristeenä. Opinnäytetyössä selvitettiin myös, mikä voisi olla villan oikea koko ja muoto optimoidessa pinnoitusta sekä millä menetelmillä pinnoitus saadaan onnistumaan villan pintaan.

Tutkimuksessa tehtiin esiselvitystä mineraalivillan uusiokäytöstä lämmöneristeenä. Tilajalle valmistettiin havainnollistavia levymäisiä tuotteita tuloksista. Opinnäytetyön tutkimuksen tavoitteena ei ollut ratkaista, kuinka kaikki mineraalivilla saadaan kierrätettyä vaan tehdä esiselvitystä sekä testejä, onko villan pinnoittaminen mahdollista toteuttaa.

Tutkimus rajautui käytetyn mineraalivillan ja kierrätysbetonista saatavan sementtijauhon tai muun vähähiilisen sideaineen yhdistelmän tutkimiseen. Tutkimuksen tavoitteena oli löytää vähän energiaa kuluttava pinnoitusmuoto mineraalivillalle.

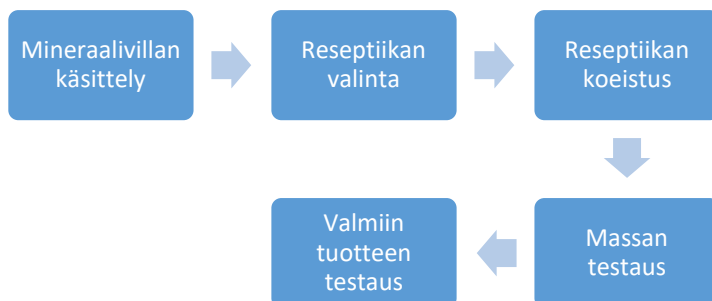
Tutkimuksen tehtävänä oli aluksi selvittää sopiva resepti massan valmistukseen. Massan valmistuksessa testattiin savea, kierrätysbetonista saatavaa sementtijauhoa sekä masuunikuonaa korvaamaan sementin määrää massasta. Esiselvityksessä päätettiin selkeästi tutkia kahta erilaista tutkimussuuntaa. Aluksi tutkittiin notkean massan hyödyntämistä mineraalivillan uudelleenkäytössä upottamalla mineraalivillapaloja massaan, josta pinnoitetut palat nostettiin kuivamaan. Toisena tutkimussuuntana opinnäytetyössä oli maakostean massan tutkiminen, jonka sekaan sekoitettiin käsin revittyä mineraalivillakuitua.

Maakostea massa toteutettiin vähäisellä vesi-sideainesuhteella toisinkuin notkea massa, jossa oli korkea vesi-sideainesuhde. Maakostea massa oli kuivempaa verrattuna notkeaan massaan, joka ominaisuuksiltaan alkoi pyörivässä laitteessa sekoituessaan palloutumaan itsestään.

4.2 Tutkimusmenetelmät ja toteutus

Tutkimustyön aineistonkeruu aloitettiin marraskuussa 2022. Tutkimus aloitettiin etsimällä vastaavia tutkimuksia ja havaittiin ettei niitä löytynyt. Seuraavaksi etsittiin tietoa, kuinka valmistaa betonia mahdollisimman vähällä sementtimäärällä. Näiden tietojen avulla päätettiin

alkaa testaamaan ensimmäisiä reseptejä massan valmistukseen. Kuviossa 1 näkyy laboratoriotutkimuksen toteutuksen vaiheistus.



Kuvio 1. Laboratoriotutkimuksen vaiheistus

Opinnäytetyössä tutkittiin eri resepteillä saavutettavia puristuslujuuksia. Koekuutiot testattiin 7 vuorokauden jälkeen valupäivästä. Kahta reseptiä testattiin lisäksi 27 vuorokauden ikäisenä, jotta saatiin selville massan lujuudenkehitys pitemmällä aikavälillä. Puristuslujuuden määrittämiseksi tehtiin kaksi kappaletta jokaisesta reseptistä. Testattavat koekuutiot olivat sivupituudeltaan 100 millimetrin kuutioita.

Puristuslujuuden määrittämisessä koekuutiosta poistettiin ylimääräinen kosteus paperilla kuivaten ja jokainen kuutio punnittiin ennen koetta. Koekuutioiden puristuslujuus määriteltiin standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti. Koekuutio kuormitettiin murtoon asti puristustestauskoneella. Puristustestauskone ilmoitti suurimman voiman sekä lujuuden koekuutiolle. Kuvassa 6 nähdään koekuutio ADR touch control 2000-puristustestauslaitteessa, jolla määriteltiin tutkimuksen koekuutioiden puristuslujuudet.



Kuva 6. Koekuutio puristustestauslaitteessa

Koekuutioista määriteltiin myös kuution tiheys. Koekuutioiden tiheys määritettiin 7 vuorokauden ikäisistä koekuutioista, jotka olivat kuivaneet $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ laboratoriossa. Kuutioiden painot mitattiin punnitusvaa'alla gramman tarkkuudella (kuva 7), jonka jälkeen koekuutioiden tiheys laskettiin kaavalla 1.



Kuva 7. Koekuutioiden punnitseminen tiheyden määrittämiseksi

$$\rho = \frac{m}{v}$$

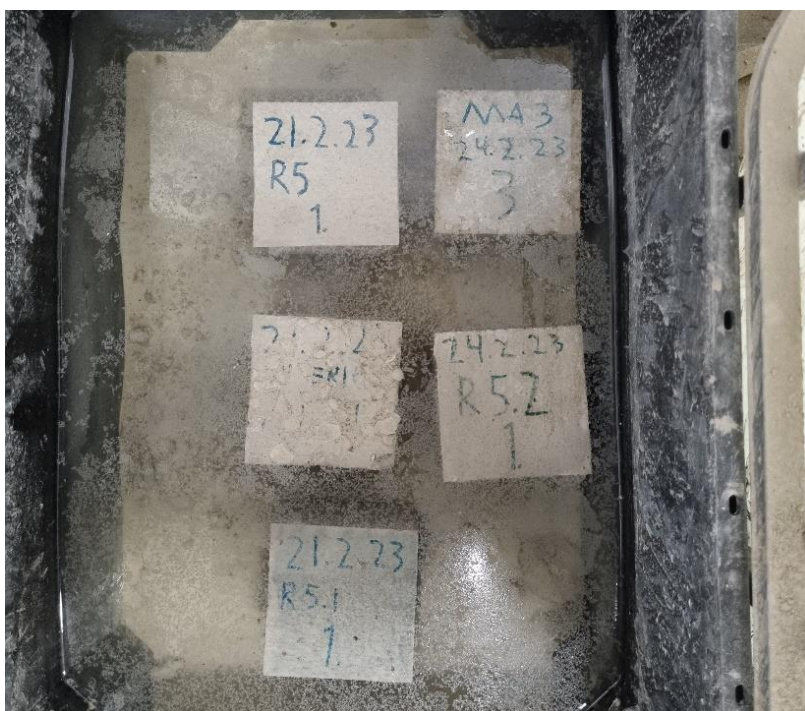
Kaava 1. Tiheyden määrittäminen.

ρ = kappaleen kosteustilan ja tilavuuden määrittämenetelmän suhteessa oleva tilavuus (kg/m^3)

m = kappaleen massa testaushetken kosteustilassa (kg)

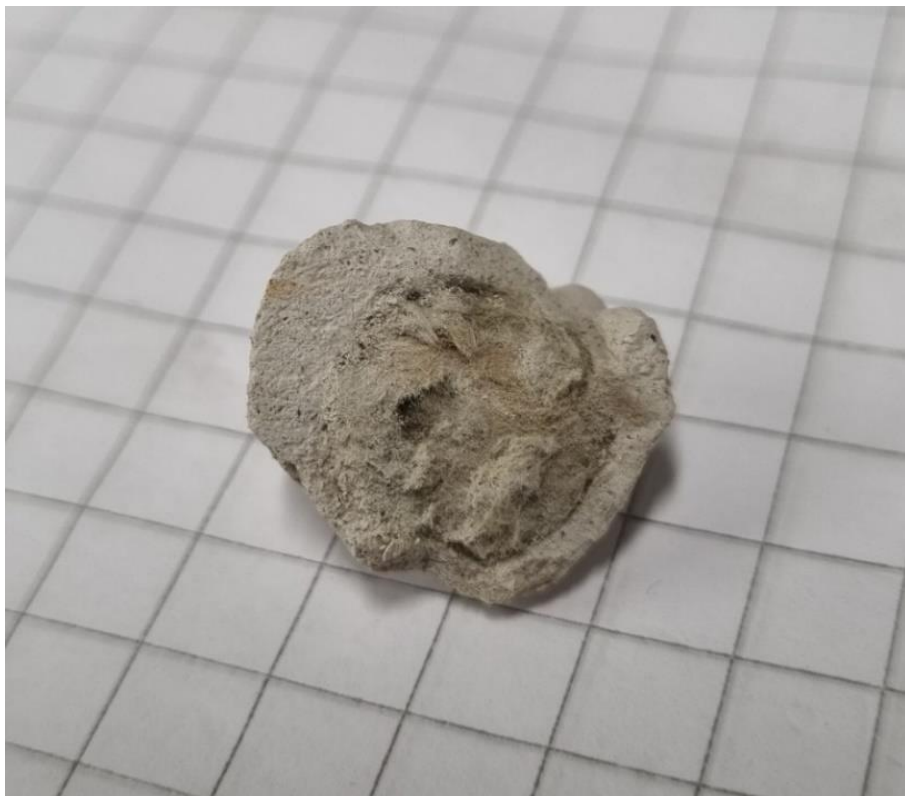
v = koekuution tilavuus (m^3).

Koekuutioiden vedenimukyky testattiin $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ vedessä 6 vuorokauden ajan. Ennen koekuutioiden veteen upottamista kuutiot punnittiin. Koekuutiot upotettiin veteen yhden vuorokauden jälkeen valusta, kuten kuvasta 8 voidaan nähdä. Välituloksia vedenimusta otettiin heti 15 minuutin jälkeen, jolloin koekuutiot punnittiin. Punnitsemisen jälkeen kuutio upotettiin uudelleen veteen ja paino mitattiin seuraavan kerran vuorokauden päästä. Viimeinen punnitseminen tehtiin, kun kuutiot olivat olleet vedessä kuusi vuorokautta. Koekuutioiden vedenimukykyä mitattiin puntarilla gramman tarkkuudella.



Kuva 8. Koemassojen koekuutiot vedenimutestissä

Massaan upotettujen mineraalivillapallojen seinämien paksuuksia tutkittiin työntömitalla. Pinnoitetut mineraalivillapallot halkaistiin laattaleikkurilla (Kuva 9) ja niistä mitattiin pinnoituksen keskimääräisiä paksuuksia. Ennen mittauksia mineraalivilla poistettiin varovasti pinnoitteen sisältä, jotta mittaukset saatiin toteutettua.



Kuva 9. Pinnoitettu mineraalivillapallo halkaistuna

Tutkimuksessa toteutettiin kaksi erilaista tutkimussuuntaa. Aluksi tutkittiin notkean massan hyödyntämistä mineraalivillan uudelleenkäytössä upottamalla mineraalivillapaloja massaan, josta pinnoitetut palat nostettiin kuivamaan. Toisena tutkimussuuntana opinnäytetyössä oli maakostean massan tutkiminen, jonka sekaan sekoitettiin käsin revittyä mineraalivillakuitua. Opinnäytetyön tutkimus toteutettiin LAB-ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa tammi- ja helmikuussa 2023. Laboratoriotyöt aloitettiin mineraalivillan pilkkomisella erimuotoisiin osiin (kuva 10). Tutkimuksessa käytettiin pienissä määrin uutta kivivillaa, sekä Etelä-Karjalan Jätehuolloilta noudettua käytettyä mineraalivillaa. Mineraalivillan työstössä ei ollut havaittavissa suuria eroavaisuuksia uuden ja käytetyn mineraalivillan välillä. Uusi kivivilla leikkautui villaveitsellä käytettyä mineraalivillaa helpommin sen ollessa jäykempää. Uuden mineraalivillan työstäminen oli mielekkäämpää villan ollessa puhtaampaa ja kuivaa verrattuna käytettyyn mineraalivillaan.



Kuva 10. Erimuotoisia mineraalivillapaloja

4.2.1 Reseptiikan tutkimukset

Mineraalivillan käsittelyn jälkeen aloitettiin reseptiikan testaukset ja tutkimukset. Koemassat valmistettiin LAB-ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa pienissä noin 5 litran määrissä. Massat sekoitettiin Hobart-merkkisellä pöytämallin betonisekoittajalla. Koemassoissa käytettiin Finnsementin Oiva-sementtiä, joka sisältää valmiiksi masuunikuonaa sekä muita seosaineita. Oiva sementti valikoitui tutkimuksen sideaineeksi sen ollessa ympäristöystävällinen sementtivaihtoehto. Massasta tehtiin vähintään kaksi kappaletta 100x100 mm koe-kuutioita, jotta massoilla saavutettavia ominaisuuksia pystyttiin vertailemaan. Taulukossa 1 on esitetty notkeat koemassat, joita tutkittiin sekä kerrottu ainesosien määrät, jolla massat on valmistettu. Taulukosta selviää myös koemassojen vesi-sideainesuhde.

Koemassa 2.1	g	Koemassa 3	g	Koemassa 3.1	g
Vesi	1350	Vesi	1100	Vesi	1430
Kierrätysbetoni # 0,25	2550	Filleri	3700	Filleri	5180
Masuunikuona	2525	Masuunikuona	1170	Masuunikuona	1456
Sementti	25	Sementti	130	Sementti	364
v/s suhde=	0,53	v/s suhde=	0,85	v/s suhde=	0,79

Koemassa 4	g	Koemassa 5	g	Koemassa 5.1	g	Koemassa 5.2	g
Vesi	1350	Vesi	1430	Vesi	1160	Vesi	1450
Kierrätysbetoni #0.25	2550	Filleri	5180	Filleri	2500	Filleri	1500
Masuunikuona	2375	Masuunikuona	1456	Masuunikuona	2000	Kierrätysbetoni # 1	1125
Sementti	125	Sementti	364	Sementti	500	Kierrätysbetoni # 0,5	1125
						Masuunikuona	3000
						Sementti	750
v/s suhde=	0,54	v/s suhde=	0,79	v/s suhde=	0,46	v/s suhde=	0,39

Taulukko 1. Koemassojen reseptit

4.2.2 Notkealla massalla pinnoitetun mineraalivillan tutkimukset

Villan käsittelyn sekä massojen tutkimuksien jälkeen aloitettiin reseptien testaaminen. Eri-muotoisia villapaloja kastettiin ja upotettiin notkeisiin taulukossa 1 oleviin koemassoihin, sekä koitettiin parhaalla mahdollisella tavalla saada villapalan pintaan jäämään yhtenäinen kerros massaa. Koemassan 4 reseptillä tehtiin pinnoitettujen villapalojen vedenimukyky- sekä puristuslujuustestit.

Opinnäytetyössä tutkittiin pinnoitettujen eri villamuotojen kykyä imeä vettä itseensä. Mineraalivillapalat pinnoitettiin koemassalla 4 upottamalla ne yksitellen massaan, josta ne nostettiin käsin koekuutiomuottiin, kuten kuvasta 11 voidaan nähdä.



Kuva 11. Massalla pinnoitettu mineraalivillapala

Tutkimuksessa tutkittiin viiden erilaisen mineraalivillan muotoa, näiden puristuslujuuksia sekä kykyä imeä vettä:

- Villamuoto 1. Leikattu iso neliö, kooltaan noin 34x34 mm.
- Villamuoto 2. Leikattu pieni neliö, kooltaan noin 17x17 mm.
- Villamuoto 3. Käsin pyöritelty iso pallo, keskiläpimitta noin 27 mm.
- Villamuoto 4. Käsin pyöritelty pieni pallo, keskiläpimitta noin 13 mm.
- Villamuoto 5. Käsin pyöritelty pieni pallo upotettuna Eri Keeper liimaan, keskiläpimitta noin 10 mm.

Kuvassa 12 on esitetty eri villapalojen muodot sekä kokoerot. Villamuodossa 5 pieniä villapalloja upotettiin Eri Keeperin ja veden sekoitukseen. Tällä testillä tutkittiin, onko vedenimukyvyssä, pinnoitteen tarttuvuudessa villan pintaan sekä puristuslujuudessa muutosta liimalla pinnoittamattomaan villapalloon. Vesi ja Eri Keeper sekoitettiin 50/50 suhteessa betonisekoittimella, johon villapalloja upotettiin ja nostettiin kuivamaan (Kuva 13).



Kuva 12. Villan muodot vedenimukyvyyn ja puristuslujuuksien mittaamiseen



Kuva 13. Villapallojen upotus Eri Keeperiin

Pinnoitetut villapalat asetettiin koekuutiomuottiin varovasti rikkomatta palan muotoa ja pinnoitusta (Kuva 14). Muotin täytyttyä villapaloista tiivistettiin muotin sisältö kuvassa 15 näkyvällä tavalla. Muotti tiivistettiin 4,4 kg painon avulla välttääkseen muotin sisään jääviä tyhjiä

kohtia, joka voisi vääristää kuution puristuslujuuden sekä vedenimukyvyn tuloksia. Muotin täryttäminen ei toiminut, koska massaa kevyempi villa nousi täryttämisen johdosta muotin pintaan massan painuessa pohjaan. Jokaisesta villamuodosta valettiin kaksi kappaletta koekuutioita, sekä näiden lisäksi kaksi kuutiota pelkästä betonimassasta, jotta vedenimukykyä, sekä puristuslujuutta voitaisiin verrata normaaliin villattomaan massaan.



Kuva 14. Pinnoitetut mineraalivillapalat aseteltiin koekuutiomuottiin



Kuva 15. Koekuution tiivistäminen

Valun jälkeen muotteja ei peitetty, eikä jälkihoidettu. Koekuutiot olivat laboratoriossa, jonka lämpötila oli tutkimuksia suorittaessa $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Koekuutioiden muotit purettiin seuraavana päivänä valusta ja laitettiin kuivumaan laboratorion pöydälle vuorokaudeksi. Kahden päivän jälkeen valusta kuutiot punnittiin. Punnitsemisen jälkeen kuutioista toinen upotettiin veteen ja punnittiin uudelleen 15 minuutin vesiupotuksen jälkeen. Punnitsemisen jälkeen kuutio upotettiin uudelleen veteen ja paino mitattiin seuraavan kerran vuorokauden päästä. Viimeinen punnitseminen tehtiin, kun kuutiot olivat olleet vedessä kuusi vuorokautta. Vertailun vuoksi myös pöydällä kuivuneet kuutiot punnittiin ennen puristuslujuuksien mittauksia. Punnitsemisen jälkeen 7 vuorokauden ikäisinä kuutioista mitattiin puristuslujuudet. Puristuslujuudet mitattiin puristustestauslaitteella ja saadut tulokset kirjattiin ylös. Kuvassa 16 näkyvässä, miltä murtoon puristettu koekuutio näyttää sisältä.

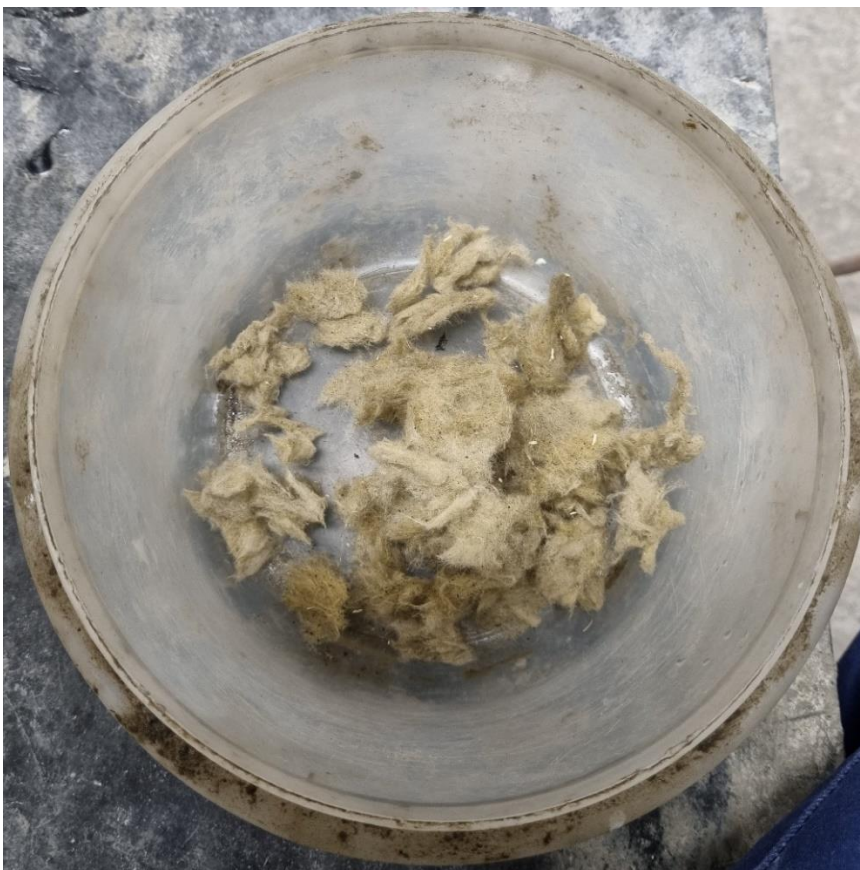


Kuva 16. Pinnoitettu mineraalivillakoekuutio puristuslujuuden mittaamisen jälkeen

Tutkimuksessa testattiin myös savijauholla pinnoitettuja villapalloja. Savijauhoa sekoitettiin veteen fillerikiviaineksen kanssa ja massa upotettiin pieniä villapalloja. Kuivuneita savimassalla pinnoitettuja villapalloja puristeltiin käsin ja halkaistiin laattaleikkurilla. Tehtyjä havaintoja verrattiin betonimassalla pinnoitettuihin mineraalivillapaloihin.

4.2.3 Maakostean massan tutkimukset

Maakostean massan testaukset toteutettiin myös 100x100 mm koekuutioilla. Maakostean massaan sekoitettiin massan valmistuksen yhteydessä kuitumaista mineraalivillaa. Mineraalivilla onnistuttiin saamaan kuitumaiseksi repimällä käsin käytetystä villalevystä kuituja, kuten kuvassa 17. Kuitua sekoitettiin massan sekaan noin 20 litraa. Massan koostumusta havainnointiin silmämääräisesti, jottei massa sekoitettaisi liikaa villaa. Taulukossa 2 maakostean massan resepti, jolla tutkimuksen massa valmistettiin. Taulukossa nähtävissä reseptin ainesosien määrät sekä vesi-sideainesuhte. Taulukossa näkyvä vesi-sideainesuhte ei ole verrannollinen normaalin betonimassan vesi-sideainesuhteeseen sen sisältävän mineraalivillan takia. Vesimäärää joutui suurentamaan massan valmistuksen yhteydessä mineraalivillan imiessä vettä itseensä.



Kuva 17. Käsin revittyä villakuitua

Koemassa maakostea	g
Vesi	1370
Filleri	1000
Kierrätysbetoni # 1	2100
Kierrätysbetoni # 0,5	2100
Mineraalivilla	204
Masuunikuona	1600
Sementti	400
v/s suhde=	0,69

Taulukko 2. Maakostean koemassan resepti

Maakosteanmassan sekä mineraalivillakuidun sekoituksesta pyrittiin aikaansaada betonipalloja. Liikkumatonta ilmatilaa pyrittiin saada aikaiseksi betonipallojen sisään rakentamalla yksinkertainen laite, joka näkyy kuvassa 18. Laite perustuu siihen, että kappale saadaan pyörimään.



Kuva 18. Eristepallojen valmistamiseen rakennettu laite

Eristepallojen valmistamiseen rakennetun laitteen toimintaperiaate oli, että putkea pyöritettiin käsin. Putki pyöri renkaitten päällä hallitusti, jotta yläpäästä syöttämällä maakosteaamassaa putken sisään, pystyttiin toisella kädellä samaan aikaan pyörittämään putkea.

Laitteeseen asetettiin kuvassa näkyvä valkoinen peltosalaojaputki. Peltosalaojaputki valikoitui mineraalivilla-betonipallojen valmistukseen putken sisäpinnan ollessa epätasainen (Kuva 19). Kuvassa 18 näkyvä musta viemäriputki on peltosalaojaputken vahvikkeena, jotta löysän salaojaputken pyöritys onnistui helpommin laitteessa. Tutkimuksessa testattiin myös tasaseinämäisen viemäriputken kykyä valmistaa mineraalivilla-betonipalloja (kuva 20).



Kuva 19. Peltosalaojaputken epätasainen sisäpinta



Kuva 20. Viemäriputken tasainen sisäpinta

5 Tulokset

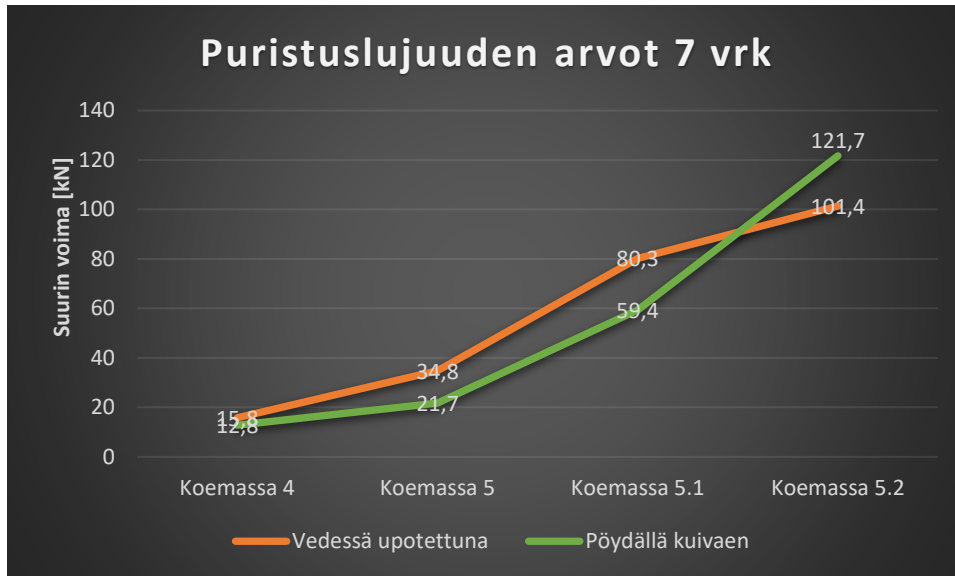
5.1 Koemassojen testitulokset

Taulukossa 3 on esitetty eri resepteillä valmistettujen koemassojen kuivatiheydet, puristuslujuuden arvot sekä vedenimukokeiden tulokset. Kuivatiheydet ja puristuslujuudet on mitattu 7 vuorokauden ikäisenä koekuutioiden kuivaessa pöydällä. Poikkeuksena edellä mainitusta koemassa 2.1, joka on punnittu ja puristettu 12 vuorokauden ikäisenä. Valetut koekuutiot olivat upotettuna veteen 6 vuorokautta, jotta koemassojen vedenimukykyä pystyttiin vertailemaan. Kuviossa esitetty painon muutos tarkoittaa koekuution painon lisäystä ennen kuution upotusta veteen. Taulukosta selviää, että koemassa neljä oli tiheydeltään pienin ja suurin tiheys oli koemassalla 5.2. Massalla 5.2 saavutettiin paras puristuslujuuden arvo sekä pienin vedenimukyky. Kaikista koemassoista ei tehty vedenimukykytestejä.

	Koemassa 2.1	Koemassa 2.1	Koemassa 3	Koemassa 3	Koemassa 3.1
ρ [kg/m ³]	1844	1824	1848	1866	1905
Suurin voima [kN]	36	35,7	8,7	9,5	30,4
Puristuslujuus [N/mm ²]	3,604	3,569	0,875	0,952	3,036
	Koemassa 3.2	Koemassa 4	Koemassa 5	Koemassa 5.1	Koemassa 5.2
ρ [kg/m ³]	1866	1753	1850	1824	1993
Suurin voima [kN]	27,8	12,8	21,7	59,4	121,7
Puristuslujuus [N/mm ²]	2,781	1,275	2,166	5,942	12,17
Vedenimukyky 6 vrk. [+g]	-	30,0	28,0	35,0	25,0

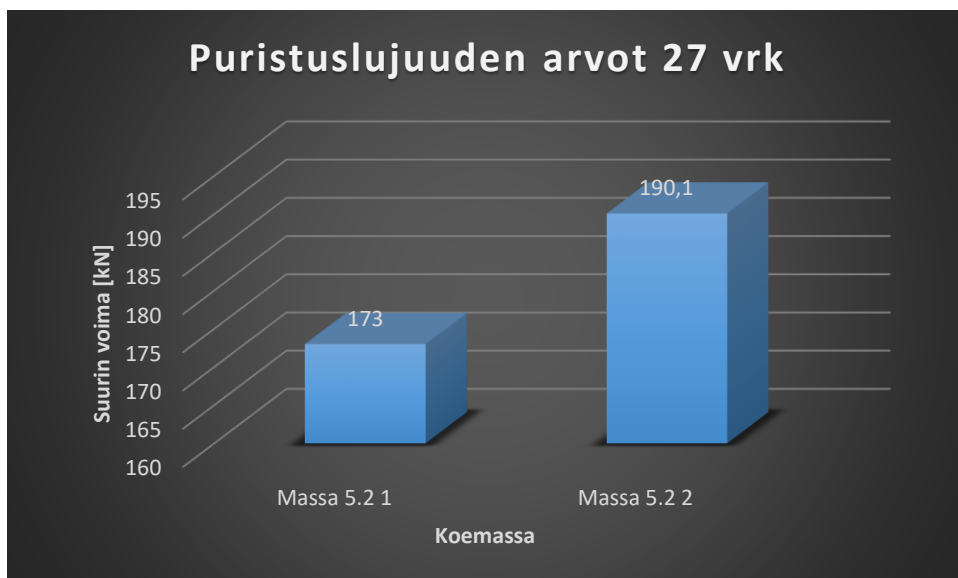
Taulukko 3. Koemassojen kuivatiheydet, puristuslujuuden arvot ja vedenimukyvyyn tulokset ilman mineraalivillaa

Kuviossa 2 on esitetty erilaisten koemassojen puristuslujuuden arvoja 7 vuorokauden ikäisinä, kun toinen koekuutioista on kuivunut pöydällä ja toinen sitoutunut veden alle upotettuna. Kuviossa vihreä viiva kertoo koekuutioiden kuivuneen betonilaboratorion pöydällä. Oranssi viiva kertoo koekuutioiden olleen näistä seitsemästä päivästä kuusi upotettuna veden alla. Kuvioista nähdään, että koemassalla 5.2 on päästy parhaimpaan puristuslujuuden arvoon.



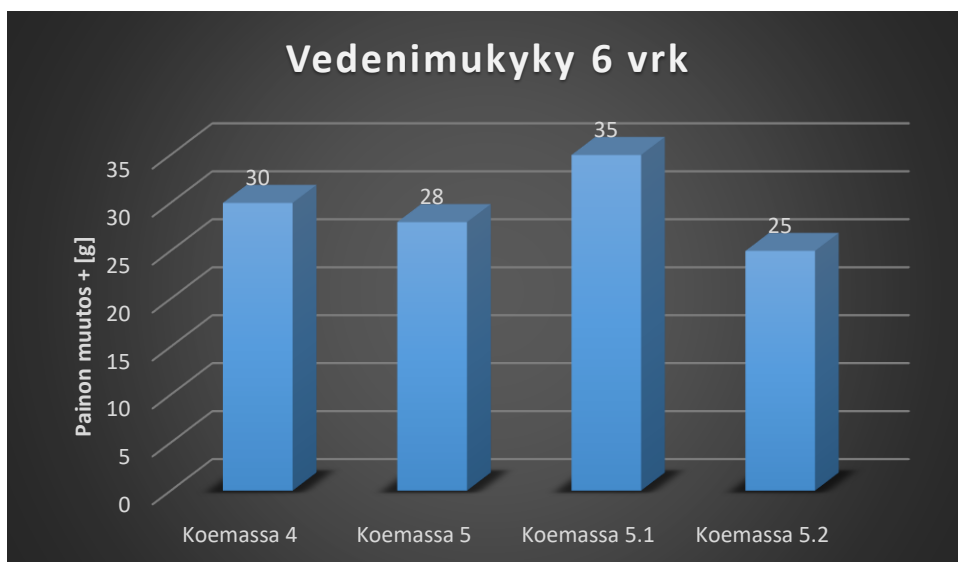
Kuvio 2. Koemassojen puristuslujuuden arvot 7 vuorokauden ikäisinä ilman mineraalivillaa

Kuviossa 3 on nähtävissä koemassalla 5.2 valettujen kahden kuution puristuslujuuden arvot 27 vuorokauden ikäisinä. Molemmat kuutiot olivat kuivamassa laboratorion pöydällä. Tuloksista selviää, että koekuutiot ovat saaneet keskiarvoisesti noin 60 % lisää puristuslujuutta 20 päivän aikana.



Kuvio 3. Koemassojen puristuslujuuden arvot 27 vuorokauden ikäisinä ilman mineraalivillaa

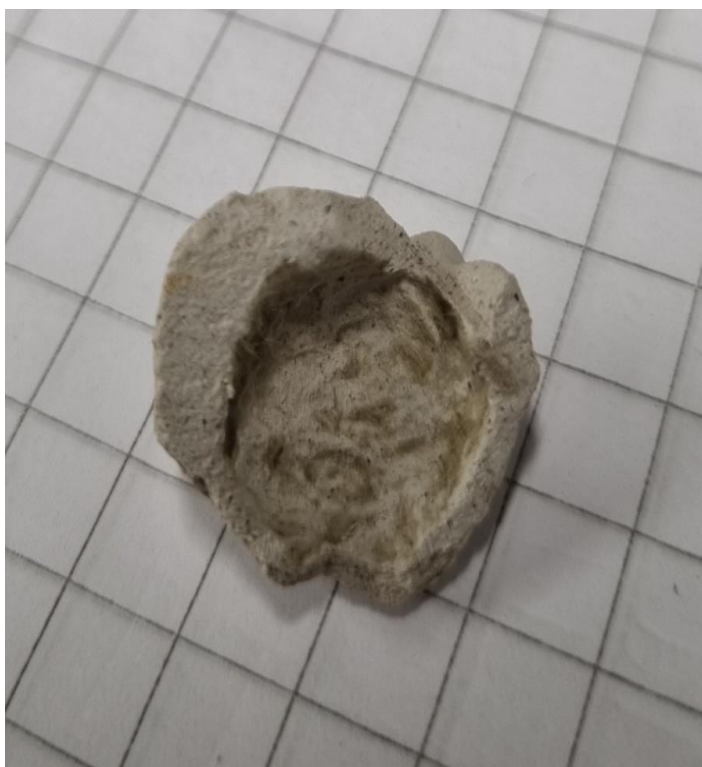
Kuviossa 4 esitetty erilaisten koemassojen vedenimukyyn testitulokset. Koemassoilla valetut kuutiot olivat upotettuna veteen 6 vuorokautta. Kuviossa esitetty painon muutos tarkoittaa koekuution painon lisäystä ennen kuution upotusta veteen. Kuvioista voidaan nähdä, että koemassa 5.2 on imenyt vettä vähiten itseensä. Eniten vettä on imenyt koemassa 5.1.



Kuvio 4. Koemassojen vedenimukyky ilman mineraalivillaa

5.2 Mineraalivillan pinnoitus

Opinnäytetyön laboratoriotestien tuloksena saatiin, että mineraalivillaa on mahdollista pinnoittaa massalla, kuten kuvasta 21 voidaan nähdä. Savimassalla pinnoitettuja mineraalivillapalloja ei tutkimuksessa mitattu koneellisesti, vaan ainoastaan käsin. Käsin puristeltaessa savella pinnoitetut mineraalivillapallot olivat saaneet hyvän puristuslujuuden verrattuna muihin tutkimuksen koemassoihin. Massapinnoitteen seinämän keskimääräisiä paksuuksia mitattiin työntömitalla millimetrin tarkkuudella ja tulokset on esitetty taulukoissa 4, 5 sekä 6. Tutkimuksissa mitattiin villamuodon 4 pinnoitteen paksuuksia. Mittaukset suoritettiin seitsemään pinnoitettuun villapalloon.



Kuva 21. Savimassalla pinnoitettu mineraalivillapallo

Villapallo	1	2	3	
Seinäma 1	5	2	1	[mm]
Seinäma 2	3	3	1	[mm]
Seinäma 3	3	3	2	[mm]
Seinäma 4	4	3	2	[mm]
Seinämän paksuuden keskiarvo:	3,75	2,75	1,5	[mm]

Taulukko 4. Savella päällystettyjen mineraalivillapallojen seinämän paksuuksia

Taulukossa 5 on koemassa reseptillä neljä päällystettyjen mineraalivillapallojen seinämien paksuuksia. Taulukossa 6 on samaisella reseptillä päällystettyjen mineraalivillapallojen seinämien paksuuksia, mutta massa kerkesi ennen pinnoitustyötä hieman sitoutumaan ja jäykistymään. Taulukkoa 5 ja 6 vertailemalla voidaan nähdä, kuinka pidempään seisonut massa sai mineraalivillapallon ympärille aikaan paksumman massakerroksen. Pidempään seisonut massa ei kuitenkaan tarttunut yhtä hyvin mineraalivillapalan ympärille ja se saattoi myös rikkoa palan muodon kokonaan.

Villapallo	1	2	
Seinäma 1	3	2	[mm]
Seinäma 2	1	2	[mm]
Seinäma 3	1	2	[mm]
Seinäma 4	2	2	[mm]
Seinämän paksuuden keskiarvo:	1,75	2	[mm]

Taulukko 5. Koemassalla neljä päällystettyjen mineraalivillapallojen seinämien paksuuksia

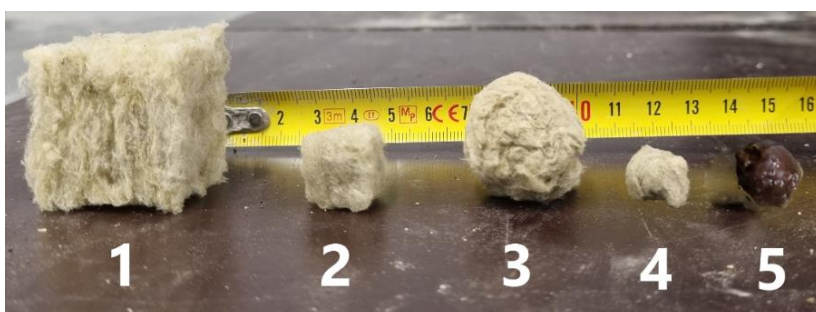
Villapallo	1	2	
Seinäma 1	3	4	[mm]
Seinäma 2	6	4	[mm]
Seinäma 3	5	4	[mm]
Seinäma 4	5	5	[mm]
Seinämän paksuuden keskiarvo:	4,75	4,25	[mm]

Taulukko 6. Koemassalla neljä päällystettyjen mineraalivillapallojen seinämien paksuuksia

5.3 Notkealla massalla pinnoitettujen mineraalivillapalojen testitulokset

Notkean massan testeihin valikoitui massa numero neljä, joka oli ennen villapallojen upotustestien alkua parhaaksi havaittu massa. Ajallisten haasteiden takia tutkimus päätettiin aloittaa koemassalla neljä, jottei koko tutkimukseen käytössä ollut aika mennyt sopivaa massareseptiä etsiessä. Tutkimuksen edetessä löytyi kuitenkin parempia massoja, kuten taulukosta 3 voidaan nähdä. Kuvassa 22 on nähtävillä eri villapalojen muodot ja näiden kokoerot. Kuviossa 5 on esitetty koemassalla neljä pinnoitettujen villapalojen vedenimukyvyn testitulokset. Valetut koekuutiot olivat upotettuna veteen 6 vuorokautta. Kuviossa

esitetty painon muutos tarkoittaa koekuution painon lisäystä ennen kuution upotusta veteen. Kuviossa 5 näkyvä villaton vertailumassa on vertailukuutio, joka on valettu pelkällä koemassalla ilman villaa. Numero viisi villapallo on pieni villapallo, joka on upotettu Eri Keeperiin. Tuloksista selviää, että mitä pienempi villapallo, sitä vähemmän sillä on vedenimukykyä. Eri Keeperillä pinnoitettu villapallo pinnoitettiin uudelleen massalla ja testeissä tämä kokonaisuus imi vettä vähiten testatuista villamuodoista. Eniten vedenimua oli kuutiossa, joka oli täytetty massalla pinnoitetuilla isoilla leikatuilla neliövillapaloilla.



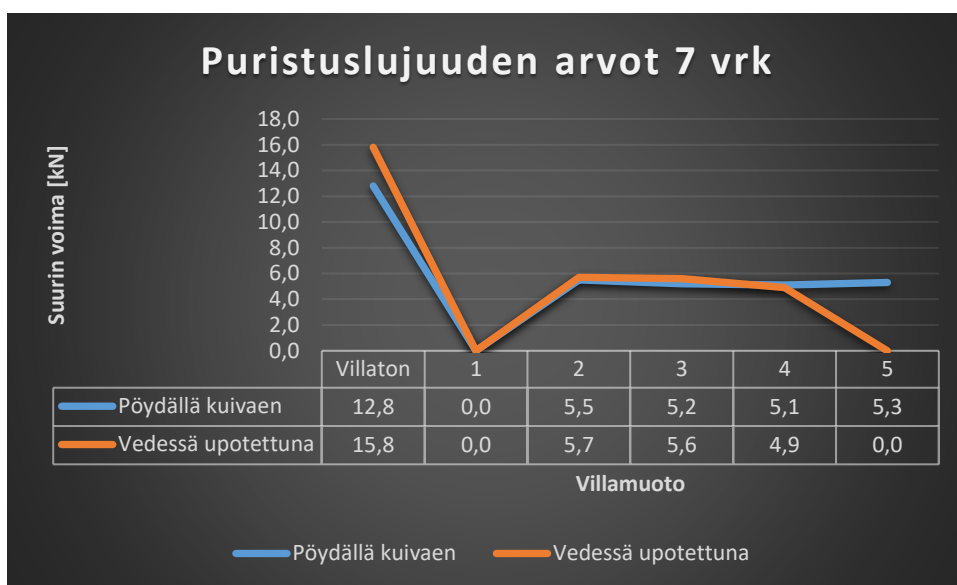
Kuva 22. Erilaisten villapalojen muodot, joille tehtiin tutkimuksia



Kuvio 5. Erilaisten villamuotojen vedenimukyky

Kuviossa 6 on esitetty koemassalla neljä pinnoitettujen mineraalivillapalojen puristuslujuudet 7 vuorokauden ikäisinä. Kuviossa sininen viiva kertoo koekuutioiden kuivuneen betonilaboratorion pöydällä. Oranssi viiva kertoo koekuutioiden olleen näistä seitsemästä

päivästä kuusi upotettuna veden alla. Paras puristuslujuus saatiin aikaan villattomassa koekuutiossa, joka sitoutui veden alla kuusi vuorokautta. Huonoin puristuslujuuden arvo saatiin isossa neliön muotoisilla villapaloilla toteutetussa koekuutiossa. Isoilla neliönmuotoisilla mineraalivillapala-koekuutiolla ei saatu ollenkaan puristuslujuuden arvoa pöydällä kuivatettuna, eikä vedessä upotettuna.



Kuvio 6. Koekuutioiden puristuslujuudet 7 vuorokauden ikäisinä

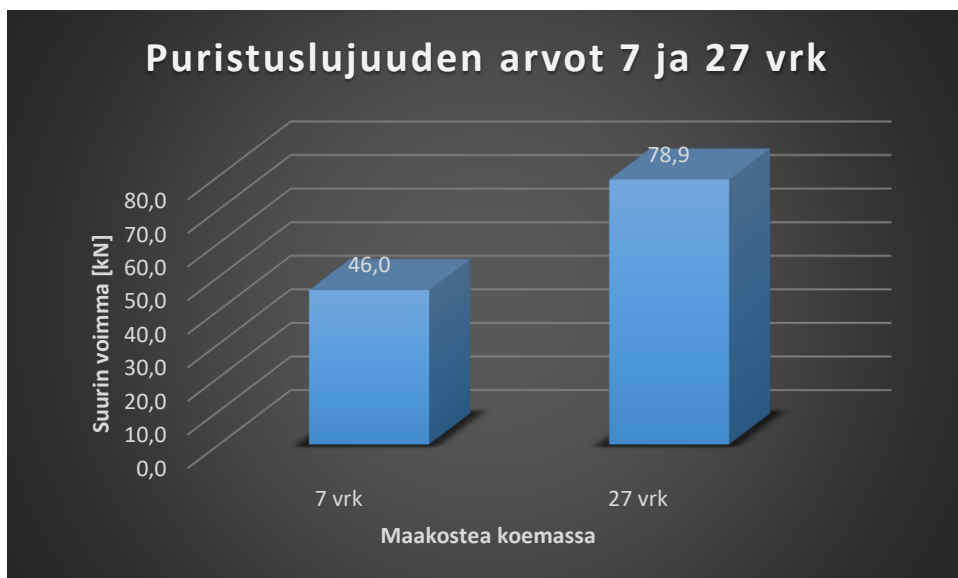
Taulukossa 7 on esitetty eri villamuodoilla saatujen koekuutioiden irtotiheydet. Villapalat pinnoitettu koemassalla neljä. Koekuutiot mitattiin 7 vuorokauden jälkeen valupäivästä ja kun ne olivat kuivaneet laboratorion pöydällä. Taulukosta selviää, että mitä isompi villa pinnoitteen sisällä oli, sitä kevyempi koekuutio oli. Pienemmillä pinnoitetuilla villapaloilla täytetty koekuutio painoi enemmän lisääntyneen betonimäärän vuoksi. Taulukossa näkyvä villaton on vertailukuutio, joka on valettu pelkällä betonimassalla ilman mineraalivillaa.

	Villaton	1	2	3	4	5
ρ [kg/m ³]	1753	1033	1253	1191	1245	1525

Taulukko 7. Eri villamuotojen koekuutioiden kuivatitheydet

5.4 Maakostean massan testitulokset

Maakostean massan ominaisuuksista tutkittiin puristuslujuutta, vedenimukykyä sekä tiheyttä. Maakostean massan sekaan oli lisätty käsin revittyä mineraalivillakuitua noin 20 litraa. Kuviossa 7 on esitetty puristuslujuuden arvot 7 ja 27 vuorokauden ikäisinä. Puristuslujuus lähes kaksinkertaistui 20 vuorokaudessa. Taulukossa 8 näkyy maakostean massan kuivatiheys sekä vedenimukyvyn testitulokset.



Kuvio 7. Maakostean koemassan puristuslujuuden arvot 7 ja 27 vuorokauden ikäisenä

maakostea koemassa	
ρ [kg/m ³]	1641
Painon muutos + [g]	17

Taulukko 8. Maakostean koemassan kuivatiheys sekä vedenimukyky

Maakostealla koemassalla valmistettiin eristepalloja siihen tarkoitetulla laitteella (Kuva 18) ja näistä palloista valmistettiin levymäinen tuote. Kuvassa 23 on maakostealla koemassalla ja eristepallojen valmistukseen tarkoitetulla laitteella tehty levymäinen tuote, jota voisi käyttää esimerkiksi routasuojauksena rakenteen ulkopuolella.



Kuva 23. Maakostealla koemassalla valmistettu levymäinen tuote

5.5 Levymäinen tuote

Tutkimuksen lopuksi valmistettiin sekä notkealla massalla pinnoitetuista mineraalivillakappaleista (Kuva 24) että maakostean massan ja mineraalivillakuidun sekoituksesta (Kuva 25) levymäiset tuotteet. Kuvassa 26 on nähtävissä valmiit levymäiset tuotteet.



Kuva 24. Notkeaan massaun upotetuilla villapaloilla valmistuva levymäinen tuote



Kuva 25. Maakostean massan ja villakuidun sekoituksesta valmistuva levymäinen tuote



Kuva 26. Levymäiset tuotteet

Taulukossa 9 on laskettu maakostean massan ja mineraalivillakuidun sekoituksesta saatavan sekä notkeaan massaan upotetuilla mineraalivillapaloilla valmistetun levymäisen tuotteen tiheys. Levyt on punnittu tiheyden määrittystä varten 6 vuorokauden kuluttua valusta. Vertailtavaksi tuotteeksi on otettu esimerkiksi routasuojauksissa käytettävän XPS-uretaanieristeen sekä pelkän mineraalivillan tiheys. Tuloksista havaitaan, että ainakin tällä tyylillä pinnoitettaessa mineraalivillaa ja siitä valmistettaessa levymäistä tuotetta on tuotteen tiheys

huomattavasti suurempi verrattuna valmiiseen routaeristeeseen. Raskaimpaankin mineraalivillaan verrattuna massalla pinnoitetusta mineraalivillasta valmistettu levy on huomattavasti painavampaa.

Eristelevy	Tiheys	
Mineraalivilla	10...250	kg/m ³
XPS-uretaanieriste	30...50	kg/m ³
Kevytsoramurske	304	kg/m ³
Pinnoitetuilla villapaloilla valmistettu laatta	1506	kg/m ³
Maakostean massan ja villakuidun sekoituksella valmistettu laatta	1778	kg/m ³

Taulukko 9. Tutkimuksen tuloksena valmistettujen eristelevyjen vertailu kaupallisiin tuotteisiin

6 Hiilijalanjälki

6.1 Hiilijalanjäljen laskeminen

Hiilijalanjäljestä tehtiin laskenta, jossa vertailtiin kaupallisia routasuojakeristeitä sekä rakennetonia opinnäytetyössä tutkittuun massalla pinnoitettuun mineraalivillaan. Laskennassa käytettiin co2data.fi sivuilta saatavia lämmityspotentiaaliarvoja (GWP) eri tuotteille, kuten kuvasta 27 voidaan nähdä. Hiilijalanjälkeä ei tässä opinnäytetyössä määritelty ISO 14067-standardien mukaan. Pinnoitetun mineraalivillan hiilijalanjälkilaskenta suoritettiin koemasalla 4.

Stone wool insulation for roofs, density 63 kg/m ³ Kivivillaeriste kattoihin, tiheys 63 kg/m ³ Stenullsisolering för tak, densitet 63 kg/m ³	1.5 kg CO₂e /kg KONSERVATIIVINEN ARVO RAKENTAMISLUVAN HAKEMISEEN, GWP (A1-A3)
---	--

[LISÄÄ LUETTELOON](#)

Ympäristöindikaattorit

TYYPILLINEN ARVO, GWP (A1-A3) Ei käytetä rakentamislupaa haettaessa	1.2 kg CO ₂ e /kg
KONSERVATIIVISEN ARVON KERROIN	1.2

Kuva 27. Kivivillan tyypillinen lämmityspotentiaaliarvo (co2data)

Co2datan rakentamisen päästötietokannasta ei löytynyt jokaiselle tuotteelle lämmityspotentiaaliarvoja, joten näiden tuotteiden arvot etsittiin valmistajien ympäristöselosteista. Kuvassa 28 on nähtävissä Finnsementin valmistaman oiva-sementin lämmityspotentiaaliarvo.

FINNSEMENTTI
A CRH COMPANY

EPD®

ENVIRONMENTAL INFORMATION

LCA results per 1 metric t of bulk cement

Core environmental impact indicators			A1	A2	A3	A1-A3
Global warming potential, total	GWP-tot	kg CO ₂ eq.	538	5.6	6.2	549

Kuva 28. Oiva-sementin ympäristöseloste (Finnsementti c)

Vertailussa olevan massalla pinnoitetun mineraalivillan hiilijalanjätkilaskennassa ei ole otettu huomioon tuotteen raaka-aineiden hankinnan ja käsittelyn (A1), kuljetuksen valmistukseen (A2) sekä tuotteen tuotannon (A3) elinkaaren vaiheita, johon energiaa kuluu tuotteen valmistuksessa. Jokaisen kaupallisen tuotteen lämmityspotentiaaliarvoissa nämä ovat kuitenkin otettu huomioon. Kaupallisten tuotteiden ympäristöselosteissa lämmityspotentiaaliarvot elinkaaren eri vaiheissa on laskettu yhteen, josta on saatu GWP-total arvo.

Kuvassa 29 on nähtävissä, kuinka masuunikuonalla on valmistettu vähähiilisesti rakennebetoni sekä vertailuksi normaalisti kovettuvan rakennebetonin reseptiikka. Näitä rakennebetoneita vertailtiin myös pinnoitetun mineraalivillan hiilidioksidipäästöihin.

Normaalisti kovettuva rakennebetoni C25/30

Raaka-aine	Määrä, massa- %	Alkuperä
Sementti	12,5	Suomi / EU
Kiviaines (hiekkä, sora ja sepeli)	79,4	Suomi
Vesi	7,8	Suomi

Vähähiilinen rakennebetoni C25/30

Raaka-aine	Määrä, massa- %	Alkuperä
Sementti	7,4	Suomi
Kiviaines (hiekkä, sora ja sepeli)	79,5	Suomi
Vesi	7,6	Suomi
Masuunikuona	5,4	Suomi

Kuva 29. Vähähiilisen ja rakennebetonin reseptiikan erot (Betoniteollisuus ry)

6.2 Tulokset

Tuotteista tehtiin hiilijalanjäljen vertaileva laskenta CO2data.fi:stä saatavilla materiaalien tiedoilla. Hiilijalanjälkeä ei tässä opinnäytetyössä määritelty ISO 14067-standardien mukaan. Suurin ympäristövaikutus mineraalivillan kierrätyksessä pinnoitusmenetelmällä tulee mineraalivillan elinkaareissa. Pinnoitetusta mineraalivillasta olisi syytä laskea elinkaariarviointi, jotta saataisiin lisätietoa ympäristövaikutuksista mineraalivillan uudelleenkäytöstä pinnoitettuna eristeenä.

Elinkaarianalyysin kannalta kevytsoramurske on parempi vaihtoehto uretaanieristeseen verrattuna sen kierrätettävyyden takia. Kevytsoramurske voidaan täysin uudelleen käyttää, toisinkuin uretaanieriste, joka menee poltettavaksi jätteeksi.

Käytettäessä mineraalivilla uudelleen pinnoitettuna esimerkiksi rakennuksen ulkopuolella routasuojauksena, saataisiin mineraalivilla nostettua kaksi astetta ylemmäksi co2datan asteikolla (kuva 30). Tämä tarkoittaisi, että mineraalivilla voitaisiin käyttää uudelleen jossain toisessa tuotteessa, eikä se menisi kokonaan kaatopaikalle läjitykseen. Mitä korkeammalla tuote on co2datan asteikolla, sitä parempi se on ympäristön kannalta. Tämän opinnäytetyön

tutkimuksen avulla pyritään lisäämään mineraalivillan uudelleenkäyttöä, joka nostaisi mineraalivillaa co2datan asteikolla ylöspäin.

ELINKAAREN JÄLKEINEN SKENAARIO (%)	Reuse	0 %
	Recycled as secondary rawmaterial	0 %
	Energy recovery	0 %
	Final disposal	100 %
	Hazardous waste to be removed from use	0 %
MUUNNOSKERROIN	Density, kg/m ³	63

Kuva 30. Kivivillan tämänhetkinen elinkaaren jälkeinen skenaario (co2data)

Taulukossa 10 on nähtävissä hiilijalanjälkilaskenta, jossa vertailtiin hiilidioksidipäästöjä kaupallisten routasuojaeristeiden, rakennebetonien sekä opinnäytetyössä tutkitun pinnoitetun mineraalivillan välillä. Laskenta suoritettiin koemassa neljän reseptillä.

Kevytsoramurske						
GWP A1-A3	0,33	CO ²				
Tiheys	304	kg/m ³				
		=	100,3	CO ² kg/m ³		
XPS-uretaanieriste						
GWP A1-A3	2,60	CO ²				
Tiheys	32	kg/m ³				
		=	83,2	CO ² kg/m ³		
Vähähiilisesti pinnoitettu mineraalivilla jätevillaalla						
	Masuunikuona	Sementti	Kierrätysbetoni			
GWP A1-A3	0,00015	0,024	0,0000017	=	0,016	CO ²
Tiheys	1253	kg/m ³				
		=	28,2	CO ² kg/m ³		
Vähähiilisesti pinnoitettu mineraalivilla uudella villalla						
	Masuunikuona	Sementti	Kierrätysbetoni	villa		
GWP A1-A3	0,00015	0,024	0,0000017	0,25	=	0,27 CO ²
Tiheys	1253	kg/m ³				
		=	337,0	CO ² kg/m ³		
Normaalisti kovettuva rakennebetoni c25/30						
GWP A1-A3	0,24	CO ²				
Tiheys	2353	kg/m ³				
		=	571,8	CO ² kg/m ³		
Vähähiilinen rakennebetoni c25/30						
GWP A1-A3	0,18	CO ²				
Tiheys	2366	kg/m ³				
		=	416,4	CO ² kg/m ³		

Taulukko 10. Hiilijalanjätkilaskenta

Taulukosta selviää, että pinnoitettu mineraalivilla, joka valmistettaisiin jätevilasta, tuottaisi vähiten hiilidioksidipäästöjä vertailluista tuotteista. Toisessa tapauksessa laskenta on suoritettu niin, että villa on valmistettu tätä tuotetta varten. Uudella villalla valmistettu pinnoitettu mineraalivilla tuottaisi moninkertaisesti enemmän hiilidioksidipäästöjä jätevillaalla valmistettuun tuotteeseen verrattuna. Laskennassa käytetyn pinnoitetun mineraalivillan arvo on kuitenkin todellista pienempi, koska tässä ei ole mukana kaupallisten tuotteiden sisältämiä A1-A3 vaiheita, jotka kuluttavat energiaa tuotteen valmistuksessa. Taulukossa keltaisella pohjalla näkyvä lopputulos hiilidioksidipäästöstä tarkoittaa, jos käytettäisiin kuutiometri kyseistä tuotetta, siitä syntyisi keltaisella pohjalla näkyvä määrä hiilidioksidipäästöjä. Mitä pienempi lukema laskennoista on saatu, sitä pienempiä hiilidioksidipäästöt on.

Kevytsoramurskeen hiilidioksidipäästöt ovat korkeammat kuin esimerkiksi XPS-uretaanieristeen, vaikka uretaanieriste tehdäänkin öljystä. Kevytsoramurskeen korkea hiilijalanjälki johtuu sen valmistuksen suuresta energian tarpeesta. Mitä enemmän tuotetta joudutaan kuljettamaan tai käsittelemään sen valmistuksessa, sitä korkeammaksi hiilijalanjälki kohoaa. Laskennan tuloksena myös saatiin, että vähähiilisesti pinnoitettua jätevillaa voisi käyttää melkein kolmenkertaisen määrän verrattuna esimerkiksi XPS-uretaanieristeeseen verrattaessa tuotteiden aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä.

7 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyössä tutkittiin mineraalivillan mahdollista uusiokäyttöä esimerkiksi rakennuksen ulkopuolisena lämmöneristeenä. Tutkimuksessa pinnoitettiin erimuotoisia mineraalivillapaloja betoni- sekä savimassoilla, joihin käytettiin mahdollisimman vähän sementtiä. Sementtiä korvattiin ekologisemmilla vaihtoehdoilla, raakaraudan tuotannon sivuvirroista saatavalla masuunikuonalla sekä käytetyn betonin murskauksesta saatavalla kierrätysbetonilla. Pinnoitetuille mineraalivillapaloille tehtiin puristuslujuus-, vedenimukyky- sekä tiheysmittauksia. Tavoitteena oli energiatehokkuus, mineraalivillajätteen vähentäminen sekä keksiä mineraalivillalle vähän energiaa tarvitseva kierrätysmuoto.

Mineraalivillan käsittely vaati runsaasti toimenpiteitä laboratoriossa ennen sen käyttöä esiselvitystyössä. Mineraalivillajätteen noutaminen jätehuolloilta tutkimustyötä varten havainnollisti purettavista kohteista tulevan mineraalivillajätteen määrää sekä sen, kuinka paljon mineraalivillajätteen mukana tulee muutakin jätettä, kuin pelkkää mineraalivillaa. Mineraalivillajätteen kierrätykseen, sen ohjeistamiseen sekä käsittelyn työllistävyyteen on keskityttävä entistä enemmän, jos mietitään mineraalivillan käyttöä uudelleen lämmöneristeenä.

Tutkimus osoitti, että oikeanlaisen betonimassareseptin löytyessä mineraalivillapala on mahdollista pinnoittaa ja tällä on puristuslujuuskykyä. Tehtyjen havaintojen pohjalta voidaan todeta, että lujuus ja kestävyys sen sijaan vaativat jatkotestausta ja jatkokehitystä molemmista tutkimussuunnista saatavilta tuotteilta, jos tuotteita käytettäisiin esimerkiksi rakennuksen ulkopuolisena lämmöneristeenä.

Mineraalivillapalaa pinnoittaessa paras villamuoto on tämän tutkimuksen mukaan pieni tiivis mineraalivillapallo. Tutkimuksen aikana selvisi, että jatkotutkimukset ovat tarpeellisia. Jatkotutkimuksia pitäisi tehdä pinnoitteen paksuuden optimointiin, sekä kuinka paljon pinnoitteen paksuus vaikuttaa kappaleen vedenimukykyyn ja kuormituksen keston.

Vedenimutestien perusteella voidaan havaita, että villamuodolla viisi toteutetun koekuution vedenimu oli testeissä vähäisin. Tiheyksiä vertaamalla villan avulla koekuutioon on saatu tyhjää ilmatilaa 228 gramman verran. Tästä tyhjästä ilmatilasta vain 18 grammaa on täyttynyt vedellä kuuden vuorokauden aikana kuution ollessa upotettuna veteen. Pinnoitettu villamuoto neljä imi vettä toiseksi vähiten tutkituista villamuodoista. Tiheyden mukaan pinnoitetulla villamuodolla neljä valmistetun koekuution sisään saatiin tyhjää ilmatilaa 508 grammaa. Tästä ilmatilasta 65 grammaa täyttyi vedellä vedenimutestissä.

Vedenimutestien perusteella Eri Keeperillä pinnoitettu villapallo imi vettä vähiten tutkituista villamuodoista. Samalla tyhjää ilmatilaa saatiin vähiten aikaan koekuution sisään. Eri Keeperillä pinnoitettu villapallo oli tutkimuksen pienin villamuoto, joka mahdollisesti selittää sekä

pienen vedenimun, että tyhjän ilmatilan vähyyden koekuutiassa. Tulosten perusteella pinnoitettu mineraalivillapallo imee vettä itseensä vähän, joten jatkotutkimuksissa olisi syytä tutkia eri resepteillä pinnoitettujen mineraalivillapalojen vedenimua. Jatkotutkimuksissa tulisi pyrkiä löytämään pinnoitusresepti, jonka avulla vedenimu saataisiin mahdollisimman vähäiseksi.

Maakostean betonin ja villakuidun sekoitusta ei juuri tässä opinnäytetyössä tutkittu. Vähäisten tutkimustulosten perusteella jatkotutkimukset ovat tarpeellisia etenkin siihen, onko mineraalivillakuidusta massan seassa enemmän haittaa kuin hyötyä. Mineraalivillakuidun määrän optimointiin olisi jatkotutkimuksissa syytä perehtyä. Mineraalivillamäärän optimoinnissa tulisi tutkia villan määrää massassa, jotta massasta tulee tarpeeksi ilmavaa saavutukseen parhaan lämmöneristävyuden. Liiallisesta mineraalivillamäärästä on taas massan puristuslujuuden kannalta haittaa, jolloin eristepallo ei kestäisi esimerkiksi maatyön painetta rakennuksen vierustalla.

Pinnoitetuista mineraalivillapaloista sekä maakostealla koemassalla valmistetuista mineraalivilla-betonipalloista valmistetut levymäiset tuotteet tarvitsevat jatkotutkimuksia. Tutkittavaa olisi, voisiko isomman mineraalivillalevyn pinnoittaa betonimassalla ja käyttää samoisenaan esimerkiksi rakennuksen routasuojauksena. Levymäiselle tuotteelle olisi myös syytä tehdä lämmöneristyskyvyn testauksia, jotta tuotteen lämmöneristävyys saataisiin selville. Tutkimuksessa selvisi, että pinnoitetun mineraalivillakappaleen sekä maakostean massan ja mineraalivillakuidun sekoituksesta saatavan levymäisen tuotteen tiheys on huomattavan suuri verrattuna esimerkiksi kaupallisiin routasuojalevyihin.

Lähteet

Anre, A. How are concrete recycled. Prodyogi. Viitattu 6.3.2023 Saatavissa <https://www.prodyogi.com/how-are-concrete-recycled>

Arcbuildingsolutions. 2022. Rock mineral wool vs glass mineral wool. Viitattu 28.3.2023. Saatavissa <https://www.arcbuildingsolutions.co.uk/knowledge-base/rock-mineral-wool-vs-glass-mineral-wool/>

Betonikeskus ry. 2005. Betonin, betonilietteen ja veden kierrätys betoniteollisuudessa. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

Betoniteollisuus ry. Verifioitu elinkaariarvio (LCA). Viitattu 14.4.2023. Saatavissa https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/05/Elinkaariarvio_valmisbetonit-1.pdf

Betonitieto a. Betonisanasto. Viitattu 1.3.2023. Saatavissa <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto.html>

Betonitieto b. Sementti. Viitattu 7.3.2023. Saatavissa <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/sementti.html>

Co2data. Rakentamisen ja infrarakentamisen päästötietokannat. Viitattu 14.4.2023. Saatavissa <https://co2data.fi/>

Finnsementti a. Sementin valmistus. Viitattu 1.3.2023. Saatavissa <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-sementista/valmistus/>

Finnsementti b. Betonin lujuus riippuu vesi-sementtisuhteesta. Viitattu 11.3.2023. Saatavissa <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaille/betonin-lujuus-riippuu-vesi-sementtisuhteesta/>

Finnsementti c. Environmental Product Declaration. Oiva-cement. Viitattu 14.4.2023. Saatavissa <https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti-Lappeenranta-Oiva-1.pdf>

Fortum. Mikä on hiilijalanjälki ja miten pienennät sitä? Viitattu 8.3.2023. Saatavissa <https://yhdedssa.fortum.fi/mika-on-hiilijalanjalki-ja-miten-pienennat-sita>

Haatainen, M. 2020. Totuus betonirakentamisen hiilidioksidipäästöistä. Viitattu 1.3.2023. Saatavissa <https://lujabetoni.fi/2020/04/24/totuus-betonirakentamisen-hiilidioksidipaastoista/>

JFE Mineral & Alloy Company, Ltd. Ground Granulated Blast Furnace Slag. Viitattu 11.4.2023. Saatavissa https://www.jfe-mineral.co.jp/e_mineral/business/iron_and_steel/ground_granulated_blast_furnace_slag.html

Keep insulation. 2022. Mikä on mineraalivilla? Mitkä ovat ominaisuudet? Mitä se voi tehdä? Viitattu 14.3.2023. Saatavissa <https://fi.keepinsulation.com/news/what-is-mineral-wool-what-are-the-characteris-58637273.html>

Lappalainen, H.-M. 2020. Nopeasti kuivuva mutta vähemmän kantava. Karjalan Heili. Viitattu 11.3.2023. Saatavissa <https://www.heili.fi/uutiset/item/7694-nopeasti-kuivuva-mutta-vahemman-kantava>

Lattiamies. Maakostea betoni – hinta ja ominaisuudet 2022–2023. Viitattu 11.3.2023. Saatavissa <https://www.lattiamies.fi/maakosteabetoni.html>

Oijala, M. 1998. Rakennusaineet. Helsinki: Sarmala Oy

Ozinga. The 411 on recycled concrete: uses, Benefits, and how to. Viitattu 6.3.2023. Saatavissa <https://ozinga.com/blog/the-411-on-recycled-concrete-uses-benefits-and-how-to/>

Paroc. REWOOL saa kivivillan kiertämään. Viitattu 7.3.2023. Saatavissa <https://www.paroc.fi/kampanjat/rewool>

Puuteollisuus. 2021. Hiilijalanjälki, hiilikädenjälki tai hiilidioksidipäästöt. Viitattu 8.3.2023. Saatavissa <https://puutuoteteollisuus.fi/tietoa-puusta-ja-tuotteista/hiilijalanjalki-hiilikadenjalki>

Semtu. Sementit ja seosaineet. Viitattu 6.3.2023. Saatavissa <https://www.semtu.fi/fi/tuotteet/sementit-ja-seosaineet>

Siikanen, U. 2001. Rakennusaineoppi. 6. Täysin uudistettu painos. Hämeenlinna: Rakennustieto Oy.

Suomen Betoniyhdistys. 2022. Seosaineet betonissa. Viitattu 1.3.2022. Saatavissa <https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2022/1.-jakso/1.3.2022-seosaineet.pdf>

Törmänen, E. 2021. Aiemmin purkuvilla on viety kaatopaikalle, nyt siitä tehdään betonin, asfaltin ja tiilien raaka-ainetta Tarvasjoella – ”Prosessi on tarkoin varjeltu salaisuus”. Viitattu 2.3.2023. Saatavissa rajoitetusti <https://www-tekniikkatalous-fi.ezproxy.saimia.fi/uutiset/aiemmin-purkuvilla-on-viety-kaatopaikalle-nyt-siita-tehdaan-betonin-asfaltin-ja-tiilien-raaka-ainetta-tarvasjoella-prosessi-on-tarkoin-varjeltu-salaisuus/15f662cd-e039-4a9b-839a-33e88e9688d5>

VTT. 2020. Hiilikädenjälki: Uusi ympäristömittari tuotteiden positiivisten ilmastovaikutusten arviointiin. Viitattu 8.3.2023. Saatavissa <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/hii-likadenjalki-uusi-ymparistomittari-tuotteiden-positiivisten>

Yliniemi, J. & Tuorila, H. 2019. Mineraalivillalle arvoketjuja. Uusiouutiset. Viitattu 4.4.2023. Saatavissa <https://www.uusiouutiset.fi/mineraalivillalle-arvoketjuja/>

Yliniemi, J. 2019. Mineral wool waste-based geopolymers. Viitattu 3.4.2023. Saatavissa https://www.researchgate.net/figure/Mineral-wool-samples-were-collected-manually-from-demolition-and-construction-sites_fig1_335567095