Tampereen yliopisto

Jesse Kauppinen

SAVEN MAHDOLLISUUDET BETONIN KORVAAJANA

Savirakentaminen vastauksena ilmastonmuutoksen haasteisiin

Kandidaatintyö

Rakennetun ympäristön tiedekunta

Markku Karjalainen

Teemu Hirvilammi

Lokakuu 2023

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. BETONI JA SAVI 4
    2.1 Betoni rakennusmateriaalina 4
    2.2 Savi rakennusmateriaalina 7
3. NYKYAJAN JA TULEVAISUUDEN SAVIRAKENTAMINEN 11
    3.1 Massiivisavi 11
    3.2 Kevytsavi 15
    3.3 Luonnonbetoni 19
    3.4 Saven hybridirakenteet 20
4. TALO P 23
5. POHDINTA 27
LÄHTEET 28
KUVALÄHTEET 31

TIIVISTELMÄ

Jesse Kauppinen: Saven mahdollisuudet betonin korvaajana – Savirakentaminen vastauksena ilmastonmuutoksen haasteisiin. (The Potential of Clay as a Substitute for Concrete – Earthen Construction as a Response to the Challenges of Climate Change.)

Tampereen yliopisto

Arkkitehtuurin TkK-tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö

Lokakuu 2023

Tässä tutkielmassa tarkastellaan savirakentamisen moninaisia vaihtoehtoja tavoitteena korvata rakennusteollisuuden suosituinta materiaalia: betonia. Kyseessä on vaikeasti päihitettävä materiaali muun muassa sen kestävyyden, muotoiltavuuden ja edullisuuden vuoksi. Betonin tärkeimmän raaka-aineen, eli sementin, valmistaminen tuottaa kuitenkin paljon hiilidioksidipäästöjä, jotka ovat suuri osatekijä ihmisten aiheuttaman alati kiihtyneen ilmastonmuutoksen takana. Työ perustuu haastatteluihin sekä kirjallisuustutkimukseen, jossa on analysoitu ja koottu kirjallisuutta sekä erinäisiä julkaisuja, kuten artikkeleita ja uutisia. Vaihtoehtoisia materiaaleja betonin käytölle koitetaan löytää jatkuvasti, ja yksi mielenkiintoa herättänyt vaihtoehto voisi olla saven käyttö, jonka ominaisuuksia rakennusmateriaalina käydään läpi betonin lisäksi.

Savesta on olemassa paljon perinnerakentamista tiilien ja harkkojen muodossa sekä massiivisavirakenteissa, joista kerrotaan omassa luvussaan lisää. Näiden lisäksi on myös noussut kiinnostusta kevytsavirakentamisen ja savi-sementtihybridirakentamisen kautta. Suomalainen Luonnonbetoni pyrkii myös mukailemaan betonia omalla savimassallaan. Eri rakentamistapojen vaihtelevia puolia tarkastellaan ja punnitaan, vaikkei yksiselitteisesti oikeaa ratkaisua olekaan. Eri toteutustavat sopivat rakennuskohteisiin niille asetettujen tavoitteiden mukaisesti, joita voivat olla esimerkiksi kosteuskäyttäytyminen, eristävyys, hengittävyys, edullisuus, kestävyys, kantavuus sekä hiilikädenjäljen määrä.

Neljännessä luvussa tutustutaan paikan päällä vierailtuun pientalokohteeseen, jossa lattiat on valmistettu savesta vaihtelevalla onnistumisella. Savilattia on erinomainen ratkaisu oikein toteutettuna. Lopuksi pohditaan saven ja betonin olevan hyvin erilaisia materiaaleja, mutta savi voisi korvata betonin käyttöä oikeissa paikoissa tai sitä voisi käyttää osittain sementin korvikkeena. Tarpeellista olisi saada savirakenteille elementtituotantoa käyntiin, jotta voitaisiin puhua merkittävästä tekijästä hiilijalanjäljen vähentämisessä muihin materiaaleihin verrattuna. Kevytsavi näyttäytyy lupaavimpana savirakenteena, joka yleistyy toivottavasti tulevaisuudessa lisää.

Avainsanat: betoni, hiilikädenjälki, ilmastonmuutos, kevytsavi, massiivisavi, savi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

1. JOHDANTO

Betoni on eniten käytetty rakennusmateriaali maailmassa. Betonia käytetään vuosittain lähes 10 miljardia kuutiometriä ja sen raaka-aineita löytyy maapallolla lähes rajattomasti. Betonilla on paljon vahvuuksia, sillä se tunnetaan esimerkiksi sen kestävyydestä, turvallisuudesta, yksinkertaisesta valmistusprosessista ja kosteudensietokyvystä. (Väisänen 2005, 21). Betonin suureksi ongelmaksi on muodostunut kuitenkin siihen tarvittavan sementin suuret hiilidioksidipäästöt.

Betonista valmistetaan suurin osa maailman teistä, padoista, silloista ja rakennuksista ja se on näin ollen käytetyin materiaali maapallolla veden lisäksi. Betoniteollisuus tuottaa yli 4 miljardia tonnia hiilidioksidia vuosittain ympäristöön. (Ramsden 2020). Asiaa ei myöskään auta se, että sementin valmistajat ovat tuplanneet hiilijalanjälkeä viimeisen 20 vuoden aikana ja sementin valmistus tuottaa nykyisillään vähintään 8 prosenttia kaikista maailman hiilidioksidipäästöistä (Tigue 2022).

Onkin siis suuri sekä kiireellinen tarve löytää vaihtoehtoisia keinoja korvaamaan nykyinen betoninkäyttö kansainvälisten sopimusten, kuten Pariisin ilmastosopimuksen tavoitteiden toteuttamiseksi ja maapallolla tapahtuvan alati kiihtyvän ilmastonmuutoksen hidastamiseksi. Myös Suomessa uusi voimaan tuleva maankäyttö- ja rakennuslaki vaatii rakennuksilta huomattavasti kunnianhimoisempia tavoitteita hiilikädenjäljen maksimoimiseksi ja hiilijalanjäljen minimoimiseksi.

Eduskunnan 1.3.2023 hyväksymässä rakennuslaissa tulisi rakentamislupavaiheessa raportoida ilmastoselvityksellä rakennusten vähähiilisyys käyttäen hyväksi rakennusten vähähiilisyyden arviointimenetelmää ja päästötietokantaa. Kiertotaloutta tulisi myös edistää korostamalla rakennukselle vaadittuja elinkaariominaisuuksia. Rakennus- ja purkumateriaaleja hyödynnetään tekemällä purkumateriaali- ja rakennusjäteselvityksiä. (Ympäristöministeriö 2022, 1). Rakennusmateriaalien vähähiilisyys tulee korostumaan entisestään tulevaisuudessa niiden valinnassa ja käytössä.

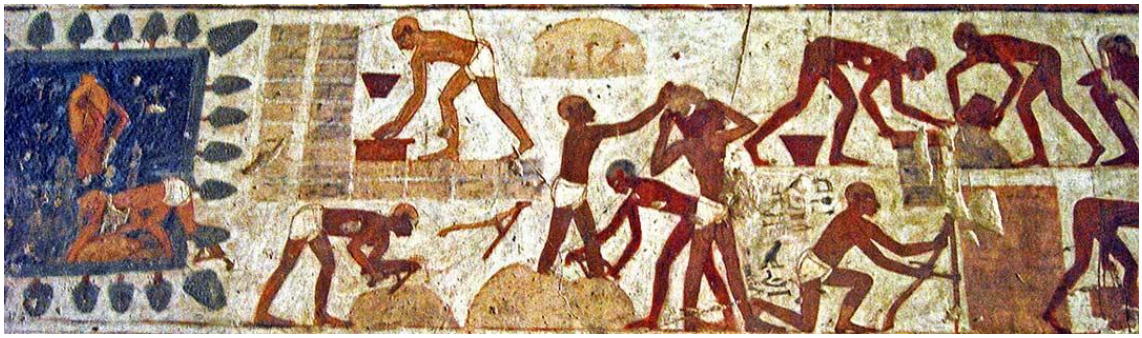
Erilaisiin rakennuskohteisiin on pitkään kokeiltu ja kehitelty sopimaan erilaisia materiaaleja, ja esimerkiksi massiivipuu on saanut Suomessa paljon huomiota tulevaisuuden suunnan näyttäjänä. Puurakentamisen yleistymistä on pitkään jo pidetty yhtenä suurena ratkaisuna ilmastonmuutoksen haasteisiin rakennusalalla. Puusta löytyy perintötie-

toa ja -taitoa pitkältä aikaväliltä, mutta ilmastonmuutoksen monimutkaisten ongelmien ratkaisemiseksi vaihtoehdot ja vastaukset tulee pitää moninaisina. Edes Suomessa ei ole varaa siihen, että kaikki tulevat rakennukset tehtäisiin massiivisesta puusta, koska metsien hakkuumäärät nousisivat kohtuuttomasti (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023). Puu on loistava materiaali, mutta sen käytölle on omat rajansa.

Yksi ratkaisu tulevaisuuteen voi löytyä katsomalla entistä kauemmas ihmiskunnan historiaan rakennetun ympäristön alkujuurille. Savi on maailman vanhin käytetty rakennusmateriaali. Saven kanssa materiaalin määrän rajaa ei käytännössä tule koskaan vastaan, koska koko maaperän kuori on täynnä savea. Savea käyttäessä ei tarvitsisi murehtia sen riittävyydestä. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Savirakenteiden asiantuntija Mikael Westermarck laski rakenteiden hiilijalanjäljen ja kädenjäljen yhden neliömetrin kokoiselle alueelle sekä vertasi niitä puurakenteisiin. Laskelmien mukaan puurakenteiden hiilijalanjälki on 70 prosenttia isompi ja hiilikädenjälki 30 prosenttia pienempi savipohjaisiin tuotteisiin verrattuna. (Westermarck 2022). Ero on huomattava ja korostaa saven potentiaalia rakennusmateriaalina.

Muinaisessa Egyptissä köyhemmät ihmisryhmät rakensivat omat talonsa savesta tai savitiilistä kaivamalla saven omalta maalta ja kuivattamalla materiaalin auringossa (Fathy 1973, 4). Savesta rakentaminen on kenties alkukantaisin ratkaisu mitä on ja hyvin ilmiselvä valinta, sillä rakennuksen muodostava materiaali tulee suoraan maaperästä.



***Kuva 1**. Seinämaalaus savitiilien valmistuksesta Rekhmiren haudassa Thebassa 1550–1069 eaa. (Dospěl 2023).*

Monesti parhaat oivallukset ja ratkaisut vaikeisiin ongelmiin, kuten ilmastonmuutoksen kanssa kamppailemiseen, ovat yksinkertaisia. Savirakentamisen yleistyminen ja kehittäminen voisi toimia yhtenä tärkeänä tekijänä betonin korvaamisessa ja vastata moniin muihin rakentamisen ongelmiin. Tutkimuksessa keskitytään vertailemaan saven ja betonin ominaisuuksia rakennusmateriaaleina sekä tarkastelemaan erilaisia savipainotteisia rakennustuotteita ja -hankkeita. Tutkimus on toteutettu pääosin kirjallisuuskat-

sauksena. Mukana on myös katkelmia EKO-SAFAN:n puheenjohtajan arkkitehti Juha Päätalon kanssa tehdystä haastattelusta sekä neljännessä luvussa tarkastellaan hänen omaa asuin- ja toimistorakennustaan. Lopuksi pohdintaosiossa tehdään johtopäätökset savirakentamisen mahdollisuuksista betonin korvaajana.

Kuva 2. *230 metriä pitkä massiivisavinen “The Great Wall of WA” Australiassa. (Birch 2016).*

2. BETONI JA SAVI

Savi ja betoni ovat monella tapaa samankaltaisia materiaaleja, sillä ne molemmat muodostuvat kiviainesmassasta, jonka kyky soveltua rakennusmateriaaliksi perustuu niiden kykyyn kuivua kiinteäksi ja jäykäksi massaksi. Savi on samankaltainen sideaine, kuin kalkki tai sementti, mutta sillä on kyky avata sidoksia veden avulla uudestaan (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023). Saven uudelleen muokattava ominaisuus on sen yksi suurimmista vahvuuksista, mutta samalla myös suuri heikkous verrattuna betonin kykyyn jäykistyä vahvaksi ja todella pitäväksi yhtenäiseksi massaksi.

Savi on kiven rapautumisen viimeinen aste, jossa pääaineksena on hyvin hienojakoinen rae, joka on kooltaan 0,002 millimetriä tai vielä vähemmän. Jääkaudella jäätikön sulamisvedet ovat kuljettaneet mereen jään sisällä ollutta maa-ainesta. Karkeimmat raekoot laskeutuivat pohjaan nopeammin ja hienojakoisempi maa-aines kulkeutui taas jään reunasta kauemmaksi päin. Jääkauden jälkeinen savi on muodostunut jokien rannoille tuomasta lietteestä. (Leppänen 2020).

Betoni on betonimassasta kovettumalla muodostuva tekokivi. Betonin ainesosat rakentuvat kiviaineksesta, sideaineesta ja vedestä. Kiviaines on betonin kova ja rakeinen materiaali, joka ei ole osana sementin reaktioissa. Sideaine on veden kanssa reagoiva aine, jolla betonin kovettuva luonne saadaan aikaiseksi. Tavallisin sideaine betonissa on sementti, mutta vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös masuunikuonaa sekä nykyaikaisia pozzolaaneja, kuten lentotuhkaa ja silikaa. (Väisänen 2005, 14 ja 15). Pozzolaaneilla viitataan aineisiin, jotka muodostavat veden ja kalkin kanssa sementin kaltaisia jäykkiä sidoksia (Finnsementti n.d).

2.1 Betoni rakennusmateriaalina

Betoni on syystäkin maailman käytetyin rakennusmateriaali. Se on kestävää, edullista tuottaa ja se soveltuu käytettäväksi hyvin moneen eri kohteeseen. Koska betonilla ei ole omaa muotoa, niin se pystyy mukautumaan moneen erilaiseen muottiin (Väisänen 2005, 24). Betonin ulkonäköön voidaan vaikuttaa muotin jättämällä jäljellä, sementin värillä, vaihtelevilla ainesosien suhteiden sekoituksilla ja sekoittamalla seokseen lasia tai keramiikkaa. Voidaan myös vaihdella käytetyn kiviaineksen määrää ja sen näyttä-

mistä pesemällä tai hiomalla betonin pintaa. (Väänänen 2023). Betonista voidaan saada hyvin erilaista jälkeä aikaan.

Rakentamiseen käytetty betoni on teräsbetonia, jossa betonin lujuus vahvistuu raudoituksella tai teräskuidulla, sillä betonin vetolujuus on vain 1/10 sen puristuslujuudesta. Teräsbetonirakenteessa betoni kestää hyvin puristusta ja raudoitus taas vetoa. Rakenne toimii yhtenäisenä, koska lämpölaajenemiskertoimet ovat samankaltaiset. (Väisänen 2005, 18 ja 34).

Kuva 3. *Alapohjan betonivalu raudoitusverkon päälle. (Kauppinen 2021).*

Betonista on tehty paljon rakennuksia paikallaanvalamalla, mutta sen nykyinen käyttö yhdistetään vahvasti osaksi teollista rakentamista. Betonirakenteiden käyttö on paljolti tehdasvalmisteista suurissa tuotantomäärissä sekä ominaista on standardit ja tasalaatuisuus. Teollisesti saadaan aikaan kerroksellisia betonielementtejä, joita voi kuitenkin jälkikäteen olla haastava korjata. Koska työ on kallista, niin sen määrää pyritään vähentämään koneellisella tuotannolla ja asennuksella suuren tehokkuuden tavoittamiseksi (Päätalo 2022).

Yhden tonnin sementin valmistukseen tarvitaan 1,5 tonnia kalkkikiveä. Energiankulutus sementin valmistuksessa ja kuljetuksessa on noin 4500–5000 MJ/tonni, mikä aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä 700–800 kg/tonni. Sementin hiilidioksidipäästöistä noin 40 % johtuu valmistuksen energiankulutuksesta ja 60 % kemiallisesta reaktiosta sementtiklinkkerin poltossa. (Väisänen 2005, 21).

Voidaan siis huomata, että betonin tuotantoprosessissa isot päästöt tuottaa juuri kalkkikiven poltto sementtiklinkkeriksi. Kalkkikiven koostumuksen muuttuessa hiiltä vapautuu ja kuumentaminen vie paljon energiaa, sillä uuni kuumennetaan 1400–1600 asteeseen (Toivonen 2017).

Betonirakennus, erityisesti sen runko, on erittäin kestävä. Massiivisena rakenteena betoni kykenee varaamaan ja tasaamaan lämpöä, mikä johtaa energian säästöön ja päästöjen vähenemiseen. Betonin karbonatisoituminen käytön aikana ja purkuvaiheessa mahdollistaa hiilidioksidin sitoutumisen takaisin betoniin. (Väisänen 2005, 21).

Sementtiteollisuutta pyritään kehittämään myös usein eri tavoin, kuten tuotannon tehostamisella, vaihtoehtoisilla energialähteillä ja pölypäästöjen suodatuksella. Sementin hiilidioksidipäästöjä vähennetään seostamalla sementtiä masuunikuonalla ja lentotuhkalla. (Väisänen 2005, 22).

Betoniteollisuus pyrkii vähentämään päästöjään kierrättämällä prosessi- ja pesuvesiä, talteenottamalla lämpöä, käyttämällä kiviainesta uudelleen, hyödyntämällä lietteitä maanparannusaineina sekä maisemoimalla ja kierrättämällä kivilouhosalueita. Murskattua betonia voidaan käyttää maarakentamisessa tai sekoittaa uuden betonin joukkoon, ja uudelleenkäytetyn betonin osuus voi olla jopa 20–30 % kiviaineksesta. (Väisänen 2005, 22).

Kalkkikiven käyttöä sementin valmistuksessa pyritään vähentämään hiilidioksidipäästöjen hallitsemiseksi. Geopolymeerisementti, joka muistuttaa antiikin roomalaisten kuuluisan kestävän betonin pozzolaania, valmistetaan pääasiassa näillä materiaaleilla. Magnesiumsementit ovat myös kehitysvaiheessa ja voivat poistaa hiilidioksidia ilmakehästä mineraaleista valmistettuina. Tällaisista betonirakenteista tulee hiilinieluja, vaikka niiden kosteudenkestävyys on heikko ja hinta korkeampi magnesiumia sisältävien kivilajien harvinaisuuden vuoksi. Betonin soveltuva koostumus, erityisesti sementin määrän optimointi, vaikuttaa betonin säilyvyyteen ja sitä kautta sen käyttöikään rakennuksissa. (Väisänen 2005, 22).

Suomalainen Carbonaide Oy aikoo markkinoida VTT:n kehittämää hiilidioksidin hyödyntämis- ja varastointiteknologiaa, jonka avulla betonin hiilijalanjälki voidaan pienentää jopa hiilinegatiiviseksi. Teknologia perustuu hiilidioksidin kivettämiseen betonituotteisiin, mikä mahdollistaa hiilidioksidipäästöjen puolittamisen perinteiseen betonituotantoon verrattuna. Saamansa rahoituksen avulla Carbonaide rakentaa automatisoidun pilot-tuotantolinjan, jossa voidaan päivittäin mineralisoida jopa 5000 kiloa hiilidioksidia pienentäen tarvetta käyttää sementtiä betonin valmistukseen. (Partanen 2023).

Uusia innovaatioita koitetaan löytää jatkuvasti lisää, vaikka erilaiset keinot betoniteollisuuden kehittämiseksi ekologisemmaksi ovat olleet kuitenkin käynnissä jo pitkään. Sementti näyttäytyy betonin selvänä suurimpana ongelmatekijänä, milloin on tarpeen tutkia muitakin materiaaleja, kuten savea.

2.2 Savi rakennusmateriaalina

Saven paras puoli on sen suuri saatavuus maaperässä, sillä sitä löytyy lähes kaikkialta maailmasta helposti lähimateriaalina. Samalla savi on hyvin edullinen materiaali. Erityisesti Suomessa on suuret savivarannot, sillä jääkauden aikana kivet ovat rapautuneet huomattavasti. Jääkauden sulamisvedet ovat myös kerrostaneet savimassoja päällekkäin eri paikkoihin. Savea voidaan käyttää rakennusmateriaalina sellaisenaan ja ilman, että kulutettaisiin muuta kuin sen ylös kaivamiseen vaadittua energiaa. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Savimateriaalien ja muiden maakosteiden massojen tekemisessä olennaista on kuivuminen, jonka luonto hoitaa itsestään. Kuivumisprosessi saattaa vaatia kuitenkin katoksen ilmaston mukaan. Savi kutistuu kuivuessaan ja tarvitsee sidosainetta, ettei se halkeile. Sidosaineena käytetään kiviainesta, kuten hiekkaa tai soraa. Vaihtoehtoisena sidosaineena tai kiviaineksen seassa käytetään myös kuituja, kuten olkia, hamppua, pellavaa, kanervaa tai lantaa. (Päätalo 2022).

Savi on kuljetusta lukuun ottamatta täysin hiilineutraali rakennusmateriaali. Savi on materiaalina monella tapaa sementin kaltainen, mutta sidoksen saa auki vedellä. Tämän ominaisuuden ansiosta materiaali on jatkuvasti korjattavissa ja rajattomasti uudelleenkäytettävä materiaali ilman, että sen laatu heikkenee. Koska vesi avaa savessa sidoksen, niin saven käytössä tulee tiedostaa tämä ominaisuus ja pitää savi kaukana vedestä. Vesihöyry ei kuitenkaan ole häiriöksi savimateriaaleille (Westermarck 2022).

Kuva 4. *METI-koulun savesta tehty luola Bangladeshissa. (Hoerbst 2006).*

Savirakentamisen historia on käsityövaltainen, sillä savirakenteisiin tarvittava materiaali saatiin usein omalta maalta ja rakennukset tehtiin usein itse. Rakenteet ovat helposti korjattavia ja standardeja ei ollut, vaan tekemistä sovellettiin tilanteen mukaan työmaalla. Omasta takaa tuleva materiaali sekä työvoima mahdollisti rakentamisen edullisuuden. (Päätalo 2022). Savi on maailman vanhin käytetty rakennusmateriaali, joten materiaalista löytyy kokemusta missä ja miten se toimii sekä mihin se ei sovellu niin hyvin.

Savilattioissa saven kosteuskapasiteetti minimoidaan vahauksella, että lattia ei ole hengittävä, sillä muuten lattia imisi itseensä myös kaiken kosteuden. Tätä ei haluta lattioissa, mutta saven hyvä kosteuskapasiteetti korostuu seinissä laastina tai massiivisavirakenteina. Savella on seinissä sisäilman kosteutta tasaava vaikutus ja ulkovaipparakenteissa suuri kosteuskapasiteetti. Päätalo kutsuu tätä saven ominaisuutta rakennusfysikaaliseksi henkivakuutukseksi rakennukselle. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023). Saven luonnollisiin, mutta merkittäviin ominaisuuksiin kuuluu kyky tasapainottaa huoneilman suhteellista kosteutta ja lämpötilavaihteluita (Westermarck 2022).

Suomen rakennuskanta on surullisen kuuluisa lukuisista homehtuneista rakennuksista ja huonosta sisäilmasta. On kuitenkin huomattu, että savi voi korjata huoneiden ilman mikrobiongelmia. On huomattu, että savea käyttäessä riski ulkovaipan rakenteiden homehtumiseen vähenee. Rakennuksen sisältä kerääntyvä kosteus ei pääse tiivistymään ja muodostamaan hometta esimerkiksi ulkoseinän tai yläpohjan rakenteisiin sekä

hyvät mikrobit viihtyvät saven huokosissa. Savea käytetään nykyisin eniten rappaamisessa ja muuraamisessa, joissa savi muodostaa luonnollisen ilmansulun, jolloin voidaan luopua ilmansulkupaperin tai höyrynsulkumuovin käytöstä. (Westermarck 2022).

Savilattioissa radon ei tule ongelmaksi, sillä rakenne on niin ilmatiivis. Jopa savilaastilla tehty rappaus toimii, koska laasti itsessään on ilmatiivis kerros. Eroa betonilattiaan ei juuri ole, sillä maaperän radonin estämisessä korostuu samat asiat, sillä esimerkiksi lattialaatan ja ulkoseinän välisen sauman tiiveys on tärkeää. Rakenteesta huolimatta myös oleellista on tehdä radonputkisto ja radontuuletus. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Ulkoseinän tapauksessa savinen rakenne tulee nostaa sokkelilla tarpeeksi ylös sekä katon ja ulkoseinän tiivis liitos on tärkeä kosteuden välttämiseksi. Sementtiin ja kalkkiin verrattuna savella on heikoin lujuus. Materiaaleja vertaillessa tämä on selkeä heikkous, mutta ei ylitsepääsemätön ongelma. Massiivisaven tapauksessa seinät tulee rakentaa paksummiksi, kuin betoniseinät. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Savirakennus on mahdollista toteuttaa paikalla rakentaen vain muutaman kuukauden vuodesta Suomessa kesä-heinäkuussa, sillä savi vaatii pitkän kuivumisajan. Savielementtien tekeminen ympärivuotisesti teollisuushalleissa on kuitenkin mahdollista. Esivalmistus on tärkeää, koska paikalla rakentaminen on hidasta ja soveltuu huonosti nykyaikaisen rakentamistuotannon aikatauluun. Valmiista elementeistä voidaan tehdä korkeitakin seiniä työmaalla, sillä esimerkiksi normaali paikallaan juntattu massiivisavirakenne ei kestä 2,5–3 metriä korkeampaa seinää ilman kuivumista. Saven käytössä on myös vaikeuksia aukonylityksissä, eli esimerkiksi ikkunoissa tarvitaan usein eri materiaalista tehtyä yläpalkkia. Savesta tehtyjen esivalmistettujen elementtien teko on edellytys sille, että savirakentamisessa päästään suuriin tuotantomääriin, joilla on iso merkitys hiilineutraalisuuden kannalta. Savirakenteiden teollinen valmistus on vasta hyvin alkutekijöissään, mutta tähän on toivottavasti tapahtumassa tulevaisuudessa muutosta. (Päätalo 2022).

Rakennustuotteiden kannalta saven huono puoli on saatavuus. Tällä hetkellä esivalmistettujen savimateriaalien saatavuus on hyvin heikkoa verrattuna esimerkiksi betonituotteisiin. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023). Suomessa Vihdin betoni tuottaa ja asentaa massiivisavilattioita ja Tiileri tekee polttamattomia savitiiliä ja savilaattoja. Muut savirakennusmateriaalit, kuten savimaali, savilevy ja laastit ovat saatavissa vain ulkomailta tilattaessa. (Westermarck 2022).

Suomessa ei myöskään ole käytössä normeja savirakentamiselle toisin kuin vaikkapa Saksassa, jossa useisiin savituotteisiin on otettu käyttöön paikalliset DIN-

standardisoinnit. Sertifioituja savituotteita ei myöskään löydy. Mikäli rakennukseen käytetään oman maan savea, on savi aina vaihtelevaa, milloin sertifiointi ei ole mahdollista. Vaikka käytettäisiinkin oman maan savea, niin massiivisaviseinille ja muille rakenteille voidaan silti suorittaa lujuustestit. Eli rakennusturvallisuudesta ei tarvitse eikä pidäkään tinkiä. Turvallisuus korostuu oman maan savesta rakentaessa, sillä rakennus on aina kertaluontoinen, joten rakennukselle asetetaan myös moninkertaiset kertoimet sen pystyssä pysymisen varmistamiseksi. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Koska savi on kiveä, niin se ei materiaalina pala, jolloin palonsietokyky ja paloturvallisuus ei ole ongelma. Koska savi tulee suoraan maaperästä eikä ole myrkyllistä, niin se voidaan rakennustarvikkeena olleen käytön jälkeen palauttaa takaisin maaperään. Saven käyttö ei näin tuottaisi rakennusjäteongelmaa. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Savea voidaan myös pitää esteettisenä materiaalina ja arkkitehtuurin kannalta oman maan saven käyttö voi olla ihannoitava piirre. Rakennus saa aivan omanlaisensa identiteetin siihen olleen materiaalin ollessa samasta maaperästä, kuin itse rakennus. Rakennuksen identiteetti tulee näin vahvasti materiaalin kautta, on kyseessä pientalo tai suuri julkinen kohde kuten kirkko tai museo. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Usein saven käyttö materiaalina yhdistetään tiileen. Tiili on erinomainen rakennusmateriaali, jolla on myös hyvä kosteuskäyttäytyminen, mutta heikompi kuin savirakenteilla, koska tiilen tekoprosessissa polttaminen vaikuttaa sen kosteuskapasiteettiin (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023). Tiili on ekologinen materiaali pitkäikäisyyden, kierrätettävyyden ja sen kautta, että massiivinen tiilirakenne säästää lämmitysenergiaa varaamalla itseensä lämpöä (Väisänen ja Huttunen 2003, 12).

Suurin ongelma tiilien tuotannossa on sen suuret rakennuskustannukset ja sen vaativa energia. Tiilien tuotannossa on useampia vaiheita ja rakennusvaiheessa on paljon pieniä osia, tiiliä, joiden muuraamiseen tarvitaan paljon työvoimaa. Tiilien polttamiseen menevä energia on hyvin suurta, sillä tiiliteollisuudessa tiilet ensin esikuivatetaan ja sen jälkeen vielä poltetaan. Monista perinteisen poltetun tiilen ongelmista voitaisiin luopua käyttämällä polttamattomia savitiiliä, jolloin paljon energiaa vaativa polttoprosessi voidaan ohittaa ja käyttää tiiliä ympäristöystävällisemmin. Polttamattomista savitiilistä löytyy valmiita tuotteita ulkomailla ja tutkimusta tehdään parhaillaan niiden käytöstä. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

3. NYKYAJAN JA TULEVAISUUDEN SAVIRAKENTAMINEN

Savea on mahdollista hyödyntää monin eri keinoin. Se voi toimia paljolti itsekseen, kuten massiivisavirakentamisessa on ollut historian saatossa tapana, tai yhdessä toisten materiaalien kanssa. Tulevaisuuden savirakentaminen on parhaimmillaan hybridirakentamista, sillä on tarpeen nojata eri materiaalien vahvuuksiin (Andersson 2022).

Maailmanlaajuisesti rakentamisen hiilidioksidipäästöjä ei voi leikata yksin puuarkkitehtuurilla (Andersson 2022). Puusta rakentaminen ei välttämättä tarkoita täyspuista rakennetta ja savirakentamisen suosion kasvu lisäisi samalla puun käyttöä rakentamisessa. Monesti saven kanssa käytetäänkin puuta kantavana runkona, kuten kevytsavirakenteissa. Tällaisissa rakenteissa saven seassa olevat puukuidut tai oljet ovat orgaanisia aineita, jotka kasvattavat hiilivarastoa eli parantavat hiilikädenjälkeä. (Westermarck 2022).

Maailmanlaajuisesti on myös kehitteillä useita erilaisia hybridihankkeita, joissa esimerkiksi savea ja sementtiä yhdistellään pyrkimyksenä saavuttaa ekologisempi betonia muistuttava materiaali. Tällaiset kokeelliset seokset voivat liittää perinteiset ja luonnolliset rakennusmateriaalit moderneihin sekä monikäyttöisiin ominaisuuksiin, kuten betonirakentamisessa on totuttu. Onkin tarpeen löytää uudenlaisia innovaatioita, jotka voivat olla ekologisesti kestävämmän rakentamisen kannalta tärkeässä murroksessa.

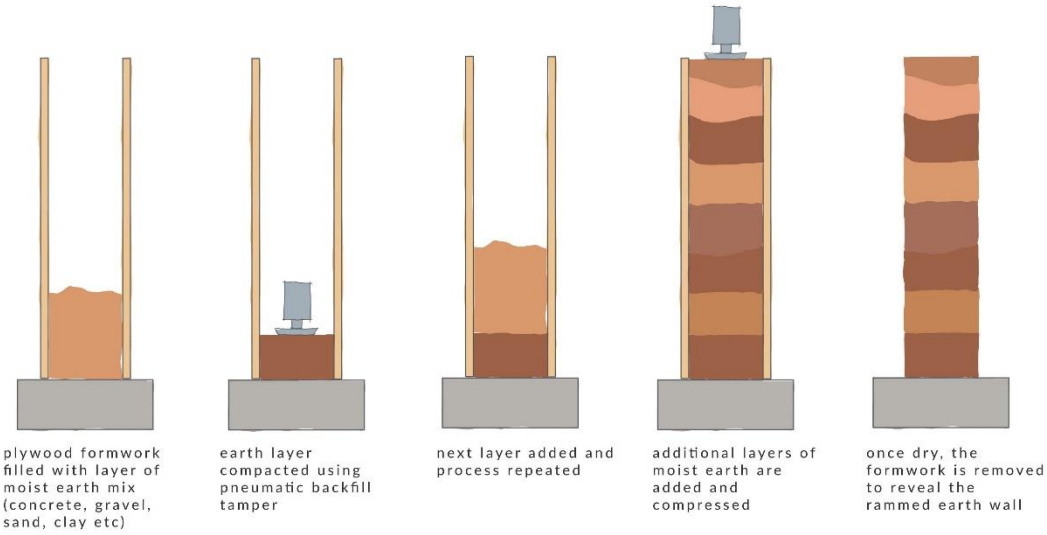
3.1 Massiivisavi

Massiivisavirakentaminen on perinteinen rakennustapa, jota on käytetty eri puolilla maailmaa. Seinät rakennetaan tavallisesti paikan päällä käytettävistä luonnonmateriaaleista, ja ne ovat yleensä 50–70 cm paksuja sekä ne hyödyntävät saven puristuslujuutta. Tämä mahdollistaa yläpohja- ja vesikattorakenteiden rakentamisen suoraan saviseinien varaan, ilman erillistä puurunkoa. Seinien paksuutta voidaan lisätä korkeiden seinärakenteiden yhteydessä. (Ranki n.d.).

***Kuva 5**. Liukuvalulla toteutetut, paikalla valetut massiivisaviseinät Sovinnon kappelissa Berliinissä (Klomfar n.d.).*

Massiivisavirakentaminen on osoittautunut ekologiseksi vaihtoehdoksi perinteisille rakennusmateriaaleille. Erityisesti paikallisesta maasta valmistetut rakenteet voivat vähentää harmaan energian kulutusta merkittävästi verrattuna muihin rakennustapoihin. Harmaa energia viittaa materiaalin tuotannon, kuljetuksen ja varastoinnin aikana kulutettuun energiaan. (Andersson 2022). Tämä tekee massiivisavirakentamisesta houkuttelevan vaihtoehdon kestävän kehityksen näkökulmasta.

Perinteisesti on hyödynnetty erilaisia luonnonmateriaaleja vahvistamaan saviseiniä. Seinien rakentamiseen on käytetty siirrettävää muottia, joka täytetään saviseoksella ja esimerkiksi kanervan varvuilla. Kanervat asettuvat kerroksittain seinän suuntaisesti ja poikittain, tuoden kestävyyttä rakenteeseen. Myös muita luonnonmateriaaleja, kuten katajia, kuusenoksia, olkia, rimoja ja lautoja on käytetty lujitteina. (Ranki n.d.).



***Kuva 6**. Massiivisaviseinän työvaiheet (First in Architecture n.d.)*

Rakennusten seinät ovat paksuja, tarjoten lämmönvarauskykyä ja kosteuden tasaamista, mikä voi olla hyödyksi erityisesti ilmastollisesti vaativissa olosuhteissa. Erityisesti viileämmässä ilmastossa massiivisavirakenne pitää myös eristää. Oikealla valmistelulla materiaalia voidaan käyttää suuressa mittakaavassa esimerkiksi toimistorakennuksen rakentamiseen. (Williams 2021).

Massiivisavirakennukset rakennetaan kestävälle pohjalle ja ulkoseinärakenteita voidaan suojata paremmin pidemmillä räystäillä. Myös erinäisiä laattoja tai tiiliä seinäpinnassa käyttämällä voidaan hidastaa veden virtausta ja vähentää eroosiota, kuten on tehty kohteessa House Rauch (Kuva 4.). Luonnollisia ja keinotekoisia lisäaineita voidaan käyttää lisäämään kestävyyttä. (Williams 2021). Eroosio on tekijä, joka vaikuttaa savipintaan ajan myötä patinoidessaan sitä, mutta se ei välttämättä tarkoita hajoamista vaan ajan jälkien näkymistä. Savi toimii kuin suojaava iho, kun taas tiili ja betoni imevät kosteutta. Savirakennus voi näin vanhetessaan korostaa materiaalien ominaisuuksia entisestään. (Andersson 2022).

***Kuva 7**. Massiivisavinen House Rauch Itävallassa (Bühler 2008).*

Savi voisi korvata betoniset pintalaatat ja pumpputasoitepinnoitteet lattioissa, ja yhden betonilattian päästöillä voisi rakentaa 25 massiivisavilattiaa. Saven lämmönvarauskyky voisi myös olla hyödyksi julkisissa lasiauloissa lämpötilojen tasaamisessa ja koneellisen jäähdytyksen tarpeen vähentämisessä. (Koivisto 2021).

Saven laatu vaihtelee, mutta on tärkeää, että siinä ei ole liikaa multaa tai hiekkaa. Rakentajat ovat joskus joutuneet tuomaan savea kauempaa, ja jopa hevoset ovat aikoinaan auttaneet sekoittamaan saven oikeaan koostumukseen. Suomen historiassa savirakennusten rakentaminen aloitettiin keväällä, jotta seinät ehtisivät kuivua kesän aikana. Kosteat seinät olisivat voineet vaurioitua altistuessaan pakkasille. Seinien kuivumista nopeutettiin joskus myös nuotioiden avulla. Lopuksi seinät rapattiin savilaastilla tai kalkkilaastilla loppukesällä. (Ranki n.d.).

Mikäli tehdään massiivisavesta elementtiä, niin on keskeistä jo sitä tehdessä ajatella tulevaa siirtoa, mikä lisää työvaiheita. Kannatuslenkit, elementtien pituus ja paino tulee suunnitella nosturikapasiteetin mukaan. Elementtien kerrosten täytyy olla keskenään yhtenevät, jotta ne voidaan liittää toisiinsa ja elementin yläpinnan pitää olla ehdottoman tasainen, kun elementtejä pinotaan. Elementteihin täytyy tämän lisäksi uurtaa railot raudoitusta ja/tai pystyliitosta varten sekä elementtien asennus paikan päällä on viimeistelyn osalta käsityötä. (Päätalo 2022)

Massiivisavirakenteet eivät ole täydellisiä, mutta eivät olleet sitä betonirakenteetkaan niiden käyttöönoton alussa. Suomessa savi ei ole paras materiaali teollisesti massatuotettuihin ulkoseiniin, mutta betonirakentaminen tuo myös omat ongelmansa tässä ilmastossa. Betoniteollisuus pyrkii kehittämään ekologisempia vaihtoehtoja, mutta betonin kuivumisaikojen piteneminen ilman lisäaineita voi tehdä siitä taloudellisesti epäedullisen vaihtoehdon (Koivisto 2021).

Massiivisavirakentaminen vaatii huolellista suunnittelua ja valmistelua, erityisesti kun kyseessä ovat suuret rakennusprojektit. Massiivisavirakentamisen suuria haasteita ilmenee aukonylityksessä, jonka takia ikkunat ovat usein pieniä. Rakennusmateriaalin kosteusvaatimusten hallinta on tärkeää, ja seinien paksuus ja muut rakenteelliset detaljit on harkittava tarkkaan. Lisäksi on otettava huomioon paikallisen saven laatu ja saatavuus. Nykyään kevytsavea suositellaan yleisesti massiivisaven sijaan sen paremman lämmöneristyskyvyn vuoksi (Ranki n.d.).

3.2 Kevytsavi

Kevytsavi on polttamattomasta savesta ja täyteaineesta koostuva erittäin vähähiilinen seos, joka toimii rakennuksen vaipan täytteenä ja eristeenä (Korkiala-Tanttu, L & Hyrkäs, J. 2022). Lopputuloksena on kevyt massa, jossa yhdistyvät saven hyvät ominaisuudet lämmöneristävyyteen ja helppoon työstettävyyteen (Ranki n.d.). Täyteaineena toimii kuitumateriaali, kuten esimerkiksi olki tai hampun päistäre. Kevytsavielementti on rakennuselementti, jossa kantava runko on puuta ja eristävä materiaali ”leivotaan” saven avulla kiinteäksi kakuksi puurungon sisään. (Päätalo 2022). Kevytsavesta voi vaihtoehtoisesti myös tehdä harkkoja tai elementtejä, jotka soveltuvat rakentamiseen niiden kuivuttua (Ranki n.d.).

Kevytsavesta rakennetulla talolla on monia hyödyllisiä ominaisuuksia, joista osa on tyypillisiä savirakenteille yleisesti ja jotkut taas erityisesti kevytsavelle. Savisen rakenteen vaippa on tiivis, joka vähentää vedontunnetta. Samalla kuitenkin seinät sitovat itseensä kosteutta ja luovuttavat sitä kuivana aikana, tasapainottaen huoneilman kosteusvaihteluita. (Suominen 2001). Saviyhdistyksen sivuilla mainitaan kuivan saven tasapainokosteudeksi noin 3 %, mikä on hyvin vähän. Se mahdollistaa kevytsavimassan sisällä olevan orgaanisen aineen, kuten vaikkapa oljen, pysymisen kuivana (Ranki n.d.). Kun rakenne on sisältä ulos yhtä ainetta, niin siinä ei ole materiaalien välistä rajapintaa, johon kosteus tiivistyisi. Tämä tekee kevytsavesta vikasietoisen. (Päätalo 2022). Homeet eivät pääse kasvavaan savirakenteessa ja sisäilman laatu säilyy hyvänä, jota edistää myös materiaalien terveellisyys ja luonnollisuus.

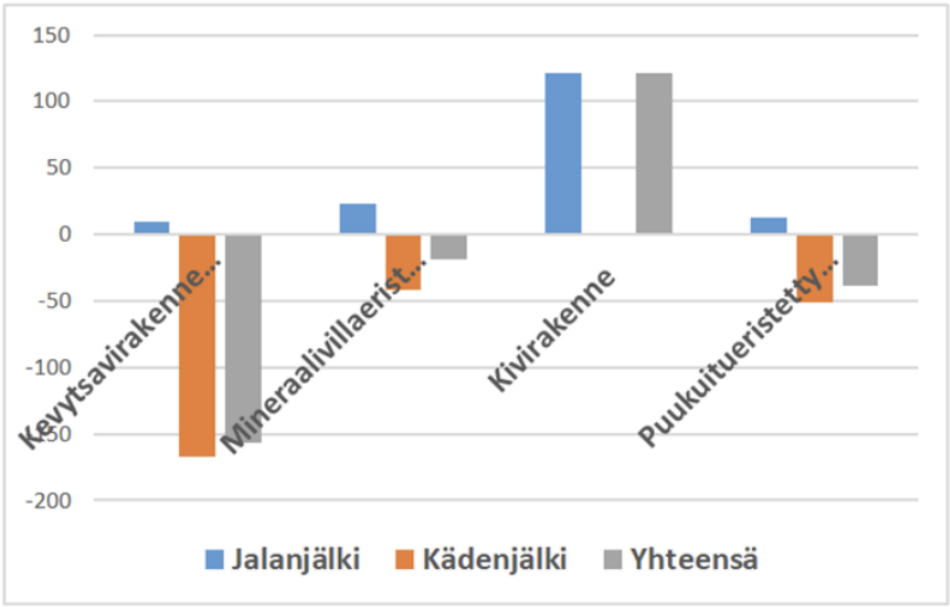
Kevytsavi on paloturvallista, sillä olkien käsittely savella vaikeuttaa niiden palamista huomattavasti ja palamattomat pintamateriaalit, kuten rappaus, mahdollistavat myös kerrostalot. Ääneneristys on massiivisen seinärakenteen takia hyvä, mutta sitä voidaan parantaa lisäämällä seoksen tiheyttä. Kevyempi rakenne on lämpöä eristävämpi, painavampi taas lujempi ja paloturvallisempi. 450 kg/m^3 painavalla, 400 mm paksulla seinärakenteella saavutetaan vaatimusten mukainen K-arvo, 0,28 W/m^3K. (Ranki n.d.). Kevytsaven työstäminen ei myöskään vaadi rakennusvaiheessa tekijältään erikoistaitoja, sillä rakenne on varsin yksinkertainen. Kuten savi yleisesti, niin myös kevytsavitalo on vapaammin muotoiltavissa ja rakenteeltaan plastinen (Suominen 2001).

Kevytsaviseinäelementin hiilikädenjälki on todella suuri. Hampun päistäre on kuituhampun puumaista vartta, jota syntyy paljon hamppukuidun tuotannon sivuvirtana. Päistäreen rakenteessa on paljon ilmaa, joka tekee siitä kevyttä. Hampun päistäreeseen sitoutunut hiili luo kevytsavimassaan suuren hiilikädenjäljen. (Päätalo 2022) Myös oljet voidaan hyödyntää pyöröpaalipahnasta, joka on maataloudesta syntyvää sivutuotetta (Suominen 2001). Rakennuksen käyttöiän päättyessä lisäaineeton kevytsavi uudelleen käytetään lisäämällä siihen vettä tai palautetaan takaisin biokiertoon kompostoimalla (Hyrkäs & Korkiala-Tanttu 2022).

***Kuva 8**. Kevytsavinen testikappale, jossa kuituaineena toimii hampun päistäre (Kauppinen 2023).*

Kevytsavirakenteiden haittapuolina korostuu manuaalisen työn määrä ja kuivumisen vaatima aika materiaalin tasapainokosteuteen etenkin Suomen olosuhteissa. Savinen seinä myös vaikeuttaa etenkin painavien kiinnikkeiden ja ripustettavien asioiden lisäämistä seiniin, ellei sitä tee etukäteen tekovaiheessa. Kevytsavi ei ole kantava rakenne, vaan se on eriste, höyrynläpäisykerros ja tuulensuoja samassa aineessa. Lopulliseksi pinnaksi soveltuu rappaus tai esimerkiksi puuverhoilu. (Suominen 2001). Tärkeää on aina mahdollistaa rakennekerrosten hengittäminen ja seinän kosteutta tasoittava toiminta.

Ulkoseinärakenteita	Rakenteen hiilisisältö kgCO2e/m2		
	Jalanjälki	Kädenjälki	Yhteensä
Kevytsavirakenne puuverhouksella	10	-167	-157
Mineraalivillaeristetty puurakenne	23	-42	-19
Kivirakenne	121	0	121
Puukuitueristetty puurakenne	13	-51	-39



Mikael Westermarck 2022, Tampereen yliopisto

***Kuva 9**. Ulkoseinärakenteiden hiilisisällöt vertailussa (Westermarck 2022).*

Arkkitehtitoimisto Päätalo Oy ja Ruukin saha ja höyläämö RY tekivät toukokuussa 2022 prototyyppiprojektin, jossa tavoitteena oli mahdollisimman kevyt, eristävä, mutta kuitenkin hyvin koossa pysyvä kevytsavimassa. Tämän massan tiheys on noin 320 kg/m^3 ja lämmöneristävyys alustavien mittausten perusteella 0,077 W/mK. Näin voidaan rakentaa 40 cm paksut seinät, joilla päästään Suomessa yleiseen seinän U-arvoon 0,17 W/m^{2}K. Myöhemmin massaa hyödynnettiin elementtien teossa, eli sullottiin saven ja hampun päistäreen seosta puukehyksiin. Päätalo myös oppi projektista sen, että tärylevyä hyödyntämällä sullomistekniikka nopeutuu. (Päätalo 2022). Elementtien teko il-

man suurempaa teollista tuotantoa on hyvin aikaa vievää. Siksi on tärkeää löytää metodeja prosessin helpottamiseksi.

Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksella on käynnissä Kevytsavi 1.1 -hanke, jossa hyödynnetään kiertotalousvirtoja, kuten ylijäämämaata ja purkupuuta rakentamisessa (Hyrkäs & Korkiala-Tanttu 2022). Rakennetun ympäristön suuri haaste ei ole pelkästään betonin hiilijalanjäljessä. 2021 julkaistun rakennetun omaisuuden tilaa tarkastelevan ROTI-raportin mukaan Euroopassa jätteistä 40–50 % syntyy rakentamisessa ja purkamisessa, eli enemmän kuin millään muulla teollisuuden alalla (ROTI 2021). Tavoitteena on luoda rakennustuotteiden teolliseen tuotantoon soveltuva, tekniset vaatimukset täyttävä ja raaka-aineenaan pääosin kiertotalousvirtoja hyödyntävä kevytsavikomposiittimateriaali. Ensin kartoitetaan teollisuuden ja maatalouden sivu- ja jätevirtoja ja selvitetään savimateriaali, joka soveltuu helposti kevytsaveen käytettäväksi ja on hyvin saatavilla. Laboratoriossa taas kehitetään saven kanssa parhaiten rakennusfysikaalisesti toimiva kuituseos. (Hyrkäs & Korkiala-Tanttu 2022).

***Kuva 10**. Liukuvalettu savi-olki-ruoko-seinä (Suominen 2001).*

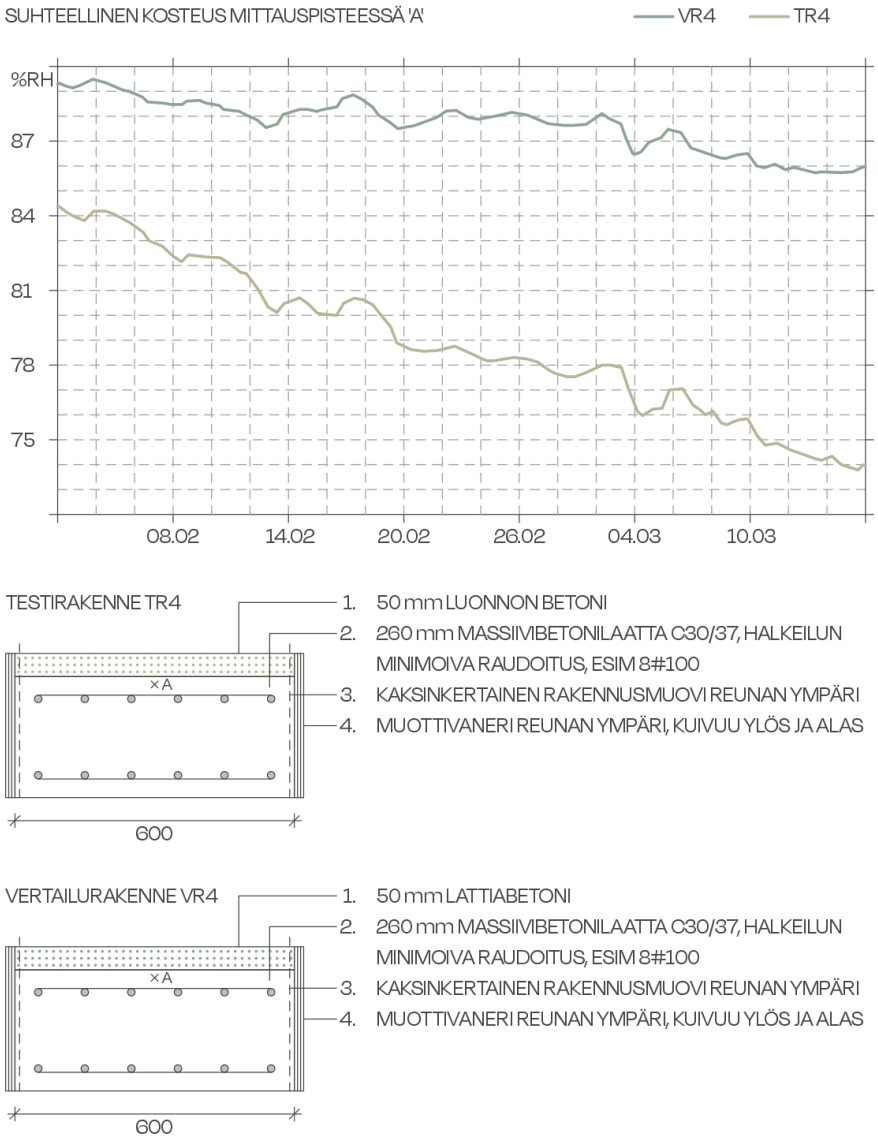
3.3 Luonnonbetoni

Yksi savipohjainen korvaaja betonin käytölle voisi olla suomalainen Luonnonbetoni. Tätä massaa valmistetaan Nummelassa suomalaisesta savesta ja kiviaineksesta tai Suomen kiertotaloudesta saatavilla materiaaleilla. Prosessissa on käytetty esimerkiksi purettua ja murskattua Finlandia-talon Carrara-marmoria. (De Rossi. Haastattelu, 21.4.2023). Sivuillaan Luonnonbetoni kuvailee tuotettaan samalla tapaa käytettäväksi kuin betoni sekä tuo ilmi materiaalin kauneuden, pienipäästöisyyden ja sopivuuden käytettäväksi erityisesti lattioissa (Luonnonbetoni n.d.). Tuotteella onkin nykyisillään eniten näyttöä juuri rakennusten lattioissa, mutta tällä hetkellä käynnissä olevassa pilottihankkeessa tarkastellaan Luonnonbetonin kelpaavuutta myös ulkoseinärakenteisiin (Denvir 2023).

Luonnonbetonin työmenetelmä on yksinkertainen. Se on kuivempaa verrattuna maakosteaan betoniin, ja sen massa levitetään ja tiivistetään. Seuraavaksi massa kuivuu, joka tapahtuu betoniin verraten jopa noin kaksi kertaa nopeammin. (De Rossi. Haastattelu, 21.4.2023). Pintakäsittely tehdään esimerkiksi pellavaöljyvahalla, jolloin pinnoite hylkii kosteutta ja likaa, ja on helppo puhdistaa (Luonnonbetoni n.d.). Lattiamassaan voi laittaa lämmitysputkia sekä se ei vaadi liikuntasaumoja eikä raudoitusta. Luonnonbetonista voi tehdä rakenteita, kuten lattioita, seiniä ja tasoja, joissa vaaditaan puristuslujuutta, mutta ei vetolujuutta. (De Rossi. Haastattelu, 21.4.2023). Valmiissa rakenteissa ei esiinny halkeilua, koska Luonnonbetonissa on vain vähän lisättyä vettä ja kutistuma huomioidaan massan tuotannossa (Luonnonbetoni n.d.)

Luonnonbetonin kovuus ja kestävyys toteutuvat puristamalla seulottu savi ja kiviaines tiiviiseen muotoon. Näin ollen valmistuksessa ei ole tarpeen käyttää energiasyöppöjä teollisia prosesseja, kuten vaikkapa sementtiä. Materiaalimenekki on verrattain pienempi kuin betonia käytettäessä, sillä esimerkiksi tiheys on enintään 2100 kg/m^3, kun rakennebetonin tiheys on normaalisti taas 2350 kg/m^3. Nettisivuilla kuvaillaan Luonnonbetonin ominaisuuksien riittävyyttä vaativienkin kohteiden lattiarakenteisiin, joissa osassa erityishaasteena on liikkuva hiekkamaapohja. Luonnonbetoni kykenee mukautumaan maaperän liikkuvuuteen. (Luonnonbetoni n.d.)

Luonnonbetonia voidaan värjätä ja sen kuviota voidaan käsitellä niin mattapintaiseen kuin kiiltävään suuntaan. Materiaalin ollessa molemmat runko- ja pintamateriaali, tulee sen edullisuus myös merkitseväksi. Lautoja, laattoja tai muita pintamateriaaleja ei tarvita. (Denvir 2023).



***Kuva 11**. Graafi näyttää eron Luonnonbetonin ja betonin kuivumisissa (Luonnonbetoni n.d.).*

3.4 Saven hybridirakenteet

Argilus-yrityksen Julien Blanchardin mukaan ”Yhden tonnin savisementin tuottaminen saastuttaa 20 kertaa vähemmän kuin tavallinen sementti”. Hän ja David Hoffman halusivat keksiä uuden rakennusmateriaalin, joka olisi yhtä vahva kuin betoni mutta ympäristöystävällisempi valmistaa. Hoffman keksi kemiallisen prosessin ”HP2A”, (“High Performance Alkaline Activation”), joka muuttaa savesta yhtä kestävän materiaalin kuin

sementti. Emäksisiä metalleja käytetään kovettamaan savijauhe kivimäiseksi koostumukseksi huoneenlämmössä, mikä vähentää tarvittavan energian määrää suuresti. (Poulet 2016).

Yhden tonnin sementin valmistuksessa syntyy 900 kg hiilidioksidia, kun taas yhden tonnin savisementin valmistaminen aiheuttaa vain 50–100 kg hiilipäästöjä. Lisäksi savesta valmistaminen tarkoittaa, ettei tarvitse kuluttaa hiekkapohjaisia rantoja, jotka usein tyhjenevät sementin tuotannossa. Savisementti on kierrätettävissä ja sitä voi valmistaa jopa purkutyömaan hiekasta. Savisementin etuna on myös se, että tuottamisen kustannukset ovat samat tai halvemmat kuin sementillä. (Poulet 2016).

Yhdessä tutkimuksessa taas testattiin teollisesti tuotetun kalkin vaikutusta savisementtijärjestelmien vahvuuden kehitykseen ja pozzolaanisten reaktioiden nopeuteen. Huomattiin, että saven lisääminen sementtilaastiin ja sen kemiallinen aktivaatio korvasi yhtä suuren määrän sementtiä laastissa, mikä alensi sementtilaastin kustannuksia ja siten kasvihuonekaasupäästöjä huomattavasti. Kalkin lisääminen savi–sementtiseoksiin on tehokas, suhteellisen edullinen ja ympäristöystävällinen tapa nopeuttaa saven reaktiota. (Noor-ul-Amin 2012, 381 & 384).

Tutkija Ville Repo kokeili laboratoriossaan kuumennettua kainuulaista savea 750 asteen lämpötilassa tavoitteenaan luoda betonin korvaavaa materiaalia. Kuumennuksen jälkeen savi jäähdytettiin, jauhettiin hienoksi ja sekoitettiin emäksiseen liuokseen. Tämä prosessi tuotti geopolymeeristä valmistettua materiaalia, josta noin puolet koostui kaoliinista. Mielenkiintoisesti huomattiin, että savesta valmistettu betoni saavutti jopa 74 megapascalin lujuuden, kun taas tavallinen betoni yleensä saavuttaa 30–50 megapascalin lujuuden. Kaoliinin käyttö voi osoittautua lupaavaksi ratkaisuksi monilla maailman alueilla, mutta sitä ei ole laajalti saatavilla Suomessa. Pyrkimykset löytää enemmän paikallisia vaihtoehtoja tälle raaka-aineelle jatkuvat. (Ruggeri 2023).

Repo ja hänen tutkijaryhmänsä ovat sitoutuneet etsimään betonin korvikkeita, jotka kuluttavat vähemmän energiaa ja vähentävät kuljetustarvetta. Ryhmä tutkii innovatiivisia lähestymistapoja hyödyntää luonnonmateriaaleja geopolymeerien ja alkaliaktivoitujen materiaalien valmistuksessa. Geopolymeerit ovat polymeerejä, jotka koostuvat mineraaleista ja tarjoavat vaihtoehdon perinteiselle kalkkikivipohjaiselle portlandsementille. Nämä materiaalit voivat tarjota ympäristöystävällisen vaihtoehdon perinteisille raken-

nusmateriaaleille samalla mahdollistaen jätteiden kierrätyksen. (Ruggeri 2023).

Kuva 12. *Geopolymeerikokeiluja Aalto-yliopistossa. (Kaarakainen 2023).*

SINTEF-tutkija Harald Justnesin mukaan betonissa voi käyttää myös epäpuhtaita savia, kuten Norjan sinisavea. Poltetun saven käyttö betonissa voi korvata jopa 50 prosenttia sementistä ja on ympäristöystävällisempää, sillä se vähentää hiilipäästöjä huomattavasti. Norjan sinisavi koostuu eri mineraaleista, ja vaikka sen käyttöä sementin korvikkeena on aiemmin pidetty haasteellisena, niin SINTEFin tutkijat ovat löytäneet sille uusia mahdollisuuksia betonissa. (Justnes 2016).

Puhtaiden kaoliinisavien kalsinointi tuottaa meta-kaolia, jota on käytetty sementin korvikkeena. Puhdistettu kaoliinisavi olisi kallista tuoda Norjaan, ja siksi tavallinen sinisavi voi olla käyttökelpoinen vaihtoehto. Se ei vaadi puhdistamista ja on edullisempaa tuottaa. (Justnes 2016).

Vaikka savella voidaan korvata 50 prosenttia kalkkisementistä, betonin vahvistuksen suojelemiseksi korroosiolta suositellaan enintään 35 prosentin saviosuutta. Tarvitaan lisää tutkimusta savien käyttäytymisestä ja lämpökäsittelyprosessin optimoinnista ennen johtopäätöksiä. Tulevaisuudessa savi voi olla hyödyllinen resurssi rakentamiseen sen hävittämisen sijaan. (Justnes 2016).

Voidaan siis huomata, että maailmanlaajuisesti on meneillään useita kiinnostavia uusia materiaaleja tuottavia hankkeita, joissa savea ja sementtiä yhdistellään eri keinoin. Olemme vahvasti riippuvaisia sementin käytöstä, joten jo sen määrän vähentäminen rakennustuotteissa on erittäin eduksi. Materiaalit tarvitsevat vielä paljon kehitystyötä, mutta suunta näyttäisi olevan savivoittoinen olkoonkin se sitten sementin kanssa sekoitteena.

4. TALO P

Tutustuin Juha Päätalon asuin- ja toimistorakennukseen Tampereen Aitolahdessa ja haastattelin häntä rakennukseen liittyen. Talon päätilojen lattiamateriaalina toimii savi, joten keskeistä oli selvittää, että miten savilattia valmistui sekä kuinka se on toiminut käytössä?

Kuva 13. *Juha Päätalon asuin- ja toimistorakennus (Päätalo 2022).*

Kohteessa on 10 cm paksu massiivisavilattia, joka on tehty sen alla olevan betonilattian päälle. Ensin on laitettu mahdollisimman ohut 5 mm raudoitusverkko, johon on surrauslangalla kiinnitetty lattialämmitysputket. Ideana oli, että lattialämmitysputkia ei laiteta betonin sisään, koska putkien oletettu elinikä on noin 30 vuotta, kun taas betonilattialla se on 80 vuotta. Mikäli rikkinäinen putki on taas savikerroksen alla, niin putki voidaan kaivaa ja vaihtaa paljon helpommin, kuin betonin sisältä. Mikäli lattian alla tapahtuu vuoto, niin se voidaan havaita nopeasti, sillä savilattia pehmentyy vuodon kohdalta. Tämä tekee lattian sisäisten ongelmien havaitsemisesta ja korjaustoimenpiteistä helppoa. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Kohteen savi on kaivettu ja otettu talteen samalla, kun talon perustuksia tehtiin. Savi on sekoitettu suhteessa 1:2, eli yksi osaa savea ja kaksi osaa kivimurskaa. Seuraavaksi materiaali on sekoitettu maakosteaksi massaksi ja levitetty noin 15 cm paksuksi ker-

rokseksi ja sitten vielä tiivistetty 9–10 cm paksuksi kerrokseksi ajelemalla pinnan päältä tärylevyllä. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Tämän jälkeen lattian piti olla valmis, mutta massiivisavilattiasta ei tullut tarpeeksi tasainen. Ongelma ratkaistiin tekemällä päälle vielä savilaastilattia, joka on hyvin samankaltainen kuin alkuperäinen lattia. Eroavaisuudet massiivisavilattiasta näkyvät siten, että käytetty kiviaines on hyvin pientä ja päällä oleva tasoitteessa vielä pienempää alle millimetrin luokkaa. Asuin- ja toimistorakennuksen massiivisavilattiat ovat identtisiä käytetyn materiaalin puolesta. Molemmissa lattioissa on käytetty pienijakoisimpana materiaalina kivituhkaa ja suurin sora taas on 32 millimetrin luokkaa. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

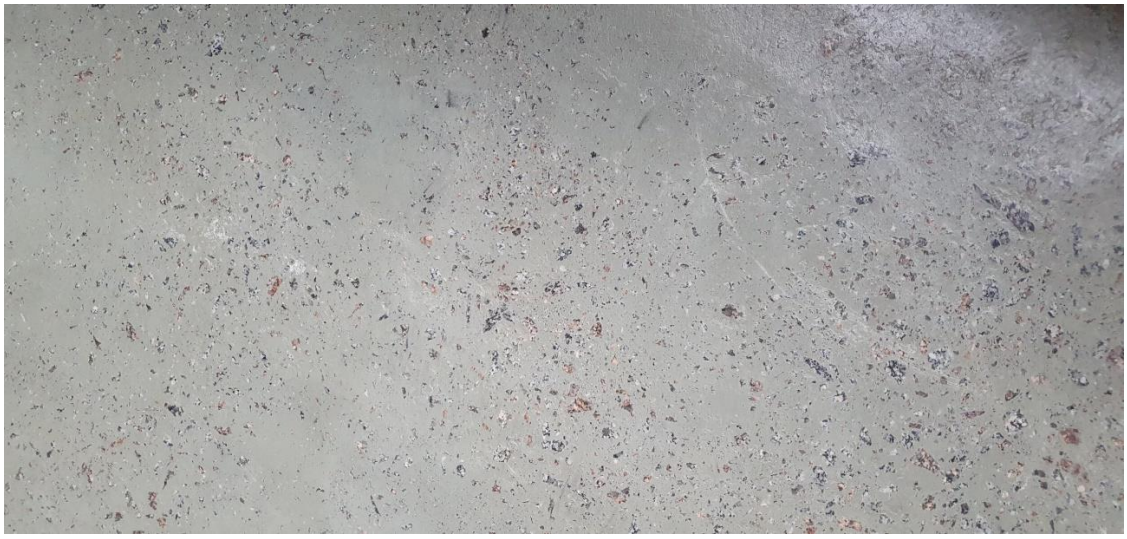
Tämän jälkeen lattia on vahattu veteen emulgoidulla karnaubavahalla ja kun se on kuivunut, niin pinta on käsitelty lattiavahalla, että lattia kestää puhdistusta ja roiskeita. Pinta toimii öljytyn parketin tavoin, eli neste pitää pyyhkäistä pois, sillä muuten neste imeytyy lattiaan. Esimerkiksi veden tapauksessa lattia on noin 10 minuuttia tumma, mutta palautuu ennalleen kuivuessaan. Punaviinin roiskuessa lattiaan saattaa jäädä tahra, mutta tahra hälvenee pinnasta ajan myötä. Päätalo mainitsi myös tapauksen, jossa pakastinta oli sulatettu ja samalla vettä oli valunut huomaamatta savilattialle jättäen jäljen. Jälki oli korjattu paikkaamalla lammikoitunut kohta uudella savipinnoitteella. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

***Kuva 14**. Asuinrakennuksen makuuhuone (Päätalo n.d.).*

Entä mitä Päätalo tekisi toisin ja mitkä ovat eroavaisuudet lattioiden välillä? Asuin- ja toimistorakennukset ovat koekohteita, joissa tehtiin ja kokeiltiin monia asioita ensim-

mäistä kertaa. Tämän seurauksena virheenä oli asuinrakennuksen lattian epätasaisuus. Toimistorakennuksessa taas massiivisavilattia on onnistuttu saamaan tarpeeksi tasaiseksi ja se myös hiottu ja vahattu. Näin ollen toimistorakennuksen massiivisavilattia on saatu paljon kulutuskestävämmäksi. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

***Kuva 15**. Asuinrakennuksen halkeileva savilaastikerros (Kauppinen 2023).*



***Kuva 16**. Toimistorakennuksen massiivisavilattian pinta (Kauppinen 2023).*

Asuinrakennuksessa olevan massiivisavilattian päälle prototyyppinä tehty laastikerros halkeilee huomattavasti. Päätalo on myöhemmin oppinut muun muassa Sukita Reay Crimmelin ja James Thomsonin Earthen floors -kirjasta, että laastikerroksen halkeilevan luonteen voisi kuitenkin välttää laittamalla lattiarakenteen ylempään kerrokseen esimerkiksi juutti- tai lasikuituverkon. Verkon asettamisen pitäisi estää, että pintaan ei syntyisi halkeamia. Laastilattia toteutui pikaisena korjaustoimenpiteenä asuinrakennuk-

seen ja Päätalo ei ollut kuullut laastilattian tekemisestä ja toimimisesta mitään ennen kuin teki sen itse. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Kun savesta tehtyä lattiaa alun perin pohdittiin ja tehtiin vuonna 2016, niin tietotaito oli Päätalon mukaan olemattomalla tasolla. Hän ei ollut aiemmin tehnyt savilattiaa, ja meni sen mukaan mitä oli lukenut netistä tai kirjoista. Kaikesta huolimatta lattian ratkaisu on saatu asuttavaan kuntoon. Päätalo tuo myös ilmi, kuinka ei nykyään irrottaisi olohuoneen ikkunan paperista erotuskaistaa, mikä on aiheuttanut sen, että puisen ikkunankarmin eläminen on murtanut savilattian reunaa. Päätalo on asukkaana huomannut, että savilattia kuluttaa sukkia nopeasti. Pinta on karheampi parkettilattiaan verrattuna, mutta esimerkiksi myös betonisella lattialla tai laattalattialla voi olla hiekkapaperimainen vaikutus. (Päätalo, J. Haastattelu, 22.3.2023).

Kuva 17. *Ikkunankarmin eläminen on murtanut savilattian reunaa erotuskaistan irrotuksen myötä (Kauppinen 2023).*

5. POHDINTA

Tämä kandidaatintyö tarkasteli savirakentamisen erinäisiä ominaisuuksia sekä sen mahdollisuuksia betonin korvaajana. Kyseessä on kaksi eri tavalla käyttäytyvää materiaalia, joilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Tällöin ei voida puhua, että ne olisivat keskenään suoraan verrannollisia. Ihmiskunta ei todennäköisesti koskaan pääse betonista täysin eroon, sillä rakentamisessa ollaan hyvin riippuvaisia portlandsementistä. Näen, että joko koko rakennuttamiskulttuurin tulisi transformoitua alkukantaisempaan suuntaan, betonin tulisi kehittyä huomattavasti vähähiilisemmäksi tai sen käyttö tulisi minimoida pakollisiin kohteisiin, joihin muut materiaalit eivät yksinkertaisesti taivu.

Uskon, että suunta on betonin käytön muuttamisessa esimerkiksi vähentämällä siinä olevan sementin määrää vaihtoehtoisilla aineilla, kuten savella ja täten kehittämällä uutta luonnon kannalta kestävämpää betonia. Nykyisen betonin suurta käyttöastetta voidaan myös vähentää rakennuksissa käyttämällä vaihtoehtoisia materiaaleja, kuten puuta ja/tai savea. Savirakentamisen mahdollisuudet ovat alkaneet kiinnostaa tutkijoita ja monia muita tahoja enemmän ja enemmän ympäri maailmaa.

Savirakentaminen on nykyisessä tilassaan hyvin pitkälti pientalorakentamista rakennuttajien toimesta, jotka ovat jo valmiiksi perehtyneet ja hurahtaneet savirakentamisen maailmaan. Koen itse, että ainoa järkevä tapa saada polttamaton savi merkittäväksi tekijäksi rakennusmarkkinoilla ja täten vastustajaksi ilmastokatastrofille, on saada sille suurimittainen elementtituotanto käyntiin. Tämä vaatii useita yrityksiä mukaan ja uudenlaista laitteistoa. Täten ei voida puhua nopeasta siirtymästä, jos pyrkimyksenä on saada esimerkiksi monet betoni- ja elementtitehtaat hyppäämään savirakentamisen puolelle. Tarve on kuitenkin kova, koska maapallon lämpenemisen kiihtyminen tulee saada aisoihin, missä rakennusteollisuus voi olla yksi merkittävä tekijä.

Massiivisavi soveltuu joihinkin kohteisiin, mutta se ei sovellu hyvin nykyisen nopean elementtivoittoisen rakentamiskulttuurin raameihin ja se on varsin kallista. Sen sijaan kevytsavirakentaminen voisi osoittautua huomattavasti halvemmaksi ja hiilikädenjäljeltään erinomaiseksi ratkaisuksi. Näen tarpeellisena yhdistellä eri materiaaleja keskenään, milloin ne voivat tukea toistensa hyviä puolia, kuten kevytsaven ja puun tapauksessa. Toivon, että savirakentamista tutkitaan lisää ja sitä aletaan hyödyntämään enemmän, sillä sen potentiaali on hyvin suuri oikein käytettynä.

LÄHTEET

Andersson, I. 2022. Boltshauser, R & Rauch, M haastattelu: Sveitsiläisarkkitehti Roger Boltshauser on savirakentamisen taituri – ekologinen savi kiinnostaa Suomessakin. Arkkitehtiuutiset 5.4.2022. Saatavilla: https://www.safa.fi/arkkitehtiuutiset/sveitsilaisarkkitehti-roger-boltshauser-on-savirakentamisen-taituri-ekologinen-savi-kiinnostaa-suomessakin/ [Viitattu 12.4.2023].

De Rossi, M. 2023. Sähköpostihaastattelu 21.4.2023, haastattelijana Jesse Kauppinen. Tallenne kirjoittajan hallussa.

Denvir, P. 2023. LUONNONBETONI: building an eco-friendly future with natural concrete. Scan Magazine. Saatavilla: https://scanmagazine.co.uk/luonnonbetoni-building-an-eco-friendly-future-with-natural-concrete/ [Viitattu 17.8.2023].

Fathy, H, 1973. Architecture for the Poor: An Experiment in Rural Egypt. University of Chicago Press.

Finnsementti Oy. Seosaineet. n.d. Finnsementti Oy. Saatavilla: https://finnsementti.fi/tuotteet_vanha/seosaineet/ [Viitattu 9.4.2023].

Justnes, H. 2016. Eco-cement from Norwegian clay. SINTEF. Saatavilla: https://www.sintef.no/en/latest-news/2016/eco-cement-from-norwegian-clay/ [Viitattu 20.10.2023].

Korkiala-Tanttu, L & Hyrkäs, J. 2022. Vähähiilinen kevytsavi auttaa pienentämään rakentamisen jätemäärää ja hiilijalanjälkeä. Aalto-yliopiston uutiset 14.10.2022. Saatavilla: https://www.aalto.fi/fi/uutiset/vahahiilinen-kevytsavi-auttaa-pienentamaan-rakentamisen-jatemaaraa-ja-hiilijalanjalkea [Viitattu 18.9.2023].

Koivisto, E. 2021. Missä menet, massiivirakentaminen? Arkkitehtilehti 2/2021 – Perinne ja uudistuminen. Saatavilla: https://www.ark.fi/fi/2021/02/missa-menet-massiivirakentaminen/ [Viitattu 3.10.2023].

Leppänen, H. 2020. Mitä savi on? Kerafiikka-blogi 8.12.2020. Saatavilla: https://kerafiikka.com/mita-savi-on/ [Viitattu 9.4.2023].

Luonnonbetoni. n.d. Materiaali. Luonnonbetoni. Saatavilla: https://www.luonnonbetoni.fi/materiaali [Viitattu 18.9.2023].

Noor-Ul-Amin. 2012. Use of clay as a cement replacement in mortar and its chemical activation to reduce the cost and emission of greenhouse gases. Construction and Building Materials 34 (2012) 381–384. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.022 [Viitattu 10.10.2023].

Partanen, L. 2023. VTT:ltä spinnaava Carbonaide rakentaa Hollolassa maailman ensimmäistä hiilinegatiivisen betonin mahdollistavaa teollista pilot-tuotantolinjastoa. VTT. Saatavilla: https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/vttlta-spinnaava-carbonaide-rakentaa-hollolassa-maailman-ensimmaista [Viitattu 4.10.2023].

Poulet, M. 2016. How two eco-friendly French inventors want to replace concrete with clay. The Observers France 24. Saatavilla: https://observers.france24.com/en/20160510-environmental-environmentally-construction-cement-clay [Viitattu 10.10.2023].

Päätalo, J. 2022. Ekologiset rakennusmateriaalit-luento 28.11.2022. Rakennusoppi II-kurssi Tampereen yliopisto.

Päätalo, J. 2023. Tampere. Haastattelu 22.3.2023, haastattelijana Jesse Kauppinen. Tallenne kirjoittajan hallussa.

Ramsden, K. 2020. Cement and Concrete: The Environmental Impact. Princeton Student Climate Initiative 3.11.2020. Saatavilla: https://psci.princeton.edu/tips/2020/11/3/cement-and-concrete-the-environmental-impact [Viitattu 7.4.2023].

Ranki, T. n.d. Kevytsavi. Saviyhdistys savirakentamisen edistämiseksi ry. Saatavilla: http://www.saviry.fi/rakentaminen/kevytsavi.html [Viitattu 18.9.2023].

Ranki, T. n.d. Massiivisavi. Saviyhdistys savirakentamisen edistämiseksi ry. Saatavilla: http://www.saviry.fi/rakentaminen/massiivisavi.html [Viitattu 18.9.2023].

RakentajaPRO toimitus. 2022. Westermarck, M haastattelu: Savi voi olla ratkaisu homeongelmaan – ekspertti ihmettelee, miksei sitä hyödynnetä. RakentajaPRO 15.11.2022. Saatavilla: https://rakentaja.pro/artikkelit/savi-voi-olla-ratkaisu-homeongelmaan-ekspertti-ihmettelee-miksei-sit%C3%A4-hy%C3%B6dynnet%C3%A4/ [Viitattu 12.4.2023].

Ruggeri, A. 2023. Perinteisen betonin superluja haastaja tehdään ekologisesti savesta – jopa suoraan rakennuspaikalla. Aalto-yliopiston uutiset. Saatavilla: https://www.aalto.fi/fi/uutiset/perinteisen-betonin-superluja-haastaja-tehdaan-ekologisesti-savesta-jopa-suoraan-rakennuspaikalla [Viitattu 10.10.2023].

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2021. ROTI, rakennetun omaisuuden tila -raportti 2021. Saatavila: https://www.ril.fi/media/2021/vaikuttaminen/roti2021_low.pdf. [Viitattu 18.9.2023].

Suominen, T. 2001. Kevytsavirakentamista Putkilahdessa. Putkilahden kylälehti 11/2001 marraskuu. Saatavilla: https://www.putkilahti.net/k011115b.htm [Viitattu 18.9.2023].

Tigue, K. 2022. Concrete is Worse for the Climate than flying. Why Aren't More People Talking About It? Inside Climate News 24.6.2022. Saatavilla: https://insideclimatenews.org/news/24062022/concrete-is-worse-for-the-climate-than-flying-why-arent-more-people-talking-about-it/ [Viitattu 7.4.2023].

Toivonen, J. 2017. Sementti on isompi ilmastopahis kuin lentokoneet, ja nyt se pitäisi korvata – mutta miten? Yle 6.11.2017. Saatavilla: https://yle.fi/a/3-9901767 [Viitattu 19.9.2023].

Väänänen, I. 2023. Betoni-luento 7.2.2023. Rakennusoppi IV-kurssi Tampereen yliopisto.

Väisänen, P. 2005. Betoni – Perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. TKK, arkkitehtiosasto. Pdf-dokumentti. Saatavissa: https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/06/Betoni-Perustietoa-arkkitehtiopiskelijalle-2010.pdf [Viitattu 7.4.2023].

Väisänen, P ja Huttunen, R. 2003. Tiili – Perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. TKK, arkkitehtiosasto. [Viitattu 12.3.2023].

Williams, F. 2021. Saving the earth: making the case for rammed earth architecture. Architects Journal. Saatavilla: https://www.architectsjournal.co.uk/specification/saving-the-earth-making-the-case-for-rammed-earth-architecture [Viitattu 3.10.2023].

Ympäristöministeriö. 2022. Hankeikkuna: Luonnos hallituksen esityksestä rakentamislaiksi. Maankäyttö- ja rakennuslaki uudistuu. Saatavilla: https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/6df1d533-c70e-4f34-81f9-b7e932433d84/9aeaf76a-9e66-4d53-8cf9-d0f15f39929c/LIITE_20220411123124.PDF [Viitattu 7.4.2023].

KUVALÄHTEET

Kuva 1: Dospěl, M. 2023. Pharaoh’s Brick Makers. Biblical Archaeology Society. Saatavilla: https://www.biblicalarchaeology.org/daily/ancient-cultures/ancient-egypt/pharaohs-brick-makers/ [Viitattu 18.9.2023].

Kuva 2: Birch, E. 2016. The Great Wall of WA. Archdaily. Saatavilla: https://www.archdaily.com/771780/the-great-wall-of-wa-luigi-rosselli [Viitattu 20.10.2023].

Kuva 3: Kauppinen, J. 2021. Alapohjan betonivalu raudoitusverkon päälle työmaalla.

Kuva 4: Hoerbst, K. 2006. METI school. Anabata. Saatavilla: https://anabata.com/architecture=anna-heringer-empowering-the-local-potential-of-bangladesh-for-meti-school-building [Viitattu 21.10.2023].

Kuva 5: Klomfar, B. n.d. Chapel of Reconciliation. Lehm Ton Erde. Saatavilla: https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?pID=28 [Viitattu 19.9.2023].

Kuva 6: First in Architecture. n.d. Rammed Earth Construction. Saatavilla: https://www.firstinarchitecture.co.uk/rammed-earth-construction/ [Viitattu 19.9.2023].

Kuva 7: Bühler, B. 2008. House Rauch. Lehm Ton Erde. Saatavilla: https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?pID= [Viitattu 3.10.2023].

Kuva 8: Kauppinen, J. 2023. Päätalo, J kevytsavinen testikappale.

Kuva 9: Westermarck, M. 2022. Päätalo, J pitämä ekologiset rakennusmateriaalit-luento 28.11.2022. Rakennusoppi II-kurssi Tampereen yliopisto.

Kuva: 10: Suominen, T. 2001. Kevytsavirakentamista Putkilahdessa. Putkilahden kylälehti 11/2001 marraskuu. Saatavilla: https://www.putkilahti.net/k011115b.htm [Viitattu 19.9.2023].

Kuva: 11: Luonnonbetoni. n.d. Materiaali. Luonnonbetoni. Saatavilla: https://www.luonnonbetoni.fi/materiaali [Viitattu 19.9.2023].

Kuva 12: Kaarakainen, J. 2023. Geopolymeerikokeiluja. Aalto-yliopiston uutiset. Saatavilla: https://www.aalto.fi/fi/uutiset/perinteisen-betonin-superluja-haastaja-tehdaan-ekologisesti-savesta-jopa-suoraan-rakennuspaikalla [Viitattu 10.10.2023].

Kuva 13: Päätalo, J. 2022. Talo P. Ekologiset rakennusmateriaalit-luento 28.11.2022. Rakennusoppi II-kurssi Tampereen yliopisto.

Kuva 14: Päätalo, J. n.d. Talo P. Arkkitehtitoimisto Päätalo Oy Saatavilla: https://paatalo.com/talo-p/ [Viitattu 19.9.2023].

Kuva 15: Kauppinen, J. 2023. Asuinrakennuksen savilattia.

Kuva 16: Kauppinen, J. 2023. Toimistorakennuksen savilattia.

Kuva 17: Kauppinen, J. 2023. Asuinrakennuksen ikkunankarmi.