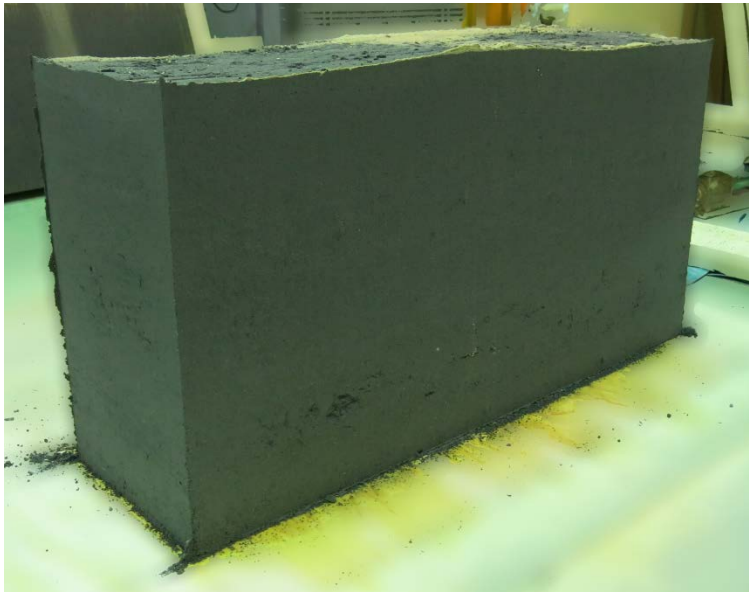
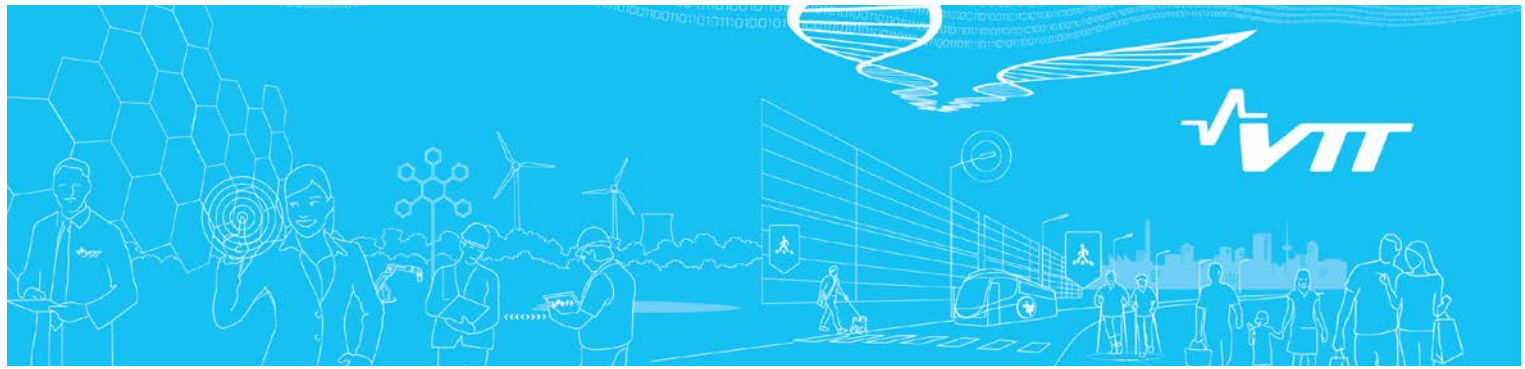
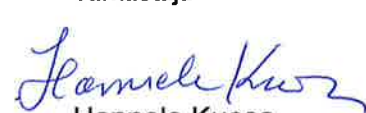
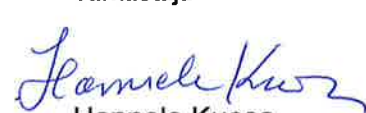
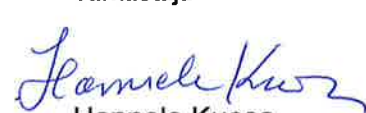




Jätemateriaaleista valmistettu hydraulisesti sitoutuva muuri- rakenne

Kirjoittajat: Tapio Vehmas ja Anna Kronlöf

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Jätemateriaaleista valmistettu hydraulisesti sitoutuva muurirakenne								
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Ympäristöministeriö Aleksanterinkatu 7 PL 35 00023 Valtioneuvosto		Asiakkaan viite						
Projektin nimi Jätemateriaaleista valmistettu hydraulisesti sitoutuva muurirakenne		Projektin numero/lyhytnimi 101464/Wastewall						
Raportin laatija(t) Tapio Vehmas ja Anna Kronlöf		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 60 s.						
Avainsanat Meluvalli, kivihiilenpolton lentotuhka, rikinpoistotuote, yhdyskuntajätteenpolton kuona, kierrätysbetoni, rammed earth -tekniikka		Raportin numero VTT-R-04051-15						
Tiivistelmä Projektissa selvitettiin soveltuvatko jätemateriat hydraulisesti sitoutuvan muurirakenteen valmistamiseen. Muurirakenteen sovelluskohteeksi valittiin meluste. Valmistusmenetelmänä käytettiin materiaalien sullomiseen perustuvaa Rammed Earth (RE) – menetelmää. RE-menetelmä on vanha rakennustekniikka joka on noussut viimeaikoina takaisin suosioon monipuolisen pintarakenteensa ja arkkitehtonisten mahdollisuuksien ansiosta. Kirjallisuusselvityksen perusteella muurimateriaaleiksi valittiin kivihiilenpolton lentotuhka, rikinpoistotuote, kierrätysbetoni ja yhdyskuntajätteenpolton kuona. Lentotuhkan ja kuonan todettiin reagoivan kalsiumhydroksidin kanssa. Rikinpoistotuote reagoi amorfisen piin kanssa. Jätemateriaalien keskinäinen reaktiivisuus jäi kuitenkin referenssimateriaaleista. Alkaliaktivointi (5 % natriumhydroksidi) nosti jätemateriaalien reaktiivisuuden referenssimateriaalien tasolle. Reaktiivisiksi todettujen materiaaliyhdistelmien puristuslujuudet määritettiin. Keskimääräinen puristuslujuus 56 vuorokauden iässä oli 2 MPa. Menetelmän soveltuvuus todennettiin valmistamalla demonstraatiomuurirakenne.								
Luottamuksellisuus	Julkinen							
Espoo 2.9.2015 <table border="0"> <tr> <td>Laatijat</td> <td>Tarkastaja</td> <td>Hyväksyjä</td> </tr> <tr> <td>  Tapio Vehmas Research Scientist VTT </td> <td>  Hannele Kuosa Research Scientist VTT </td> <td>  Eila Lehmus Head of Research Area </td> </tr> </table>  Anna Kronlöf Product Manager VTT Expert Services			Laatijat	Tarkastaja	Hyväksyjä	 Tapio Vehmas Research Scientist VTT	 Hannele Kuosa Research Scientist VTT	 Eila Lehmus Head of Research Area
Laatijat	Tarkastaja	Hyväksyjä						
 Tapio Vehmas Research Scientist VTT	 Hannele Kuosa Research Scientist VTT	 Eila Lehmus Head of Research Area						
VTT:n yhteystiedot VTT, PL 1000, 02044 VTT, puh. 020 722 111 (vaihe), fax 020 722 7001								
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tilaaja, VTT								
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.								

Alkusanat

Projekti 'Jättemateriaaleista valmistettu hydraulisesti sitoutuva muurirakenne' (WasteWall) toteutettiin ympäristöministeriön ja VTT:n rahoittamana VTT:ssä vuosina 2014 ja 2015. Tutkimuksessa yhdistettiin betonin materiaalitekniikasta tuttua tietoa kivihiilenpolton lentotuhkan ja masuunikuonan reaktiomekanismeista sekä uusinta tietoa sementin sitoutumisreaktiosta latenttien hydraulisten jättemateriaalien käyttöön. Projektin tavoite oli nostaa epäorgaanisten mineraalisten jätteiden jalostusastetta hyödyntämällä niiden sitoutumisominaisuuksia muurimaisissa rakenteissa. Projektissa sovellettiin tuhansia vuosia vanhaa ja uudelleen kiinnostuksen kohteeksi nousutta maa-aineksen sullomiseen perustuvaa tekniikkaa rammed earth (RE), jota nimitetään stabilized rammed earth (SRE) tekniikaksi, jos materiaalissa käytetään sideainetta kuten sementtiä. Projektin aikana otettiin käyttöön Vantaa Energian jätevoimala ja uusia yhdyskuntajätteen polttovoimaloita suunniteltiin myös muihin Suomen kaupunkeihin, mikä nosti mielenkiintoa jätteenpolton tuhkia kohtaan. Tässä tuhkillä tarkoitetaan sekä lentotuhkaa että pohjatuhkaa, joista jälkimmäistä nimitetään suomenkielisissä yhteyksissä myös kuonaksi. Työn kokeellisessa osassa tutkittiin materiaalikombinaatioita, joiden karkeimman partikkelifraktion muodosti murskattu betoni ja yhdyskuntajätteenpolton kuona. Hienojakoisen osan muodosti edellisten pölymäinen fraktio sekä kivihiilenpolton lentotuhka ja rikinpoistotuote. Työssä tarkasteltiin materiaalin ja menetelmän soveltuvuutta noin puoli metriä paksun pystysuoran muurimaisen meluesteen valmistamiseen. Vaikka tutkimus rajattiin materiaalitekniikan alueeseen, tutkimus laajeni useille perinteisille teknisille aloille kuten hydrataatiokemia, betonitekniikka, sullomiseen perustuva rakennustekniikka (RE), jättemateriaalien ympäristövaikutukset ja arkkitehtuuri.

Projektin johtoryhmän muodostivat puheenjohtaja Juha Forsman (Ramboll) sekä Leena Korkiala-Tanttu (Aalto-yliopisto), Else Peuranen (ympäristöministeriö), Pia Rämö (Rudus) (1.6.2015 asti), Katja Lehtonen (1.6.2015 alkaen), Jyrki Sinkkilä (Aalto-yliopisto) ja Margareta Wahlström (VTT). Heidän asiantuntijuutensa ja ohjauksensa maarakentamisen, geotekniikan, ympäristölainsäädännön, kierrätysteknologian, maisema-arkkitehtuurin ja ympäristövaikutusten aloilla olivat välttämätön ja korvaamaton tuki projektin läpi.

Projektin tutkimusta sitoutumisominaisuuksien osalta jatkettiin elektronimikroskooppi-tutkimuksella joka toteutettiin vertaisarvioitua tieteellistä artikkelia varten. Koska tutkimus ei suoranaisesti liity projektiin, mikroskooppitutkimukseen viitataan kyseisessä raportissa mutta tuloksia ei sellaisenaan esitetä. Vertaisarvioidun artikkelin tiedot toimitetaan raportin liitteeksi kun se on julkaistu.

Espoo 2.9.2015

Tekijät

Sisällysluettelo

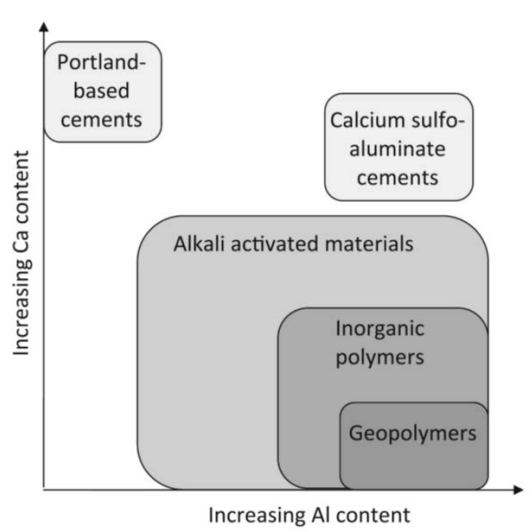
Alkusanat	2
Sisällysluettelo	3
1. Johdanto	5
2. Tavoite	9
3. Tutkimuksen sisältö	9
4. Kirjallisuusselvitys	10
4.1 Muurirakenteiden tarve	10
4.2 Materiaalien kartoitus ja valinta	10
4.2.1 Yhdyskuntajätteen polton tuhkat ja tuotanto	10
4.2.2 MSWI- tuhkan koostumus	11
4.2.3 Vantaan jätevoimalan toiminta	13
4.2.4 MSWI-tuhkien kierrätys ja käyttö	13
4.2.5 MSWI-tuhkien käyttö betonissa	15
4.3 Sullomismenetelmällä valmistettu muurirakenne	18
4.3.1 Koostumuksen vaikutus lujuuteen	18
4.4 Melumuurirakenteelta vaadittavat ominaisuudet	20
4.4.1 Vaadittavat ominaisuudet	21
4.4.2 Huokosrakenne	21
4.4.3 Stabiloidun sullotun maa-aineksen ja betonin vertailu	24
4.5 Kirjallisuuskatsauksen johtopäätökset	28
5. Materiaalivalinnat kokeisiin	29
5.1 Materiaalien valintaan vaikuttavat tekijät	29
5.2 Valitut materiaalit	30
5.3 Valittujen materiaalien kemiallinen koostumus ja hydrauliset reaktiot	31
5.4 Ympäristöriskit ja niihin varautuminen	33
5.5 Muurirakenteen erityispiirteet ympäristövaikutusten kannalta	34
6. Kokeellinen tutkimus	34
6.1 Materiaalit	34
6.2 Menetelmät	35
6.2.1 Valittujen materiaalien alkuaineanalyysit	35
6.2.2 Runkoainemateriaalien partikkelikoon määrittäminen	35
6.2.3 Hienojakoisten materiaalien partikkelikoon määrittäminen	35
6.2.4 PASTOJEN REAKTIIVISUUDEN MÄÄRITTÄMINEN	35
6.2.5 Näytekappaleet	36
6.2.6 Muurirakennedemonstraatio	36
6.3 Materiaalien koostumus	37
6.4 Materiaalien reaktiivisuuden määrittäminen	38
6.4.1 Kalsium-silikaatti-hydraattien muodostuminen	38
6.4.2 Kokonaisreaktiivisuus	39
6.4.3 Päätelmät reaktiivisuustutkimuksesta	42
6.5 Muurirakenteen mekaaniset ominaisuudet	43
6.5.1 Alkaliaktiivisuuden vaikutus lujuuteen	44
6.5.2 Vesimäärän vaikutus	45

6.5.3	Pastapitoisuuden ja ajan vaikutus lujuuteen.....	45
6.5.4	Runkoainemateriaalin vaikutus lujuuteen	46
6.5.5	Koostumuksen vaikutus ulkonäköön	46
6.5.6	Päätelmiä muurirakenteen ominaisuuksista	48
6.6	Muurirakennedemonstraatio	48
6.6.1	Muurirakennedemonstraatio 1.....	49
6.6.2	Muurirakennedemonstraatio 2.....	50
6.6.3	Muurirakenteiden soveltuvuus ympäristörakentamiseen	52
6.6.4	Päätelmät muurirakennedemonstraatioista	52
7.	Johtopäätökset	53
7.1	Tarpeen määrittäminen.....	53
7.2	Tarvittavat ominaisuudet.....	53
7.3	Materiaalien kartoitus ja valinta.....	53
7.4	Materiaalien karakterisointi	54
7.5	Materiaalien sitoutumisominaisuuksien määrittäminen.....	54
7.6	Sullomismenetelmän kehittäminen	54
7.7	Rakenteiden testaus	55
7.8	Ympäristökelpoisuus.....	55
8.	Jatkotutkimukset	55
9.	Yhteenveto	55
	Lähdeviitteet.....	56

1. Johdanto

Teollisuuden epäorgaanisia sivuvirtoja on hyödynnetty rakennustekniikassa vuosikymmeniä. Sähkön tuotantoon käytettävien kivihiilivoimaloiden lentotuhkaa ja terästehtaiden masuunikuonaa hyödynnetään betoniteollisuudessa laajasti sideaineena (Malhotra 1980, Taylor 1997, Malhotra 1999). Lentotuhkan ja masuunikuonan sideaineominaisuudet perustuvat niiden kykyyn reagoida sementin hydrataatiotuotteen, kalsiumhydroksidin kanssa. Korvaamalla lentotuhkalla tai masuunikuonalla Portlandsementin klinkkerifaasia, vähennetään sementin aiheuttamaa ympäristökuormaa ja samalla paranevat betonin mekaaniset ja säilyvyysominaisuudet. Pienet annostelumäärät parantavat betonin ominaisuuksia mutta suuremmilla korvausmäärillä ominaisuudet heikkenevät. Tästä johtuen näiden ns. täydentävien sideaineiden käyttöä on rajoitettu. Suuremmat korvausmäärät olisivat kuitenkin suotavia, koska yksistään klinkkerin polttoprosessi aiheuttaa globaaleista hiilidioksidipäästöistä 2,4 %, (Gibbs et al. 2000) tai 5–8 % (van Deventer et al. 2010).

1950-luvulta lähtien on tutkittu Portlandsementtivapaita sideaineita (Davidovits 1991, Duxson et al. 2007, Kriven, Bell & Gordon 2003). Nämä sideaineet koostuvat pii- ja alumiinipitoisista materiaaleista ja alkaliaktivaattoreista. Materiaalien reaktiotuotteina ovat erilaiset silikaatti-/aluminaattihydraatit ja polysialaatit. Materiaaleja kutsutaan yleisesti alkali-aktivoiduiksi materiaaleiksi tai geopolymeereiksi. Yleensä käytössä on luokitus, jonka mukaan laajimman kokonaisuuden muodostavat alkali-aktivoidut materiaalit. Alkali-aktivoiduissa materiaaleissa on alaryhmänä epäorgaaniset polymeerit ja näiden alaluokkana ovat geopolymeerit. Ryhmien keskinäinen järjestys on esitetty kuvassa 1. Ryhmittely on kuitenkin joustava ja nimityksiä käytetään usein sekaisin.



Kuva 1. Alkaliaktivoitujen materiaalien luokittelu. (van Deventer et al. 2010)

Optimimateriaaleilla ja optimaalisissa reaktio-olosuhteissa alkaliaktivoidut materiaalit voivat saavuttaa 20–30 MPa puristuslujuuden muutamassa tunnissa (Khale, Chaudhary 2007). Loppulujuus voi nousta yli 90 MPa (Davidovits 1994). Tällaiset materiaalikombinaatiot ovat kuitenkin suhteellisen harvinaisia. Alkaliaktivoiduilla materiaaleilla saavutetaan tyypillisesti tavallisen betonin ominaisuudet. Lupaavista tutkimustuloksista huolimatta alkaliaktivoidut materiaalit eivät ole saavuttaneet teollista läpimurtoa (Van Deventer, Provis & Duxson 2012, Duxson, Provis 2008). Tällä hetkellä kaupallisesti käytössä on ainoastaan geopolymeereihin perustuvia palonkestäviä tuotteita. Laajemmassa mittakaavassa alkaliaktivoituja materiaaleja ei käytetä. Teollistamisen suurimmiksi esteiksi on todettu tavallista betonia haastavampi tekniikka, pitkäaikaisreferenssien puute ja materiaalien vaihtelevuus. Lisäksi alkaliaktivoidut materiaalit tarvitsevat lievän lämpökäsittelyn hydrataatioprosessin alussa, jotta tyydyttävät mekaaniset ominaisuudet saavutettaisiin betonitekniikkaa vastaavassa ajassa.

Alkaliaktivointiin soveltuvia materiaaleja on kuitenkin runsaasti saatavissa. Maailmanlaajuisesti ainoastaan 30–40 % lentotuhkasta hyödynnetään (Fernández-Jimenez et al. 2006, Li et al. 2004, Lam et al. 2010). Esimerkiksi yhdyskuntajätteenpoltosta aiheutuvan kuonan ja tuhkan käyttö alkaliativoinnissa on käytännössä olematon. Alkaliaktivointiin soveltuvat materiaalit ovat yleisesti polttoprosessien sivutuotteita jolloin kyseisiin materiaaleihin on käytetty huomattava määrä energiaa, mikä mahdollistaa reaktiivisten pii- ja alumiinifaasien muodostumisen. Näiden faasien käyttämättä jättäminen on ekologisesti ja taloudellisesti epäedullista.

Koska alkaliaktivoidut materiaalit eivät kykene kilpailemaan tavallisten betonirakeinteiden kanssa, tulee alkaliaktivoituja materiaaleja käyttää niille soveltuvissa kohteissa (Duxson, Provis 2008). Yksi mahdollinen sovellus on erilaiset sullomismenetelmään perustuvat rakenteet. Kiinnostus sullomismenetelmällä valmistettuihin ympäristörakenteisiin on ollut kasvussa viime vuosina johtuen niiden omaleimaisesta ulkonäöstä ja ympäristöystävällisyydestä (Walker et al. 2005). Sullomismenetelmä voi käytännössä hyödyntää hienojakoisia materiaaleja, joilla ei itsessään ole sideaineominaisuuksia. Tällaisilla materiaaleilla saavutetaan lähes megapascalin (1 MPa) puristuslujuus. Sullomismenetelmään perustuvat rakenteet kykenevät kantamaan oman painonsa välittömästi sullomisen jälkeen. Tyypillisimmillään sullomismenetelmää käytetään liukuvaluna jolloin, seuraava rakenne voidaan tehdä välittömästi edellisen viereen. Sullomismenetelmä on historiallinen rakennustekniikka ja useita hyvin vanhoja sullomismenetelmään perustuvia rakenteita voi löytää ympäri maailmaa (kuva 2).



Kuva 2. Rammed Earth -tekniikalla valmistettuja historiallisia kohteita. Ylhäällä Alhambra -palatsi Espanjasta, alhaalla vasemmalla Ait Benhaddou -kylä Marokosta ja alhaalla oikealla Pokara-palatsi Tiibetistä. (Calderon 2010)(Morocco Holidays Guide 2014)(Toni)

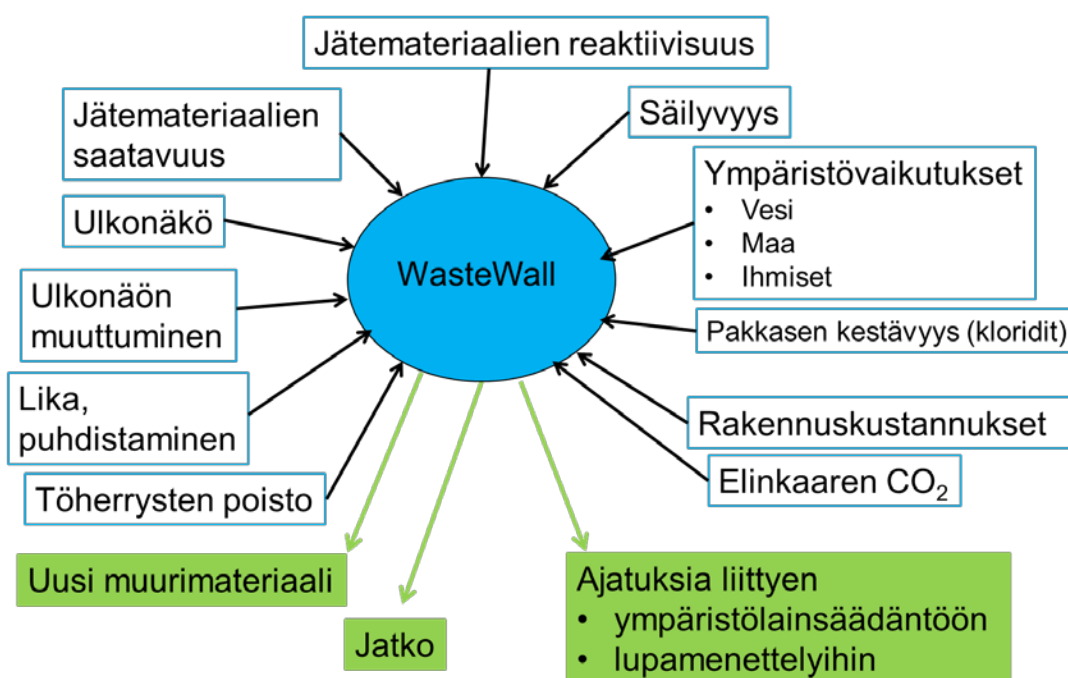
Nykyajan rakennustekniikassa ainoastaan sullomiseen perustuvaa lujuutta pidetään usein riittämättömänä kestävien rakenteiden aikaansaamiseksi. Yleisesti materiaaleihin lisätään pieni määrä sementtiä suuremman lujuuden saavuttamiseksi (Jayasinghe, Kamaladasa

2007). Rittävän suuret lujuudet ($> 2 \text{ MPa}$) ovat tyypillisesti myös saavutettavissa alkaliaktivoituilla materiaaleilla. Alkaliaktivoitujen materiaalien käyttö Portlandsementin korvaajana on taloudellisesti ja ympäristön kannalta erittäin edullista. Lisäksi sullomismenetelmän kyky kantaa painonsa välittömästi sullomisen jälkeen on alkaliaktivoituille materiaaleille edullinen. Koska alkaliaktivoitujen materiaalit tarvitsevat normaalilämpötilassa pitkän ajan kehittääkseen lujuutta, sullomismenetelmä mahdollistaa nopean muottikierron alkaliaktivoituilla materiaaleilla.

Sullomismenetelmään perustuvassa alkaliaktivoitujen materiaalien käytössä ei tule rajoittua ainoastaan alkaliaktivoinnissa tyypillisesti tavattuihin reaktiotuotteisiin. Epäorgaanisten materiaalien reaktiotuotteiden kirjo on laaja. Esimerkiksi alumiiniferriittifaaseja sovelletaan usein erikoiskohteissa. Alumiiniferriittifaasin muodostuminen aiheuttaa usein paisumista rakenteissa, mikä on tuhoisaa rakenteen kannalta. Kuitenkin sullomismenetelmässä vesimäärän vähyys voi estää paisuvien tuotteiden muodostumisen ylimäärin, jolloin niiden vaikutus rakenteen lujuudelle on ainostaan positiivinen. Käytännössä paisuvien ettringiittifaasin muodostumiseen tarvitaan rikkiä joka mahdollistaa faasin muodostumisen.

Myös erilaiset poltetut savet ja murskattu betoni voivat tarjota sitoutumisominaisuuksia sullotuissa rakenteissa. Yhteistä kaikille näille materiaaleille on niiden ympäristöystävällisyys ja tämänhetkinen vähäinen hyödyntäminen suhteessa materiaalien kokonaistuotantoon.

Teollisuuden sivuvirtojen ja jätemateriaalien hyödyntäminen sullomismenetelmällä valmistettuihin rakenteisiin ei ole yksinkertaista. Hyödyntämisessä vaikuttavat useat tekijät, joita on identifioitu kuvassa 3. Vaikuttavina tekijöinä on mm. töherryksen poisto, puhdistaminen, ulkonäkö, ulkonäön muuttuminen, jätemateriaalien saatavuus, jätemateriaalien reaktiivisuus, säilyvyys, ympäristövaikutukset, säänkestävyys, rakennekustannukset ja elinkaaren hiilidioksidipäästöt. Ylimpänä kuvassa on jätemateriaalien reaktiivisuus, joka on tekijöistä tärkein. Ilman reaktiivisuutta jätemateriaalin hyödyntäminen rakenteen kannalta on olematon. Toinen tärkeä tekijä on materiaalien saatavuus. Materiaaleja tulee olla saatavissa runsaasti edulliseen tai negatiiviseen hintaan jotta menetelmä olisi taloudellisesti käyttökelpoinen.



Kuva 3. Jätemateriaalien hyödyntämiseen muurirakenteissa vaikuttavia tekijöitä ja projektin lopputulosten hahmotelma.

Sullomismenettelyn uudessa tulemisessa merkittävänä tekijänä on ollut osaltaan omaleimainen ulkonäkö (Kuva 4). Vastaava ulkonäkö tulee saavuttaa jättemateriaaleja käyttämällä. Käytännössä ulkonäkö koostuu erilaisista materiaalikombinaatioista, jotka tuottavat eloisan pinnan väri vaihtelujen avulla. Rakenteen pintaa voi myös elävöittää tiivistyskerrosten paksuutta muuttamalla. Paksummat tiivistyskerrokset jättävät selvän kerrosmaisen rakenteen, kun taas ohuimmat tiivistyskerrokset tuottavat tasaisen pinnan.



Kuva 4. Esimerkkejä RE-menetelmällä luoduista pinnoista. (HBBH Architects 2008) (Inspiration Green)

Rakenteiden tulee olla myös pitkäikäisiä ympäristöolosuhteessaan. Suomessa tämä tarkoittaa hyvää kykyä vastustaa pakkasrapautumista ja joissakin tapauksissa myös klorideja ja pakkas-suolarapautumista. Ympäristörakenteiden tulee olla myös helposti liasta ja töherryksistä puhdistettavia. Koska kyseessä on ekotehokas ratkaisu, tulee rakenteiden elinkaaren hiilidioksidipäästöjen olla pieniä.

2. Tavoite

Tässä projektissa kehitetään uusi ympäristöystävällinen muurirakenne ja tietoa rakenteiden sen sovellusmahdollisuuksista.

Jättemateriaaleista/sivutuotteista valmistetun muurirakenteen ensisijaiseksi soveltamiskohdeksi valittiin melueste. Tavoitteena oli tuottaa kestävä muurirakenne, joka soveltuu teknisiltä ominaisuuksiltaan meluesteeksi. Muurirakenne meluesteenä yhdistää meluvallin ja meluseinämän ominaisuuksia.

Tavoitteena oli että tieto antaa perusteet mineraalisten jätteiden uusille käyttötavoille. Tavoitteena oli, että tuloksia voidaan käyttää pilot-hankkeiden suunnitteluun yhteistöissä eri toimijoiden kanssa (esim. materiaalitoimittajat, urakoitsijat, loppukäyttäjät, viranomaiset, tutkimuslaitokset). Näihin pilot-hankkeisiin tulee liittää tärkeänä osana kunnallisten ympäristörakenteiden hankintamenettelyjen kehittäminen. Kunnallisissa hankinnoissa on todennäköisesti mahdollista ottaa huomioon jättemateriaaleille tyypilliset saatavuusvaihtelut joustamalla aikatauluissa ja sallimalla useiden materiaalikombinaatioiden käyttö. Tämä edellyttää, että lujuus- ja säilyvyysominaisuudet sekä estetiikka eivät kuitenkaan kärsi.

Jatkohankkeet voivat myös soveltua EU Horizon 2020 tutkimushankkeeksi, jossa nykyään usein edellytetään teknologian valmiusaste "pilot-vaihetta".

3. Tutkimuksen sisältö

Tutkimussuunnitelman mukaan projekti koostui seuraavista osatehtävistä:

Tarpeen määrittäminen

Kartoitettiin ympäristörakentamisessa tarvittavien pystyrakenteiden (erityisesti muurirakenteiden) tarve. Kartoitus perustui nykyiseen ympäristörakentamisen volyymiin sekä ideointiin uudenaikaisesta muurirakenteiden käytöstä.

Tarvittavat ominaisuudet

Selvitettiin tyypillisten pystyrakenteiden (esim. muurirakenteen) vaadittavat lujuusominaisuudet ja pakkasenkestävyyden kannalta vaadittava huokosrakenne.

Materiaalien kartoitus ja valinta

Tehtävässä kartoitettiin UUMA2 verkoston avulla käytettävissä olevat materiaallivarannot ja niiden saatavuus nyt ja tulevaisuudessa sekä ympäristörakentamisen kannalta keskeiset ominaisuudet. Lisäksi arvioitiin alustavasti materiaalien soveltuvuus erityisesti muurirakentamiseen.

Materiaalien karakterisointi

Analysoitiin materiaalit reaktiivisuuden kannalta. Dokumentoitiin huomiot myös ulkonäköön liittyen.

Materiaalien sitoutumisominaisuuksien määrittäminen

Selvitettiin sitoutumisominaisuudet isoteremisellä kalorimetrialla ja lujuuskokein. Koeohjelmassa painotettiin materiaaleja, joita on runsaasti saatavana ja joiden muu käyttö on ongelmallista.

Sullomismenetelmän kehittäminen

Projektissa valmistettiin laboratorio-mittakaavan demorakenne. Lisäksi valittiin tiivistysmenetelmä sullomiskokeiluja varten.

Rakenteiden testaus

Arvioitiin rakenteiden soveltuvuus muurimaiseen meluesteeseen.

Ympäristökelpoisuus

Arvioitiin materiaalien ympäristökelpoisuus ympäristörakentamisen näkökulmasta.

4. Kirjallisuusselvitys

4.1 Muurirakenteiden tarve

Meluntorjuntaa säädellään valtioneuvoston periaatepäätöksellä (Ympäristöministeriö 2013). Kuntien ja Liikenneviraston tulisi meluesteiden sijaan pyrkiä vähentämään meluhaittoja muilla käytettävissä olevilla keinoilla ja kehittää meluntorjuntaan edullisempia ja ympäristöön sopivia ratkaisuja. Tällaisia ovat mm. väylän oikea sijoittaminen, päällystevalinnat ja rajoitukset. Monissa tapauksissa kuitenkin meluesteet ovat ainoa käytettävissä oleva vaihtoehto (Tiehallinto 2009).

Perusvaihtoehdot meluesteeksi ovat meluvallit, meluseinät ja melukaiteet. Meluvallien etuna ovat ääntä imevä rakenne, hyvä ulkonäkö, pienet ilkivaltaongelmat ja edullinen hinta. Meluvallien ongelmiksi on listattu tilan tarve ja painumien ja sortumien riski. Meluseinät ovat suhteellisen ohuita rakenteita ja tyypillisesti vähintään kaksi metriä korkeita. Meluseiniä käytetään kohteissa, joissa tarvitaan merkittävä melunvaimennus ja tilaa on vähän käytettävissä. Muurimaisia rakenteita ei vielä hyödynnetä meluntorjunnassa. Tien meluesteiden suunnitteluohjeen mukaan meluseinämien paksuntaminen muurirakenteeksi ei ole hyötyä, koska äänen eristävyys saavutetaan jo ohuella rakenteella ja muurimaisten rakenteiden ja perustusten kustannukset nousevat (Tiehallinto 2009). Muurirakenteet tuovat kuitenkin uusia vaihtoehtoja meluesteiden suunnitteluun ja kaupunkikuvaa voidaan huomattavasti elävöittää erilaisilla muurirakenteilla. Kun kaikki meluntorjuntaan vaikuttavat seikat huomioidaan, voidaan muurirakenteita pitää varteenotettavana vaihtoehtona meluntorjunnassa.

Esitetyn perusteella voidaankin todeta, että melumuurissa yhdistyvät meluesteen ominaisuudet uudessa konseptissa ja jätemateriaalien hyödyntäminen. Jätemateriaalien hyödyntämisestä saatavien etujen lisäksi kaupunkikuvaa voidaan elävöittää muurimaisilla meluntorjuntaratkaisulla.

4.2 Materiaalien kartoitus ja valinta

Kirjallisuuskatsauksessa selvitettiin yhdyskuntajätteen polton tuhkien muodostumista, laatua sekä kokeellisia yrityksiä löytää tuhille käyttöä maantäyttömateriaalina sekä betoniteknikassa. Tiedot perustuvat pääasiassa Taiwanissa ja Italiassa tehtyihin tutkimuksiin.

4.2.1 Yhdyskuntajätteen polton tuhkat ja tuotanto

Riippuen polttolaitoksen tyypistä yhdyskuntajätteen polton tuhkan [municipal solid waste incineration ash (MSWI ash)] tuotanto painoyksiköissä on tyypillisesti 1–30 % ja tilavuusyksiköissä 5–15 % jätteen määrästä. Polttoprosessi tuottaa pohjatuhkaa [bottom ash (BA)] ja lentotuhkaa [fly ash (FA)], joista edellistä kutsutaan myös kuonaksi (slag). Suurin osa tuhista (noin 75–80 %) on kuonaa ja suurin osa kuonasta on "grate" tuhkaa, joka jää lämmitti-

meen [stoker] tai arinaan [grate] polttosyklin päättyessä. Tuhka muistuttaa ulkonäöltään huo-koista, harmaata hienoa hiekkaa, jossa on soraa. Se sisältää pieniä määriä palamatonta orgaanista ainetta ja metallin kappaleita. Arinatuhka sisältää pääasiassa lasia, keramiikkaa, metalleja sekä mineraaleja. Lentotuhka on erittäin hienojakoista ja kulkeutuu savukaasujen mukana.

Taiwanissa on vertailtu 2003 MSW polttolaitosten tuhkantuotantoa (taulukko 1). Uudemmat, tehokkaammin toimivat laitokset tuottavat selvästi enemmän tuhkaa. Vanhimmassa laitok- sessa vuodelta 1991 tuhkan päivätuotanto on vain 62 tonnia/vrk ja tuhkan osuus jätteestä hieman alle 16 %. Vertailun uusimmassa laitoksessa (2001) vastaavat luvut ovat 268 ton- nia/vrk ja noin 22 %. (Huang et al. 2006).

Taulukko 1. MSWI tuotanto Taiwanissa 2003. (Huang et al. 2006)

No.	Suunniteltu kapasiteetti (tonnia/päivä)	Poltettu jäte (tonnia/päivä)	Käytössä oleva kapa- siteetti (%)	Tuhkan- tuotanto (tonnia/päivä)	Tuhkan saanto, (%)	Laitoksen val- mistumisvuosi
1	900	397	52	62	15,65	1991
2	1500	613	48	81	13,27	1995
3	1800	923	60	136	14,75	1999
4	900	674	88	100	14,84	1999
5	1800	1071	70	251	23,43	2000
6	900	741	97	128	17,33	2001
7	900	625	82	104	16,57	1997
8	300	232	91	35	14,98	2001
9	900	607	79	109	17,97	1999
10	900	688	90	120	17,47	1995
11	1350	962	84	161	16,77	1995
12	1350	1250	109	229	18,34	2001
13	900	782	102	161	20,61	2000
14	900	761	99	153	20,09	2001
15	900	832	109	167	20,12	2001
16	1350	926	81	213	22,98	2000
17	1350	1005	88	234	23,25	2001
18	900	703	92	168	23,90	2000
19	1350	1196	104	268	22,40	2001

4.2.2 MSWI- tuhkan koostumus

Yhdyskuntajätteestä muodostunut tuhka on suhteellisen kevyttä verrattuna luonnon hiekkoi- hin ja kiviaineksiin. Sen irtotiheys (bulk specific gravity) on 1,5–2,2 g/cm³ hiekan kokoluokalle ja sitä pienemmille partikkeleille 1,9–2,4 g/cm³. Suuremmille partikkeleille arvo on 2,6–2,8 g/cm³. Polton tuhka on lievästi vettä adsorboivaa ja adsorptioarvot ovat 5–17 % hienojakoi- sille partikkeleille ja 4–10 % suurille partikkeleille (Siddique 2010).

Song et al. (2004) ovat tutkineet MSWI-tuhkien koostumusta polttolaitoksen eri kohdissa tuh- kien jatkokäsittelyä varten (taulukko 2.). Polttolaitos oli varustettu laitteilla ilmaan päätyvien päästöjen kontrolloimiseksi [air pollution control devices (APCD)]. Nämä olivat vedensumu- tintorni [water spray tower (WST)] ja spraykuivausabsorptio [spray dryer absorber (SDA)], pussisuodatin [bag filter (BF)] ja selektiivinen katalyyttireaktori [selective catalytic reactor (SCR)]. Tutkimukseen valittiin kaupallinen polttolaitos, jonka kapasiteetti oli 100 t/vrk. Näyt- teet kerättiin normaalin toiminnan aikana ja niistä tutkittiin kemiallinen koostumus, emäksi- syys, kalsium/pii-suhde [basicity], metallioksidipitoisuudet ja raskasmetallien liukoisuus. Kal- sium/pii -suhde ja pH vaihtelivat laajasti väleillä 0,08–9,07 ja 3,5–12,3, mikä saattoi johtua eräiden epäorgaanisten komponenttien vaihtelevasta määrästä. Poltossa vapautui suuri osuus elohopeasta ja kadmiumista. Yli 90 % lyijystä, kuparista ja kromista jäi kuonaan. Kui-

tenkin 54 % elohopeasta jäi vedensumutintorniin, 41 % spraykuivain/pussisuodattimeen ja 3,6 % emittoitui. Kadmiumista 81,5 % jäi spraykuivain/pussisuodattimeen. Raskasmetallien jääminen tuhkaan varmistui, mutta osa vapautui helposti liukoisuuskokeissa.

Taulukko 2. Poltossa muodostuvien tuhkien kemiallinen koostumus painoprosentteina XRF-analyysin mukaan. (Song et al. 2004).

Kuonan koostumus (mg/kg)					Lentotuhkan koostumus (mg/kg)		
	>5mm	2–5mm	0,85–2mm	<0,85mm	WST	SDA	BF
pH	3,46	11,7	12,2	12,3	5,5	12,3	11,6
SiO ₂	53,16	34,82	33,10	25,30	16,61	5,83	4,73
TiO ₂	0,18	0,90	1,55	2,08	4,06	1,94	1,17
Al ₂ O ₃	3,98	8,58	10,32	10,77	8,82	2,79	1,77
Fe ₂ O ₃	1,40	5,99	5,75	4,49	3,63	2,36	0,95
Cr ₂ O ₃	0,13	0,14	–	–	0,16	0,07	0,20
K ₂ O	0,94	1,93	2,29	2,19	1,98	1,53	10,57
Na ₂ O	6,67	2,24	1,94	2,07	1,44	–	10,92
P ₂ O ₅	5,00	10,07	7,02	6,45	4,75	1,42	1,20
CaO	19,13	27,88	30,43	37,04	33,96	52,90	25,16
MgO	1,49	2,17	2,27	3,30	6,02	2,55	1,25
CuO	1,48	0,76	0,45	0,33	0,11	0,07	0,20
PbO	0,08	0,11	0,16	0,15	0,15	0,12	0,49
ZnO	0,67	1,70	1,32	0,95	1,04	0,54	0,85
SO ₃	5,27	1,51	1,95	2,84	7,02	6,69	7,98
Cl	0,41	1,20	1,45	2,03	8,58	20,32	31,72
Basicity	0,36	0,08	0,92	1,46	2,04	9,07	5,36

Basicity = CaO/SiO₂; WST = Water spray tower; SDA = Spray dryer absorber; BF = Bag filter

Tulosten ja varhaisemman kirjallisuuden perusteella vedettiin seuraavat johtopäätökset ja esitettiin ehdotukset tuhkan käsittelylle:

Kuona sisälsi runsaasti SiO₂:a ja Al₂O₃:a. Kalsium/pii – suhde oli alhainen ja ominaisuudet vaihtelivat partikkelikoosta riippuen. Metallioksidien pitoisuus ja kalsium/pii-suhde kasvoivat kuonan partikkelikoon pienentyessä. Poikkeuksen muodostivat SiO₂, Na₂O ja CuO. Näin ollen tuhkan käsittely voisi olla verrannollinen partikkelikokoon.

WST tuhkien pääasialliset komponentit olivat SiO₂, Al₂O₃ ja CaO. Liukenevien SO₃-, Ca-, Mg- ja Na-komponenttien pitoisuudet olivat korkeat ja toksisten raskasmetallien liukoisuus oli myös korkea. Näin ollen WST-tuhkien käsittely on suunniteltava veteen liukenevia komponentteja silmällä pitäen.

SDA- ja BF-laitteiden tuhkat sisälsivät suuria määriä seuraavia aineita: CaO, Na₂O, K₂O, Cl, Zn, Pb ja Hg. Tuhkat olivat erittäin emäksisiä. Korkeiden kloridipitoisuuksien perusteella arvioitiin, että tuhkat SDA- ja BF-laitteista sisältävät liukoisia suoloja kuten NaCl ja KCl sekä metalleja sekä orgaanisia klorideja (Jakob et al. 1995). Tuhkien käsittelyssä liukenevien komponenttien stabilointi on välttämätöntä.

Kuonan suurimmat partikkelit sisälsivät enemmän raskasmetalleja kuin pienet partikkelit. Suuremmilla partikkeleilla oli pidempi retentioaika poltossa ja metalleilla tällöin enemmän aikaa termiseen haihtumiseen (volatilization). Toisaalta, pienillä partikkeleilla ei ole riittävästi aikaa haihtumiseen ja ne putoavat kuonan joukkoon.

Haihtumisen seurauksena noin 88–97 % lyijystä, kuparista ja kromista jäi kuonaan ja niiden haihtumis/dispersio-suhteet [vaporization/dispersion ratios] olivat 3–12 %. Vanhentamiskäsittely ennen uusiokäyttöä on mahdollisesti tarpeen metallien liukoisuuden pienentämiseksi. (Shin& Choi 2000)

Koska kadmiumia ja elohopeaa haihtuu paljon noin 18 % kromista ja alle 1 % elohopeasta jäi kuonaan ja niiden haihtumis/dispersio-suhteet olivat 82 % ja 99 %. Myös niiden liukenevuussuhteet olivat korkeat, mikä tulee ottaa tuhkien käsittelyssä huomioon.

Kuonan metallien liukenevuussuhteet olivat alhaisemmat kuin lentotuhkien johtuen kuonan sisältämästä verkkorakenteen muodostamasta SiO₂:sta. Yleensä suurin osa raskasmetalleista on kiinnittyneenä verkkorakenteeseen (Kim 1996).

4.2.3 Vantaan jätevoimalan toiminta

Vantaa vuonna 2014 käynnistetyn yhdyskuntajätteen polttolaitoksen tuhkien tuotanto on noin 26 % käsitellyn jätteen määrästä (taulukko 3). Jätteenpolton tuhkat edustavatkin mittavaa materiaaalivirtaa tulevaisuuden Suomessa.

Taulukko 3. Vantaan 2014 käyttöön otetun jätevoimalan tuotanto vuotta kohden.

Jätteenpolto	Käsiteltävä jätemäärä 320 000 t - Maakaasun käyttö 73,5 milj. m³ - Polttoaine-energia yhteensä 1 671 GWh (1 GWh = 1 milj. kWh) - Hyötysuhde 95 % - Käyttöaika vähintään 8000 h
Tuotanto	- Tuottaa kaukolämpöä 920 gigawattituntia (GWh), joka vastaa noin puolta Vantaan kaukolämpötarpeesta. - Tuottaa sähköä 600 GWh, joka vastaa noin 30 % Vantaan sähköntarpeesta.
Sivutuotteet	- Kuona 65 500 t - Kattila- ja lentotuhka 5 600 t - Savukaasun puhdistuksen reaktiotuotteet 13 100 t
Hiilidioksidipäästöt	- Kokonaismäärä 270 000 t - Fossiilisten polttoaineiden (hiili, maakaasu) käyttö sähkön ja lämmön tuotannossa vähenee noin 30 %.

4.2.4 MSWI-tuhkien kierrätys ja käyttö

Taiwanin ympäristövirasto Taiwan Environmental Protection Administration (TEPA) on selvittänyt vuosituhaten vaihteessa laajasti sekä lentotuhkan että kuonan kierrätystä ja käyttöä (taulukko 4).

Taulukko 4. MSWI-lentotuhkan ja -kuonan käyttöä koskevia taiwanilaisia selvityksiä.

TEPA, 1998. <i>Development of Reuse Technologies of Municipal Solid Waste Incinerator Ashes and Their Regulations (I)</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 1999. <i>Development of Reuse Technologies of Municipal Solid Waste Incinerator Ashes and Their Regulations (II)</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2000. <i>Development of Reuse Technologies of Municipal Solid Waste Incinerator Ashes and Their Regulations (III)</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2001. <i>Technical Directives of Utilization of Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2002a. <i>Standards for Defining Hazardous Waste</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2002b. NIEA R201.12C, <i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) for Industrial Waste</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2002c. <i>The Project on Planning, Design, and Construction of Facility for Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash Utilization</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2002d. <i>The Project on Revised of Measures for Recycling, Removal and Disposal of General Wastes</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2002e. <i>Measures for Recycling, Removal and Disposal of General Wastes</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2002f. <i>Resource Recycling and Reuse Act</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2004a. <i>Yearbook of Environmental Protection Statistics</i> , Taipei, Taiwan.
TEPA, 2004b. <i>The Research on the Utilization of MSWI residues (II)</i> . EPA-93-U1H1-02-101, Taipei, Taiwan.

Taiwanin selvityksiä on tarkasteltu ja päivitetty myöhemmin (2006) ja todettu lentotuhkan osalta seuraavaa (Huang et al. 2006):

MSWI-lentotuhka tulee välikäsittellä [intermediate treatment process] ennen maantäyttökäyttöä, jotta materiaali täyttää TEPA:n ympäristövaatimukset. Näihin välikäsittelyihin kuuluvat seuraavat menetelmät:

1. kiinteytys [solidification]
2. stabilointi [stabilization]
3. sulatus [melting] ja/tai
4. muut TEPA:n hyväksymät menettelyt.

Käytännössä useimmilla laitoksilla lentotuhka stabiloidaan tai kiinteytetään ennen kuin se käytetään maantäyttöön [sanitary landfill]. Tilanne ei ole tyydyttävä vaarallisten aineiden liukenemisen kannalta. Vuonna 2000 on tutkittu ja ehdotettu lentotuhkan sulatusta ja tuotteen käyttöä tienpohjiin kiviainesta korvaavana materiaalina. Valitettavasti menetelmästä ei ole tehty perusteellista toteutettavuustutkimusta ja jotkin avainteknologian piirteet eivät ole kiinnostaneet teollisuutta. Ennen menetelmän käyttöönottoa on vielä useita ongelmia ratkaistamatta kuten korkeat käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä useat skaalausongelmat.

Kuonan osalle tehty skenaario sisältää viisi mahdollista käyttötapaa:

1. kiviainesta korvaava materiaali
2. asfaltin ainesosa
3. tiilen valmistuksen ainesosa
4. tien perustus
5. peitemateriaali maantäyttöalueilla.

Intiassa on tehty kirjallisuuteen pohjautuva katsaus MSWI tuhkien käytöstä vuonna 2010 (Siddique 2010). Selvityksen mukaan lentotuhkaa voidaan käyttää sementin valmistuksen raaka-aineena. Tuhkassa on 24–27 % kalkkia, joitain silikaatteja ja alumiinisilikaatteja (Mangialardi et al. 1999).

Lentotuhka sisältää sementille tyypillisiä mineraaleja ja sitä voidaan käyttää sementtiä korvaavana seosaineena betonissa. Hamernik ja Frantz (Hamernik & Frantz 1991a, Hamernik & Frantz 1991b) ovat raportoineet, että lentotuhka muistuttaa C-luokan pozzolaania ASTM:n mukaan määriteltynä ja näin ollen sitä on mahdollista käyttää sementtiä korvaavana aineena, vaikka tuhka ei täytä kaikkia standardin vaatimuksia.

Lentotuhkaa voidaan käyttää kiviaineksena prosessoimalla se pelleteiksi tai kevyeksi kiviainekseksi. Rebeiz ja Mielich (Rebeiz & Mielich 1995) mukaan tuhkaa voi käyttää polymeeribetonissa (polymer concrete (PC)). Ferreira et al. (2003) esittivät, että myös MSWI-lentotuhkaa voidaan käyttää erilaisissa rakennusmateriaaleissa. Käyttökohteina mainittiin tiilet, joiden osalta oli saatu lupaavia koetuloksia sekä mekaanisten ominaisuuksien että liukoisuuden osalta, sekä tuhkan sintraaminen yli 1300 °C lämpötilassa ja tuotteen edelleen käyttäminen tienpohjissa, pengerryksissä, hiekan korvaamiseen betonissa, monoliittisina kappaleina rannikoiden suojaukseen sekä muissa rakennusmateriaaleissa. Tiet oli nimetty yhdeksi käyttökohteeksi. Tässä lentotuhkaa käytettäisiin stabilointiin kalkin tai sementin sijaan. Vastaavia käyttötapoja on ehdottanut myös Ferreira et al. (2003).

4.2.5 MSWI-tuhkien käyttö betonissa

MSWI-tuhkien käytöstä betonissa on julkaistu kokeellista tutkimusta pääasiassa vuosina 2000–2010. Alla on referoitu alkuperäisiä artikkeleita, joita on käsitelty myös edellä esiteityissä kirjallisuuskatsauksissa. Alla olevaan on koottu numeerisia koetuloksia, jotka ovat kiinnostavia sideaineilla stabiloituja sullottuja maa-ainesrakenteita [stabilized rammend earth construction] ajatellen. Referointeihin on lisätty tämän katsauksen kirjoittajan omat kommentit menetelmien soveltuvuudesta betonikäyttöön Suomen oloissa.

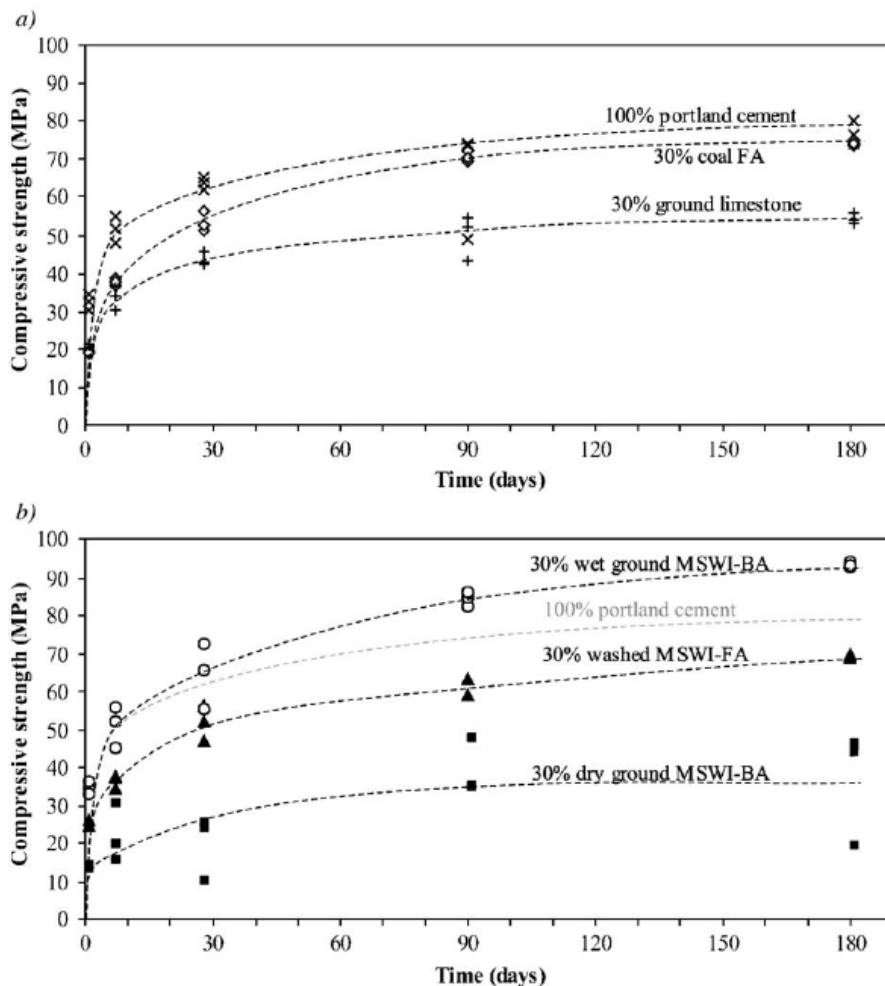
Kikiuchi et al. (2001) ovat tutkineet MSWI-tuhkan käyttöä sementin klinkkerin valmistuksen raaka-aineena lähinnä korvaamaan Al- ja Si-lähteitä. Kokeet tehtiin pilot-mittakaavassa (50 tn/vrk). Kokeissa onnistuttiin tuottamaan kolme erilaista sementtiä, joiden lujuudenkehitys vaihteli koostumuksen mukaisesti ja materiaali oli joko nopeampaa tai hitaampaa kuin portlandsementti. Kaikissa tapauksissa massat sitoutuivat liian nopeasti. Kokeita ei jatkettu sitoutumisen säätämiseksi. Tuhkan laatua ei artikkeleissa määritelty (lento/pohja), mutta alhainen sulfaattipitoisuus viittaa kuonaan. Tuhka sisälsi runsaasti klorideja ja artikkelissa on käsitelty kloridien sitomista kiinteäksi faasiksi. On tunnettua, että osa klorideista sitoutuu ns. Riedelin suolaksi $(\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl},\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O})$ aluminaattiyhdisteiden läsnä ollessa. Sementin valmistukseen liittyy runsaasti haasteita erityisesti liittyen sen tasalaatuisuuteen ja säilyvyysominaisuuksiin. Al- ja Si-lähteiden (saven) korvaaminen vaihtoehtoisella MSWI -tuhkalla sisältää riskejä, muttei tuo ympäristövaikutusten kannalta huomattavia etuja. Sementin valmistuksen ympäristövaikutukset muodostuvat pääasiassa muista lähteistä kuten polttoaineesta ja kalkkikiven hajoamisesta muodostuvasta hiilidioksidista. Näihin MSWI-tuhkan käyttö ei vaikuta merkittävästi.

Berg & Neal (1998) tutkivat MSWI kuonan käyttöä betonin kiviaineksena. Tulosten mukaan kuonan kulmikas partikkelimuoto ja hauraus heikensivät massan työstettävyyttä. Betoniteknikassa työstettävyysoongelma korjataan käytännössä lisäämällä sementin ja veden määrä massassa, jotka pääsääntöisesti huonontavat betonin laatua, lisäävät betonin ympäristövaikutuksia (CO_2 päästöjä) ja/tai nostavat hintaa. Myös Pera et al. (1997) tutkivat pohjankuonan käyttöä betonin kiviaineksena. Tuhkan sisältämä metallinen alumiini reagoi tuoreen betonin emäksissä oloissa tuottaen vetykaasua, joka vaurioittaa betonia. Tämän estämiseksi kuona esikäsiteltiin emäsluoksessa, joka muuttaa alumiinin vetykaasua tuottamattomaan muotoon. Betonikokeissa karkein kiviaines, jonka osuus kiviaineksesta oli 50 %, korvattiin osittain tai kokonaan käsitellyllä kuonalla. Molemmista tapauksista ja jokaisesta testausiässä (7, 28 ja 90 vrk) lujuus pieneni merkittävästi.

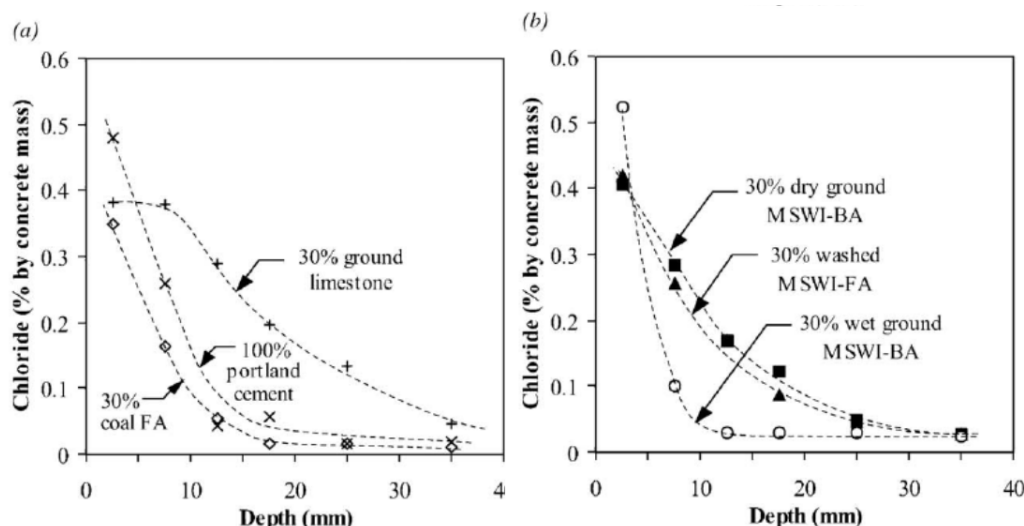
Mangialardi (2001) tutki sintratun lentotuhkan käyttöä kiviaineksena. Sintrattu lentotuhka ei soveltunut betonin kiviainekseksi, koska siitä liukenee betonille haitallisia klorideista ja sulfaatteja sekä tuotteen rakenne on lasimainen. Kun lentotuhka pestiin nelivaiheisessa proses-

sisä, tuotteen laatu parani niin, että sitä voitiin käyttää betoneissa, joiden lujuus on alle 15 MPa. Parhaat olosuhteet sintraukselle olivat 1140 °C sekä 28 MPa paine. Sintrausmenetelmä siihen liittyvine pesuvesien käsittelyineen muodostaa erittäin suuren kustannuserän verrattuna neitseellisten kiviainesten käyttöön.

Bertolini et al. (2004) tutkivat MSW-tuhkien käyttöä betonissa sementtiä korvaavana sideaineena (kuvat 5 ja 6). Kokeissa käytettiin pestyä lentotuhkaa, kuivana jauhettua kuonaa ja märkänä jauhettua välisäilytettyä (muutama vrk) kuonaa. Betonikokeissa sementistä korvattiin 30 % käsitellyillä tuhilla. Märkäjauhettu kuona oli hienojakoisempaa kuin kuivajauhettu kuona, joka oli likimain yhtä hienoa kuin sementti. Märkäjauhatuksen ja säilytyksen tarkoitus oli edistää metallisen alumiinin reagoimista ennen betonin valmistusta ja täten estää haitallisen vetykaasun muodostuminen kovettuvassa betonissa. Kaasun muodostumisen estämisessä onnistuttiinkin. Lujuudenkehityksen osalta märkä jauhettu pohjatuhka oli jopa hieman tehokkaampaa kuin sementti, mikä osoittaa voimakkaita hydraulisia ominaisuuksia. Kuivajauhettu kuona heikensi betonia jopa kalkkikivijauheeseen verrattuna vetykaasun muodostumiseen vuoksi. Pesty lentotuhka heikensi betonia noin 10 %. Kloriditunkeutumaprofiilit ja sähkönvastustulokset osoittivat, että märkäjauhettu kuona tiivisti materiaalin rakennetta ja täten paransi säilyvyyttä. Myös käsitelty lentotuhka ja kuivajauhettu kuona vähensivät kloridien tunkeutumista verrattuna referenssinä käytettyyn kalkkikivijauheeseen, mikä viittaa tiiviiseen rakenteeseen ja se puolestaan hydraulisiin reaktioihin. Tutkijoiden arvion mukaan märkäjauhettu kuona oli pestyä lentotuhkaa kiinnostavampi materiaali betonin sideaineena. Lentotuhkan käyttö edellyttää kustannuksia lisäävää monivaiheista pesuprosessia sekä pesuvesien käsittelyä.



Kuva 5. Betonien lujuudenkehitys. Ylemmässä kuvassa referenssibetonit ja alemmassa MSWI-betonit. (Bertolini et al. 2004)



Kuva 6. Kloridiprofiilit kuuden kuukauden kloridisykliä jälkeen (1 vrk upotus 3,5 % NaCl-liuokseen ja 2 vrk kuivatus). Vasemmalla kuvassa referenssibetonit ja oikealle MSWI-betonit (Bertolini et al. 2004).

Aubret et al. (2004) tutkivat ns. Revasol-prosessissa esikäsittellyn MSWI lentotuhkan [treated fly ash (TFA)] vaikutusta betonin huokosrakenteeseen, joka kontrolloi monia säilyvyysominaisuuksia. Esikäsittelyprosessi oli monivaiheinen ja siihen kuuluu liukenevan osan raskasmetallien ja dioksiinin käsittely. Tulosten mukaan betonin kaasunläpäisevyys, kapillaarihuokoisuus ja kokonaishuokoisuus eivät muuttuneet merkittävästi, kun sementtiä korvattiin 12 % esikäsittellyllä lentotuhkalla. Korvaussuhteella 50 % huokostilavuus kasvoi kapillaari- ja kokonaishuokoisuuden osalta lähes yhtä paljon kuin korvattaessa sementti hiekalla. Kaasunläpäisevyyden osalta korvaaminen hiekalla kasvatti arvon kaksinkertaiseksi verrattuna TFA-korvaamiseen. Samoista massoista tehdyt lujuuskokeet osoittivat, että lujuusvaikutus ei juuri poikkeaa hienon hiekan vaikutuksesta. Suurta korvaussuhdetta käytettäessä vaikutus oli hieman positiivisempi. Liukoisuuskokeissa tavoite oli arvioida tuotetun betonin saastuttamispotentiaali poikkeustilanteessa (satunnaisessa räjähdyksessä tai rakennetta purettaessa) sekä tuotetun kovettuneen sementtipastan aiheuttama retentiokapasiteetti (taulukko 5). Tuloksia verrattiin Ranskassa käytössä oleviin kuonan tierakennekäyttöä koskeviin vaatimuksiin. Tulosten mukaan betoni alitti vaatimukset selvästi. Betonirakenne, jossa oli käytetty käsiteltyä lentotuhkaa sitoi vaaralliset liukenevat aineet hyvin.

Taulukko 5. Revasol-prosessissa käsitellyn MSWI-lentotuhkan, TFA-tuhkan, kemiallinen koostumus.

Oksidipitoisuudet (%)		Pitoisuudet (mg/kg)			
CaO	25,23	Zn	24	Co	79
SiO ₂	20,67	Pb	8816	Mo	49
P ₂ O ₅	13,56	Sn	2883	Rb	34
SO ₃	11,60	Cr	2078	Bi	30
Al ₂ O ₃	10,01	Ni	1889	V	30
MgO	2,74	Cu	1714	Ce	30
Fe ₂ O ₃	2,73	Ba	1521	Ga	21
TiO ₂	1,73	Sb	1457	La	15
Na ₂ O	1,35	Cd	586	Nd	11
K ₂ O	1,35	Sr	399	Nb	11
MnO	0,2	W	227		
Vesipitoisuus	0,2	Zr	149		
Hehkutushäviö	6,5	As	120		

Aubert at al. (2006) on tutkinut MSWI:n käsitellyn lentouuhkan [treated fly ash (TFA)] käyttöä sementin seosaineena. Kemialliseen käsittelyyn kuului seuraavat vaiheet:

1. liukenevien yhdisteiden pesu
2. fosfatointi, jossa stabiloidaan raskasmetallit fosforihapon avulla
3. kalsinointi 600 °C:ssä orgaanisten yhdisteiden, erityisesti PCDD:n ja PCDF:n eliminoimiseksi

Ensimmäisestä vaiheesta tehtiin kaksi variaatiota;

- a) jossa pesu tehtiin vedellä (TFA-A)
- b) jossa pesu tehtiin natriumkarbonaattiliuoksella (TFA-B), jossa tavoitteina oli metallisen alumiinin reagointi ja sulfaattien poisto.

Tulosten mukaan molemmat tuhkat sisälsivät kalsiumaluminaattisilikaattia, joka reagoi voimakkaasti kalsiumhydroksidin kanssa tuottaen kalsiumaluminaattihydraattia. A-käsittelyn tuhka tuotti myös ettringiittiä. Tuhka, jolle oli tehty b käsittely, ei sisältänyt sulfaattia eikä metallista alumiinia. Se tuotti karboaluminaattia. B-käsittely johti myös lisääntyneeseen kromin, seleenin ja antimonin liukoisuuteen ja tuote ei sovellu maantäyttöön. A-käsiteltyä tuotetta voidaan käyttää maantäyttöön. Molempien tuhkien TFA-A ja TFA-B reaktiivisuutta sementin kanssa kuvattiin aktiivisuusindeksillä, jota verrattiin inertin jauheen ja kivihiilenpolton lentotuhkan (FA) indekseihin Aubert at al. (2007). Arvot vaihtelivat seuraavasti: TFA-B:n indeksi oli CEM I -tyypin sementin kanssa noin 90 % ollen korkeampi kuin FA:n. CEM III -tyypin sementin kanssa arvo oli sama kuin FA:n indeksivaatimus. TFA_A:n indeksi oli CEM I -tyypin sementin kanssa alhaisempi kuin inertin jauheen ja CEM III -tyypin sementin kanssa sama kuin inertin jauheen. Tuloksista pääteltiin että TFA-A:n tapauksessa metallisesta alumiinista johtuva paisuminen heikensi lujuutta, jota hydraulinen reaktion kuitenkin kompensoi CEM III:n tapauksessa.

Lin et al. (2003) ovat tutkineet MSWI-lentotuhkasta valmistetun 1400 °C lämpötilassa sintra-
tun, vesijähdytetyn kuonan toimintaa sementin seosaineena. Lentotuhkanäyte oli koottu syklonista ja jauhettu sintrauksen ja jäähdytyksen jälkeen sementin hienouteen (500 m²/kg).

XRD-analyysin tuloksen mukaan tuhka muuttui sintrauskäsittelyssä amorfisemmaksi. Näytteistä tehtiin sementillä sidotut laastinäytteet, joissa sementistä oli korvattu 10–40 % jauhe-
tulla sintratulla lentotuhkalla.

Korvaussuhdetta suurennettaessa massasta tuli työstettävämpää, sitoutumisnopeus hidastui ja puristuslujuus pieneni. Poikkeuksen muodosti 10 % korvaussuhde. 90 vrk iässä havaittiin 1–2 MPa suurempi lujuus kuin vertailukokeessa. Korvaussuhteen kasvaessa kokonais-, kapillaari- ja geelihuokosten tilavuusosuus suureni. Kuitenkin 60 vrk iässä 10 % korvaus ei suurentanut huokoisuutta, joten tuotteen voidaan olettaa reagoivan pozzolaanisesti. XRD-analyysin mukaan sementin korvaaminen ei vaikuttanut hydratoituneen tuotteen mineraalikoostumukseen. Näytteiden sisältämien myrkyllisten aineiden liukoisuutta tutkittiin eluutiomenetelmällä [toxic characteristics leaching procedure (TCLP)]. Alkuperäisen tuhkan raskasmetallien (Zn, Cr ja Cd) liukoisuudet olivat korkeat. Erityisesti Cd:n liukoisuus saavutti vaarallisen tason, 1,82 mg/l. Sintratuista tuhista valmistettujen laastinäytteiden liukoisuus oli kaikissa tapauksissa alle 10 % suurimmista sallituista liukoisuusvaatimuksista. Näytteet täyt-
tivätkin myös jätevesistandardin vaatimukset.

4.3 Sullomismenetelmällä valmistettu muurirakenne

4.3.1 Koostumuksen vaikutus lujuuteen

Ciancio et al. (2013) tutkivat sullomismenetelmällä [rammed earth (RE)] materiaaleissa käytettävien maalajien vaikutusta materiaalin ominaisuuksiin. Tavoite oli testata käytössä olevien koostumussuosittelujen luotettavuutta. Ciancio et al. (2013) ovat koonneet taulukossa 6 esitettyjä tietoja kahdesta Australiassa käytössä olevasta ohjeesta (Bulletin 5 ja HB 195) sekä Uudessa Seelannissa käytössä olevasta standardista NZS4298:1998. Taulukossa 6 on esi-

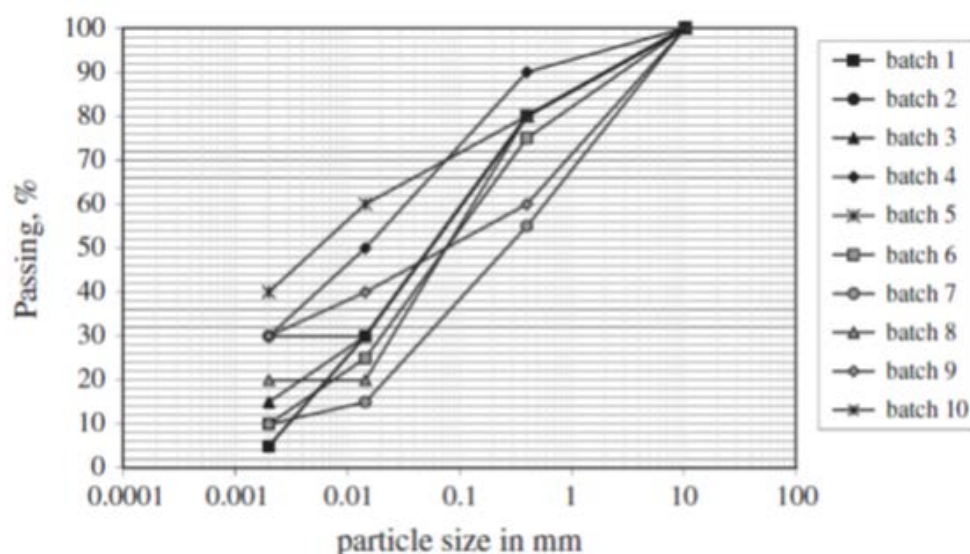
tetty eri suosituksia raaka-aineille ja valmiin materiaalin toimivuudelle. Koemassojen kuiva-aineskoostumukset sideainepitoisuuksineen on esitetty taulukossa 7. Vesimäärä on kullekin massalle ominainen optimaalinen kosteuspitoisuus [optimum water content (OWC)], jolla tarkoitetaan sitä vesimäärää, joka tuottaa vakioidussa tiivistyksessä suurimman kuiva-aineiden tiheyden [dry density]. Tiivistysmenetelmänä on käytetty modifioitua Proctor-testiä. RE-tekniologialle tyypilliseen tapaan veden määrää ei ole kuitenkaan ilmoitettu. Maa-ainesten rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 7. Koemassojen laatua karakterisoitiin geoteknisin kokein kuten kartiojuoksuraja [Liquid limit (LL)] ja plastisuusindeksi [Plasticity index (PI)]. Tulokset stabiloimattomille ja stabiloituille massoille on esitetty kuvassa 8. Stabiloitujen massojen tapauksessa lujuuden ja kuivien materiaalien tiheyden välillä oli korrelaatio, mutta stabiloimattomien kohdalla sitä ei ollut. Stabiloiduista massoista lujin (7) ja toiseksi lujin (10) edustivat partikkelikokojakaumaltaan ääripäitä. 10 oli hienojakoisin ja 7 karkein. Kirjoittajien mukaan raaka-aineita koskevia suosituksia tulisi käyttää materiaalin laatua kuvaavina arvioina, muttei sitovina sääntöinä. RE-materiaalien testien tulisi olla suoria toimivuustestejä ja toimivuusvaatimusten tulisi olla sidotut käyttökohteeseen.

Taulukko 6. Australiassa ja Uudessa Seelannissa käytössä olevien RE-menetelmien vaatimuksia. (Ciancio et al. 2007)

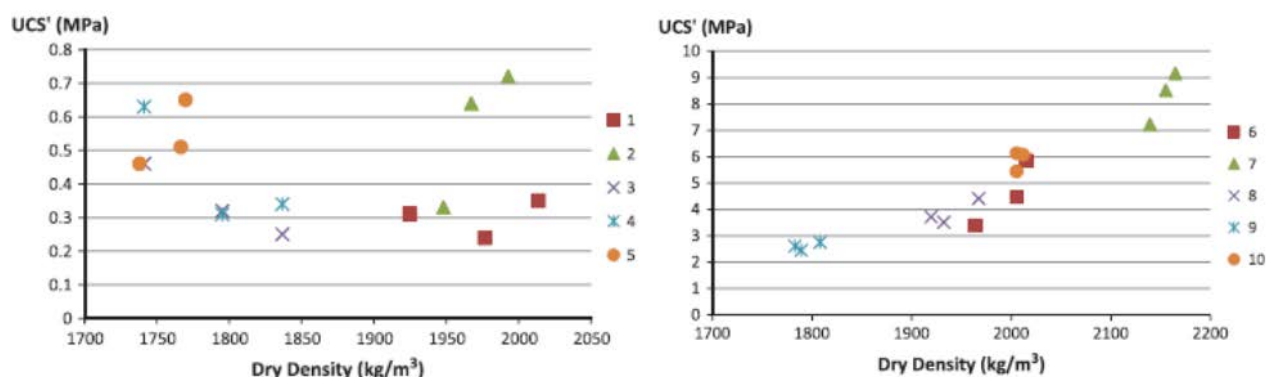
	Bulletin 5	HB 195	NZS4298:1998	Walker et al. 2005
<i>Materiaalin vaatimukset</i>				
Hiekka ja savi (% massasta)	–	45–75	–	45–80
Siltti (% massasta)	–	10–30	–	10–30
Savi (% massasta)	Suhteellisen matala pitoisuus	5–20	–	5–20
Sementti (% massasta)	–	4–12	–	4–12
Juoksevuusraja	–	<35–45	–	<45
Plastisuusindeksi	–	<10–30	–	<2–30
Lineaarinen kutistuma	–	–	–	<5
<i>Ominaisuusvaatimukset</i>				
Puristuslujuus (>MPa)	2	1	1.3	1
Taivutuslujuus (>MPa)	-	0.5	02.5	-
Kuivumiskutistuma (%)	–	–	<0.05	<0.5
Eroosioindeksi (mm/min)	<1	–	<2	–

Taulukko 7. Tutkimuksen koemassojen koostumukset. (Ciancio et al. 2013)

Stabiloimaton RE					Sementillä stabiloitu RE						
Näyte	% Savi	% Siltti	% Hiekka	% Sora	Näyte	% Savi	% Siltti	% Hiekka	% Sora	% Sementti	% Kalkki
1	5	25	50	20	6	10	15	50	25	5	0
2	30	0	50	20	7	10	5	40	45	4.5	0
3	15	15	50	20	8	20	0	60	20	4	1
4	30	20	40	10	9	30	10	20	40	4	2
5	40	20	20	20	10	5	25	50	20		



Kuva 7. Käytettyjen RE-massojen rakeisuuskäyrät. (Ciancio et al. 2013)



Kuva 8. Tutkittujen stabiloimattomien (RE) ja stabiloitujen (SRE) massojen puristuslujuudet. Vasemmalla stabiloimattomat ja oikealla stabiloitunut massat. (Ciancio et al. 2013)

4.4 Melumuuirakenteelta vaadittavat ominaisuudet

Sassali (2011) on käsitellyt kattavasti melusteiden laatuvaatimuksia diplomityössään seuraavasti:

- Sijainnin ja korkeuden asettavat vaatimukset
- Arkkitehtoniset vaatimukset
- Rakenteelliset vaatimukset
 - Tuulikuorma ja oma paino
 - Aurauslumikuorma
- Iskunkestävyys ja osien putoaminen
- Palonarkuus
- Materiaalit, päästöt ja hävittäminen
- Muut vaatimukset
- Akustiset vaatimukset
 - Akustiset ominaisuudet
 - Vaimennus
 - Eristävyys
 - Absorptio
 - Diffraktio

4.4.1 Vaadittavat ominaisuudet

Tässä projektissa esitetään meluuste tehtäväksi noin puoli metriä paksusta pystysuorasta muurirakenteesta. Sen akustisia ominaisuuksia ei ole testattu, mutta lähtökohtaisesti voidaan olettaa akustisten vaatimusten täyttyvän. Arkkitehtoniset ominaisuudet ovat lähtökohtaisesti hyvät, mutta onnistunut kokonaisuus edellyttää sijainnin huomioon ottavaa maisema-arkkitehtuuria sekä detaljien suunnittelua. Projektin alussa käydyissä haastatteluissa ja keskustelussa nousivat esiin materiaalin pinnan esteettinen säilyminen ja huoltaminen kuten puhdistaminen ja töherryksen poisto sekä pakkasenkestävyys. Aiheita on käsitelty alla materiaalin rakenteen yhteydessä sekä kokeellisessa osiossa. Materiaalin päästöihin ja hävittämiseen vaikuttaa valittu materiaalikombinaatio. Keskeisiä ovat materiaalien haitta-aineiden määrä ja laatu sekä toisaalta muodostuvien reaktiotuotteiden kyky sitoa haitta-aineita. Lisäksi muurin muoto, perustus ja sateelta suojaaminen vaikuttavat haitta-aineiden mahdollisuuksiin liueta ympäristöön. Materiaalikombinaatiot on suunniteltu siten, että koematriisissa on myös riskitön/erittäin vähäriskinen betonimurskeeseen ja lentotuhkaan perustuva vaihtoehto. Betonimurskeelle on olemassa muitakin käyttökohteita. Koska projektin tavoite oli löytää käyttöä jättemateriaaleille, koematriisiin on otettu mukaan myös muita materiaaleja.

Melumuurin rakenteelliset ominaisuudet riippuvat rakennesuunnittelusta ja rajataan työn ulkopuolelle. Alla muutamia huomioita aiheesta:

- Materiaali ei suojaa raudoitetta korroosiolta. Savipohjaisten RM-rakenteiden lujitteena käytetään perinteisesti olkea ja muita kasvikuittuja. Rakenteissa on käytetty myös oksia, tukkeja tai lautoja.
- Muurin altistus sateelle.
- Routaliikkeiden rajoittamiseksi rakenne vaatii perustuksen. Tarve riippuu maaperän laadun lisäksi rakenteen raudoituksesta.

4.4.2 Huokosrakenne

Sullottujen maa-ainesrakenteiden materiaalien tieteellinen tutkimus on suhteellisen vähäistä ja uutta. Lujuuden katsotaan muodostuvan mm. savipartikkeleiden välisestä koheesiosta, joka kasvaa suhteellisen kosteuden (RH) pienentyessä (Röhler & Zeiger 2011), kapillaarihuokosissa olevan veden jännityksestä aiheutuva imu [matrix suction], joka kasvaa RH:n pienentyessä sekä sideaineena käytetyn materiaalin (yleensä sementin) hydraulisesta reagoimisesta (Jaquin et al. 2009, Aquin & Augarde 2012). Jos RE-materiaalissa käytetään sideainetta, joka on yleensä kalkki tai portlandsementti puhutaan stabiloidusta RE-materiaalista [stabilized rammed earth (SRE)]. Imumekanismin merkitys materiaalin lujuudelle on esitetty vasta viime vuosina (Jaquin et al. 2009) ja imusta kehittyvän lujuuden on osoitettu olevan jopa 0,8 MPa.

Materiaalin suunnittelun lähtökohdan tulee olla sen huokosrakenteen suunnittelu. Huokosrakenne tuottaa materiaalille sen lujuuden ja säilyvyyden. Huokosrakenne vaikuttaa rakenteeseen seuraavilla tavoilla:

Huokosrakenne vaikuttaa rakenteen lujuuteen heti sullomisen jälkeen ennen kuin hydrauliset, sitovat reaktiot ovat lähteneet käyntiin. Mitä pienempiä ja kuivempia ilmatäytteiset huokokset ovat, sitä voimakkaampi on rakennetta koossa pitävä alipaine. Kuvassa 9 on esitetty lainalaisuuksia, jotka vaikuttavat materiaalin alipaineeseen.

Suomen oloissa on todennäköistä, että kokonaan ulkoilmaan rajoittuva rakenne on niin kostea, että yllä mainittu alipaine ei riitä rakenteen elinkaaren aikaisen lujuuden ylläpitämiseen. Näin ollen hydraulinen reaktio on välttämätön.

Vesitäytteiset huokokset jäätyvät ja altistavat rakenteen pakkasvaurioille. Vesitäytteisten huokosten tilavuusosuuden tulee olla mahdollisimman alhainen.

Tämä koskee erityisesti jatkuvia kapillaarihuokosia, jotka imevät vettä rakenteen sisään.

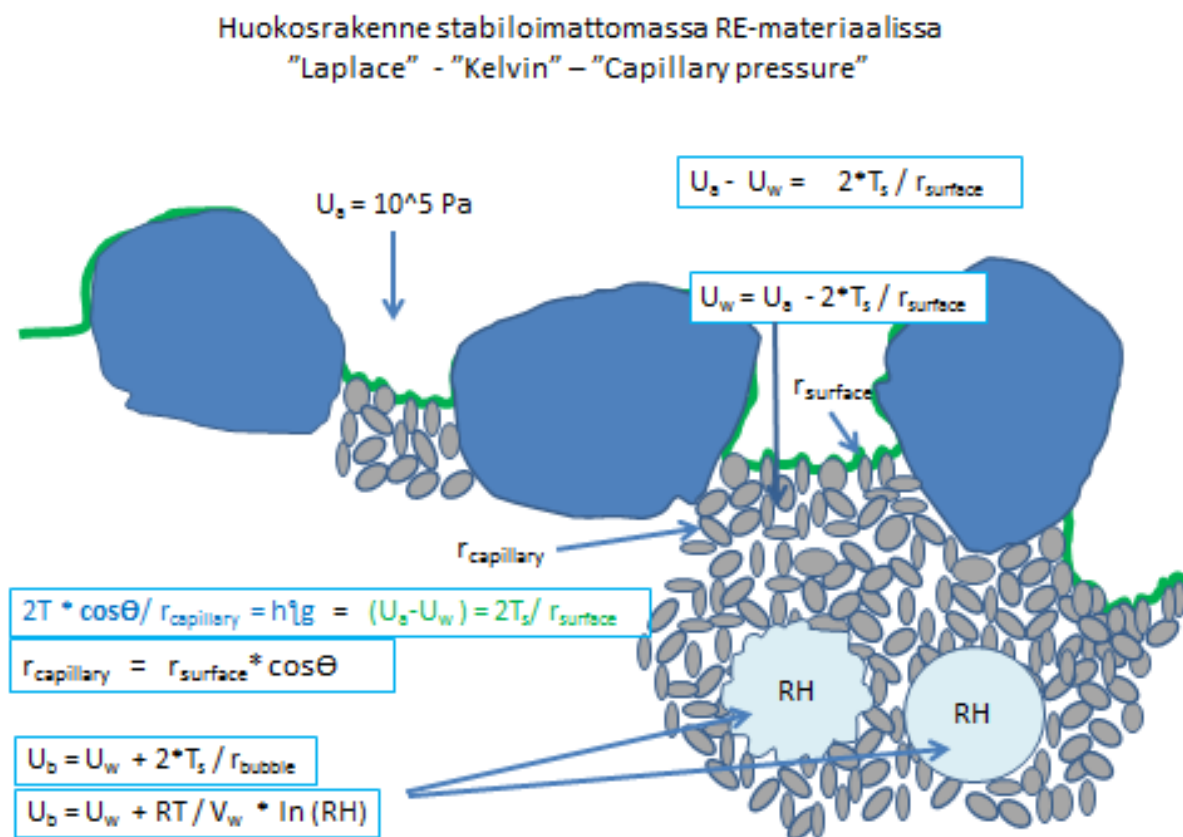
Huokosrakenteessa tulee olla runsaasti ilmatäytteisiä suojahuokosia pakkasenkestävyyden varmistamiseksi.

Jos massassa käytetään yhdyskuntajätteen kuonaa, on varauduttava siihen, että kuona sisältää metallista alumiinia, joka tuottaa emäksisissä olosuhteissa vetykaasua. Vetykaasu ei ole ympäristölleen vaarallinen, mutta se saattaa vaurioittaa rakennetta. Avoin jatkuva huokoisuus ja ilmatäyteinen huokosverkosto ovat tarpeen vedyn poistamiseksi kun massassa on yhdyskuntajätteen kuonaa.

Harvabetonityyppinen rakenne on mahdollinen.

Koska huokosten tulee olla sekä lujuuden että säilyvyyden kannalta mieluiten ilma- kuin vesitäytteisiä, sateelta suojaaminen ja kapillaarisen veden nousun estäminen ovat tarpeen.

Huokosrakenne vaikuttaa materiaalin lujuuteen useiden mekanismien kautta. Niistä stabiloimattoman massan ja huokoisuuden välisiä mekanismeja on esitetty kuvassa 9. Lujuuden ja stabiloidun massan huokoisuuden yhteyttä käsitellään seuraavassa kodassa 4.4.2.



Kuva 9. Semaattinen kuvaus stabiloimattomassa osittain kyllästyneessä maa-aineksessa vaikuttavista huokospaineista. Kuva esittää materiaalia, joka ei sisällä sideaineita. Laplace-yhtälö $U_a - U_w = \frac{2 \cdot T_s}{r_{\text{surface}}}$ kuvaa ilmanpaineen ja vedenpaineen erotuksen riippuvuutta pintajännityksestä ja rajapinnan kaarevuudesta. Erotus ilmoittaa veden "imun", joka on rakennetta koossapitävä. Kelvin-yhtälö $U_b - U_w = \frac{RT}{V_w} \cdot \ln(RH)$ ilmoittaa ilmakuplan ja veden paineen välisen erotuksen sekä huokosten ilman suhteellisen kosteuden välisen riippuvuuden. Mitä kuivempaa ilma on, sitä voimakkaampi on rakennetta koossa pitävä "imu". Yhtälö $\frac{2T_s \cdot \cos\Theta}{r_{\text{capillary}}} = h \cdot g = (U_a - U_w) = \frac{2T_s}{r_{\text{surface}}}$ ilmoittaa savipartikkeleiden väliin muodostuvien vesitäytteisten kapillaarien paineen riippuvuuden kapillaarin säteestä sekä veden ja saven välisen kontaktikulman suuruudesta. Lisäksi yhtälössä on esitetty yhteys Laplace-yhtälöön. Kuvan yhtälöiden merkinnät:

U_a = Ilmanpaine

r_{surface} = pinnan kaarevuuden säde

T = absoluuttinen lämpötila

RH = ilman suhteellinen kosteus

$r_{\text{capillary}}$ = kapillaarin säde

g = painovoiman kiihtyvyys.

U_w = vedenpaine

U_b = paine ilmakuplassa

V_w = vesimolekyylin tilavuus

Θ = kiinteän aineen ja veden välinen kontaktikulma

h = kapillaarin korkeus

ρ = veden tiheys

T_s = pintajännitys

R = kaasuvakio

4.4.3 Stabiloidun sullotun maa-aineksen ja betonin vertailu

Taulukossa 8. on verrattu betonin ja RE/SRE-materiaalien mekaanisia ominaisuuksia. Sementin lujittava vaikutus on merkittävä, mutta sen merkityksen ymmärtäminen on vasta alussa (Ciancio et al. 2013).

Taulukko 8. RE-materiaalin ja betonin mekaanisia ominaisuuksia. (Ciancio et al. 2013)

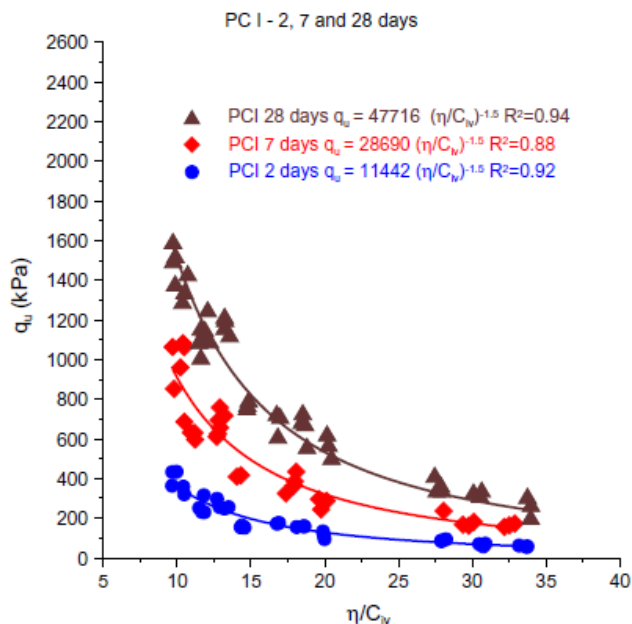
	Betoni	Lähde	RE/SRE-materiaali	Lähde
Puristuslujuus	20–60 MPa	Neville 1996	1–3 MPa	Röhlen & Zeigert 2011
			$1,9 \pm 0,2$ MPa	Bui et al. 2014
Kimmomoduuli	25–36 GPa	Neville 1996	0,45–3 GPa	Röhlen & Zeigert 2011
			500 ± 40 MPa	Bui et al. 2014
Tiheys	2600 kg/m ³		1800–2400 kg/m ³	Röhlen & Zeigert 2011
Muodonmuutoskyky	0,002	Neville 1996	0,01	Bui et al. 2014
			0,01–0,04 ¹⁾	Jaquin et al. 2009
Huokoisuus			25–45 %	Röhlen & Zeigert 2011
Poissonin vakio	0,15–0,22	Neville 1996	0,25–0,45	Röhlen & Zeigert 2011
			$0,22 \pm 0,01$	Bui et al. 2014

1) Arvo kosteuspitoisuuden mukaisesti.

Sementin reagoiminen ja lujittava vaikutus tunnetaan betonitekniikassa sekä teoreettisesti että laajan kokemuksen pohjalta hyvin ja siksi on yllättävää että SRE-materiaalin toimintaa ei ole rinnastettu betonin materiaalitekniiseen toimintaan. SRE-materiaalin lujuutta ei ole selitetty betonitekniikan käsittein.

SRE-materiaali mielletään yksifaasiseksi materiaaliksi ja sen lujuutta pyritään selittämään koko massan huokoisuuden avulla. Betoni ajatellaan kaksifaasiseksi materiaaliksi, jossa rakennetta koossa pitävän pastan laatu määrää betonin lujuuden. Betonin pastalla tarkoitetaan veden, sementin ja ilmahuokosten yhteenlaskettua tilavuutta ja sen huokostilavuudella tarkoitetaan ilmahuokosten ja hydrataatioreaktiosta jäljelle jääneen veden yhteenlaskettua tilavuutta. Betonin lujuutta kuvataan perinteisesti vesi/sementti-suhteen (w/c) ja pastan huokoisuuden avulla.

Viime vuosina on ilmestynyt muutamia SRE-materiaalien tutkimuksia, joissa on ilmoitettu koostumustietoja niin paljon, että yksinkertainen betonitekniinen analyysi on mahdollista tehdä (Consoli et al. 2013, Beckett & Ciancio 2014). Koetuloksia ei esitetty numeerisina, vaan pistejoukkoina ja niihin sovitettuina yhtälöinä. Analyysiin valittiin kuvassa 10 esitetty 28 vrk tuloksiin sovitettu yhtälö 1. (Consoli et al. 2013). Sementti oli tyypiltään CEMII. Kiviaines oli hienojakoinen mineraalikoostumukseltaan pääasiassa kvartsipitoinen hiekka, jonka D50 partikkelikoko oli 0,16 mm ja tiheys 2,63 kg/dm³. Sementin tiheys oli 3,12 kg/dm³. Hydrataatioon sitoutuneen veden määräksi oletettiin 30 % sementin painosta.



Kuva 10. Betonitekniiseen analyysiin valitut pistejoukot. Puristuslujuus on esitetty materiaalin kokonaishuokoisuuden ja sementin tilavuuden välisen suhteen funktiona 2, 7 ja 28 vuorokauden iässä.

28 vuorokauden näytejoukkoon sovitettu yhtälö: (Consoli et al. 2013)

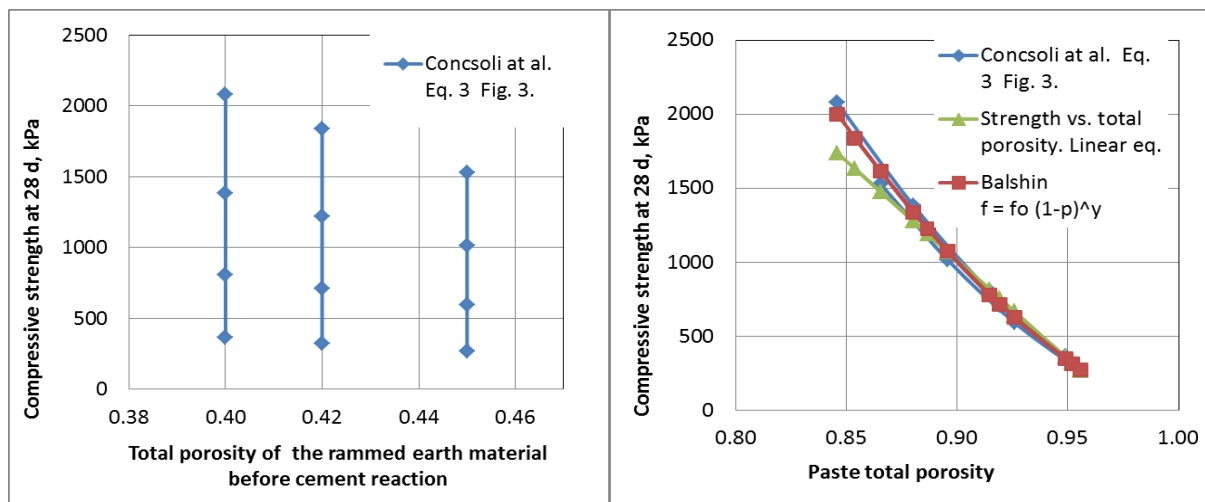
$$q_u \text{ (kPa)} = 47716.5 \left[\frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1.50} \quad (1)$$

Taulukko 9. SRE-massojen koostumus laskettuna tutkimuksessa annettujen tietojen pohjalta.

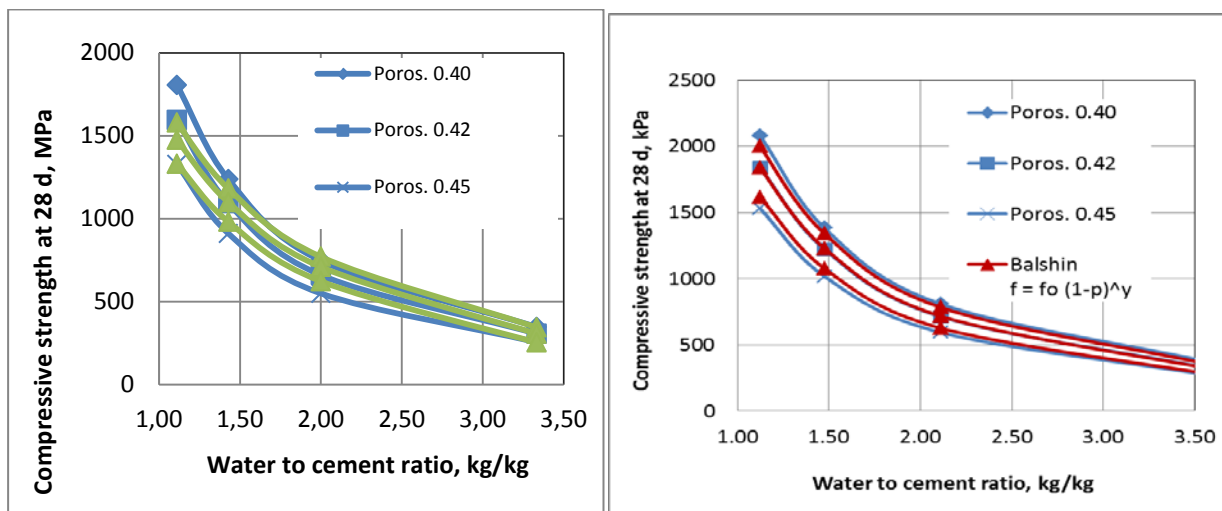
Kokonaishuokoisuus ennen reaktiota (vesi + ilma)	Sementtipitoisuus 3, 5, 7, 9 paino-% kuiva-aineiden määrästä	Kokonaisvesipitoisuus 10 % näytteen painosta	Kokonaishuokoisuus reaktion jälkeen. (vesi + ilma)	28 vrk koetuloksiin sovitettu lujuus
litra/litra	kg/litra	kg/litra	litra/litra	kPa
0,40	0,05	0,18	0,95	370
0,40	0,08	0,18	0,91	810
0,40	0,12	0,18	0,88	1380
0,40	0,16	0,18	0,85	2080
0,42	0,05	0,17	0,95	320
0,42	0,08	0,17	0,92	710
0,42	0,11	0,17	0,89	1220
0,42	0,15	0,17	0,85	1840
0,45	0,04	0,16	0,96	270
0,45	0,08	0,16	0,93	590
0,45	0,11	0,16	0,90	1020
0,45	0,14	0,16	0,87	1530

Kuvassa 11 on rinnastettu SRE-materiaalin kokonaishuokoisuus, joka on ilma- ja vesihuokosten yhteenlaskettu tilavuusosuus ennen sementin reaktiota, puristuslujuuteen. Kokonais-

huokoisuus pienentää materiaalin lujuutta hiukan. Se ei kuitenkaan ole koesarjassa määräävä tekijä. Sen sijaan lujuus on rinnastettu pastan kokonaishuokoisuuteen. Tässä huokostilavuus on ilmahuokosten ja sementin reaktiosta jäljelle jääneen veden yhteen laskettu tilavuusosuus. On ilmeistä, että pastan huokoisuus on lujuuden kannalta määräävä tekijä kuten betoniteknikassakin. Sekä lineaarinen sovitus että Bakshin-yhtälö kuvaavat tuloksia erittäin hyvin. Kuvassa 12 on esitetty lujuus vesi-sementtisuhteen funktiona. Riippuvuus muistuttaa muodoltaan betoniteknikassa hyvin tunnettua riippuvuutta. Vesi/sementti -suhde välillä 1–3 on lujuuden kannalta määräävä tekijä. Massojen kokonaishuokoisuus, joka koostuu ilma- ja vesitäytteistä huokosista ennen hydrataatioreaktiota välillä 0,40–0,45 vaikuttaa lujuuteen selvästi vähemmän. Analyysin pohjalta voidaan päätellä, että koesarjan stabiloitujen RE-materiaalien lujuus noudattaa betoniteknikasta tuttuja lainalaisuuksia erittäin tarkasti ja tietoa voidaan käyttää massojen suunnitteluun. Tästä myös seuraa, että sementtiä korvaavien materiaalien välillä tulee tapahtua hydraulisia reaktioita, jotta saavutetaan taulukossa 8 esitetty 1–3 MPa lujuus.



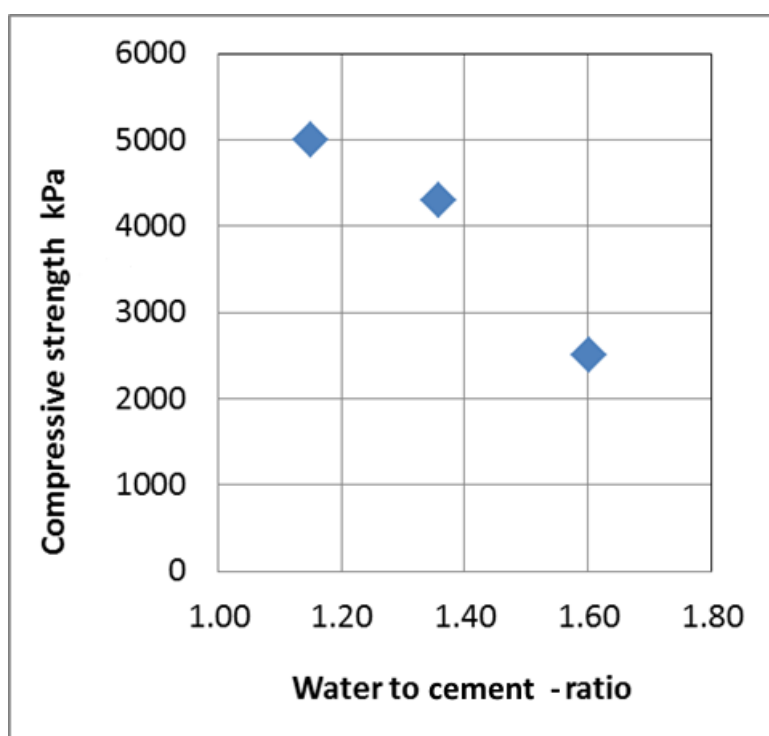
Kuva 11. Vasemmalla: Sementillä stabiloidun SRE-materiaalin alkuperäisen kokonais-huokoisuuden (ilma- ja vesihuokosten yhteenlaskettu tilavuusosuus ennen sementin reaktiota) vaikutus 28 vrk puristuslujuuteen. Oikealla: Lineaarinen yhtälö on sovitus, jossa lujuus = $13056 - 13379 \times \text{pastan kokonaishuokoisuus}$. Bakshin-yhtälö on sovitus, jossa lujuus = $38537 \times (1 - \text{pastan kokonaishuokoisuus})^{1,58}$. Edellisen $R^2 = 0,982$ ja jälkimmäisen $R^2 = 0,995$.



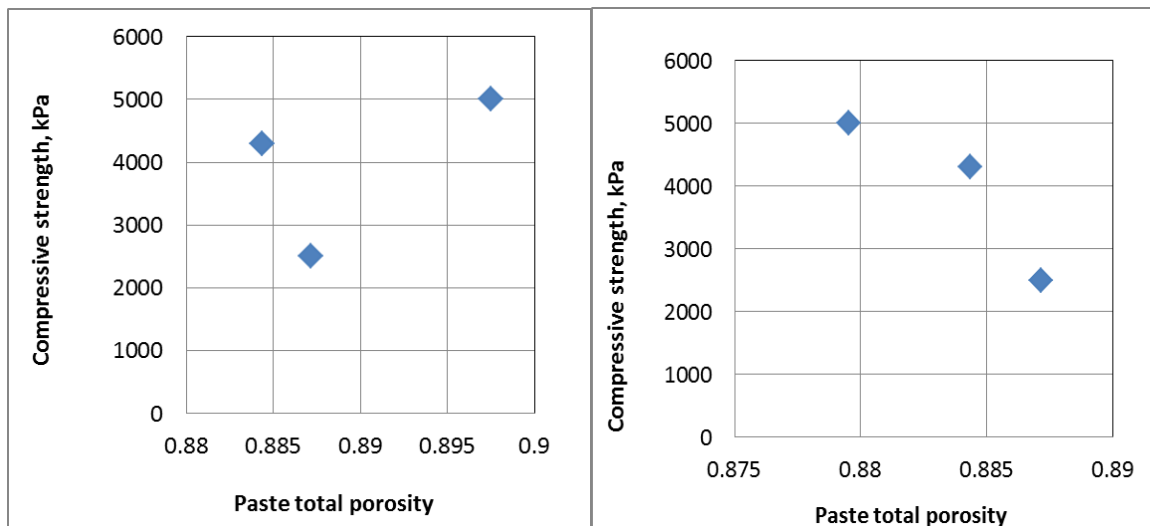
Kuva 12. Lujuus vesi/sementtisuhteen funktiona rinnastettuna lineaariseen (vasemmalla) ja Bakshin-yhtälöön (oikealla).

Beckett et al. (2014) selvitti massan vesipitoisuuden vaikutusta lujuuteen, kun sementin pitoisuus on vakio (5 %). Kiviaines oli murskattu kalkkikivi, jossa oli alle 0,1 mm partikkeleita noin 3 % ja alle 1 mm partikkeleita noin 75 %. Seuraavassa on käsitelty 28 vrk tulokset. Vesi-sementtisuhte vaikuttaa lujuuteen kuvan 13. mukaisesti, mutta pastan huokoisuus ei näyttäisi vaikuttavan lujuuteen (kuva 14). Tehdyissä kokeissa oli määritetty hydrataatioon kulu-
neen veden määrä, mutta tuloksissa oli epä johdonmukaisuutta. Tulosten mukaan yhdessä koesarjassa hydrataatioaste jäi 28 vrk iässä selvästi muita alhaisemmaksi. Koejärjestelyjen pohjalta tähän ei ollut syytä. Kun hydrataatioaste korjattiin samalle tasolle muiden tulosten kanssa, lujuuden ja pastan huokoisuuden välinen yhteys oli kuvan 14 (oikeanpuoleinen kuva) mukainen. Kuvissa (kuva 14) esitetyn huokostilavuuden laskennassa käytettiin oletusta, että kiinteiden aineiden keskimääräinen tiheys oli $2,63 \text{ kg/dm}^3$. Arvon varioiminen välillä 2,5–2,8 kg/dm^3 ei vaikuttanut merkittävästi kuvissa esitetyn riippuvuuden muotoon.

Beckett et al. (2014) tutkimuksessa oli myös vertailtu partikkeleiden kiinnittymistä toisiinsa elektronimikroskoopilla [scanning electron microscope (SEM)]. Pääteltiin, että kuivahko ja jäykähkö massa on tuottanut rakenteen, jolle oli tyypillistä partikkeleiden väliset ”sementtiset sillat” sekä partikkeleiden väliset huokokset, joiden halkaisija oli noin 200 μm . Kun vesimäärä kasvatettiin, siltarakenne hävisi ja suuremmat partikkelit olivat kauttaaltaan pienistä partikkeleista koostuvan matriisin ympäröimiä. Kirjoittajat pitivät jälkimmäistä rakennetta huonompana ja syynä alhaisempaan lujuuteen. Tutkimuksessa on saavutettu selvästi korkeampi lujuustaso suhteessa vesi-sementtisuhteeseen kuin edellä käsitellyssä (Consoli et al. 2013). Ero ei selity kokonaishuokoisuudella. On ilmeistä, että myös muut tekijät vaikuttavat tulokseen. Näitä voivat olla hiekan partikkelikokojakauma ja tiivistystapa, jotka määräävät hiekkapartikkeleiden välisten keskimääräisen etäisyyden sekä niiden välisten kontaktipisteiden lukumäärän.



Kuva 13. Vesisementtisuhteen vaikutus 28 vrk puristuslujuuteen. Lähtötiedot Beckett et al. (2014) ja Beckett & Ciancio (2014)



Kuva 14. Materiaalin pastaosuuden huokoisuuden vaikutus 28 vrk puristuslujuuteen. Lähtötiedot Beckett at al. (2014) ja Beckett & Ciancio (2014)

4.5 Kirjallisuuskatsauksen johtopäätökset

Kirjallisuuskatsaukseen perustuen MSWI-tuhkien kemiallinen koostumus muistuttaa betonin valmistuksessa seosaineena käytettävän kivihiilenpolton lentotuhkan sekä masuunikuonan koostumusta.

Tuhkien käsittelyssä liukenevien komponenttien stabilointi on välttämätöntä. Kuonasta liukenee vähemmän ympäristön kannalta haitallisia komponentteja, mutta silti sen liukenevien komponenttien käsittely stabiloimalla tai kuonan jatkokäyttö tavoilla, jotka sitovat ne, on välttämätöntä. Käsiteltyä kuonaa voidaan käyttää maantäyttöön ja tierakenteisiin. Lentotuhkan kannalta ongelmaksi nousevat liukenevat sulfaatit ja kloridit sekä raskasmetallit (Zn, Cr ja Cd). Tuhka joudutaan stabiloimaan ja varastoimaan. Tilanne ei ole tyydyttävä. Lentotuhkan sulattamista lasimaiseksi materiaaliksi, joka sitoisi liukenevat komponentit, on harkittu. Menetelmä on kallis eikä sitä ole otettu käyttöön.

Betonisovelluksista on tutkittu MSWI-tuhkan käyttöä sementin valmistuksen raaka-aineena, sementin seosaineena ja kiviaineksena. Teollisen betonin valmistuksen kannalta tuhista saatavat tuotteet ovat monella tavalla ongelmallisia. Betonin kannalta haasteellisia piirteitä ovat liukenevien kloridien ja sulfaattien sekä joidenkin raskasmetallien korkea pitoisuus ja alkali (Na ja K) korkea pitoisuus sekä lisäksi kuonan sisältämät metalliset alumiinipartikkelit, kuonapartikkeleiden kulmikas muoto ja alhainen lujuus. Edellä mainittujen piirteiden vaikutusmekanismeja on käsitelty katsauksessa lähemmin. Ympäristön kannalta haasteellisia piirteitä ovat liukenevat kloridit, sulfaatit ja raskasmetallit.

Tuhkien hyötykäyttäjää on myös jätteen loppusijoittaja, mistä seuraa lakisääteisiä vastuita. Maailman tiheästi asuttuihin alueisiin verrattuna Suomen erityispiirteet kuten pienestä populaatiosta ja lyhyestä jätteenpolton historiasta johtuva pieni tuhkien määrä, maa-alueiden suuri pinta-ala sekä hyvä kiviaineksen saatavuus vähentävät kiinnostusta tuhkien hyötykäyttöön tapauksissa, joissa tuhkillä korvataan kiviainesta. Suomen oloissa tuhkien käytön on mahdollista nousta taloudellisesti kiinnostavaksi, jos tuhkien jalostusastetta pystytään nostamaan riittävästi hyödyntämällä niiden hydraulisia ominaisuuksia. Näillä tarkoitetaan niiden taipumusta reagoida kemiallisesti veden kanssa tuottaen materiaaliin mekaanista lujuutta. Tuhkillä on hydraulisia ominaisuuksia, mutta reaktiot ovat hitaita perinteisiä betonitekniisiä sovelluksia ajatellen. Lisäksi sekä jätteenpolton lentotuhkaa että kuonaa tulee prosessoida ennen betonitekniistä käyttöä. Yleisesti ottaen poltettavan jätteen laatu ja polttotekniikka vaikuttaa kuonien ominaisuuksiin ja laatuun.

Pitkästä historiastaan huolimatta RE- materiaalitekniikka on vasta kehitysvaiheessa eikä yhtymäkohtia betonin materiaalitekniikkaan ole selvitetty, vaikka koostumussuosituksiin ja tutkimuksissa esiintyviin koostumuksiin kuuluu noin 5 paino-%:n sementtipitoisuus. Sementin vaikutus lujuuteen on huomattava. Ilman sementtistabilointia materiaalin puristuslujuus on alle 1 MPa ja sementillä stabiloituna 2–10 MPa (Ciancio et al. 2013).

Kirjallisuusselvityksen pohjalta kiinnostavaksi materiaaliksi osoittautui yhdyskuntajätteen-polton kuona. Sementin hienouteen jauhetun kuonan on havaittu olevan lähes sementin veroinen sideaine, kun sillä on korvattu sementtiä 30 % edellyttäen, että sen sisältämän metallisen alumiinin aiheuttama vedynmuodostus kovettuneessa materiaalissa estetään. Kokeissa tämä oli tehty aktivoimalla alumiini reagoiminen jo ennen massan valmistusta jauhamalla näyte vedessä ja säilyttämällä sitä vedessä vuorokausi. Tässä projektissa kuona käytetään karkeana. Tavoite on, että mahdollinen vety purkautuu rakenteesta sitä rikkomatta tai hitaasti reagoivat sitovat osa-aineet korjaavat rakenteen. RE-materiaali poikkeaa perinteisestä betonista tavoilla, jotka saattavat mahdollistaa tuhkien käytön. RE-materiaalin puristuslujuus on vain 5–10 % betoniin verrattuna, muodonmuutoskyky on noin 10-kertainen. Sen tiheys on vain noin 2000 kg/m³ verrattuna betonin tiheyteen, joka on noin 2600 kg/m³. Betoniin verrattuna RE-materiaali on erittäin huokoista. Sen kokonaishuokoisuus on 20–30 %. Suuresta veden ja alhaisesta sideaineen määrästä johtuen kapillaarihuokoisuus on suuri.

Edellä mainitut piirteet tekevät RE-materiaalista joustavamman ja parantavat sen kykyä kestää muodonmuutoksia ja läpäistä esimerkiksi kaasuja. Huokosten määrään ja laatuun tulee vaikuttaa valmistusprosessin avulla niin, että saavutetaan

- o riittävän avoin huokoisuus kaasunläpäisevyyden kannalta,
- o riittävä suojahuokosten määrä pakkasenkestävyyden kannalta,
- o riittävän alhainen kapillaarihuokosten määrä lujuuden ja pakkasenkestävyyden kannalta.

Valmiin muurirakenteen ympäristövaikutukset tulee minimoida luopumalla materiaalin stabiloinnista sementillä tai ainakin sementtipitoisuuden tulisi alittaa selvästi käytössä oleva 5 paino-%, mikä vastaa noin 100 kg sementtiä/m³.

5. Materiaalivalinnat kokeisiin

Hydraulisesti reagoivat aineet nostavat materiaalin lujuutta. Perinteinen tapa tuottaa lujuus ns. stabiloiduissa maa-ainesrakenteissa on portlandsementin käyttö. Tyypillinen annostus on 5 paino-% kuiva-aineista. Kun materiaalin tiheys on noin 2000 kg/m³, on sementin määrä 100 kg/m³. Jos valmistettava muurin paksuus on 0,5 m, sementin kulutus on 50 kg/m² muuripintaa. Tämä on suhteellisen suuri määrä sementtiä tuotettua pinta-alaa kohden. Jos muurin sijaan käytettäisiin 10 cm paksua betoniseinää ja betonin sementin kulutus olisi sama 50 kg/m², betonimassan sementtipitoisuus olisi 500 kg/m³, mikä vastaa ns. rikasta runsas-sementtistä betonia. Jos maa-ainesrakenteilla tavoitellaan sementin käytön vähentämistä ympäristövaikutussyistä, sementin käytöstä tulisi luopua kokonaan tai rajoittaa se murtoosaan 5 % tasosta. Tässä projektissa etsitään keinoja jättemateriaalien reagoimisen tehostamiseksi ja materiaalivalinnat on tehty tätä tavoitetta silmälläpitäen.

5.1 Materiaalien valintaan vaikuttavat tekijät

Osa-aineiden kemiallinen koostumus ja partikkelikoko vaikuttavat materiaaliin seuraavilla tavoilla:

Hydraulisten reaktioiden kannalta keskeinen ongelma on pozzolaanisten (runsaasti amorfista piitä ja/tai amorfisia piiyhdisteitä) sisältävien materiaalien hidas tai lähes olematon reaktionopeus. Reagoidakseen ne tarvitsevat kalsiumhydrioksidiä ja reaktioita nopeuttamiseksi tarvitaan emäksinen liuospäristö.

Sulfaatit muodostavat ettringiittiä, joka muuttuu sulfaattipitoisuuden madaltuessa monosulfaatiksi. Jos sulfaattipitoisuus nousee uudestaan kovettuneessa rakenteessa, monosulfaatti muodostaa uudestaan ettringiittiä. Tähän liittyvä kiteiden kasvu voi rikkoa rakennetta.

Suuri ominaispinta-ala edistää reaktioita, joten hienojakoiset pölymäiset tai huokoiset aineet ovat reaktioiden kannalta tärkeimmät. Hienojakoiset materiaalit muodostavat tilavuusyksikköä kohti suuren määrän rakennetta lujittavia partikkeleiden välisiä kontaktipisteitä. Hienojakoisten materiaalien määrä tulee kuitenkin rajoittaa tavoiteltavan avoimen huokosrakenteen takia. Koska tavoitteena on erikokoisia ilmahuokosia ja ilmataskuja sisältävä materiaali, seoksen tulee sisältää hienojakoisia materiaaleja selvästi vähemmän kuin perinteiset betonituotteet, joissa tavoitteena on partikkeleiden mahdollisimman tiivis pakkautuminen.

Massan ei tule olla valettavaa, vaan ns. maakostea. Veden osuus massassa tulee rajoittaa, koska vesipitoisuus alentaa lujuutta ja lisää säilyvyyden kannalta haitallisten kapillaarihuokosten tilavuusosuutta. Vettä tulee kuitenkin olla riittävästi massan tiivistymisen varmistamiseksi. Tässä yhteydessä tiivistymisellä tarkoitetaan partikkelien välisten kontaktien muodostumista materiaalia sullottaessa.

Tavoitteena on materiaalin rakenne, jossa hienojakoisten aineiden ja veden muodostama seos muodostavat siltoja suurien partikkeleiden välille. Silloittavassa materiaalissa veden määrän suhde hienojakoisten aineiden määrään (vesi-sideainesuhde) on mahdollisimman pieni. Suurten partikkeleiden välillä on ilmatäytteisiä huokosia, joiden halkaisija on riittävän suuri estääkseen kapillaarisen veden imun (kuva 9).

Vaikka hydraulisesti sidottu muuri on kiinnostava tapa vaarallisten aineiden kemialliseen sitomiseen, tulee muurirakenteen olla ympäristön kannalta turvallinen. Materiaalien ympäristölle vaarallisten aineiden tulee sitoutua materiaalin. Sitoutuminen tapahtuu hydraulisesti reagoivien aineiden reaktiotuotteiden kalsiumsilikaattihydraatin ja kalsiumaluminaattihydraatin kiderakenteeseen samoin kuin sementillä stabiloitaessa.

5.2 Valitut materiaalit

Kokeisiin valittiin seuraavat materiaalit (taulukko 11):

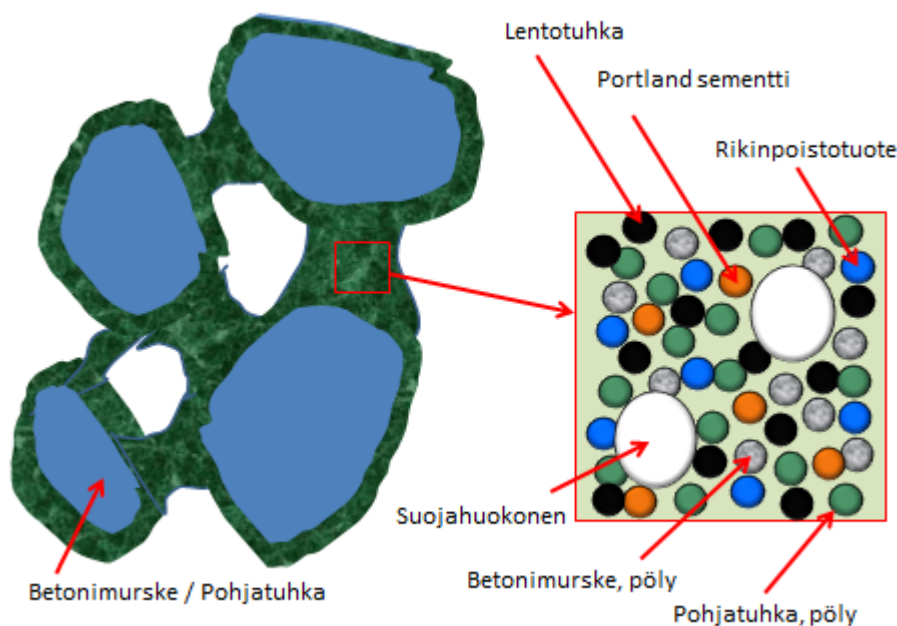
Vantaan yhdyskuntajätteen polttolaitoksen kuona

Betonimurske

Kivihiihlenpolton lentotuhka Hanasaaren voimalaitoksesta

Kivihiihlenpolton rikinpoistotuote Hanasaaren voimalaitoksesta

Näistä kuona ja betonimurske muodostavat karkean fraktion. Edellisten pölymäinen aines sekä lentotuhka muodostavat hienoaineksien (kuva 15). Näillä tavoitellaan rakennetta, jossa sideaine muodostuu kalsium-silikaattihydraatista ja kalsium-aluminaattihydraatista. Rikinpoistotuotetta käytetään edellisten lisänä, kun tavoitellaan lisäksi neulasmaisen ettringiitin muodostumista sekä halutaan hyödyntää sen sisältämä kalsiumoksidi. Materiaalin tavoiteltu rakenne on esitetty kuvassa 15. Massan sekoitusvaiheessa suurimmat rakeet pinnoittuvat hienojakoisella materiaalilla. Nämä kiinnittyvät toisiinsa valumuotissa tiivistysvaiheessa.



Kuva 15. Materiaalin tavoiterakenne ennen reagoimista. Suuret partikkelit ovat hienoainespartikkelien pinnoittamia. Hienoaines muodostaa siltoja suurten partikkeleiden välille. Hienoainesfaasi koostuu lentotuhkasta, yhdyskuntajätteen kuonasta, betonimurskeen pölymäisestä fraktiosta, vedestä ja ilmatäytteisistä suojahuukosista. Veden määrän tulee olla mahdollisimman alhainen. Suurista partikkeleista sekä betonimurske että kuona ovat lievästi hydraulisesti reagoivia.

Taulukko 11. Materiaalivalinnat kokeisiin.

Materiaali	Lisätiedot
Vantaan yhdyskuntajätteen polttolaitoksen kuona	Fraktiot: 0–2 mm,* 2–5 mm, 5–12 mm, 12–50 mm
Kivihiilenpolton lentotuhka Kivihiilenpolton rikinpoistotuote	
Betonimurske Betonoc BEM 1	Fraktio 0–45 mm

*0–2 mm tuote kovettuu itsestään veden kanssa.

5.3 Valittujen materiaalien kemiallinen koostumus ja hydrauliset reaktiot

Materiaalivalintoihin ovat vaikuttaneet sekä kemiallinen koostumus, partikkelikoko että saataavuus.

Kivihiilen polton lentotuhka on betoniteknikassa hyvin tunnettu potsolaaninen materiaali. Sen reaktio vaatii kalsiumhydroksidia tuottaakseen kalsium-silikaatihydraattia. Rikinpoistotuotteessa on jäljellä kalsiumhydroksidia. Korkea pH edistää reaktion käynnistymistä.

Rikinpoistotuotteessa on sulfaatteja, jotka muodostavat seoksessa ettringiittiä, joka on neulamainen materiaali. Reaktio on nopea ja tuote sitoo rakennetta.

Ongelma voi olla kovettuneessa rakenteessa tapahtuvan ettringiitin kidekasvusta johtuva paisuminen. Tämä ei tapahdu kaikissa betonimassoissa. Potsolaanien läsnä olo rajoittaa paisumista ja niitä käytetään betoniteknikassa sulfaatinkestävyyden varmistamiseksi. Tavoitteena on suunnitella materiaali, joka sisältämät potsolaanit edistävät sulfaatinkestävyyttä.

Keskeinen syy yhdyskuntajätteen kuonan valintaan oli sen alhainen hyödynnettävyys ja odotettavissa oleva suuret tuotantomäärät yhdyskunta-jätteen polton yleistyessä. Tulevaisuudessa sen käytön kehittämiseksi on tarvetta. Tällä hetkellä kuona käsitellään jätteenpolttolaitoksella. Metallit poistetaan. Käsitelty kuona jaetaan neljään kokofraktioon, 0–2 mm, 2–5 mm, 5–12 mm ja 12–50 mm. Kuonasta liukenee klorideja hieman enemmän kuin MARA-asetuksen liukoisuutta koskevat vaatimukset sallivat, minkä takia sen hyödyntäminen on toistaiseksi hyvin rajallista. Kuonan kemiallinen koostumus muistuttaa masuunikuonaa, jota käytetään perinteisesti hyvin reagoivana sementin ainesosana (taulukko 12). Tällöin kuitenkin masuunikuonan tulee olla vesijäähdytettyä nopeassa jäähtymisessä saavutettavan amorfisen rakenteen vuoksi. Amorfinen rakenne on yksi reaktiivisuuden edellytys. On mahdollista, että jokin osa jätteen polton kuonasta, erityisesti pienten partikkeleiden pinnoilla, on jäähtynyt nopeasti muodostaakseen amorfisen rakenteen, joka mahdollistaa hydraulisen reaktion. Näin partikkeleiden välille voi muodostua sidoksia. Alkalipitoisuudet ovat riittävän korkeat latenttien materiaalien aktivoimiseen edellyttäen, että ne liukenevat veteen. Korkea pH viittaa siihen, että näin tapahtuu. Jauhetun kuonan on havaittu olevan lähes sementin veroinen sideaine edellyttäen, että sen sisältämän metallisen alumiinin aiheuttama vedynmuodostus estetään. Reaktiivisuus on prosessikohtainen, joten kirjallisuudesta (Bertolini et al. 2004) saatuja tuloksia ei voida suoraan rinnastaa suomalaisten laitosten tuhkiin.

Suomessa yhdyskuntajätteen polton lentotuhka stabiloidaan sementillä seoksella, jossa on kuiva-aineita paino-osuuksina 75 % lentotuhkaa ja 25 % sementtiä. Vettä lisätään 25 % kuiva-aineiden painosta. Tuore massa lämpeene sekoituksen jälkeen tunneissa, mikä viittaa siihen, että tuhka osallistuu reaktioihin. Kovettuneen massan kloridien liukoisuus kovettuneesta massasta ylittää vaarallisen jätteen raja-arvot. Kloridien liukenevuutta ajan funktiona ei tutkittu. Kovettunut massa varastoidaan omalla laitoksella. Materiaali jätettiin pois liukenevien kloridien aiheuttaman ympäristöriskin takia.

Betonimurske on valmistettu betonia murskaamalla, joten se sisältää kiviainesta ja kovettunutta sementtipastaa. Näistä sementtipasta on mekaanisesti heikompi, joten se jauhautuu hienojakoisemmaksi pölyksi. Kemiallisesti se sisältää samoja aineita kuin sementti, mutta veden kanssa reagoineessa muodossa. Pääsialliset reaktiotuotteet ovat kalsiumsilikaattihydraatti ja kalsiumhydroksidi, josta suurin osa on reagoinut kalsiumkarbonaatiksi. Lisäksi murskeessa on sulfaatin reaktiotuotteet, monosulfaatti ja ettringiitti. Murskeessa on reagoimaton sementtiä, joka reagoi edelleen kuten sementti. Koostumus vaihtelee raaka-ainelähteen mukaisesti. Muurimateriaalin kannalta kiinnostavat piirteet ovat reagoimaton sementti ja kalsiumhydroksidi, joista ensimmäinen reagoi veden kanssa tuottaen lujuutta ja jälkimäinen reagoi potsolaanien kanssa.

Taulukko 12. Mikko Suikin (Suikki 2010) insinööriyöhön koottuja, Suomen teollisuudesta saatuja materiaalien koostumustietoja. Lisäksi taulukossa on yllä esitetystä poimittuja tietoja koskien yhdyskuntajätteen polton kuonan kahden hienojakoisimman fraktion koostumusta. Analyysitietoja käytetään suuntaa-antavina.

	Kivihiilen poltto		Yhdyskuntajätteen polton kuona (Song et al. 2004)	
	Lentotuhka, %	Rikinpoistotuote, %	0,85-2 mm, %	< 0,85 mm, %
SiO ₂	45–55		33,1	25,3
Al ₂ O ₃	20–30		10,32	10,77
Fe ₂ O ₃	8		5,75	4,49
CaO	4		30,43	37,04
MgO	3		2,27	3,3
K ₂ O	1		2,29	2,19
Na ₂ O	0–1		1,94	2,07
Cl			1,45	2,03
pH			12,2	12,3
CaSO ₄ *2H ₂ O		15		
CaSO ₃ * 1/2H ₂ O		50–70		
Ca(OH) ₂		20		
CaCO ₃		5		
CaCl ₂		0,5–3		

5.4 Ympäristöriskit ja niihin varautuminen

Valitut materiaalit sisältävät ympäristön kannalta ongelmallisia raskasmetalleja, sulfaatteja ja klorideja. Valituista materiaaleista on kuitenkin olemassa lainsäädäntöä, joka mahdollistaa materiaalien käytön erilaisissa kohteissa. Lainsäädännön perusteella voidaan valmistetuille muurimateriaaleille asettaa kahden tason vaatimuksia.

Ensimmäinen taso on muurimateriaalin alkuaineiden kokonaispitoisuus. Tähän voidaan vaikuttaa suhteittamalla valitut materiaalikombinaatiot siten, että säädetyt kokonaispitoisuudet eivät ylitä.

Toinen taso on haitallisten aineiden liukoisuus. Liukoisuuteen voidaan vaikuttaa reaktiotuotteiden koostumuksen kautta. Kalsium-silikaattihydraatti -tyyppisten rakenteiden tiedetään sitovan itseensä raskasmetalleja korvaamalla kalsium-atomeja ionihilassa. Kyseistä ominaisuutta hyödynnetään jo matala-aktiivisten ydinjätteiden varastoinnissa. Ettringiitti-rakenteet sitovat itseensä huomattavan määrän rikkiä. Kloridien tiedetään myös sitoutuvan kalsium-silikaattihydraattiin muodostaen ns. Riedelin-suolan. Liukoisuuden osalta korkea hydrataatiotuotteiden osuus muurirakenteessa on siis erittäin tärkeää. Siksi projektissa tulee keskittyä myös suureen reaktiotuotteiden osuuteen lopullisessa muurirakenteessa. Lopullinen varmuus haitallisten aineiden liukoisuudesta saadaan liuotuskokeilla, jotka on kuitenkin rajattu nyt kyseessä olevan tutkimuksen ulkopuolelle. Liukoisuustutkimus on tarkoitus toteuttaa jatkohankkeessa pilot-tyyppisten rakenteiden yhteydessä. (Moon et al. 2013,) (Taylor 1997) (Khale & Chaudhary 2007)(Shi & Fernandez-Jimenez 2006)(Suryavanshi & Swamy 1996)

5.5 Muurirakenteen erityispiirteet ympäristövaikutusten kannalta

Maarakennuslainsäädäntö ei sovellu kyseisen muurirakenteen arviointiin. Myös meluvallin vaatimuksia on vaikea perustella muurirakenteelle, koska ainemäärät ovat pienempiä ja altistuminen sateelle ja maaperän vesille vähäisempää. Lisäksi teiden suolaus tuottaa klorideja teiden ympäristöön joka tapauksessa. Sulfaattien liukoisuutta testattaessa tulee muistaa, että ettringiitin stabiilisuus riippuu sen ympäristön liuoksen sulfaattipitoisuudesta. Pitoisuuden pienentyessä ettringiitti hajoaa ja reaktiossa muodostuu monosulfaattia, joka sisältää selvästi vähemmän sulfaattia. Näin ollen ettringiitin stabiilisuus eluutiokokeessa on kyseenalaista verrattuna lopulliseen käyttöympäristöön. Voidaankin todeta, että ympäristökelpoisuuden todentaminen ja siihen liittyvät menetelmät hyväksymisrajoineen tulee kehittää muurirakenteelle erikseen. Jatkotutkimuksissa on syytä palata ympäristövaikutusten arviointiin.

6. Kokeellinen tutkimus

6.1 Materiaalit

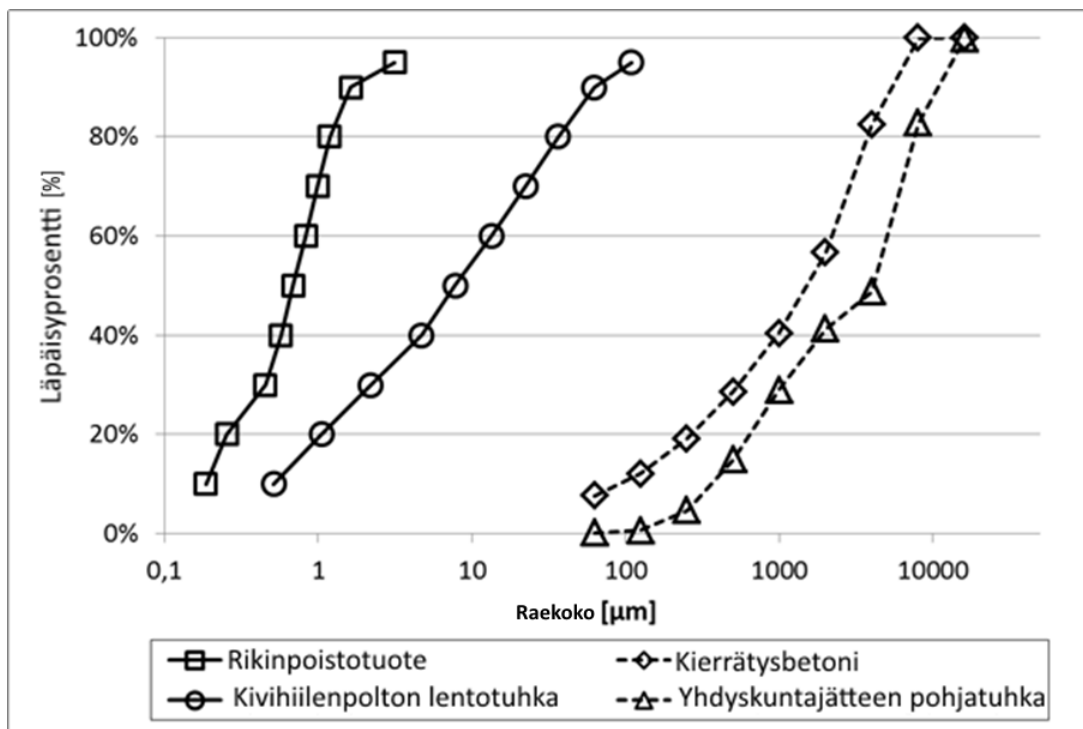
Kirjallisuusselvityksen perusteella materiaalit jaettiin kahteen osaan. Hienojakoisten materiaalien oletettiin toimivan lujuutta muodostavana pastana ja karkeammat materiaalit toimivat runkoaineena. Osa valituista materiaaleista oli liian karkeita RE-menetelmällä valmistettavaan muuriin. RE-menetelmä perustuu hienojakoisten materiaalien helppoon tiivistyvyyteen, jolloin sullomalla saavutetaan materiaalien optimaalinen pakkautuvuus. Karkeat materiaalit eivät omaa tällaista ominaisuutta. Karkeampien materiaalien tiivistäminen vaatii erillisiä laitteistoja, joiden käyttäminen projektissa ei ollut tarkoituksenmukaista.

Edelliseen perustuen karkeimmiksi käytettäviksi runkoaineiksi valittiin kuonan 50/50-seos 0–2 mm ja 2–5mm fraktioista. Toinen käytetty runkoaine oli murskattu betoni. Murskatun betonin maksimipartikkelikoko oli 45 mm, joka oli RE-menetelmään liian karkea. Murskattu betoni hienonnettiin VTT:n laboratorioissa leukamurskaimella (Pulverisette 1-I type 01.703). Lopullisten runkoaineiden partikkelikokojakauma on esitetty kuvassa 16.

Hienojakoisen materiaaliolosuhteiden muodostivat lentotuhka ja rikinpoistotuote. Lentotuhka ja rikinpoistotuote soveltuivat käytettäviksi sellaisenaan.

Kalorimetrikokeissa käytettiin ionivaihdettua vettä. Koekuutioissa ja demovaluissa käytettiin temperoitua talousvettä.

Aktivaattorina kokeissa käytettiin natriumhydroksidia ($\geq 98\%$, Sigma Aldrich). Referenssimateriaaleina käytettiin kalsiumhydroksidia ($>95\%$, J.T. Baker) ja granulointua silikaa (Parmix-silika, Finnsementti).



Kuva 16. Käytettyjen materiaalien rakeisuuskäyrät.

6.2 Menetelmät

6.2.1 Valittujen materiaalien alkuaineanalyysit

Materiaalien alkuaineanalyysit suoritettiin puolikvantitatiivisena röntgenfluoresenssi-analyysinä. Näytteiden alkuainekoostumukset määritettiin käyttäen Panalytical Axios mAX 3 kW röntgenspektrometriä ja puolikvantitatiivista Omnian-ohjelmaa. Näytteistä määritettiin fluori (F) ja sitä raskaammat alkuaineet lukuun ottamatta jalokaasuja, yhteensä 79 alkuainetta. Menetelmän määrittämisraja on 0,01 %. Alkuaineet, joita ei ole lueteltu tulostaulukossa (taulukko 13) ovat pitoisuudeltaan alle käytetyn menetelmän määrittämisrajan.

6.2.2 Runkoainemateriaalien partikkelikoon määrittäminen

Runkoainemateriaalien partikkelikoko määritettiin seulomalla standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti.

6.2.3 Hienojakoisten materiaalien partikkelikoon määrittäminen

Hienojakoisten materiaalien partikkelikoko määritettiin laserdiffraktion avulla (Lecotrac ASVR). Mittaukset suoritettiin vedessä.

6.2.4 PASTOJEN REAKTIIVISUUDEN MÄÄRITTÄMINEN

Materiaalien reaktiivisuutta tutkittiin isotermissellä kalorimetrillä (Tam-Air). Mittaukset suoritettiin 25 °C lämpötilassa. Näytteet sekoitettiin käsin näytekapselissa. Kuivia materiaaleja sekoitettiin keskenään 30 sekunnin ajan, minkä jälkeen näytteeseen lisättiin nestemäiset materiaalit (vesi ja NaOH-liuos). Sekoittamista jatkettiin kolmeen minuuttiin asti. Näytekapseli siirrettiin välittömästi sisälle kalorimetriin. Näytteen annettiin tasapainottua 7 h ennen ensimmäistä mittausta. Seitsemän tunnin tasapainottumisen jälkeen voidaan varmuudella todeta lämpövuon aiheutuvan ainoastaan näytteen reaktiivisuudesta.

6.2.5 Näytekappaleet

RE-menetelmällä valmistettiin 100 mm koekuutioita lujuus- ja tiheysmäärytyksiin. Näytteet sekoitettiin vaakatasosekoittimessa (Hobart H-400-52). Ensin kuivia materiaaleja sekoitettiin 30 sekunnin ajan keskenään, minkä jälkeen näytteeseen lisättiin nestemäiset materiaalit (vesi ja NaOH-liuos) kolmenkymmenen sekunnin aikana. Kokonaissekoitusaika oli neljä minuuttia.

Näytekuutiot valmistettiin sullomalla RE-materiaalia kerroksittain 100 mm kuutioteräsmuotteihin. Vastaavia muotteja käytetään betonitekniikassa koekuutioiden valmistamiseen. Näytekerrokset tiivistettiin neliömäisellä teräslevyllä, jonka sivun pituus oli 99 mm. Teräslevy asetettiin tiivistettävän kerroksen päälle ja 10 kg paino pudotettiin 45 cm korkeudesta teräslevyn päälle kahdeksan kertaa. Neljän tiivistysiskun jälkeen havaittavaa tiivistymistä ei enää tapahtunut. Koemuottien tiivistäminen tapahtui keskimäärin kymmenessä kerroksessa (kuva 17).



Kuva 17. Koekappalemuottien tiivistäminen RE-menetelmällä.

Täytetyt koekappalemuotit siirrettiin 22 °C lämpötilaan 95 % suhteelliseen kosteuteen 7 vuorokaudeksi. Seitsemän vuorokauden jälkeen näytemuotit purettiin ja kovettuneet koekappaleet siirrettiin takaisin 95 % suhteelliseen kosteuteen. Koekappaleet siirrettiin neljä tuntia ennen 30 % suhteelliseen kosteuteen ennen suunniteltua koestamista. Puristuslujuus ja tiheys määritettiin standardin EN 12390-3 mukaisesti.

6.2.6 Muurirakennedemonstraatio

Projektissa demonstroitiin pienimuotoisten muurirakenteiden valmistamista RE-menetelmällä. Muurirakenteen muottina käytettiin perinteistä puumuottia. Valupintoja vasten materiaalina käytettiin vaneria, joka oli pinnoitettu suihkutettavalla polytetrafluorieteenillä (PTFE). RE-materiaali valmistettiin 30l Zyklos -sekoittimella. Ensin sekoitettiin kuivat materiaalit 30 sekunnin aikana. Nestemäiset materiaalit lisättiin 30 sekunnin aikana ja sekoittamista jatkettiin neljään minuuttiin. RE-materiaalilla tehtiin n. 5 cm kerros muottiin ja kerros tiivistettiin manuaalisesti kunnes merkittävää tiivistymistä ei enää havaittu. Välittömästi tiivistämisen jälkeen uusi tiivistettävä kerros asetettiin muottiin ja tiivistettiin. Menetelmää jatkettiin kunnes muurirakenne oli valmis. Tiivistämiseen käytettiin 99 mm neliömäistä teräslevyä ja 2x4 tuuman puulankkua. Käytetyt tiivistysvälineet on esitetty kuvassa 18.

Puumuotti purettiin valmiin muurirakenteen ympäriltä kahden tunnin iässä. Valmis muurirakenne suojattiin kauttaaltaan muovikalvolla liiallisen vedenhaihtumisen estämiseksi (kuva 18).



Kuva 18. Vasemmalla: Demonstraatiomuurirakenteen tiivistämiseen käytetyt työvälineet. Vasemmalla puolella olevaa tiivistyssauvaa ei käytetty lopullisessa demonstraatioissa, vaikka alustavissa kokeissa tiivistäminen sauvalla onnistui myös erinomaisesti. Oikealla: Muotista purettu muurirakenne suojattiin muovikalvolla liian vedenhaihtumisen estämiseksi ja hydraataatiotuotteiden muodostumisen mahdollistamiseksi.

6.3 Materiaalien koostumus

Tutkittujen materiaalien alkuainekoostumus on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Materiaalien alkuainekoostumus VTT:n mittausten mukaan.

Alkuaine	Rikinpoiston lopputuote, %	Kivihiili- lentotuhka, %	Murskattu betoni, %	Kuona 0–2 mm, %	Kuona 5–12 mm, %
Fluori, F	0,1	-	-	-	-
Natrium, Na	0,25	2,0	1,9	2,3	4,9
Magnesium, Mg	0,44	1,4	1,3	1,1	1,2
Alumiini, Al	0,71	12	7,0	7,2	4,7
Pii, Si	1,2	23	25	15	21
Fosfori, P	0,03	0,38	0,08	0,63	0,32
Rikki, S	19	0,34	0,36	0,85	0,39
Kloori, Cl	2,6	0,02	0,02	0,62	0,50
Kalium, K	0,12	1,1	2,4	1,2	0,80
Kalsium, Ca	29	3,6	9,4	13	10
Titaani, Ti	0,04	0,54	0,27	0,68	0,49
Kromi, Cr	-	0,02	0,01	0,07	0,03
Mangaani, Mn	0,01	0,08	0,05	0,21	0,07
Rauta, Fe	0,40	5,6	3,3	9,3	10
Koboltti, Co	-	0,02	-	0,02	0,02
Nikkeli, Ni	-	0,02	-	0,03	0,01
Kupari, Cu	-	0,02	-	0,41	0,78
Sinkki, Zn	-	0,06	0,01	0,74	0,14
Rubidium, Rb	-	-	0,02	-	-
Strontium, Sr	0,02	0,14	0,04	0,03	0,03
Yttrium, Y	-	0,01	-	0,01	-
Zirkonium, Zr	-	0,02	0,02	0,02	0,02
Tina, Sn	-	-	-	0,04	0,01
Barium, Ba	-	0,31	0,08	0,19	0,21
Lyijy, Pb	-	-	-	0,10	0,05
yhteensä*	54,0	50,7	51,3	53,8	55,7

*Loppuosuus fluoria kevyempiä alkuaineita kuten hiiltä, typpeä, happea ja vetyä.

6.4 Materiaalien reaktiivisuuden määrittäminen

Hienojen materiaalifraktioiden reaktiivisuutta tutkittiin isotermissellä kalorimetrillä. Isoterminen kalorimetri mittaa näytteessä kehittyvää lämpöä vakioämpötilassa. Hydrataatioprosessin tiedetään tuottavan lämpöä. Kirjallisuusselvityksen mukaan tavoiteltavat reaktiotuotteet muodostuvat hydrataatioprosessissa.

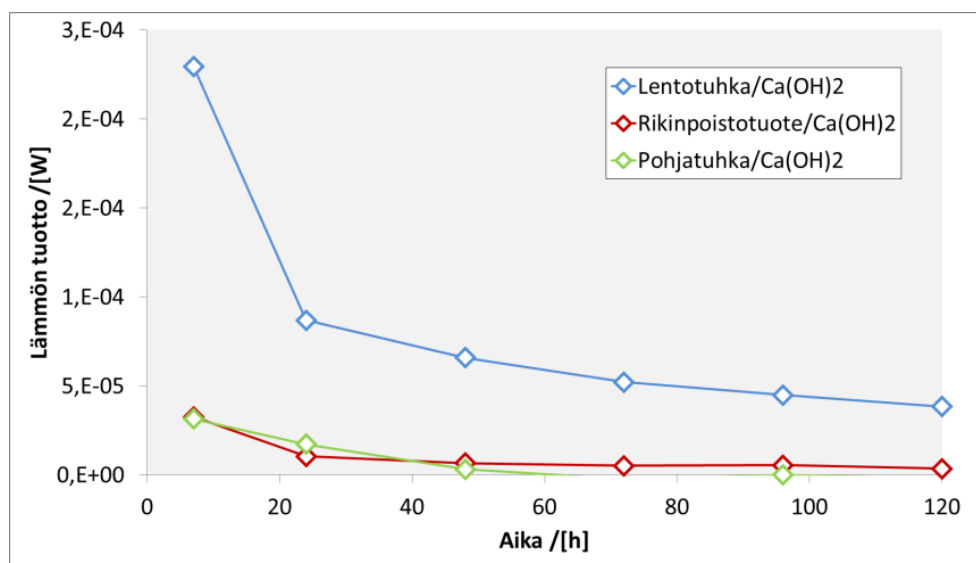
6.4.1 Kalsium-silikaatti-hydraattien muodostuminen

Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin materiaalien kykyä muodostaa kalsium-silikaattihydraatteja. Betoniteknikassa kalsium-silikaattihydraatit tuottavat suurimman osan kovettuneen betonin lujuudesta. Lisäksi kalsium-silikaattihydraateilla on kyky sitoa raskasmetalleja itseensä. Edellä esitetyn perusteella kalsiumsilikaattihydraattien muodostuminen muurirakenteessa on erittäin tavoiteltavaa.

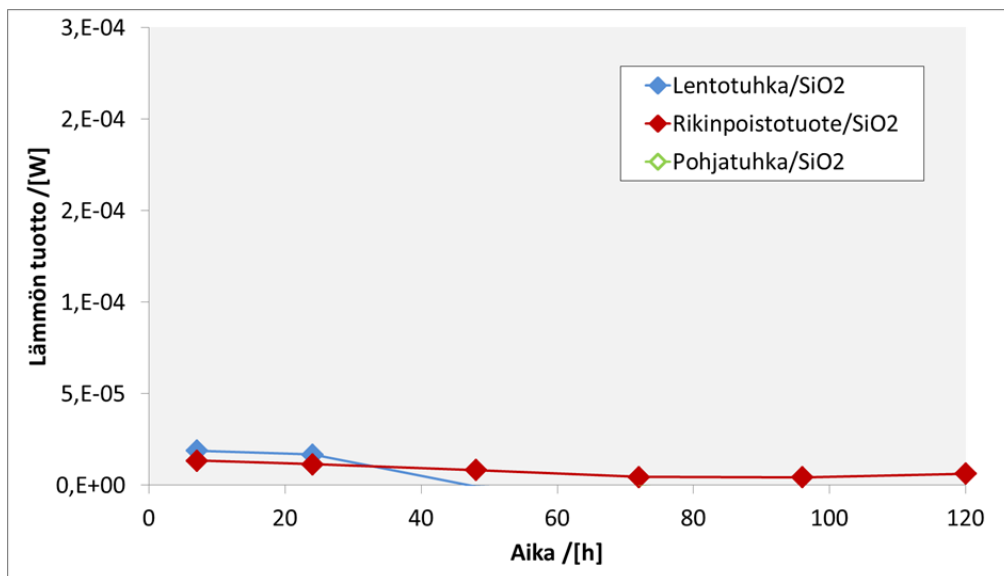
Materiaalien kyky muodostaa kalsiumsilikaattihydraatteja perustuu materiaalin kykyyn luovuttaa joko kalsium- ja/tai silikaatti-ioneja. Lisäksi liuoksen pH:n tulee olla yli kymmenen, jotta kalsiumsilikaattihydraattien muodostuminen olisi mahdollista. Materiaalien liuosten pH tutkittiin indikaattoripaperilla ja kaikkien tutkittujen materiaalien pH ylitti arvon kymmenen. Tutkittavia materiaaleja seostettiin suureen määrään joko kalsiumhydroksidia tai silikaa. Seossuhteet on esitetty taulukossa 14. Jos tutkittava materiaali reagoi silikan kanssa, on materiaalilla kyky luovuttaa kalsiumia vastaavia ioneja hydrataatioprosessiin. Jos tutkittava materiaali reagoi kalsiumhydroksidin kanssa, on materiaalilla kyky luovuttaa piitä vastaavia yhdisteitä hydrataatioprosessiin. Kalorimetrikokeiden tulokset on esitetty kuvissa 19 ja 20.

Taulukko 14. Materiaalikombinaatiot kalorimetrikokeisiin.

Ca(OH) ₂ /g	mikrosilika/g	lentotuhka/g	rikinpoistotuote/g	kuona/g	vesi/g
2,5		0,50			5,0
2,5			0,50		5,0
2,5				0,50	5,0
	2,5	0,50			5,0
	2,5		0,50		5,0
	2,5			0,50	5,0



Kuva 19. Materiaalien reaktiivisuus kalsiumhydroksidin kanssa ionivaihdetussa vedessä.



Kuva 20. Materiaalien reaktiivisuus amorfisen piin kanssa ionivaihdetussa vedessä. Pohjatuhkan lämmöntuotto oli alle määrittämissä.

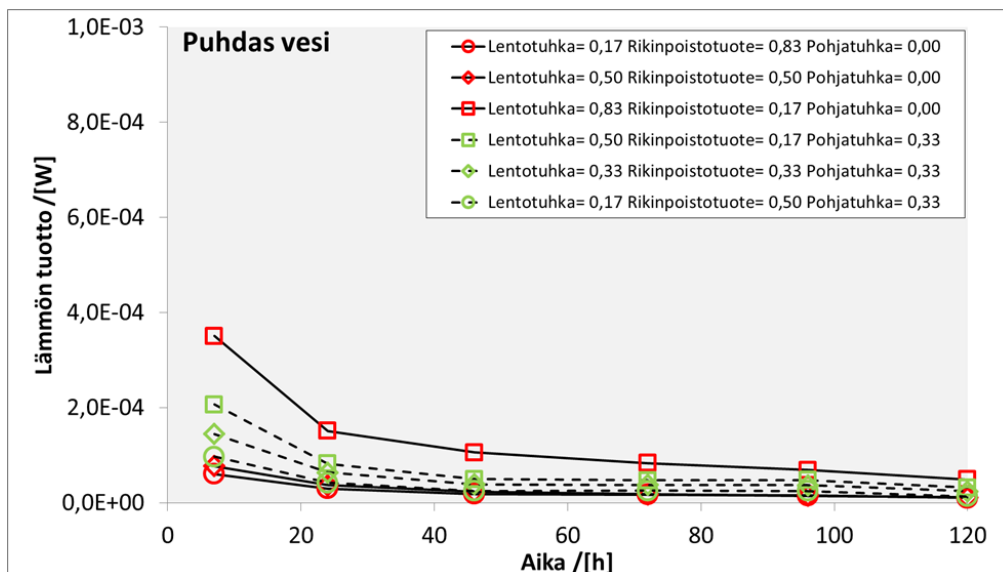
Kuvan 19. mukaan lentotuhka reagoi hyvin kalsiumhydroksidin kanssa. Tulos ei ole yllättävä, koska lentotuhkaa käytetään betonitekniikassa vastaavassa tarkoituksessa. Myös rikinpoistotuote ja kuona omaavat heikon kyvyn reagoida kalsiumhydroksidin kanssa. Silikan kanssa ainoa reaktiivinen materiaali oli rikinpoistotuote (kuva 20). Rikinpoistotuotteen reaktiivisuus silikan kanssa oli kuitenkin dekadia pienempi kuin lentotuhkan kyky reagoida kalsiumhydroksidin kanssa. Rikinpoistotuotteen niukka reaktiivisuus ei kuitenkaan ole ongelma, koska tyyppillisesti hydrataatioreaktion nopeutta rajoittaa piin liukoisuus.

6.4.2 Kokonaisreaktiivisuus

Edellisten tulosten perusteella tutkittavat materiaalit pystyvät muodostamaan kalsium-silikaatti-hydraatteja tai niitä muistuttavia yhdisteitä. Lentotuhka pystyy luovuttamaan silikaatti-ioneja hydrataatioprosessiin ja rikinpoistotuote toimii kalsium-lähteenä. Kuona osoitti myös lieviä reaktiivisuuden merkkejä kalsiumhydroksidin ollessa läsnä. Tuloksiin perustuen tutkitiin eri materiaalien reaktiivisuutta taulukon 15 mukaisilla seossuhteilla. Tulokset on esitetty kuvassa 21.

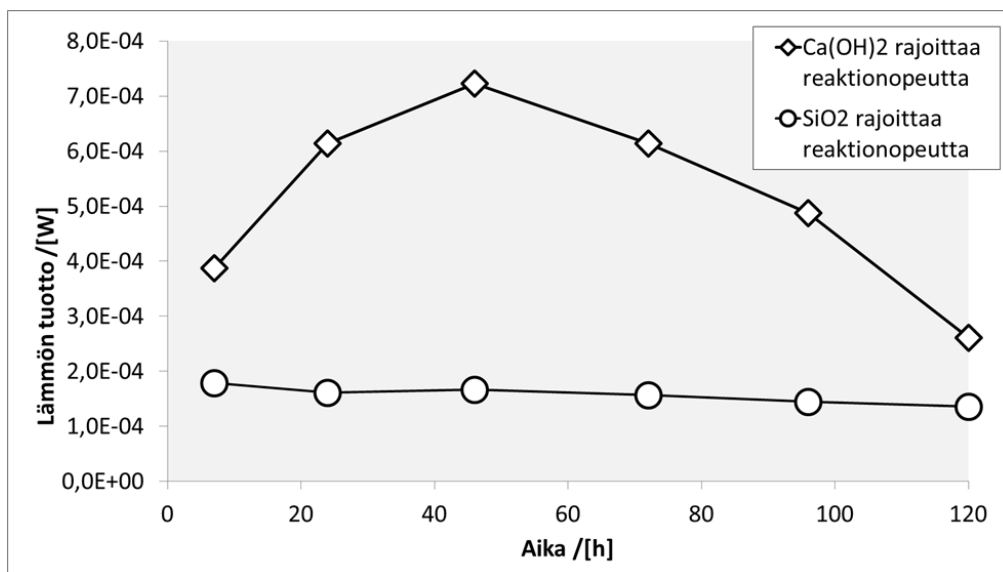
Taulukko 15. Lentotuhkan rikinpoistotuotteen ja kuonan seossuhteet kalorimetrikokeissa. Ionivaihdetun veden annostus oli 1:1 kuviin materiaaleihin verrattuna.

Näyte	lentotuhka	rikinpoistotuote	kuona
1	0,250	0,750	0,000
2	0,500	0,500	0,000
3	0,750	0,250	0,000
4	0,500	0,167	0,333
5	0,333	0,333	0,333
6	0,167	0,500	0,333
7	0,500	0,000	0,500
8	0,000	0,500	0,500



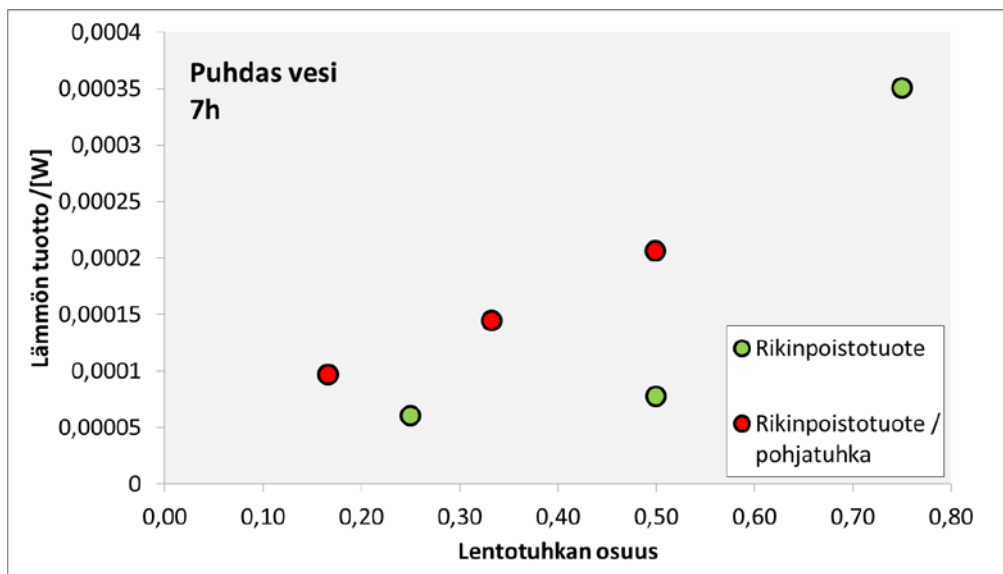
Kuva 21. Taulukon 14 mukaisten seosten lämmöntuotto ionivaihdetussa vedessä.

Kuvan 21 perusteella voidaan päätellä kaikkien valittujen materiaaliyhdisteiden olevan reaktiivisia. Kuitenkaan pelkän reaktiivisuuden perusteella materiaalin reaktiokykyä ei voida ennustaa. Parempi käsitys materiaaliyhdistelmien reaktiivisuudesta saadaan vertaamalla puhtaiden referenssimateriaalien reaktiivisuuteen (kuva 22). Kuvaajien 21 ja 22 perusteella materiaaliyhdistelmien reaktiivisuus on pienempi kuin referenssimateriaalien reaktiivisuus.



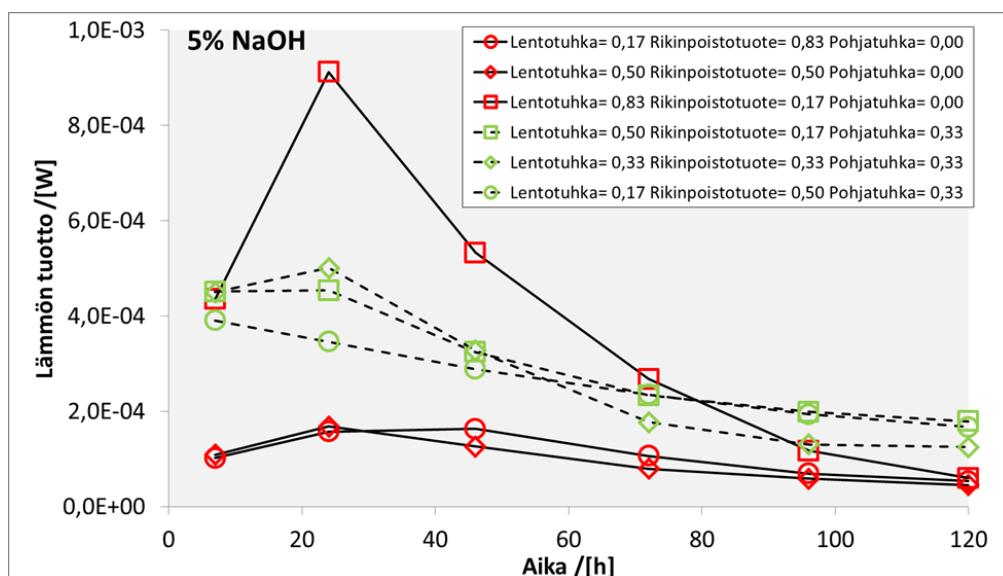
Kuva 22. Referenssimateriaalien lämmönkehitys $\text{Ca}(\text{OH})_2:\text{SiO}_2$:vesi 1:5:10 ja 5:1:10 -suhteilla.

Suurin reaktiivisuus saavutettiin korkeimmalla lentotuhkapitoisuudella. Myös muut koepisteet noudattelevan lentotuhkan pitoisuutta (kuva 23). Lentotuhkapitoisuudesta riippuvainen reaktionopeus indikoi silikan liukoisuuden rajoittavan reaktion nopeutta. Lisäksi kaikki koepisteet osoittivat hidastuvaa reaktiota, joka on tyypillinen profiili reaktioille, joiden nopeutta yhden komponentin liukoisuus rajoittaa.



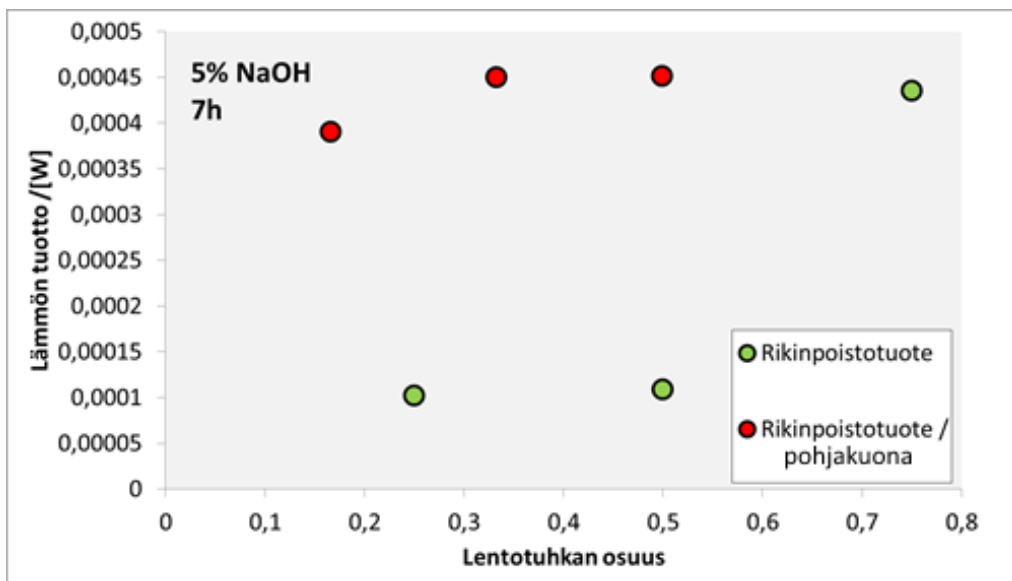
Kuva 23. Seosten lämmöntuotto ionivaihdetussa vedessä lentotuhkan osuuden funktiona.

Yleisesti käytetty tapa nostaa silikan liukoisuutta on ns. alkaliaktivaattorien käyttö. Tutkimuksessa valittiin natriumhydroksidi alkaliaktivaattoriksi ja koesarja toistettiin 5 % natriumhydroksidissa. Kuva 24 esittää materiaaliyhdistelmien reaktiivisuutta 5 % natriumhydroksidissa.



Kuva 24. Taulukon 15 mukaisten seosten lämmöntuotto 5 % natriumhydroksidiliuoksessa.

Alkaliaktivaattorin käyttö lisäsi materiaaliyhdistelmien reaktiivisuutta merkittävästi. Alkaliaktivaattorin käyttö mahdollisti materiaaliyhdistelmien referenssimateriaaleja vastaavan reaktiivisuuden. Korkein reaktiivisuus saavutettiin edelleen suurimmalla lentotuhkapitoisuudella, mutta kuvaajien lämmöntuottoprofiilit olivat muuttuneet. Seitsemän tunnin mittauspisteessä reaktionopeus ei ollut yhtä selvästi riippuvainen lentotuhkan määrästä kuin puhtaassa vedessä (kuva 25). Lisäksi kuona osoitti suurempaa reaktiivisuutta 120 tunnin mittauksessa, indikoiden kalsium-silikaatti-hydraattien lisäksi toista reaktiotuotetta.



Kuva 25. Seosten lämmöntuotto 5 % natriumhydroksidiliuoksessa lentotuhkan osuuden funktiona.

Myöhemmissä tutkimuksissa varmistui sulfaattipitoisten alumiini-ferriitti (AFt) faasien runsaampi muodostuminen kuona-näytteissä.

6.4.3 Päätelmät reaktiivisuustutkimuksesta

Tutkitut materiaalit osoittautuivat reaktiivisiksi kirjallisuudesta tehtyjen johtopäätösten mukaisesti. Lentotuhka osoittautui ylivoimaiseksi silikaatti-tyyppisten materiaalien osalta, mutta myös kuona ja rikinpoistotuote osoittivat merkkejä reaktiivisuudesta. Kalsiumin osalta ainoastaan rikinpoistotuote osoittautui reaktiiviseksi.

Valitut materiaalit sisälsivät tarvittavat komponentit kalsium-silikaattihydraatti-tyyppisten rakenteiden muodostumiseen. Reaktiotuotteiden muodostuminen oli kuitenkin hidasta verrattuna referenssimateriaaleihin. Reaktionopeus todettiin riippuvaiseksi lentotuhkan suhteellisesta osuudesta seoksessa. Lämmöntuottokuvaajien muoto oli myös kauttaaltaan laskeva, viitaten liukoisuuden rajoittavan reaktionopeutta (Scrivener & Nonat 2011). Tyypillisesti hydrataatioprosessin lämmöntuottokuvassa on kaksi selvästi erilaista vaihetta, ensin kiihtyvä osuus ja lopuksi hidastuva osuus. Tällainen tyypillinen lämmöntuottokuva voidaan havaita kuvassa 22 tapauksessa, jossa seoksen reaktionopeutta rajoittava komponentti oli kalsiumhydroksidi. Nykyisen tulkinnan mukaan hydrataatioreaktion kiihtyvän vaiheen reaktionopeutta rajoittaa kiteytymisytymien lukumäärä. Nämä kiteytymisytimet toimivat reaktiotuotteen kasvukeskuksina (Thomas et al. 2009). Tutkimuksissa keinotekoisia kasvukeskuksia on lisätty hydrataatioprosessiin ja merkittävää alkuvaiheen kiihtymistä on havaittu (Vehmas & Kronlöf 2011). Hidastuvan vaiheen reaktionopeutta kontrolloi komponenttien liukeneminen, yleensä silikaattien. Tulosten perusteella reaktionopeutta näytteissä rajoitti materiaalien liukeneminen, mutta ei kasvukeskusten lukumäärä. Tehokkain tapa nopeuttaa liukenemisen kontrolloimaa reaktiota on lisätä rajoittavan tuotteen liukoisuutta, kyseisessä tapauksessa silikaattityyppisten tuotteiden liukoisuutta. Liukoisuutta voidaan tehokkaasti lisätä ns. alkaliaktivoimalla, jossa reaktioseokseen lisätään alkalihydroksideja.

Alkaliaktivoitujen reaktioseosten lämmöntuottonopeus oli verrannollinen referenssimateriaaleihin. Suurin reaktionopeus mitattiin edelleen suurimmalla lentotuhkaosuudella, mutta lämmöntuottokuvan muoto oli muuttunut. Lämmöntuottokuvassa oli selvästi havaittavissa kiihtyvä ja hidastuva osuus indikoiden kasvukeskusten rajoittamaa reaktionopeutta ensimmäisen vuorokauden aikana. Merkittävää oli myös kuonan aktivoituminen. Kuonaa sisältävät näytteet tuottivat eniten lämpöä 120 h mittauspisteessä. Myöhemmissä tutkimuksissa var-

mistui sulfaattipitoisten alumiini-ferriitti (Aft) faasien runsaampi muodostuminen kuonanäytteissä.

Materiaalien alkuaineanalyysin mukaan Aft-faasien muodostuminen ei liity suoraan materiaalien pii- ja alumiinipitoisuuteen. Kuona ja lentotuhka sisältävät samassa suhteessa piitä ja alumiinia, joka ei selitä eroavia reaktiotuotteita. Kuona sisältää kuitenkin huomattavasti enemmän kalsiumia kuin lentotuhka (kuona Al:10 p.-%, lentotuhka Al:3,6 p.-%). Alustavan hypoteesin mukaan seoksissa kalsiumin lähteenä toimii rikinpoistotuote suuren kalsiumpitoisuutensa vuoksi (Ca: 29 p.-%). Koko rikinpoistotuotteen kalsiumsisältö ei kuitenkaan ole hydrataatioprosessin käytettävissä. Rikinpoistotuote koostuu kalsiumhydroksidista, kalsiumkarbonaatista ja kalsiumsulfaatista (kipsistä), joista jälkimmäisen osuus on huomattava 19 p.-%. Tällöin reaktiota rajoittavaksi tekijäksi tulee nopeasti sulfaatin saostumiseen liittyvät faasit, esim. etringiitti. Kuonan sisältämä kalsium voi saostaa runsaassa sulfaattipitoisuudessa enemmän etringiittiä mahdollistaen suuremman lämmöntuoton mittausjakson loppupuolella.

6.5 Muurirakenteen mekaaniset ominaisuudet

Reaktiivisuustutkimusten perusteella voitiin tehdä koeohjelma mekaanisten ominaisuuksien määrittämiseksi (taulukko 16). Lisäksi arvioitiin materiaalien soveltuvuutta RE-menetelmään. RE-menetelmässä vesimäärä määritetään kokeellisesti optimaalisen koostumuksen aikaansaamiseksi. Suhteituksessa kuivien materiaalien keskinäiset suhteet pidettiin vakiona ja optimaalinen vesimäärä etsittiin kokeellisesti. Sopivalla vesimäärällä massa pysyi puristettaessa kasassa, mutta ei vielä muodostanut yhtenäistä massaa sekoitettaessa. Kuva 26 esittää optimaalisen ja liikaa vettä sisältävän massan. Kummatkin massat pystyttiin tiivistämään sullomalla, mutta liikaa vettä sisältävä massa muistutti enemmän jäykkää betonia kuin RE-menetelmän massoja. Kun optimaaliset vesimäärät eri materiaalikombinaatioille saatiin määritettyä, toistettiin kokeita eri liuksilla ja runkoainekoostumuksilla taulukon 16 mukaisesti.



Kuva 26. Vasemmalla optimaalinen vesiansostus RE-massalle. Veden annostus on juuri riittävä pitämään massa kasassa muotoillessa. Oikealla puolella liikaa vettä sisältävä massa, joka muistuttaa jäykkää betonia. Massa muodostaa yhtenäisen massan, jolloin kovettuneen RE-massan lujuusominaisuudet laskevat.

Taulukko 16. Koekappaleiden suhteitus.

Näyte	Lentotuhka/kg	Rikinpoistotuote/kg	Kuona/kg	Murskattu betoni/kg	vesi/kg	NaOH/kg
1	7,50	2,50	0,00	0,00	1,33	
2	5,00	1,67	3,33	0,00	1,33	
3	7,50	2,50	0,00	0,00	1,33	0,0665
4	5,00	1,67	3,33	0,00	1,33	0,0665
5	3,75	1,25	5,00	0,00	1,33	0,0665
6	3,75	1,25	5,00	0,00	1,00	0,05
7	2,50	0,83	6,67	0,00	1,00	0,05
8	2,50	0,83	6,67	0,00	0,67	0,0335
9	5,00	1,67	0,00	3,33	1,33	0,0665
10	3,75	1,25	0,00	5,00	1,00	0,05
11	2,50	0,83	0,00	6,67	0,67	0,0335
12	3,75	1,25	5,00	0,00	1,33	0,0665
13	3,75	1,25	5,00	0,00	1,33	0,0665

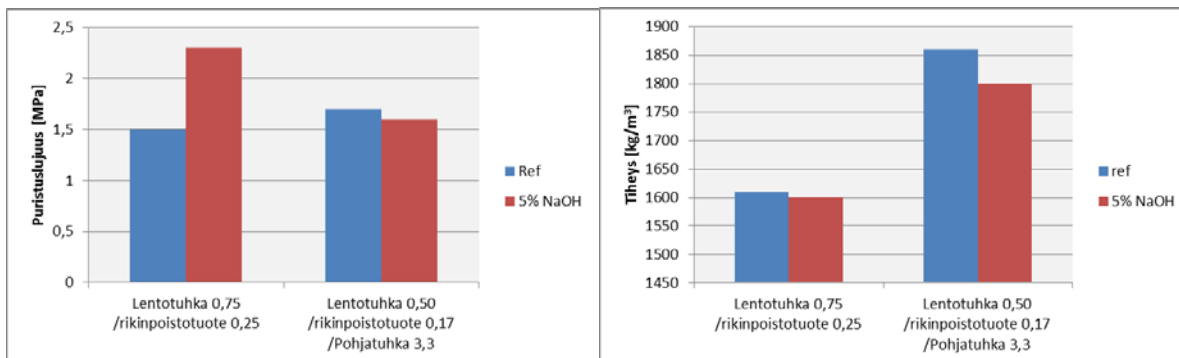
Koekappaleiden valmistaminen onnistui helposti, mutta betoniteknikkaan soveltuvien muottien käyttö aiheutti ongelmia näytekuutioiden purkamisessa. Useiden näytteiden tartunta muottien pintaa aiheutti näytteiden hajoamista (kuva 27). Lisäksi havaittiin tiivistyskerrosten irtoavan toisistaan. Tästä syystä mitattuja puristuslujuusarvoja voidaan pitää minimiarvoina, jotka käytetyillä materiaaleilla ja RE-menetelmällä saavutetaan.



Kuva 27. Jotkut koekappaleet hajosivat tiivistyskerrosten rajapintojen kohdilta muoteista purettaessa.

6.5.1 Alkaliaktiivoinnin vaikutus lujuuteen

Koesarjan ensimmäisillä pisteillä pyrittiin arvioimaan alkaliaktiivoinnin vaikutusta lujuuteen. Kuva 28 esittää tavallisen ja alkaliaktivoitun suhteituksen eron. Lentotuhka/rikinpoistotuote -näytteessä alkaliaktiivointi nostaa merkittävästi puristuslujuutta. Vastaavaa efektiä ei havaittu tutkitussa lentotuhka/rikinpoistotuote/pohjatuhka (kuona) -näytteessä. Näytteiden tiheyteen alkaliaktiivoinnilla ei ollut vaikutusta (kuva 28).

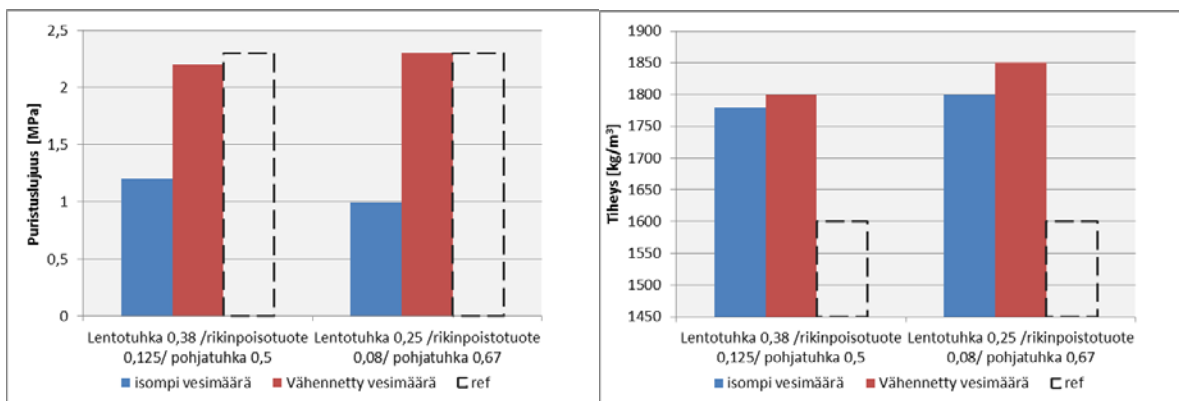


Kuva 28. Alkali-aktivoinnin vaikutus koekappaleiden puristuslujuuteen ja tiheyteen.

6.5.2 Vesimäärän vaikutus

Vesimäärän vaikutus on esitetty kuvassa 29. Näytteet, jotka oli valmistettu liian suurella vesimäärällä (koostumukseltaan jäykkä betoni), olivat systemaattisesti heikompia kuin optimaalisella vesimäärällä valmistetut. Optimaalisella vesimäärällä valmistetut koekappaleet saavuttivat lentotuhka/rikinpoistotuote-näytteitä vastaavan lujuuden (lentotuhka/rikinpoistotuote referenssi on esitetty kuvassa katkoviivalla).

Tiheyteen vesimäärä ei merkittävästi vaikuttanut. Kuitenkin vähemmän vettä sisältävät massat olivat aavistuksen tiheimpiä. Kuonan annostelumäärän kasvattaminen kasvatti massan tiheyttä.

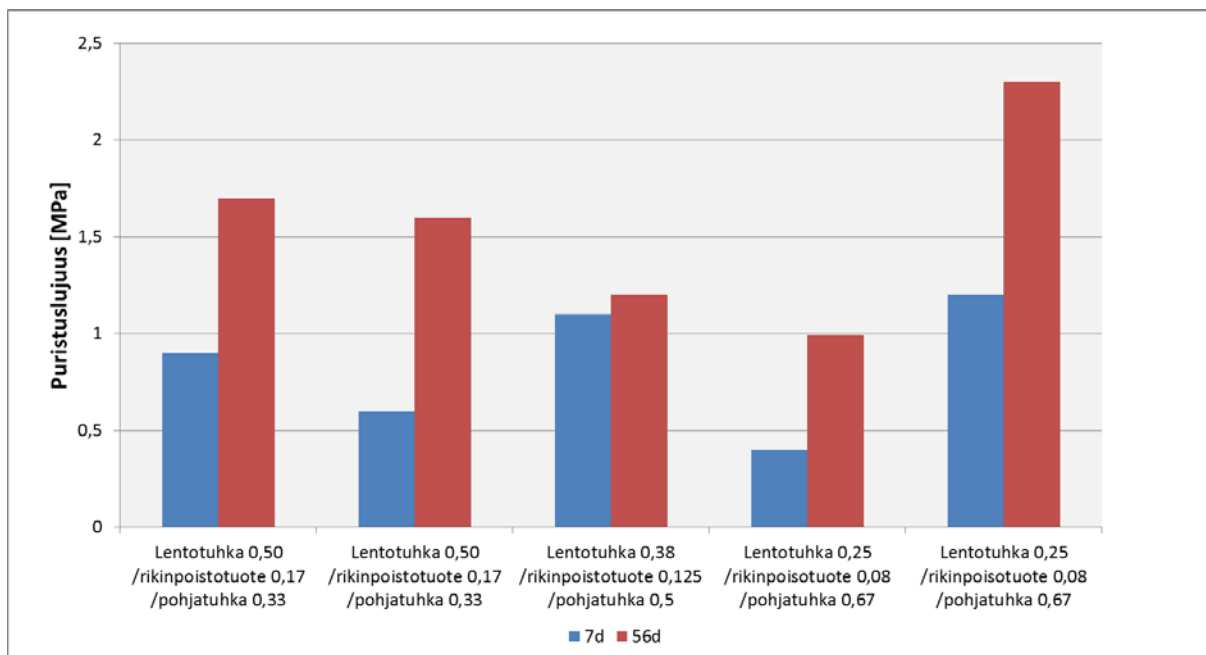


Kuva 29. Vesimäärän vaikutus koekappaleiden puristuslujuuteen ja tiheyteen. Lentotuhka/rikinpoistotuote referenssi on esitetty katkoviivalla.

6.5.3 Pastapitoisuuden ja ajan vaikutus lujuuteen

Kuva 30 esittää kuonan annostuksen kasvattamisen vaikutusta ja puristuslujuuden aikariippuvuutta. Kuonan annostuksen kasvattaminen ei merkittävästi vaikuttanut puristuslujuuteen. Viidenkymmenenkuuden vuorokauden (56 d) puristuslujuus oli 1,5–2 MPa tutkituissa näytteissä. Kuonan annostusta tärkeämpi tekijä on optimaalisen vesimäärän määrittäminen. Liian suuri vesimäärä alentaa lujuutta, kun taas liian pieni vesimäärä ei tuota koossapysyvää massaa.

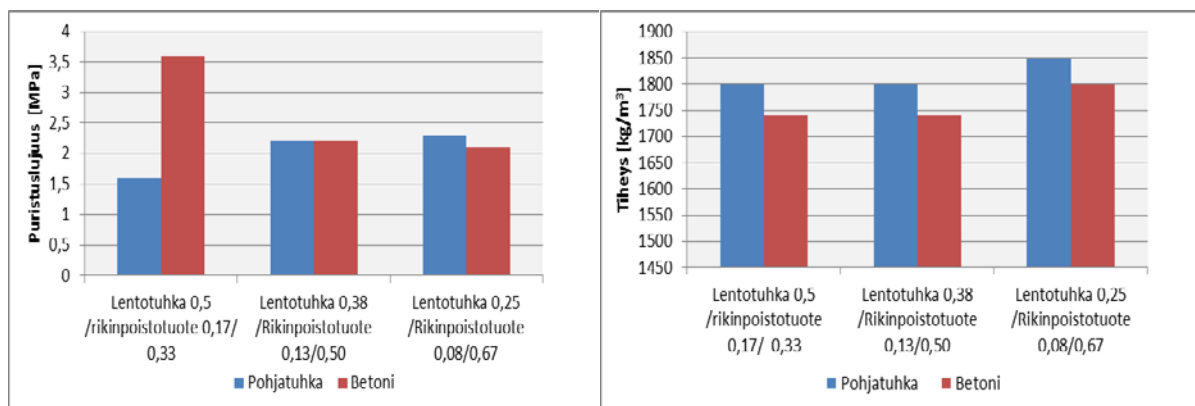
Puristuslujuudella on tulosten perusteella voimakas aikariippuvuus. Seitsemän vuorokauden puristuslujuudet ovat 0,5–1,0 MPa. Sen sijaan 56 vuorokauden puristuslujuudet olivat 1,5–2 MPa. Lujuus siis keskimäärin kaksinkertaistui aikavälillä 7–56 d.



Kuva 30. Runkoaineen osuuden kasvattamisen vaikutus puristuslujuuteen ja puristuslujuuden vaikutus.

6.5.4 Runkoainemateriaalin vaikutus lujuuteen

Runkoainemateriaalin vaikutus puristuslujuuteen on esitetty kuvassa 31. Kuonan ja murskatun betonin käytössä runkoaineena ei ole merkittäviä eroja.



Kuva 31. Runkoainemateriaalityypin vaikutus puristuslujuuteen ja tiheyteen. Kuonan ja murskatun betonin lujuustulokset ovat käytännössä samat.

6.5.5 Koostumuksen vaikutus ulkonäköön

Kuva 32 esittää eri materiaalkoostumusten värin yli 56 vuorokauden ikäisenä. Eri materiaali-kombinaatiolla ei ole merkittävää värieroa. Lentotuhkan voimakas tumma väri dominoi ulkonäköä.



Kuva 32. Koekappaleiden väri yli 56 vuorokauden iässä. Numerointi taulukon 16 mukaan.

Koekappaleissa, joissa oli suuri vesimäärä, havaittiin huomattava määrä alkalihärmettä kovettuneen rakenteen pinnalla (kuva 33). Vastaavaa efektiä ei havaittu muissa näytteissä. Suuri vesimäärä toi mukanaan suuren määrän alkaliaktivaattoria. Ylimääräinen alkaliaktivaattori kulkeutui rakenteen pinnalle veden haihtuessa ja kiteytyi muodostaen valkoista härmettä kappaleen pintaan. Kokeiden perusteella ei voida tarkasti määrittellä millaisissa olosuhteissa härmettä ilmenee, ja voidaanko veden alkuvaiheen haihtumisen estämisellä myös vaikuttaa härmeen muodostumiseen.



Kuva 33. Alkalihärmeen muodostuminen joidenkin koekappaleiden pinnalle oli voimakasta. Kaikissa koekappaleissa ei härmeen muodostumista havaittu.

6.5.6 Päätelmiä muurirakenteen ominaisuuksista

Valitut materiaalit soveltuivat käytettäväksi RE-menetelmällä. Menetelmää ei kuitenkaan sovellettu karkeimmille fraktioille, koska tiivistämismenetelmät haluttiin säilyttää perinteisen RE-menetelmän mukaisina. Materiaalit oli helppo tiivistää, koska niiden pakkautuvuus oli hyvä. Haastavinta oli optimaalisen vesimäärän löytäminen kokeellisesti. Liian pieni vesimäärä ei mahdollistanut materiaalien tiivistämistä ja valmistetut näytteet hajosivat muottien purun yhteydessä. Liian suuri vesimäärä heikensi materiaalin lujuutta.

RE- menetelmän havaittiin eroavan normaalista betoniteknikasta. Esimerkiksi muottipintojen käsittely muottiöljyllä aiheutti materiaalin voimakkaan tarttumisen muottipintaan rikkoen pinnan rakenteen. Paras tapa todentaa RE-menetelmällä valmistettujen rakenteiden lujuus on valmistaa riittävän suurikokoinen rakenne, josta puristuslujuusnäytteet irrotetaan poraamalla.

Alkaliaktivointi kasvatti RE-näytteiden puristuslujuutta. Jossain tapauksissa alkaliaktivointi tuplasi näytteiden lujuuden. Vaikutusta ei kuitenkaan havaittu kaikissa näytteissä. Myöhemmissä elektronimikroskooppitutkimuksissa todennettiin huomattavasti suuremmat reaktiotuotemäärät alkaliaktivoituissa näytteissä. Koska vastaavia eroja ei todennettu kaikissa tutkituissa puristuslujuusnäytteissä, voidaan päätellä muiden tekijöiden vaikuttavan ratkaisevasti lujuuteen. Todennäköisesti partikkelien tulee olla tarpeeksi hyvin pakkautuneita, jotta pieni määrä reaktiotuotteita kykenee lujittamaan kappaleen rakennetta.

Vesimäärä vaikutti huomattavasti puristuslujuuteen. Liian suuri vesimäärä heikensi kappaleiden lujuutta. Kyseessä ei välttämättä ole betoniteknikassa tunnettu vesi-sideainesuhteen vaikutus lujuuteen, vaan myös mahdollisen vetykaasun kehittyminen heikentää kappaleen rakennetta. Liian suuri vesimäärä mahdollistaa vesikalvon muodostumisen kappaleessa kehittyvän vetykaasun ympärille, jolloin muodostunut kaasu ei pääse kulkeutumaan ulos rakenteesta. Muodostuneet kaasukuplat heikentävät huomattavasti rakennetta. Kirjallisuus selvityksen perusteella kyseinen mekanismi on yksi oleellisimmista tekijöistä, joka estää pohjakuonien käyttämisen tavanomaisissa betoniteknisissä sovelluksissa.

Koekappaleiden lujuudella havaittiin myös voimakas aikariippuvuus. Suurimassa osassa koekappaleista puristuslujuus kaksinkertaistui aikavälillä 7–56d. Kyseistä lujuudenkehitystä voidaan pitää osoituksen materiaalien reaktiivisuudesta. Puhtaasti RE-menetelmän pakkautuvuuteen perustuva lujuus ei merkittävästi kasva ajan kuluessa.

Runkoainemateriaalilla ei todettu suuria vaikutusta lujuuteen tarkastellulla aikavälillä. Kuona tai murskattu betoni toimivat yhtä hyvin runkoaineena. Kokeiden suurin puristuslujuus mitattiin betonimurskeella valmistetulla koekappaleella (3,5 MPa). Muita korkeampi lujuus johtui todennäköisesti optimaalisesta vesimäärästä. Vettä oli tarpeeksi optimaalisen pakkautuvuuden ja reaktiivisuuden saavuttamiseksi.

Runkoaineen määrällä ei havaittu olevan vaikutusta lujuuteen. Koesarjassa runkoaineen osuus kasvatettiin arvosta 0,33 arvoon 0,67, mutta merkittävää muutosta lujuudessa ei havaittu. Luonnollisesti ylisuuri runkoainemäärä ei mahdollista hyvää pakkautuvuutta ja tulee heikentämään koekappaleiden lujuutta.

Tutkituilla runkoainekoostumuksilla ei havaittu merkittävää vaikutusta lopputuotteen ulkonäköön. Hallitsevana ominaisuutena oli lentotuhkasta aiheutuva tumma väri. Muutokset sideaineissa tai runkoaineissa eivät vaikuttaneet silminnähävästi lopputuotteen väriin. Jotta tuotteille saataisiin suuremmat värierot ja tällöin elävämmän näköinen pinnan, tulisi jatkossa kehittää suhteellisen vähän lentotuhkaa sisältävä sideainekombinaatio.

6.6 Muurirakennedemonstraatio

Muurirakennedemonstraatio toteutettiin materiaalien ja RE-menetelmä soveltuvuuden selvittämiseksi suurempiin rakenteisiin. Mekaanisten ominaisuuksien tutkimuksissa tiivistysvoima

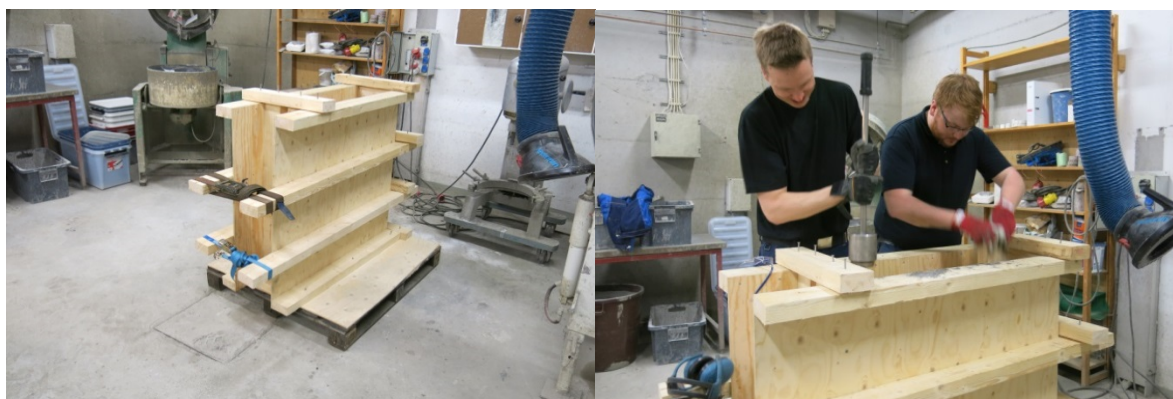
pystyttiin kohdistamaan kokonaisuudessaan tiivistettävän koekappaleen koko pinta-alalle. Suuremmassa rakenteessa tiivistys voitiin kohdistaa ainoastaan pieneen osaan tiivistettävää pinta-alaa. Tiivistystavan erosta huolimatta materiaalien havaittiin tiivistyvän erinomaisesti myös suuremmassa rakenteessa. RE-menetelmä soveltui myös suuremmassa mittakavassa valmistetulle tuotteelle (demo-muuri) (kuvat 34, 35 ja 36).

6.6.1 Muurirakennedemonstraatio 1

Ensimmäisessä muurirakennedemonstraatiossa käytettiin taulukon 17 mukaista massaa. Materiaalien havaittiin tiivistyvän hyvin, mutta lopullisen rakenteen vesipitoisuus havaittiin liian alhaiseksi. Muurirakenne halkeili purettaessa ja myöhemminkään rakenteessa ei havaittu lujuudenkehitystä. Syy lujuuden puuttumiseen oli liian alhainen vesimäärä. Vaikka materiaali sekoitushetkellä täytti RE-menetelmälle vaadittavan koostumuksen, tiivistämiseen kuluva aika aiheutti veden haihtumisen rakenteesta. Myös alimman kerroksen tiivistyminen havaittiin puutteelliseksi. Alimman kerroksen tiivistys jäi puutteelliseksi, koska osa tiivistysvoimasta hukkui huonosti suunniteltuun muurimuotin pohjarakenteeseen (liian joustava).

Taulukko 17. Demovalu 1. Massan koostumus.

Materiaali	Annostus (kg/m ³)
Lentotuhka	420
Rikinkoistotuote	140
Murskattu betoni	1121
Vesi	113
NaOH	5,636



Kuva 34. Demovalu 1. muottirakenne ja kuva RE-massan tiivistämisestä.



Kuva 35. Kuva RE-massan tiivistämisestä muottiin ja tiivistetty massakerros.



Kuva 36. Kuva muotin purkamisesta välittömästi valun jälkeen ja lopullinen rakenne. Muuri-rakennedemonstraatio 1:n massan vesimäärä oli liian pienen.

6.6.2 Muurirakennedemonstraatio 2

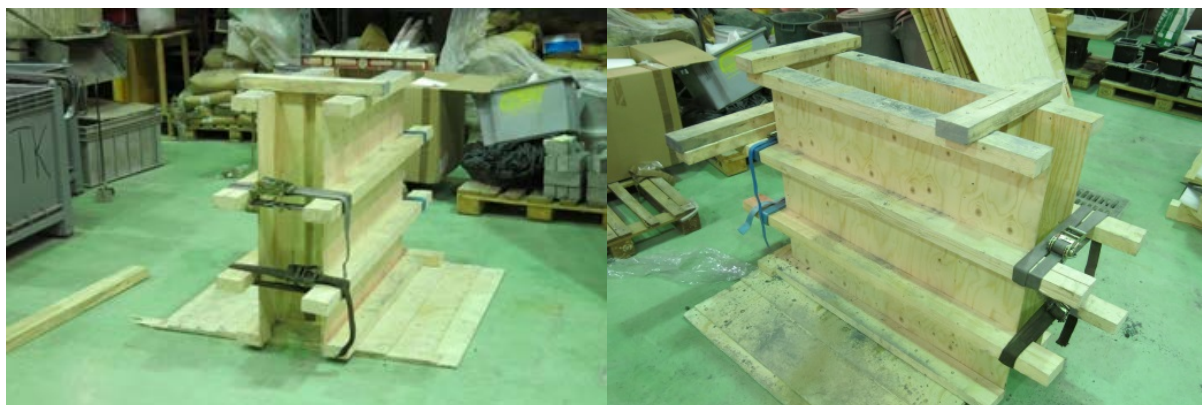
Muurirakennedemonstraatio 1 epäonnistumisen perusteella suunniteltiin muurirakennedemonstraatio 2 (taulukko 18). Muurirakennedemonstraatio 2:ssa materiaalin vesipitoisuutta nostettiin ja veden haihtuminen tiivistämisen minimoitiin valmistamalla massa useissa erissä ja sulkemalla tiivistuspinta muovikalvolla uusien erien valmistamisen ajaksi. Muurimuotin pohjarakenne suunniteltiin myös uudestaan, jotta muurirakennedemonstraatiossa 1 havaittu pohjakerroksen huono tiivistyminen pystyttiin välttämään. Uudessa demossa valmistettiin muurirakenne, joka pystyttiin purkamaan muotista välittömästi valmistuksen jälkeen. Lisäksi muurirakenne pystyi kantamaan painonsa välittömästi valmistamisen jälkeen (kuvat 37, 38 ja 39).

Valmistettu muurirakenne suojattiin muovikalvolla liiallisen vedenhaihtumisen estämiseksi ja hydrataatioreaktion mahdollistamiseksi. Muurirakenteen havaittiin kehittävän lujuutta välittömästi valmistamisen jälkeen (muurirakenne tuotti havaittavasti lämpöä).

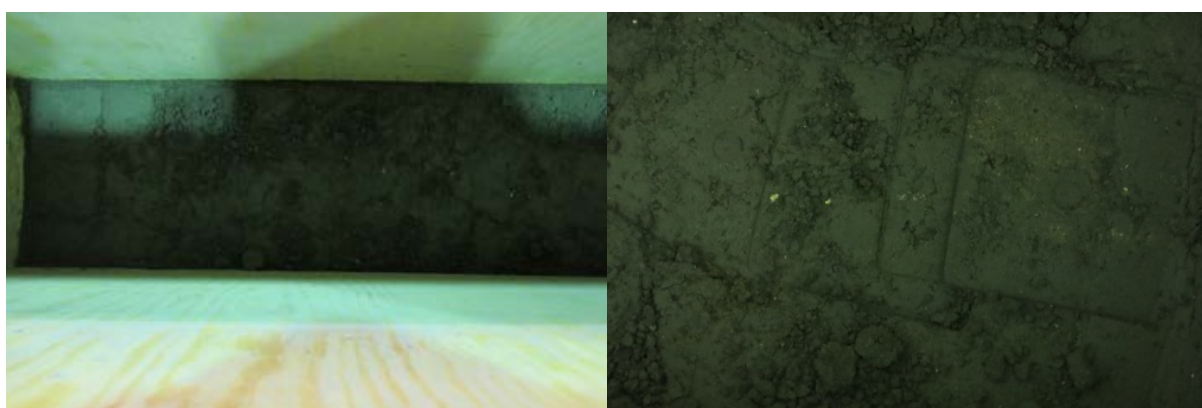
Muurirakennedemonstraatiossa tutkittiin myös pinnan värinmuodostusta. Yksi valetuista kerroksista toteutettiin ainoastaan betonimurskerunkoaineella. Erilaisesta materiaalikombinaatiosta huolimatta minkäänlaista värieroa rakenteessa ei havaittu.

Taulukko 18. Demovalu 2. Massan koostumus.

Kerros (numerointi alhaalta ylös)	Materiaali	Annostus (kg/m ³)
1 - 3	Lentotuhka	400
	Rikinpoistotuote	133
	Murskattu betoni	530
	Kuona	530
	Vesi	200
	NaOH	9,883
4	Lentotuhka	388
	Rikinpoistotuote	130
	murskattu betoni	1034
	Vesi	237
	NaOH	11,830



Kuva 37. Demovalu 2. Parannettu muottirakenne.



Kuva 38. Kuva tiivistetystä RE-materiaalin pinnasta. Demovalu 2:ssa tiivistäminen oli huomattavasti helpompaa kuin demovalu 1:ssä.



Kuva 39. Kuva valmiista muurirakennedemonstraatiosta 2 välittömästi muotin purkamisen jälkeen.

6.6.3 Muurirakenteiden soveltuvuus ympäristörakentamiseen

Muurirakenteiden soveltuvuutta käytännön ympäristörakentamiseen rajoittavat muurirakenteen sisältämät haitta-aineet ja muurirakenteen kyky täyttää melumuurille asetetut vaatimukset. Muurirakenteen ympäristökelpoisuuden arvioiminen käytettävissä olevien tietojen perusteella ei ole mahdollista. Jatkossa jokainen muurirakenne tulee arvioida tapauskohtaisesti ympäristölupamenettelyn mukaan. Ympäristökelpoisuus voidaan todeta esimerkiksi ympäristöministeriön ja liikenneviraston selvitysten perusteella (Pajukallio, Wahlström & Alasaarela 2011) (Liikennevirasto 2014).

6.6.3.1 Meluesteiden laatuvaatimukset

Tien meluesteiden tulee täyttää lukuisia vaatimuksia. Melumuurin arvioiminen käytettävissä olevilla tiedoilla ei ole mahdollista. Meluesteiden suunnittelun laatuvaatimuksissa ei kuitenkaan ilmene yksittäistä tekijää joka suoralta kädeltä rajaisi valmistettujen melumuurien käytettävyyttä.

6.6.4 Päätelmät muurirakennedemonstraatioista

Toinen muurirakennedemonstraatio onnistui hyvin. Ensimmäisessä demonstraatioissa havaitut puutteet korjattiin ja lopputuloksena oli hyvin onnistunut muurirakenne. Muurirakenteen valmistaminen osoittautui haastavammaksi kuin vastaavan rakenteen valmistaminen normaalista betonista. Erityisesti rakenteen vesimäärän hallinta osoittautui vaativaksi. Veden haihtuminen valmistusvaiheessa vaikutti kriittisesti rakenteen onnistumiseen. Massiivisissa rakenteissa vesimäärän hallinta tulee edelleen haastavammaksi. Massiivisten rakenteiden valmistaminen tulee vaatimaan paljon käytännön kokemusta massan valmistamisesta ja tiivistämisestä. Tämän vuoksi massojen vesimäärää tulee pystyä säätämään työmaaolosuhteissa.

Jatkossa muurirakenteiden ympäristökelpoisuus tulee arvioida ympäristölupamenettelyn avulla.

Meluesteiden laatuvaatimuksien arvioinnissa ei esiintynyt yksittäistä tekijää, joka estäisi muurirakenteiden käytön meluntorjunnassa. Tarkkaa arviota ei kuitenkaan käytettävissä olevilla tiedoilla voida esittää.

7. Johtopäätökset

Tutkimuksen johtopäätökset esitetään projektin tavoitteiden otsikoinnin mukaisesti.

7.1 Tarpeen määrittäminen

Selvityksen perusteella muurimaiset meluntorjuntaratkaisut tarjoavat vaihtoehdon nykyisille meluntorjuntaratkaisuille. Muurimaisia meluntorjuntarakenteita voidaan käyttää kaupunkikuvan elävöittämiseen.

Ajava voima muurimaisille rakenteille on myös jättemateriaalien uudelleenkäyttö. Runsaasta tutkimuksesta huolimatta tuhille ja kuonille ei ole löydetty laajamittaisia sovelluskohteita. Lentotuhkaa käytetään yleisesti betonitekniikassa, mutta suurin osa tuhkaista ei ole betonitekniikkaan soveltuva. Yhdyskuntajätteen polton pohjatuhkien ja kuonien käyttö on huomattavasti vähäisempää (pois lukien masuunikuona). Tuhkien ja kuonien määrä tulee kuitenkin tulevaisuudessa edelleenkin kasvamaan jätteenpolton yleistymisen seurauksena. Lain-säädäntö jättemateriaalien osalta on edelleen kiristymässä ja uusia hyödyntämisspolkuja tulee löytää, jotta jättemateriaalien hyödyntämistavoitteet saavutetaan. Voidaankin todeta uudelleenkäytön toimivan voimakkaana ajavana voimana.

Jättemateriaalien sovelluskohteena muurimaiset meluesteet ovat optimaalisia. Meluesteiden tarve on suurinta asutuskeskuksissa ja niiden välittömässä läheisyydessä, samalla alueella jolla myös jätteenpolttolaitokset operoivat. Muurirakenteessa pystytään myös hyödyntämään tuhkiin ja kuoniin sitoutunutta energiaa. Energia on varastoitunut amorfisiksi yhdisteiksi mikä mahdollistaa rakennetta sitovien reaktiotuotteiden syntymisen.

7.2 Tarvittavat ominaisuudet

Teknisten ominaisuuksien kartoittamisessa ei havaittu mitään yksittäistä tekijää, joka estäisi jättemateriaaleista koostuvan melumuurin soveltamisen meluesteeksi. Lopullinen varmuus saadaan kuitenkin vasta testaustulosten perusteella.

Melumuurirakenteen pakkasenkestävyys on edelleen ongelma. RE-menetelmään ei voida soveltaa perinteisiä betonitekniikassa käytettyjä suojahuokostusmenetelmiä, koska massan vesimäärä on erittäin pieni. Samasta syystä myöskään erilaiset vaahtovaihtoehdot eivät tule kyseeseen. Tällä hetkellä lupaavimpana vaihtoehtona on soveltaa muuriin betonisten reunakivien standardia ja todeta säänkestävyys kokeellisesti (Suomen standardoimisliitto SFS 2003). Yhtenä mahdollisuutena on käyttää nk. mikrohuokostusta, jossa huokokset ovat onttoja muovipalloja tai vastaavia. Myös tapaukseen soveltuva kuidutus (luonnonkuidut) voi parantaa kestävyyttä.

7.3 Materiaalien kartoitus ja valinta

Materiaalien kartoituksen perusteella muurirakenteeseen löytyi useita potentiaalisia vaihtoehtoja. Valittujen materiaalien käyttö todettiin ajankohtaiseksi Suomessa, mutta myös maailmalla materiaalien käyttö on kiinnostuksen kohteena (Fernández-Jimenez et al. 2006, Siddique 2010, Babu et al. 1998, Chandra 1996, Nixon 1978). Tutkimukseen valitut materiaalit olivat:

- Lentotuhka
- Rikinpoistotuote
- Yhdyskuntajätteenpolton kuona (pohjatuhka)
- Kierrätysbetoni.

Ainoastaan 30–40 % vuosittain tuotettavasta lentotuhkasta kierrätetään (Fernández-Jimenez et al. 2006). Erityisen haastavaa on yhdyskuntajätteen pohjatuhkan kierrätys. Pohjatuhkalle raportoituja sovelluskohteita on vain muutamia (Li et al. 2004, Lam et al. 2010).

7.4 Materiaalien karakterisointi

Valittujen materiaalien alkuainekoostumus analysoitiin. Alkuaineanalyysin perusteella materiaalien voitiin todeta sisältävän runsaasti hydrataatiotuotteita muodostavia materiaaleja. Lisäksi tutkittiin materiaalien kykyä osallistua potsolaaniseen reaktioon. Lentotuhka reagoi voimakkaimmin kalsiumhydroksidin kanssa. Myös kuonalla havaittiin reaktiivisuutta. Amorfisten silikaattien kanssa paras reaktiivisuus oli rikinpoistotuotteella.

Valittujen materiaalien keskinäinen reaktiivisuus oli hidas ioni-vaihdetussa vedessä, kun reaktionopeutta verrattiin referenssimateriaaleihin. Ongelmaan löytyi ratkaisu alkaliaktivoinnista. Alkaliaktivoinnin avulla materiaalien keskinäinen reaktiivisuus saatiin nostettua referenssimateriaalien tasolle. Alkaliaktivointi lisäsi myös huomattavasti kuonan reaktiivisuutta. Kuonan reaktiivisuus lisääntyi erityisesti 120 h tarkkailujakson loppupuolella indikoiden vaihtoehtoisia reaktiotuotteita. Myöhemmissä elektronimikroskooppitutkimuksissa runsaampi ettringiittityyppisten rakenteiden esiintyminen todennettiin.

7.5 Materiaalien sitoutumisominaisuuksien määrittäminen

Valittujen materiaalien sitoutumisominaisuuden määritettiin lujuuskokein. Viidenkymmenen kuuden vuorokauden (56 d) testausiässä saavutettiin keskimäärin 2 MPa puristuslujuus. Korkein yksittäinen lujuus oli 3,5 MPa. Seitsemän vuorokauden (7 d) iässä lujuus oli keskimäärin puolet 56 d lujuudesta. Tutkimuksissa runkoainemateriaalin muodostivat kierrätetty betoni ja kuona. Selviä eroja näiden kahden runkoainevaihtoehdon välillä ei havaittu. On mahdollista, että eroja muodostuu vasta vuosien kuluessa.

Sitoutumisominaisuuksiensa perusteella valitut materiaalit soveltuvat muurimaiseen rakenteeseen. Jos lujuudenkehitystä halutaan tehostaa, on mahdollista lisätä seokseen hieman portlandsementtiä.

RE-menetelmä ja alkaliaktivoitujen materiaalien käyttö täydensivät hyvin toisiaan. Alkaliaktivoitujen materiaalien yleisenä ongelmana on hidas lujuudenkehitys ilman lämpökäsittelyä. RE-menetelmässä materiaalien lujuudenkehityksellä ei ensimmäisten vuorokausien aikana ole merkitystä. RE-menetelmällä valmistetut rakenteet kantavat oman painonsa välittömästi tiivistyksen jälkeen. RE-menetelmällä valmistettujen rakenteiden lujuus on kuitenkin liian alhainen moniin nykyajan rakennuskohteisiin. Normaalisti RE-seokseen lisätään portlandsementtiä lujuusominaisuuksien parantamiseksi. Laskemien mukaan valmiin rakenteen portlandsementtipitoisuus pinta-alayksikköä kohden vastaa sementtirikasta betonimassaa. Alkaliaktivoitujen materiaalit mahdollistavat lujuudenkehityksen ilman portlandsementtilisäystä, mikä tekee valmistetuista rakenteista huomattavasti ympäristöystävällisempiä ja laskee lopurakenteen kustannuksia.

7.6 Sullomismenetelmän kehittäminen

Kaikki valitut materiaalit eivät soveltuneet sellaisenaan käytettäväksi RE-menetelmässä. RE-menetelmä käyttää hyväkseen hienojakoisten materiaalien pakkautuvuutta. Hienojakoiset materiaalit on mahdollista tiivistää manuaalisesti, mikä on RE-menetelmän ydin. Manuaalisesti sullomalla tiivistyvät materiaalit on yksinkertaista valmistaa ilman mekaanisia välineitä. Jos tiivistettävä seos sisältää karkeita materiaaleja, ei hyvää pakkautuvuutta enää saavuteta manuaalisesti sullomalla. Tällöin tiivistys tulee suorittaa mekaanisilla laitteistoilla, mikä ei enää vastaa RE-menetelmää. Tästä syystä tutkittavat materiaalit rajattiin hienoiimpiin rakeisuuksiin, jotka soveltuvat perinteiseen RE-menetelmään.

RE-menetelmä oli sovellettavissa koekuutioille ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$) ja massiivisille rakenteille. Menetelmän todettiin vaativan paljon käytännön kokemusta. Erittäin haastavaksi osoittautui RE-seosten vesimäärän hallinta. Liian alhainen vesimäärä aiheutti rakenteen hajoamisen muotipurun yhteydessä. Liian korkea vesimäärä taas heikensi valmistetun

rakenteen lujuutta. Kokeellisesti optimaalinen vesimäärä oli kuitenkin mahdollista määrittää. Myös rakenteiden valmistusvaiheen aikana vesimäärä pienentyi. Sullomisen aikana osa käytetystä vedestä haihtui ja/tai imeytyi käytettyihin materiaaleihin tuottaen valmistushetkeä kuivemman rakenteen. Haihtuvan veden hallintaan jouduttiin kiinnittämään erityistä huomiota demonstraatorakenteissa. Veden haihtuminen valmistusvaiheessa vaikutti kriittisesti rakenteen onnistumiseen. Massiivisissa rakenteissa vesimäärän hallinta tulee edelleen haastavammaksi. Massiivisten rakenteiden valmistaminen tulee vaatimaan paljon käytännön kokemusta massan valmistamisesta ja tiivistämisestä. Tästä johtuen massojen vesimäärää tulee pystyä säätämään työmaaolosuhteissa.

7.7 Rakenteiden testaus

Valitut materiaalit mahdollistivat muurirakenteen valmistamisen. Valmistettu muurirakenne osoitti myös reaktiotuotteiden muodostumista välittömästi sullomisen jälkeen.

Väri vaihteluja ei valmistettuihin rakenteisiin saatu aikaan. Kaikkien tutkittujen materiaaliyhdistelmien hallitseva väri oli lentotuhkan aiheuttama. Runkoainetyypillä ei ollut vaikutusta lopullisen rakenteen ulkonäköön. Jotta tuotteille saataisiin suuremmat värierot ja näin elävämmän näköinen pinta, tulee jatkossa kehittää suhteellisen vähän lentotuhkaa sisältävää sideainekombinaatio.

7.8 Ympäristökelpoisuus

Valmistettujen rakenteiden ympäristökelpoisuutta ei voida arvioida käytettävissä olevien tietojen avulla. Jatkossa muurirakenteet tulee hyväksyttää ympäristölupamenettelyn kautta.

8. Jatkotutkimukset

Projektin tulosten perusteella voidaan siirtyä kohti pilot-tason tutkimuksia. Ensin tulee kuitenkin todentaa muurirakenteiden ympäristökelpoisuus liuotuskokeilla ja testata säänkestävyys kokeellisesti. Kummankin kokeen lopputulosta voidaan parantaa lisäämällä rakenteeseen portlandsementtiä. Vaadittava portlandsementinmäärä tulee määrittää kokeellisesti.

Ympäristökelpoiset rakenteet tulisi tutkia pilot-mittakaavassa. Pilot-mittakaava voisi käytännössä tarkoittaa neljää, n. 2 m korkeaa, 0,5 m leveää ja 20 m pitkää muurimaista meluestettä. Ennen muurien rakentamista olisi syytä tutustua paremmin RE-menetelmän käytännön toteuttamiseen tekniikkaan paremmin perehtyneissä maissa. Erityisesti huomiota tulisi kiinnittää rakentamisvaiheen kosteudenhallintaan.

Projekti luo hyvät perusteet jatkaa työtä esimerkiksi EU:n hankeohjelmien puitteissa.

9. Yhteenveto

Projektissa tutkittiin jätemateriaalien soveltuvuutta hydraulisesti sitoutuvan muurirakenteen valmistamiseksi. Muurirakenteen sovelluskohteeksi valittiin melueste

Valmistusmenetelmänä käytettiin materiaalien sullomiseen perustuvaa Rammed Earth (RE)-menetelmää. RE-menetelmä on vanha rakennustekniikka, joka on noussut viime aikoina takaisin suosioon monipuolisen pintarakenteensa ja arkkitehtonisten mahdollisuuksien ansiosta. Kirjallisuusselvityksen perusteella muurimateriaaleiksi valittiin kivihiilenpolton lentotuhka, rikinpoistotuote, kierrätysbetoni ja yhdyskuntajätteen polton kuona.

Alkuaineanalyysin perusteella voitiin olettaa materiaalien sisältävän runsaasti hydrataatiotuotteiksi reagoivia materiaaleja. Lentotuhkan ja kuonan todettiin reagoivan kalsiumhyd-

roksidin kanssa. Rikinpöistotuote reagoi amorfisen piin kanssa. Jättemateriaalien keskinäinen reaktiivisuus jäi kuitenkin referenssimateriaaleista. Alkaliaktivointi (5 % natriumhydroksidi) nosti jättemateriaalien reaktiivisuuden referenssimateriaalien tasolle.

Reaktiivisiksi todettujen materiaaliyhdistelmien puristuslujuudet määritettiin. Keskimääräiseksi puristuslujuudeksi 56 vuorokauden iässä saatiin 2 MPa. Muurimateriaali saavuttaa puolet 56 vuorokauden lujuudestaan 7 vuorokaudessa. Arkkitehtonisesti merkittäviä väri- vaihteluja ei valituilla materiaaleilla pystytty toteuttamaan.

Projektin tulokset luovat hyvät perusteet jatkaa työtä esimerkiksi EU:n hankeohjelmien puitteissa.

Lähdeviitteet

Aubert, J., Husson, B. & Vaquier, A. 2004, "Use of municipal solid waste incineration fly ash in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 6, pp. 957-963.

Babu, M., College, J.W. & Forsythe, R.C. 1998, *Process for producing cement from a flue gas desulfurization process waste product*, Google Patents.

Beckett, C. & Ciano, D. 2014, "Effect of compaction water content on the strength of cement-stabilized rammed earth materials", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 51, no. 5, pp. 583-590.

Berg, E.R. & Neal, J.A. 1998, "Municipal solid waste bottom ash as Portland cement concrete ingredient", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 168-173.

Bertolini, L., Carsana, M., Cassago, D., Curzio, A.Q. & Collepardi, M. 2004, "MSWI ashes as mineral additions in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 10, pp. 1899-1906.

Calderon, J., 2010 Travel to Tibet, Accessed 2 Sep 2015, <http://traveltotibet8908.blogspot.fi/2010/05/potala-palace.html>.

Chandra, S. 1996, *Waste materials used in concrete manufacturing*, Elsevier.

Ciano, D., Jaquin, P. & Walker, P. 2013, "Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth", *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 40-47.

Consoli, N.C., Festugato, L., da Rocha, C.G. & Cruz, R.C. 2013, "Key parameters for strength control of rammed sand-cement mixtures: Influence of types of portland cement", *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 591-597.

Davidovits, J. 1991, "Geopolymers", *Journal of Thermal Analysis*, vol. 37, no. 8, pp. 1633-1656.

Davidovitch, J. 1994, "Properties of geopolymeric cement", *Proceedings first international conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine*, , pp. 131.

Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. & van Deventer, J.S.J. 2007, "Geopolymer technology: the current state of the art", *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 2917-2933.

Duxson, P. & Provis, J.L. 2008, "Designing Precursors for Geopolymer Cements", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 91, no. 12, pp. 3864-3869.

Fernández-Jimenez, A., de la Torre, A.G., Palomo, A., López-Olmo, G., Alonso, M.M. & Aranda, M.A.G. 2006, "Quantitative determination of phases in the alkali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity", *Fuel*, vol. 85, no. 5–6, pp. 625-634.

Ferreira, C., Ribeiro, A. & Ottosen, L. 2003, "Possible applications for municipal solid waste fly ash", *Journal of hazardous materials*, vol. 96, no. 2, pp. 201-216.

Gibbs, M.J., Soyka, P., Conneely, D. & Kruger, M. 2000, "CO₂ emissions from cement production", *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, .

Hamernik, J. & Frantz, G., 1991a, "Physical and chemical properties of municipal solid waste fly ash", *ACI materials journal*, vol. 88, pp. 294.

Hamernik, J. & Frantz, G., 1991b, "Strength of concrete containing municipal solid waste fly ash", *ACI materials journal*, vol. 88, pp. 508.

HBBH Architects / HBBH Architects 2008 Nk'Mip Desert Cultural Centre. Accessed 2 Sep 2015. <http://www.archdaily.com/10629/nkmp-desert-cultural-centre-hbbh-architects>

Huang, C., Yang, W., Ma, H. & Song, Y. 2006, "The potential of recycling and reusing municipal solid waste incinerator ash in Taiwan", *Waste Management*, vol. 26, no. 9, pp. 979-987.

Inspiration Green, Rammed Earth, Accessed 2 Sep 2015, <http://www.inspirationgreen.com/rammed-earth.html>.

Jakob, A., Stucki, S. & Kuhn, P. 1995, "Evaporation of Heavy Metals during the Heat Treatment of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash", *Environmental Science & Technology*, vol. 29, no. 9, pp. 2429-2436.

Jaquin, P., Augarde, C., Gallipoli, D. & Toll, D. 2009, "The strength of unstabilised rammed earth materials.", *Géotechnique*, vol. 59, no. 5, pp. 487-490.

Jaquin, P. & Augarde, C. 2012, *Earth building: history, science and conservation*, Bracknell: IHS BRE Press.

Jayasinghe, C. & Kamaladasa, N. 2007, "Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls", *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 11, pp. 1971-1976.

Khale, D. & Chaudhary, R. 2007, "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review", *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 3, pp. 729-746.

Kikuchi, R. 2001, "Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 31, no. 2, pp. 137-147.

Kim, S. (ed) 1996, *The Principles of Mineralogy*, Woosung press.

- Kriven, W.M., Bell, J.L. & Gordon, M. 2003, "Microstructure and Microchemistry of Fully-Reacted Geopolymers and Geopolymer Matrix Composites", *Advances in Ceramic Matrix Composites IX, Volume 153*, pp. 227-250.
- Lam, C.H.K., Ip, A.W.M., Barford, J.P. & McKay, G. 2010, "Use of Incineration MSW Ash: A Review", *Sustainability*, vol. 2, no. 7, pp. 1943.
- Li, M., Xiang, J., Hu, S., Sun, L., Su, S., Li, P. & Sun, X. 2004, "Characterization of solid residues from municipal solid waste incinerator", *Fuel*, vol. 83, no. 10, pp. 1397-1405.
- Liikennevirasto, 2014 Uusiomateriaaliopas, Helsinki
- Lin, K., Wang, K., Tzeng, B. & Lin, C. 2003, "The reuse of municipal solid waste incinerator fly ash slag as a cement substitute", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 39, no. 4, pp. 315-324.
- Malhotra, V.M 1980, "Fly Ash for Use in Concrete - A Critical Review", *Journal Proceedings*, vol. 77, no. 2.
- Malhotra, V.M. 1999, "Making concrete greener with fly ash", *Concrete International*, vol. 21, no. 5, pp. 61-66.
- Mangialardi, T. 2001, "Sintering of MSW fly ash for reuse as a concrete aggregate", *Journal of hazardous materials*, vol. 87, no. 1, pp. 225-239.
- Moon, D.H., Park, J., Cheong, K.H., Hyun, S., Koutsospyros, A., Park, J. & Ok, Y.S. 2013, "Stabilization of lead and copper contaminated firing range soil using calcined oyster shells and fly ash", *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 35, no. 6, pp. 705-714.
- Morocco holidays guide, 2014, Accessed 2 Sep 2015, <http://www.morocco-holidays-guide.co.uk/ait-benhaddou-morocco/>.
- Nixon, P. 1978, "Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review", *Matériaux et Construction*, vol. 11, no. 5, pp. 371-378.
- Pajukallio, A., Wahlström, M., Alasaarela E., 2011, Maarakentamisen uusiomateriaalit, Ympäristöministeriön raportteja 11. Helsinki
- Pera, J., Coutaz, L., Ambroise, J. & Chababbet, M. 1997, "Use of incinerator bottom ash in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 1, pp. 1-5.
- Rebeiz, K. & Mielich, K. 1995, "Construction Use of Municipal-Solid-Waste Ash", *Journal of Energy Engineering*, vol. 121, no. 1, pp. 2-13.
- Röhler & Zeiger (eds) 2011, *Earth building, practice-planning-design-building*, Beuth Verlag GmbH.
- Salmenperä, H., Moliis, K. & Nevala, S. 2015, "Jättemäärien ennakointi vuoteen 2030", .
- Sassali, J. 2011, *EPS-solumuovien käyttömahdollisuudet melu- ja rakenteissa*.
- Scrivener, K.L. & Nonat, A. 2011, "Hydration of cementitious materials, present and future", *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 7, pp. 651.

- SFS-EN 933-1, 2012, Kiviainesten geometrysten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuu-
den määrittäminen. Seulontamenetelmä. Suomen standardoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 12390-3, 2009, Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslu-
juus. Suomen standardoimisliitto SFS ry.
- Shi, C. & Fernandez-Jimenez, A. 2006, "Stabilization/solidification of hazardous and
radioactive wastes with alkali-activated cements", *Journal of hazardous materials*, vol.
137, no. 3, pp. 1656-1663.
- Shin, D. & Choi, S. 2000, "The combustion of simulated waste particles in a fixed bed",
Combustion and Flame, vol. 121, no. 1–2, pp. 167-180.
- Siddique, R. 2010, "Use of municipal solid waste ash in concrete", *Resources, Conservation
and Recycling*, vol. 55, no. 2, pp. 83-91.
- Song, G., Kim, K., Seo, Y. & Kim, S. 2004, "Characteristics of ashes from different locations
at the MSW incinerator equipped with various air pollution control devices", *Waste
Management*, vol. 24, no. 1, pp. 99-106.
- Suikki, M. 2010, "Tuhkien käyttö stabilointityömaalla korvaavana sideaineena", *Insinöörityö,
Metropolia, Tekniikka ja liikenne*, .
- Suomen standardoimisliitto SFS 2003, "Betoniset reunakivet. Vaatimukset ja testausmene-
telmät SFS-EN 1340+AC", .
- Suryavanshi, A. & Swamy, R.N. 1996, "Stability of Friedel's salt in carbonated concrete
structural elements", *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no. 5, pp. 729-741.
- Taylor, H.F.W. 1997, *Cement chemistry*, 2nd edn, Thomas Telford Publishing, Thomas
Telford Services Ltd., London.
- Thomas, J.J., Jennings, H.M. & Chen, J.J. 2009, "Influence of Nucleation Seeding on the
Hydration Mechanisms of Tricalcium Silicate and Cement", *The Journal of Physical
Chemistry C*, vol. 113, no. 11, pp. 4327-4334.
- Tiehallinto 2009, *Tien melusteiden suunnittelu*, Edita prima Oy, Helsinki.
- Toni, C., Rammed earth, Accessed 2 Sep 2015, <https://www.pinterest.com/anitsia/rammed-earth/>.
- Van Deventer, J.S.J., Provis, J.L. & Duxson, P. 2012, "Technical and commercial progress in
the adoption of geopolymer cement", *Minerals Engineering*, vol. 29, no. 0, pp. 89-104.
- van Deventer, J.J., Provis, J., Duxson, P. & Brice, D. 2010, "Chemical Research and Climate
Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials", *Waste and
Biomass Valorization*, vol. 1, no. 1, pp. 145-155.
- Vehmas, T. & Kronlöf A. 2011, "A study of Early-age Ordinary Portland Cement Hydration
According Autocatalytic Reaction Model", *Proceedings of XXI Nordic Concrete Research
Symposium*, vol. 43, pp. 269.
- Walker, P., Keable, R., Martin, J. & Maniatidis, V. 2005, *Rammed earth: design and
construction guidelines*, BRE Bookshop Watford.

Ympäristöministeriö, 2013, Valtioneuvoston periaatepäättös meluntorjunnasta, Accessed 2 Sep 2015, http://www.ym.fi/fi-fi/maankaytto_ia_rakentaminen/Ohjelmat_ia_strategiat/Valtioneuvoston_periaatepaatos_meluntorjunnasta.