



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KYÖSTI RAJANIEMI
TEOLLISTEN SIVUTUOTTEIDEN STABILOINTI GEOPOLYMER-
REJÄ KÄYTTÄEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa 3. kesä-
kuuta 2015.

TIIVISTELMÄ

Kyösti Rajaniemi: Teollisten sivutuotteiden stabilointi geopolymeerejä käyttäen
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 38 sivua, 11 liitesivua
Marraskuu 2015
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Liikenne ja kuljetusjärjestelmät
Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja

Avainsanat: stabilointi, geopolymeeri, jarosiitti, masuunikuona, lentotuhka, sementti, rikastushiekka, viherlipeäsakka

Työn keskeisenä tarkoituksena oli vertailla erilaisia vaihtoehtoisia sideaineita, geopolymeerejä, muutaman teollisuuden sivutuotteen stabiloinnissa. Tarkasteltavia sivutuotteita tässä tutkimuksessa ovat viherlipeäsakka, jarosiitti ja rikastushiekka. Tutkimuksessa vertailusideaineena käytettiin Finnsementti Oy:n valmistamaa Plus-sementtiä ja geopolymeereinä masuunikuonajauhetta, lentotuhkaa ja näiden 50/50 seosta. Metakaoliini rajoitettiin pois työstä sen korkeiden kustannusten vuoksi. Tässä työssä on selvitetty mihin ja miten stabilointia käytetään ja kerrottu tutkittavien aineiden synnystä ja niiden vaikutuksesta yritysten toimintaan. Tutkittavat menetelmät valittiin yleisesti betoniteollisuuden ja stabiloinnin käytössä olevista standardoiduista menetelmistä. Näiden menetelmien valinnasta johtuen tehty työ on vertailukelpoinen aikaisemmin ja myöhemmin samoilla standardeilla tehtyihin tutkimuksiin.

Tämän työn tuloksena saatiin testien avulla osoitettua geopolymeerien toimivuus ja toimimattomuus tutkittavien teollisuuden sivutuotteiden stabiloinnissa. Tässä tutkimuksessa käytetty lentotuhka ei soveltunut ollenkaan stabilointiin. Yksikään lentotuhkaa sisältänyt massa ei muodostanut lujuutta juuri lainkaan. Myös jarosiitti vaikutti lujuutta heikentävästi eikä liukoisuustesteihin saatu yhtään massaa, jossa oli käytetty jarosiittia. Ainoat geopolymeerimassat, jotka saatiin liukoisuustesteihin, olivat masuunikuonan ja rikastushiekan sekä masuunikuonan ja viherlipeäsakan avulla valmistetut massat. Rikastushiekka läpäisi standardin mukaisen yksivaiheisen liukoisuustestin, mutta ei viisivaiheista liukoisuustestiä. Siinäkin ylityksiä oli kuitenkin vain muutama. Viherlipeäsakka osoittautui parhaaksi testitulosten perusteella, koska sen liukoisuudet sekä yksivaiheisessa että viisivaiheisessa uutossa olivat määrittämissä arvojen alapuolella.

Tutkimuksia geopolymeerien ja teollisuuden sivutuotteiden hyötykäytön lisäämiseksi kannattaa jatkaa. Viherlipeäsakan soveltuvuutta maarakentamiseen kannattaa tutkia rouhimisen suhteen sekä optimoimalla massan sideainekäyttöä. Näillä tutkimuksilla on mahdollista vähentää kustannuksia ja ympäristön neitseellisten raaka-aineiden käyttöä maarakentamisessa.

ABSTRACT

Kyösti Rajaniemi: Stabilization of industrial by-products by using geopolymers
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 38 pages, 11 appendix pages
November 2015
Master's Degree Programme in Construction engineering
Major: Traffic and transportation systems
Examiner: Professor Pauli Kolisoja

Keywords: geopolymer, stabilization, jarosite, GGBFS, fly ash, ore-dressing sand, cement, green liquor sludge.

The main purpose of the work was to compare different adhesives, geopolymers, in stabilization along with some industrial by-products. These by-products are green lime sludge, jarosite and ore-dressing sand. The comparison adhesive was plus-cement which is produced by Finnsementti Oy. Geopolymers, which were used in this study, were great granulated blast furnace slag (GGBFS), fly ash and their 50/50 weight percent mixture. Metakaolin was limited out of this study due to the high cost of work. In this work has been clarified where and how stabilization is used and also told about the origin of the substances and their impact on the companies. Test methods were selected from concrete and stabilization industries. With the help of these methods this work is comparable to past and later researches with the same standards.

As a result of this work was indicated through tests that geopolymer functionality and inactivity subjects of industrial by-product stabilization. The fly ash, which was used in this investigation, was not suited at all for stabilization. None of the fly ash containing the concrete mass formed any strength at all. Also jarosite was not forming any strength. That is the reason why there were only GGBFS based concrete mass in leaching tests. Tests were made blast-furnace slag and ore-dressing sand and blast furnace slag and green liquor sludge masses. Ore-dressing sand passed the standard one-step leaching test according, but not the five-step leaching test. In that test there were only a few crossings. Green liquor sludge mass turned out to be the best in one-step and five-step tests. All measured values were under the limits.

There is an increasing number of studies in geopolymers and industrial by products. It is also suitable to continue these studies. The green liquor sludge showed its suitability to land construction in this study. It should be studied further on specially winter conditions and optimization of the mass. These studies have the potential to reduce costs and use of the virgin raw materials in earth construction.

ALKUSANAT

Ensimmäisen diplomityöni jälkeen en olisi uskonut tekeväni vielä toista. Monipuolisen työkokemukseni ja koulutukseni ansiosta tämän tekeminen oli suhteellisen vaivatonta. Tämä työ toteutettiin lopputyönä rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkintooni. Eri-tyiset kiitokseni tahdon osoittaa professori Pauli Kolisojalle työni ohjaamisesta, valvomisesta ja parannusehdotuksista sekä professori Ulla Lassille tutkimustilojen ja -laitteiden järjestämisestä sekä kemiallisten analyysien mahdollistamisesta. Kajaanin ammattikorkeakoulu ja sieltä Kimmo Kemppainen ja Minna Sarkkinen ansaitsevat kiitokseni. Heidän apunsa oli erittäin tärkeä betonilaboratoriotöitä tehdessäni. Oulun yliopiston soveltavan kemian yksikkö ja erityisesti Tero Luukkainen ja Sari Tuomikoski ansaitsevat kiitokseni avusta, jota hieltä sain. Kiitokset myös Pyhäsalmen kaivokselle, Oulun StoraEnsolle ja Harjavallan Norilsk Nickelille tutkittavien materiaalien toimittamisesta. Oulun ammattikorkeakoulun betonilaboratoriota haluan kiittää muottien lainaamisesta betonitestauksia varten.

Erityisen kiitoksen tahdon osoittaa Rakennustuotteiden Laatu Säätiölle, joka auttoi minua taloudellisesti ja mahdollisti työn loppuun saattamisen. Lämpimät kiitokset myös kaikille ystäväilleni erityisesti Jukalle, Mikolle ja Villelle, jotka huolehtivat mielenterveydestäni hakemalla minut välillä ”iltalenkille”, sekä langolleni Tapiolle, lastenhoitoavusta. Vanhemmilleni erityiset kiitokset kaikesta heiltä saamastamme tuesta. Lapsilleni kiitokset ymmärtävyydestä ja ilosta, jonka he tuovat elämäni. Viimeiseksi tahdon kiittää vaimoani pyyteettömästä tuesta ja rakkaudesta minua kohtaan.

Oulussa, 8.11.2015

Kyösti Rajaniemi

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	I
ABSTRACT	II
ALKUSANAT	III
SISÄLLYSLUETTELO.....	IV
KUVALUETTELO.....	VI
TAULUKKOLUETTELO	VII
LYHENTEET JA MERKINNÄT	VIII
1. JOHDANTO	1
1.1 Työn tarve ja tausta	1
1.2 Työn toteutustapa ja rajaukset.....	1
1.3 Työn tavoitteet.....	2
2. STABILOINTI POHJANVAHVISTUSMENETELMÄNÄ.....	3
2.1 Stabilointi	3
2.1.1 Massastabilointi	3
2.1.2 Pilaristabilointi	4
2.2 Viranomaisrajoitukset sivutuotteille ja niiden käytölle.....	6
2.2.1 Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa.....	7
2.2.2 Jätelaki ja –asetus	8
2.2.3 Ympäristönsuojelulaki ja valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta	8
2.2.4 Muut viranomaiset asettamat rajoitukset jätteille	8
3. GEOPOLYMEERIT STABILOINNIN SIDEAINEINA	10
3.1 Mikä on geopolymeeri?.....	10
3.2 Viimeaikaiset geopolymeeritutkimukset.....	11
4. KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT JA KOEMENETELMÄT.....	12
4.1 Käytettävät geopolymeerit sekä vertailusementti	12
4.1.1 Plus-sementti	12
4.1.2 Masuunikuonajauhe	13
4.1.3 Lentotuhka.....	14
4.2 Stabiloitavat aineet	15
4.2.1 Viherlipeäsakka.....	15
4.2.2 Jarosiitti	16
4.2.3 Rikastushiekka	17
4.3 Koemenetelmät.....	18
4.3.1 Puristuslujuus	18
4.3.2 Liukoisuuskoe	19
4.3.3 Sekventiaallinen viisivaiheinen uutto.....	19
4.4 Taloudellinen tarkastelu	21
5. KOETULOKSET	22

5.1	Puristuslujuus	22
5.2	Standardin mukainen liukoisuuskoe.....	24
5.3	Viisivaiheinen sekventiaalinen uutto	25
5.3.1	Ensimmäinen vaihe - heikko happosade	25
5.3.2	Toinen vaihe – happoaltistus.....	26
5.3.3	Kolmas vaihe – helposti pelkistyvät fraktiot.....	27
5.3.4	Neljäs vaihe – hapettavien olosuhteiden vaikutus biosaatavuuteen.....	28
5.3.5	Viides vaihe – metallien kokonaispitoisuudet	29
6.	TULOSTEN ANALYSOINTI.....	30
6.1	Puristuslujuus	30
6.2	Liukoisuustestit	31
6.3	Taloudellinen tarkastelu	32
7.	YHTEENVETO JA JATKOTOIMENPITEET	33
	LÄHTEET	35
	LIITTEET	39

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Massastabiloinnin periaatekuva [4].....</i>	<i>4</i>
Kuva 2.	<i>Pilaristabiloinnin periaatekuva [6].....</i>	<i>5</i>
Kuva 3.	<i>Esimerkkejä pilaristabiloinnin sovelluskohteista [7].....</i>	<i>6</i>
Kuva 4.	<i>Esimerkkejä pilaristabiloinnin sijoittelusta maastoon [7].....</i>	<i>6</i>
Kuva 5.	<i>Na-polysialaatti polymeerin oletettu rakenne [21]</i>	<i>10</i>
Kuva 6.	<i>Masuunikuonan valmistus yksinkertaisena kaaviokuvana</i>	<i>13</i>
Kuva 7.	<i>Kiertoleijukattilan toimintaperiaate[31].....</i>	<i>14</i>
Kuva 8.	<i>Oulun StoraEnson kaustinoitiprosessikaavio[34].....</i>	<i>16</i>
Kuva 9.	<i>Jarosiitin eli rautasakan syntyminen [35].....</i>	<i>16</i>
Kuva 10.	<i>Pyhäsalmen rikastamon prosessikaavio[36].....</i>	<i>17</i>
Kuva 11.	<i>Koekappaleen mitat standardissa[37]</i>	<i>18</i>
Kuva 12.	<i>Viisivaiheisen uuton vaiheet [42].....</i>	<i>20</i>
Kuva 13.	<i>Massat ennen sekoitusta ja veden lisäämistä</i>	<i>22</i>
Kuva 14.	<i>Puristuslujuusmittalaite.....</i>	<i>23</i>
Kuva 15.	<i>Näytteiden kuivattamiseen käytetty uuni</i>	<i>24</i>
Kuva 16.	<i>Liukoisuustesteissä käytetty suodatinlaitteisto</i>	<i>25</i>
Kuva 17.	<i>Punertava suodos neljännessä vaiheessa</i>	<i>28</i>

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1.</i>	<i>Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa mukaiset raja-arvot betonimurskeelle[8]</i>	<i>7</i>
<i>Taulukko 2.</i>	<i>Suomessa sallitut sementit ja niiden koostumusvaatimukset [27].....</i>	<i>12</i>
<i>Taulukko 3.</i>	<i>Masuunikuonajauheen kemiallinen koostumus</i>	<i>14</i>
<i>Taulukko 4.</i>	<i>Viherlipeäsakan eräiden aineiden pitoisuudet</i>	<i>15</i>
<i>Taulukko 5.</i>	<i>Jarosiitin eräiden aineiden keskimääräiset pitoisuudet.....</i>	<i>17</i>
<i>Taulukko 6.</i>	<i>Rikastushiekan osalta eräiden aineiden keskimääräinen vuosikoostumus.....</i>	<i>17</i>
<i>Taulukko 7.</i>	<i>Massatiedot sekä 28 vrk puristuslujuudet</i>	<i>23</i>
<i>Taulukko 8.</i>	<i>Yksivaiheisen liukoisuuskokeen tulokset.....</i>	<i>24</i>
<i>Taulukko 9.</i>	<i>Tulokset heikon happosateen simuloinnista</i>	<i>26</i>
<i>Taulukko 10.</i>	<i>Tulokset happoaltistuksen simuloinnista.....</i>	<i>26</i>
<i>Taulukko 11.</i>	<i>Tulokset helposti pelkistyvistä fraktioista.....</i>	<i>27</i>
<i>Taulukko 12.</i>	<i>Tulokset hapettavien olosuhteiden vaikutuksesta biosaatavuuteen.....</i>	<i>28</i>
<i>Taulukko 13.</i>	<i>Kokonaismetallipitoisuudet</i>	<i>29</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Al	alumiini
Al ₂ O ₃	alumiinioksidi
As	arseeni
Ba	barium
BaSO ₄	bariumsulffaatti
Ca	kalsium
CaO	kalsiumoksidi
Cd	kadmium
CH ₃ COOH	etikkahappo
CH ₃ COONH ₃	ammoniumasetaatti
Co	koboltti
Cr	kromi
Cu	kupari
Fe	rauta
H ₂ O	vesi
H ₂ O ₂	vetyperoksidi
H ₂ SO ₄	riikkihappo
H ₃ BO ₃	boorihappo
HCl	suolahappo
HF	vetyfluoridi
Hg	elohopea
HNO ₃	typpihappo
K ₂ O	kaliumoksidi
MgO	magnesiumoksidi
Mo	molybdeeni
Na ₂ O	natriumoksidi
NH ₃ OH – HCl	hydroksyyliammoniumkloridi
Ni	nikkeli
Pb	lyijy
S	rikki
Sb	antimoni
SiO ₂	piidioksidi
SO ₂	rikkidioksidi
Ti	titaani
UUMA-hanke	uusiutuvien materiaalien käyttö maarakentamisessa - hanke
V	vanadiini
Zn	sinkki

1. JOHDANTO

1.1 Työn tarve ja tausta

Nykyisin maaperän kestävyyttä parannetaan monella eri tavalla. Näistä yleisimpiä ovat paalutukset ja stabiloinnit, mutta myös massanvaihtoja tehdään. Stabiloinnilla tarkoitetaan maan kestävyuden parantamista lisäämällä olemassa olevaan huokoiseen maaperään kestävyyttä lisääviä aineita esimerkiksi sementtiä, lentotuhkaa tai muita sideaineita. Stabilointia tehdään mm. massastabilointina, jolloin tietty massa sidotaan kokonaisuudessaan kestäväksi, ja pilaristabilointina, jossa koneellisesti muodostetaan pilarimainen vahvistetun maan vyöhyke.

Nykyinen lainsäädäntö määrittelee miten yritysten tulee kierrättää tai uusiokäyttää tuottamiaan materiaaleja. Yleensä päätuotteen, esimerkiksi raaka-raudan tai paperin valmistuksen, yhteydessä tulee sivutuotteita, joille kaikille ei ole kunnollista käyttöä, vaan ne läjitetään tehtaiden omille kaatopaikoille. Viranomaiset maksut läjitettävää kaatopaikalle menevää tonnia kohden tällä hetkellä 55 euroon tonnilta ja hallitus on esittänyt sen korottamista 70 euroon tonnilta vuoden 2016 alusta [1]. Läjityskustannukset aiheuttavat merkittäviä kustannuksia teollisuudelle ja se kehittää koko ajan tuotantoaan vähentääkseen kustannuksia sekä ympäristölle aiheuttamaansa kuormitusta.

Tässä työssä tutkitaan muutamia teollisuuden sivutuotteita, joiden hyödyntäminen on suhteellisen vähäistä tällä hetkellä. Nämä aineet ovat nikkelin tuotannosta syntyvä jarosiitti, sinkki- ja kuparikaivoksen rikastushiekka sekä sellutehtaan viherlipesäkkeä. Kyseisten aineiden hyötykäyttö on suhteellisen pientä ja aineiden läjittämisestä kaatopaikoille aiheutuu yrityksille Suomessa miljoonien eurojen kustannukset vuosittain.

1.2 Työn toteutustapa ja rajaukset

Luvuissa kaksi ja kolme selvennetään tarkemmin stabilointia sekä joitakin geopolymeereihin liittyviä tutkimuksia. Näissä osiossa kerrotaan lyhyesti kaksi keskeisintä stabilointimentelmää, massastabilointi ja pilaristabilointi, sekä tutustutaan aikaisempiin tutkimuksiin stabiloitavista aineista sekä selvitetään käsite geopolymeeri ja kerrotaan viimeaikaisista tutkimuksista geopolymeerien osalta. Tutkimukset rajataan käsittämään Suomen olosuhteita vastaaviin aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin sekä vastaavien aineiden tutkimuksiin stabiloinnissa. Kaikkia tutkimuksia ei voida ottaa mukaan tarkasteluun niiden suuren lukumäärän vuoksi. Luvussa 4 käydään läpi tutkittavat aineet, niiden muodostuminen sekä selitetään tutkimuksessa käytettävät koemenetelmät. Työn lopussa käsitellään ja analysoidaan tulokset. Lopuksi tehdään perustellut johtopäätökset saavutettujen tulosten perusteella sekä ehdotetaan jatkotoimenpiteitä tutkimusaiheiksi.

1.3 Työn tavoitteet

Tämän työn tarkoituksena on selvittää miten yllä mainitut teollisuuden sivutuotteet saadaan stabiloitua sementin korvikkeilla, jotka tulevat teollisuuden sivutuotteista tai jätteistä. Näitä kutsutaan geopolymeereiksi. Kyseisiä sideaineita ovat lentotuhka, jota syntyy esimerkiksi energiantuotannon sivutuotteena, ja masuunikuonajauhe, jota valmistetaan raaka raudan valmistuksen yhteydessä syntyvästä masuunihiekasta. Työssä kokeillaan myös geopolymeerien vaikutusta stabiloitavuuteen. Tavoitteena on saada selkeä kuva tutkittavien sivutuotteiden stabiloitavuudesta ja niiden mahdollisesta hyötykäytöstä stabiloinnissa esimerkiksi väylä- tai pohjarakentamisessa.

2. STABILOINTI POHJANVAHVISTUSMENETELMÄNÄ

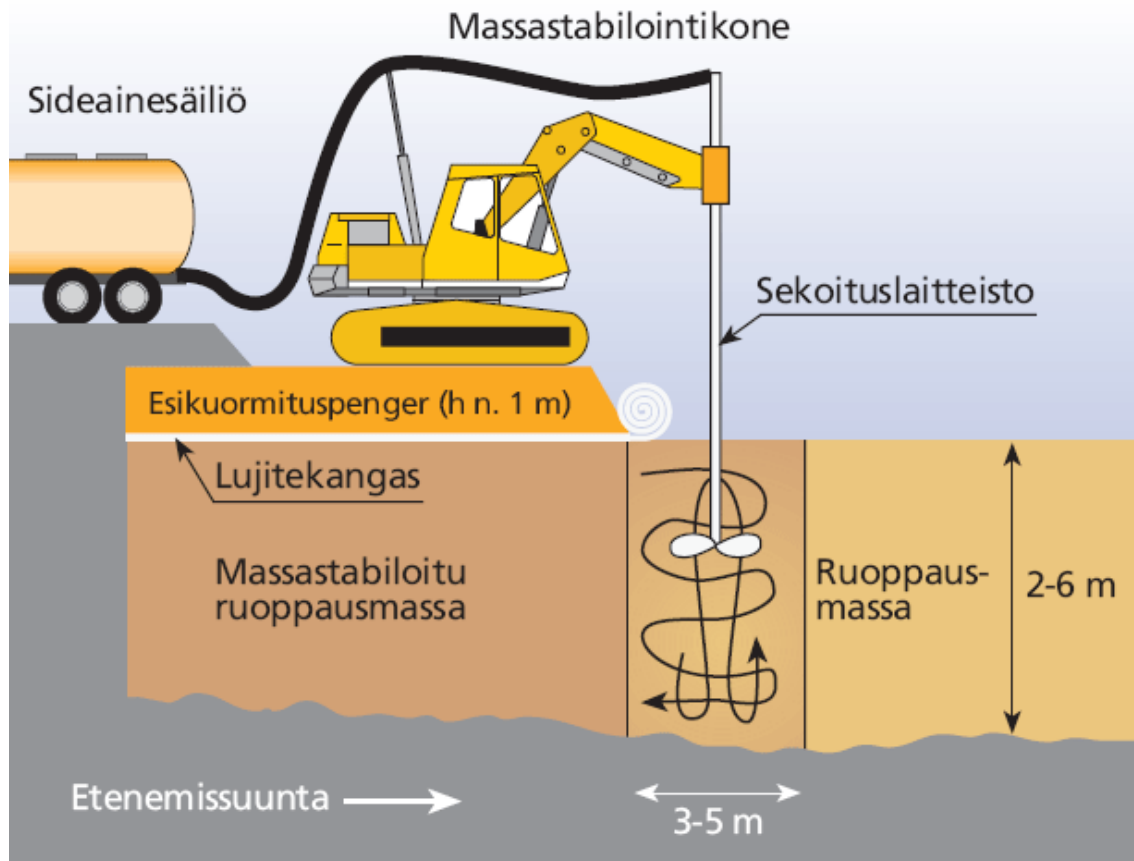
2.1 Stabilointi

Monet varhaisista kulttuureista jo tuhansia vuosia sitten käyttivät jonkin asteista maanparannustekniikkaa esimerkiksi kiinalaiset, roomalaiset ja inkat. Heidän tekniikkansa perustui erilaisten materiaalien käyttöön. Roomalaisten noin 2000 vuotta sitten rakentamia teitä on vieläkin olemassa. Nykyaikaisen stabiloinnin aikakauden voidaan katsoa alkaneeksi joskus 1960 / 1970 luvulla. [2]. Tällöin piti löytää ratkaisuja rakentaa teitä myös hiukan huonommalle maaperälle. Seuraavaksi on esitelty kaksi stabilointi tapaa, massastabilointi ja pilaristabilointi. Olemassa on myös muita menetelmiä, kuten kerrostabilointimenetelmät (bitumistabilointi, sekoitusjyrsintä ja komposiittistabilointi). Nämä menetelmät rajattiin pois tästä työstä.

Stabilointia käytetään pääasiallisesti maan lujuuden ja painumaominaisuuksien parantamiseen. Tällöin stabilointi suoritetaan tehtyjen maaperätutkimuksien ja ennakkokokeiden perusteella. Stabiloinnin avulla heikosti kantava maa-alue saadaan hyötykäyttöön esimerkiksi väylärakentamiseen. Stabiloinnin etuna on nopeus ja edullisuus verrattuna massanvaihtoon. Toinen tärkeä sovelluskohde on pilaantuneiden maiden stabilointi. Tällä tarkoitetaan ympäristölle vaarallisten aineiden stabilointia sellaiseen muotoon, jossa stabiloituvan maan sisältämät haitalliset aineet eivät liukene ympäristöön. Tämän työn pääasiallinen tutkimuskohde on pilaantuneiden maiden stabilointi ja vasta toissijaisesti stabiloitavien aineiden soveltuvuus maan lujuuden parantamiseen esimerkiksi väylärakentamisessa.

2.1.1 Massastabilointi

Massastabiloinnilla tarkoitetaan menetelmää, jolla pehmeään maahan sekoitetaan sideainetta tällaiseen työhön suunnitellulla erityislaitteella. Sekoitus tapahtuu pysty- ja vaakasuunnassa, jolloin maahan syntyy tasaisesti lujittunut laattamainen vyöhyke, jonka varaan maarakenteet voidaan perustaa. [3]. Massastabiloinnin avulla maamassanvaihtoja ei tarvita. Tällöin säästetään aikaa ja rahaa. Menetelmä soveltuu erinomaisesti suurten maa-alueiden käyttöönottoon. [4]. Yksi suurimmista ja tunnetuimmista massastabilointikohteista on Vuosaaren satama. Kuvassa 1 on esitetty massastabiloinnin periaate [4].



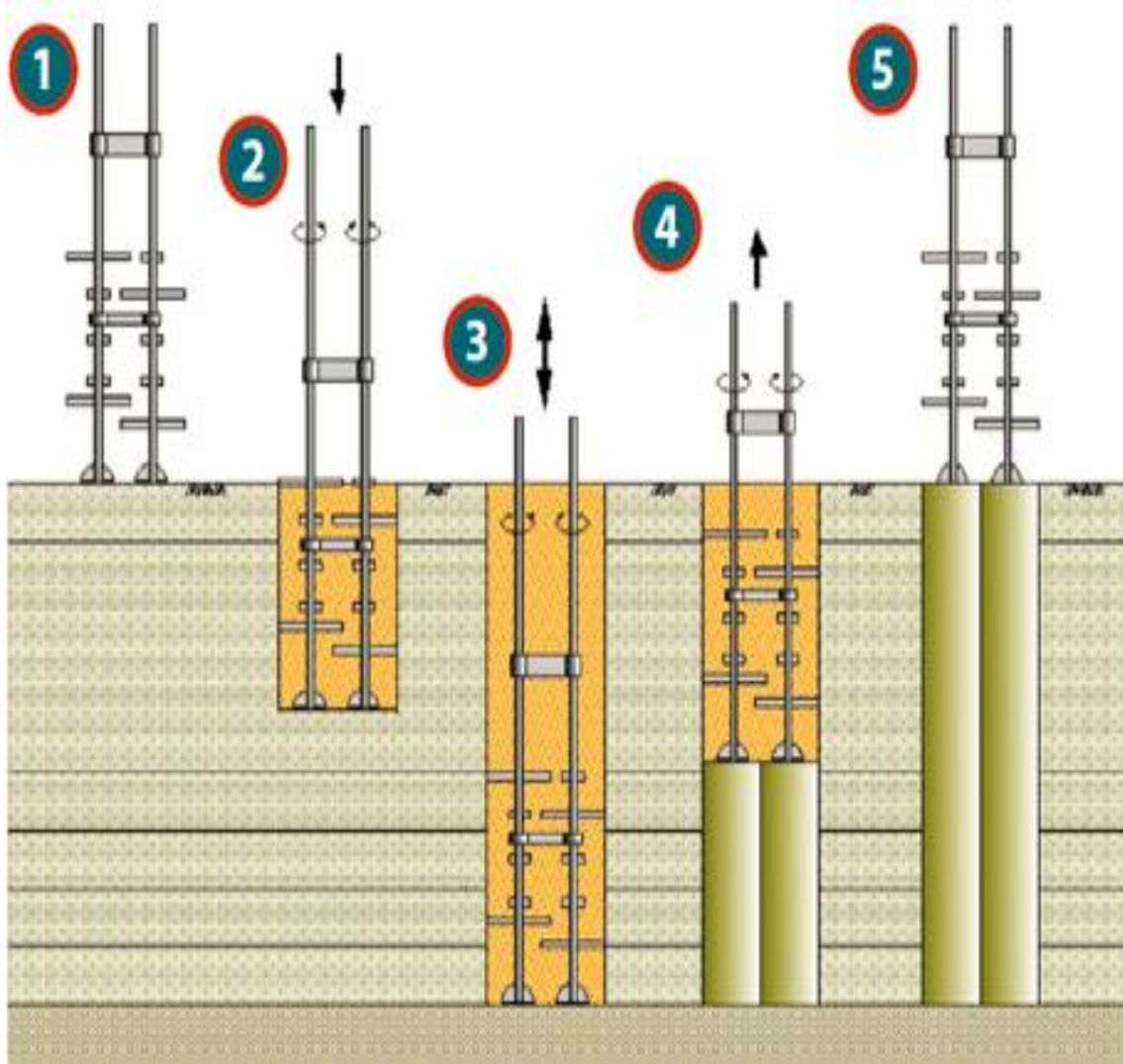
Kuva 1. Massastabiloinnin periaatekuva [4]

2.1.2 Pilaristabilointi

Pilaristabiloinnissa eli syvästabiloinnissa stabilointikoneen kärki upotetaan pilarin suunnitellun alapään tasolle. Sideaineensyöttö ja sekoittaminen tapahtuvat, kun kärkeä aletaan nostaa ylöspäin. [5] Suomessa on käytössä kuivamenetelmä [5], jossa maaperään ei lisätä vettä vaan maaperän oman kosteuden oletetaan sitoutuvan sideaineen kanssa. Pilarin halkaisija kuivamenetelmässä on yleensä noin 500 – 800 mm. Yleisimmät pilarikoot kuivamenetelmässä ovat 600 – 700 mm. [5].

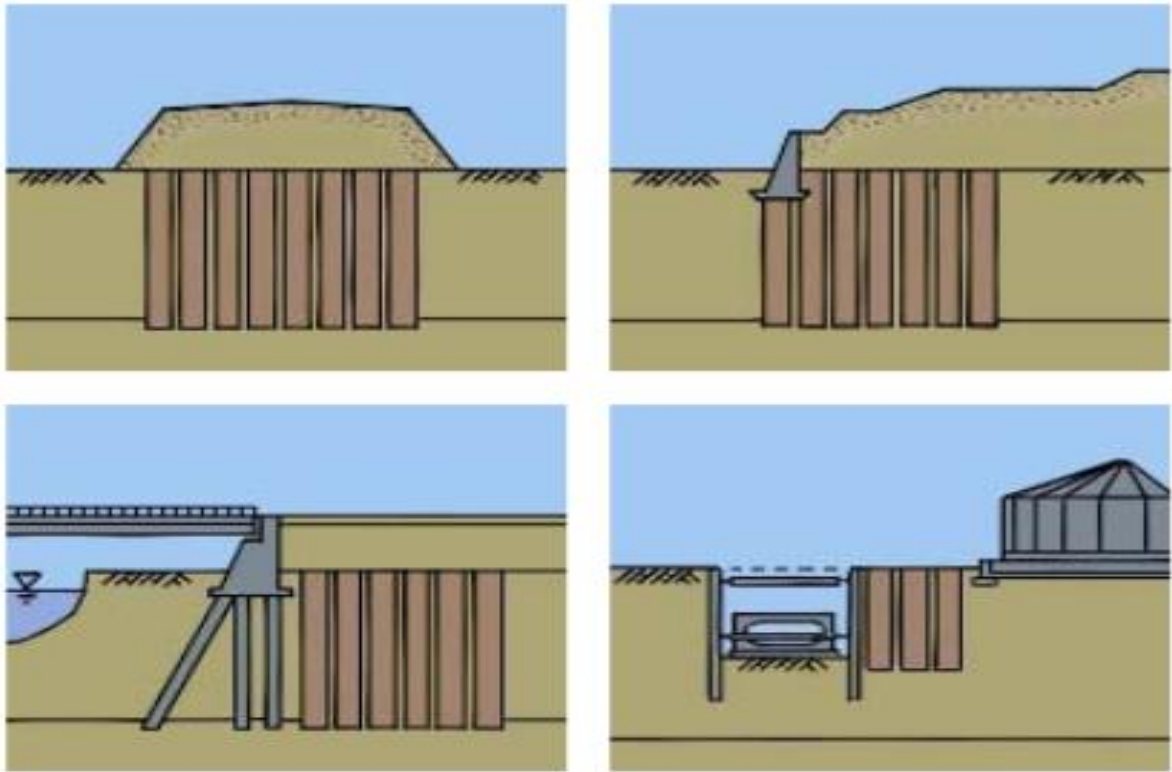
Pilaristabiloinnissa stabilointia tehdään huomattavasti syvemmälle kuin massastabiloinnissa. Kun massastabiloinnilla ylletään maksimissaan 8 metrin syvyyteen kannattavasti, voidaan pilaristabiloinnilla stabiloida maata jopa 24 metrin syvyyteen [5]. Yleensä pilaristabilointi ulottuu noin 18 – 20 metrin syvyyteen [5]. Pilaristabiloinnissa oleellisia asioita ovat sideaineen syötön tasaisuus ja hallittavuus, riittävän tehokas sekoitustyö sekä paineilman käytön minimointi. Sideaineen syöttömäärää pystytään säätämään syvyysuunnassa ja tätä mahdollisuutta käytetään yhä useammin. [5]. Alla olevassa kuvassa 2 esitetään Japanissa käytetyn pilaristabiloinnin periaate. Aluksi sekoitin, läpimitaltaan 1 m - 1,5 m, kohdennetaan oikeaan kohtaan. Tämä voi tapahtua merkittyjen paalujen tai 3D-ohjauksen avulla. Vaiheessa 2 lasketaan kärki haluttuun syvyyteen samalla sekoittaen sementtiä maan joukkoon. Kuvan keskellä kohdassa kolme aloitetaan sekoitustyö ja sementin syöttö sekä kohdassa 4 nostetaan kärkeä ylöspäin, jolloin muodos-

tuu kaksi stabiloitua pilaria. Kohdassa 5 näkyy valmiiksi stabiloidut pilarit. Huomioitavaa kahden terän mallissa on, että terien pyörimissuunta vaihdetaan pohjalla ja terät pyörivät aina erisuuntiin toisiinsa nähden. [6]. Suomalaisessa menetelmässä on yleisesti käytössä vain yksi terä ja sementin syöttö aloitetaan vasta pohjalla. Pilarien läpimitta Suomessa on huomattavasti japanilaista pilaria pienempi

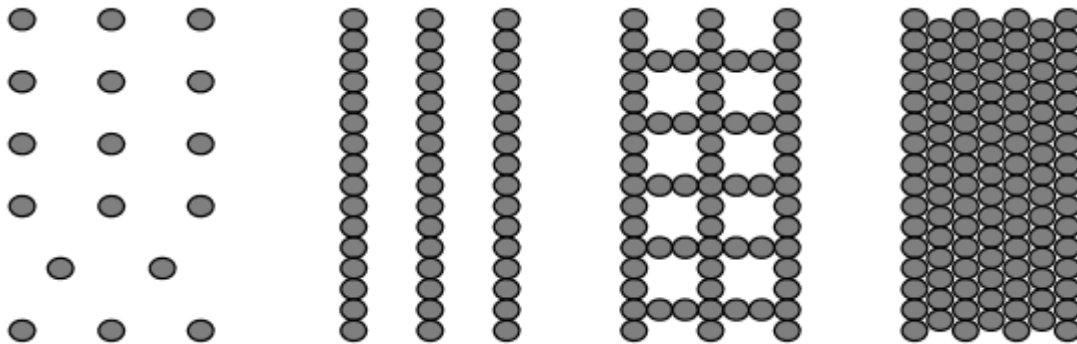


Kuva 2. Pilaristabiloinnin periaatekuva [6]

Kuvassa 3 on esitetty esimerkkejä pilaristabiloinnin sovelluskohteista. Pilaristabilointia käytetään yleisesti maan kestävyuden parantamiseen, värinän vaimentamiseen sekä erilaisten reunojen tukemiseen. Kuvassa 4 on esimerkkejä pilareiden sijoittelusta stabiloitavalla alueella. Pilareiden määrä riippuu stabiloinnin tarkoituksesta. Mitä raskaampi käyttö ja suuremmat kuormat alueelle kohdistuu, sitä suurempi määrä pilareita tarvitaan. Pilareiden sijoittelulle ei ole mitään rajoituksia, mutta niiden suunnittelu on tehtävä huolella, jotta rakenteen kantavuusominaisuudet tulevat riittävän hyviksi.



Kuva 3. Esimerkkejä pilaristabiloinnin sovelluskohteista [7]



Kuva 4. Esimerkkejä pilaristabiloinnin sijoittelusta maastoon [7]

2.2 Viranomaisrajoitukset sivutuotteille ja niiden käytölle

Sivutuotteiden hyödyntämistä säädelään monella eri lailla, asetuksella sekä muilla viranomais määräyksillä. Näitä ovat esimerkiksi valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa [8], jätelaki [10] ja -asetus [11], ympäristönsuojelulaki [12] ja valtioneuvoston asetus ympäristön suojelusta [13], valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista [14], jäteverolaki [1], lannoitevalmistelaki [15], valtioneuvoston asetus kaatopaikoista [16], valtioneuvoston päätös kaatopaikoista [17], sekä valtakunnallinen [18] ja paikallinen [19] jättesuunnitelmat. Tässä työssä lähtökohdaksi otettiin valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa ja erityisesti siinä

määritellyt liukoisuusarvot. Kyseisessä asetuksessa on määritelty raja-arvoja betonille, joka soveltuu käytettäväksi tässä työssä tehtäviin tutkimuksiin.

Työssä on käsitelty myös jätelakia ja -asetusta sekä ympäristönsuojelulakia ja -asetusta. Nämä lait yhdessä antavat Suomen jätehuollolle ja ympäristönsuojelulle perustan, joita täydentämässä ovat muut viranomaismääräykset, lait ja asetukset.

2.2.1 Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa

Asetuksen [8] tarkoituksena on parantaa eräiden jätteiden hyödyntämistä maarakentamisessa. Asetuksessa annetaan myös tavat missä ja miten kyseisiä aineita voidaan hyödyntää. Vaikka asetus määrittelee siihen sovellettavat sivutuotteet, tämä asetus on otettu tässä työssä tärkeimmäksi lähtökohdaksi ja liukoisuustuloksia verrataan tämän asetuksen liitteenä 1 olevaan raja-arvoihin. Nämä raja-arvot ovat esitetty taulukossa 1. Työhön valittiin betonimurskeelle annetut raja-arvot, koska tutkittavat aineet ovat sementin korvikkeita ja niiden käyttäytyminen on betonille ominaista. Asetuksen liukoisuusraja-arvoja voidaan verrata standardin SFS – EN 12457-2 [9] mukaisella testillä tehtyihin tuloksiin.

Taulukko 1. *Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa mukaiset raja-arvot betonimurskeelle[8]*

Haitallinen aine	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta Pitoisuus	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta Liukoisuus (L/S = 10 l/kg)	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta Liukoisuus (L/S = 10 l/kg)
		Peitetty rakenne	Päällystetty rakenne
PCB ²	1		
PAH ³	20		
Mineraaliöljyt ⁴	500		
DOC ⁵		500	500
Antimoni (Sb)		0,06	0,06
Arseeni (As)	50	0,5	0,5
Barium (Ba)		20	20
Kadmium (Cd)	10	0,02	0,02
Kromi (Cr)	400	0,5	0,5
Kupari (Cu)	400	2	2
Elohopea (Hg)		0,01	0,01
Lyijy (Pb)	300	0,5	0,5
Molybdeeni (Mo)		0,5	0,5
Nikkeli (Ni)		0,4	0,4
Vanadiini (V)		2	2
Sinkki (Zn)	700	4	4
Seleeni (Se)		0,1	0,1
Fluoridi (F ⁻)		10	50
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)		1 000	6 000
Kloridi (Cl ⁻)		800	800

2.2.2 Jätelaki ja -asetus

Jätelain tarkoituksena on ehkäistä jätteistä ja jätehuollosta aiheutuvaa vaaraa ja haittaa terveydelle ja ympäristölle sekä vähentää jätteen määrää ja haitallisuutta, edistää luonnonvarojen kestävästä käyttöä, varmistaa toimiva jätehuolto ja ehkäistä roskaantumista. [10]. Jäteasetuksessa [11] määritellään tarkemmin miten jätteiden käsittelyä tulee hoitaa. Asetus ja sen liitteet kertovat myös erilaisten jätteiden vaarallisuudesta sekä niiden uudelleen käyttämisestä.

Työssä tutkittavat teollisuuden sivutuotteiden tulee olla sellaisia, etteivät ne aiheuta vaaraa ihmisille, eläimille ja ympäristölle. Jätelaissa ja -asetuksessa pyritään vähentämään jätteiden määrää kaatopaikoilla, mutta samalla rajoittavat erilaisia päästöjä ympäristöön. Työn kannalta näissä viranomaismääräyksissä ei ole 2.2.1 kohdassa esitetystä taulukosta poikkeavia arvoja.

2.2.3 Ympäristönsuojelulaki ja valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta

Näiden tarkoituksena on suojata luontoa teollisuuden aiheuttamilta päästöiltä. Ympäristönsuojelulain [12] pääasiallisena tarkoituksena on:

- 1) ehkäistä ympäristön pilaantumista ja sen vaaraa, ehkäistä ja vähentää päästöjä sekä poistaa pilaantumisesta aiheutuvia haittoja ja torjua ympäristövahinkoja;
- 2) turvata terveellinen ja viihtyisä sekä luonnontaloudellisesti kestävä ja monimuotoinen ympäristö, tukea kestävästä kehityksestä sekä torjua ilmastonmuutosta;
- 3) edistää luonnonvarojen kestävästä käyttöä sekä vähentää jätteiden määrää ja haitallisuutta ja ehkäistä jätteistä aiheutuvia haitallisia vaikutuksia;
- 4) tehostaa ympäristöä pilaavan toiminnan vaikutusten arviointia ja huomioon ottamista kokonaisuutena; sekä
- 5) parantaa kansalaisten mahdollisuuksia vaikuttaa ympäristöä koskevaan päätöksentekoon.

Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta [13] määrittelee tarkemmin viranomaistoimintoja ja täydentää omalta osaltaan lain velvoitteita. Yhdessä nämä kaksi muodostavat perustan Suomen ympäristönsuojelulle sekä viranomaisvalvonnalle. Nämä viranomaismääräykset eivät poikkea suuresti tämän työn lähtökohdaksi otetusta valtioneuvoston asetuksesta.

2.2.4 Muut viranomaiset asettamat rajoitukset jätteille

Edelle mainittujen lakien ja asetusten lisäksi on olemassa paljon muita viranomaisvaatimuksia. Tällaisia ovat esimerkiksi valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista, jäteverolaki, lannoitevalmistelaki, valtioneuvoston päätös kaatopaikoista, valtioneuvoston asetus kaatopaikoista sekä paikalliset ja valtakunnalliset jättesuunnitelmat.

Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista [14] käsittelee miten maaperän pilaantuneisuutta tulee arvioida. Jäteverolaissa [1] määritellään kaatopaikalle toimitettavasta jätteestä suoritettavan veron määrä ja lannoitevalmistelain [15] tarkoituksena on edistää puhtaiden, hyvien, turvallisten ja myrkyttömien lannoitteiden valmistusta esi-

merkiksi teollisuuden sivutuotteista. Valtioneuvoston asetus ja päätös kaatopaikoista [16][17] määrittelevät kaatopaikkojen perustamista, käyttöä, jälkihoitoa ja jätteiden sijoittamista kaatopaikalle. Näissä annetaan myös erilaisia arvoja esimerkiksi liukoisuuden osalta. Tämän työn osalta nämä viranomaismääräykset vaikuttavat hiukan stabilointiin. Stabiloinnissa pyritään luomaan liukenemattomia kantavia maakerroksia, joten näiden määräysten tulee täytyä tehtävissä tutkimuksissa. Näissä määräyksissä olevat raja-arvot ovat kuitenkin suurempia kuin mitä valtioneuvoston asetuksessa eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa annetaan

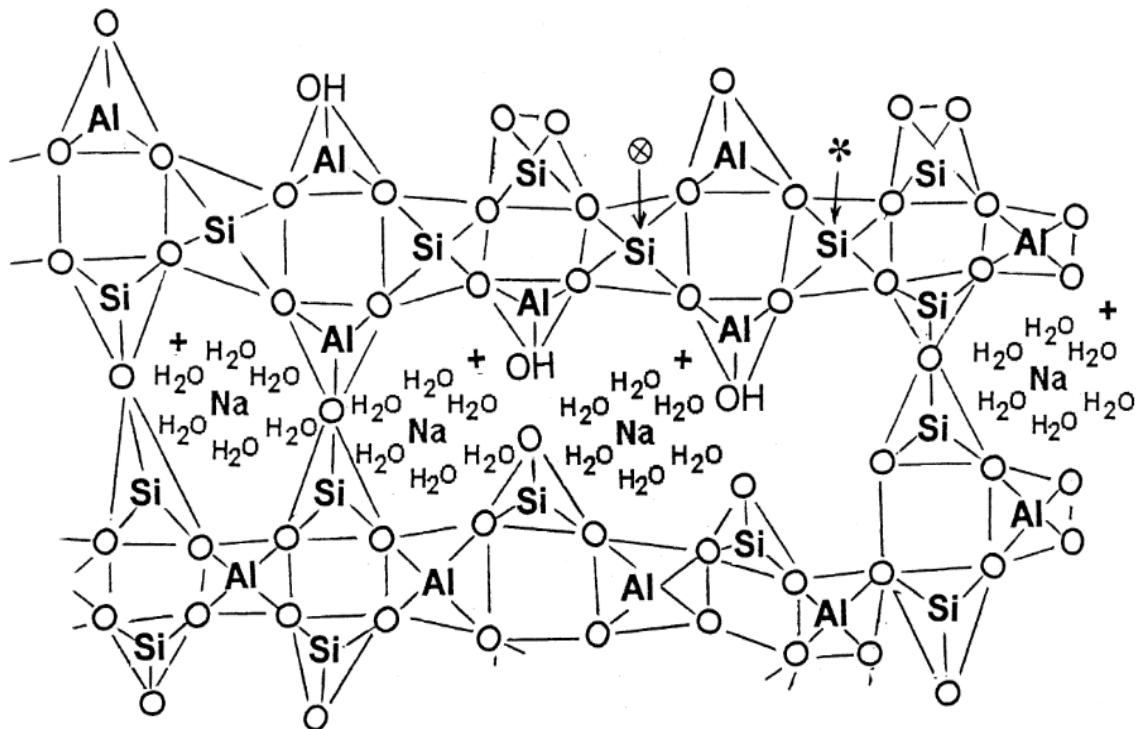
EU edellyttää kaikilta jäsenmailtaan kansallista jätehuoltosuunnitelmaa. Suomessa valtioneuvosto on hyväksynyt suunnitelman vuonna 2008 [18]. Siinä määritellään Suomen jätehuollon tavoitteet ja päämäärät vuoteen 2016 saakka. Uusi valtakunnallista jätesuunnitelmaa on parhaillaan työn alla. Paikallisesti Oulun läänin alueellinen jätesuunnitelma [19] määrittelee valtakunnallista jätesuunnitelmaa tarkemmin alueen jätteiden määrän vähentämistä esimerkiksi lisäämällä kierrätystä ja hyötykäyttöä. Suunnitelma on tehty vuoteen 2018 saakka. Jätesuunnitelmat vaikuttavat hiukan teollisuuden sivutuotteiden sijoittamiseen sekä pyrkivät vähentämään läjitettävän jätteen määrää. Nämä suunnitelmat ovat osasyynä tähän tutkimukseen.

3. GEOPOLYMEERIT STABILOINNIN SIDEAINEINA

Geopolymeerit ovat monenlaisia teollisuuden sivuvirroista saatavia sementin korvikkeita. Suomessa yleisesti käytössä ovat masuunikuonajauhe sekä lentotuhka. Seuraavassa on kerrottu lyhyesti miten geopolymeeri määritellään sekä missä näiden aineiden tutkimus on Suomessa.

3.1 Mikä on geopolymeeri?

Sarkkinen ja kumppanit [10] määrittelevät geopolymeerin geosynteesiksi, jossa mineraalit liitetään kemiallisesti toisiinsa. Kemia – lehdessä 7/2014 oli kirjoitus geopolymeereistä. Tässä artikkelissa Luukkonen ja kumppanit [20] kirjoittavat hyvin mitä geopolymeeri tarkoittaa. Geopolymeerejä on monenlaisia ja pääasiallisesti niissä hyödynnetään alumiini- ja piipitoisia teollisuuden sivutuotteita. Artikkelin [20] mukaan geopolymeerit ovat olleet käytössä jo useita vuosikymmeniä aina 1970-luvulta lähtien. Termin geopolymeeri kehittäjä on ranskalainen kemisti Joseph Davidovits. Geopolymeereistä voidaan käyttää myös muita nimityksiä kuten alkaliaktivoitunut alumiinisilikaattisideaineet. Nykyään yleisin käyttömuoto on jo geopolymeeri. [20]. Luukkonen ja kumppanit [20] määrittelevät geopolymeerin rakennetta seuraavasti: ”Geopolymeerien rakenne on mikrohuokoinen, eli siinä on nanometrien kokoluokan huokosta, kanavia ja rakoja.” Barbosa ja kumppanit [21] ovat kuvanneet erään geopolymeerin rakennetta kuvassa 5 esitetyllä tavalla. Samalla he määrittelevät, että geopolymeerit ovat amorfisia mikrohuokosia sisältäviä alumiinisilikaattimateriaaleja.



Kuva 5. Na-polysialaatti polymerin oletettu rakenne [21]

Barbosa ja kumppanit [21] kiinnittävät huomiota myös siihen miten epäorgaanisilla materiaaleilla, geopolymeereillä, voidaan vähentää CO₂ päästöjä. Koska geopolymeerit valmistetaan jättemateriaalista, eivät ne aiheuta laskennallisia hiilidioksidipäästöjä.

Rakennusmateriaaleja säädellään hyvin tarkasti EU:ssa ja se estää omalta osaltaan geopolymeerien käytön yleistymistä. Vuoden 2014 heinäkuusta voimassa ollut CE -merkki pakko rakennusmateriaaleille on eräs esimerkki EU säädöksistä. Myös sementtien koostumuksen tarkka määrittely standardeilla rajoittaa vaihtoehtoisten sementtien käyttömahdollisuuksia betoniteollisuudessa [24]. Muualla maailmassa geopolymeerejä käytetään ja on jo pitkään käytetty rakentamisessa. Varhaisimmat kaupalliset tuotteet ovat 1980-luvulta, mutta ensimmäinen täysin geopolymeereistä valmistettu rakennus valmistui Australiassa vasta vuonna 2013. Yhdysvalloissa tehtiin lentokenttien rullausteita geopolymeerillä valmistetusta betonista jo 1980-luvulla. [20].

3.2 Viimeaikaiset geopolymeeritutkimukset

Suomessa geopolymeerejä on tutkittu ja tähän on koottu tutkimukset, jotka soveltuvat Suomen olosuhteisiin. Ajallisesti tutkimukset rajattiin 2010 – 2015 väliselle ajalle. Kaikkia tutkimuksia ei voitu ottaa mukaan niiden suuren lukumäärän vuoksi. Tutkimuksissa on pääasiallisesti tutkittu sementin korvaamista erilaisilla geopolymeereillä.

Suomessa oli käynnissä UUMA-hanke (Uusiutuvien materiaalien käyttö maarakentamisessa) vuosien 2006 – 2010 välisenä aikana. Hankkeen koordinoituvastuu oli ympäristöministeriöllä ja käytännön koordinoitua suoritti Thule Instituutti Oulun Yliopistolta. UUMA-hankkeen tarkoituksena oli Inkeröisen ja Alasaarelan [22] mukaan hyödyntää heikkolaatuisia ylijäämä- ja kiviaineksia, teollisuuden sivutuotteita, pilaantuneita maita ja vanhoja maarakenteita. Hankkeen tuloksena oli hyvää tietoa edellä mainituista kohteista. Hankkeen tavoitteet täyttyivät erinomaisesti ja tämän vuoksi hanketta on jatkettu UUMA2-hankkeella vuoden 2013 alusta. Tämä hanke keskittyy vieläkin tarkemmin tutkimaan teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämistä maarakentamisessa. Hankkeen koordinoituvastuu on Rambol Finland Oy:llä ja Motiva vastaa hankkeen tulosten tiedottamisesta [23].

Kajaanin ammattikorkeakoulussa on tehty paljon erilaisia tutkimuksia liittyen geopolymeereihin. Vuosien 2013 ja 2014 aikana heillä on ollut käynnissä Geopolymeerit - projekti, jonka tarkoituksena on ollut geopolymeeripohjaisten uusien tuotteiden kehittäminen ja käytön tutkiminen. Näissä tutkimuksissa [24][25] Kajaanin ammattikorkeakoulu on kartoittanut erilaisten geopolymeerien ja -materiaalien käyttösovelluksia rakentamisessa. Nämä tutkimukset on pääasiassa tehty vertailemalla eri materiaaleja maarakentamiskäytössä. Vertailukohtana näille tuloksille on käytetty normaalibetonia.

4. KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT JA KOEMENETELMÄT

4.1 Käytettävät geopolymeerit sekä vertailusementti

Sarkkinen ja kumppanit [10] määrittelevät geopolymeerin geosynteesiksi, jossa mineraalit liitetään kemiallisesti toisiinsa. Geopolymeerin määritelmä sementin korvikkeena on tavalliselle ihmiselle ymmärrettävämpi muoto. Lisäksi geopolymeerit ovat yleensä teollisuuden sivuvirroista syntyviä tuotteita, joille etsitään aktiivisesti uusia käyttökohteita.

4.1.1 Plus-sementti

Suomen ainoa sementinvalmistaja Finnsementti Oy on kehittänyt Plus-sementin tarjoamaan ekologisemman vaihtoehdon betonirakentamiseen. Plussementin irtotonniostohinta Finnsementiltä on noin 80 euroa tonnilta, joka lisää stabiloinnin kustannuksia. Tässä sementissä käytetään paljon erilaisia teollisuuden sivutuotteita korvaamaan klinkkeristä jauhettua sementtiä. Sementtien laatuvaatimukset tulevat standardista SFS-EN 197-1 2012 [26]. Taulukossa 2 on esitetty standardin mukaisesti Suomessa sallittujen sementtien vaatimustaulukko. Plus-sementti on luokassa CEM II/B-M. Tässä luokassa erilaisten side- ja muiden aineiden osuus on 21 - 40 % sementin kokonaismassasta. Yleensä Plus-sementin seosaineena käytetään kuonajauhetta, lentotuhkaa ja kalkkikiveä. Näiden aineiden suhteita voidaan hiukan muuttaa eräkohtaisesti vaaditun puristuslujuuden säilyessä suhteellisen vakiona. Koska sementin tuotanto on suuri hiilidioksidipäästöjen aiheuttaja, voidaan näillä sideaineilla vähentää ympäristön kuormitusta sementin osalta.

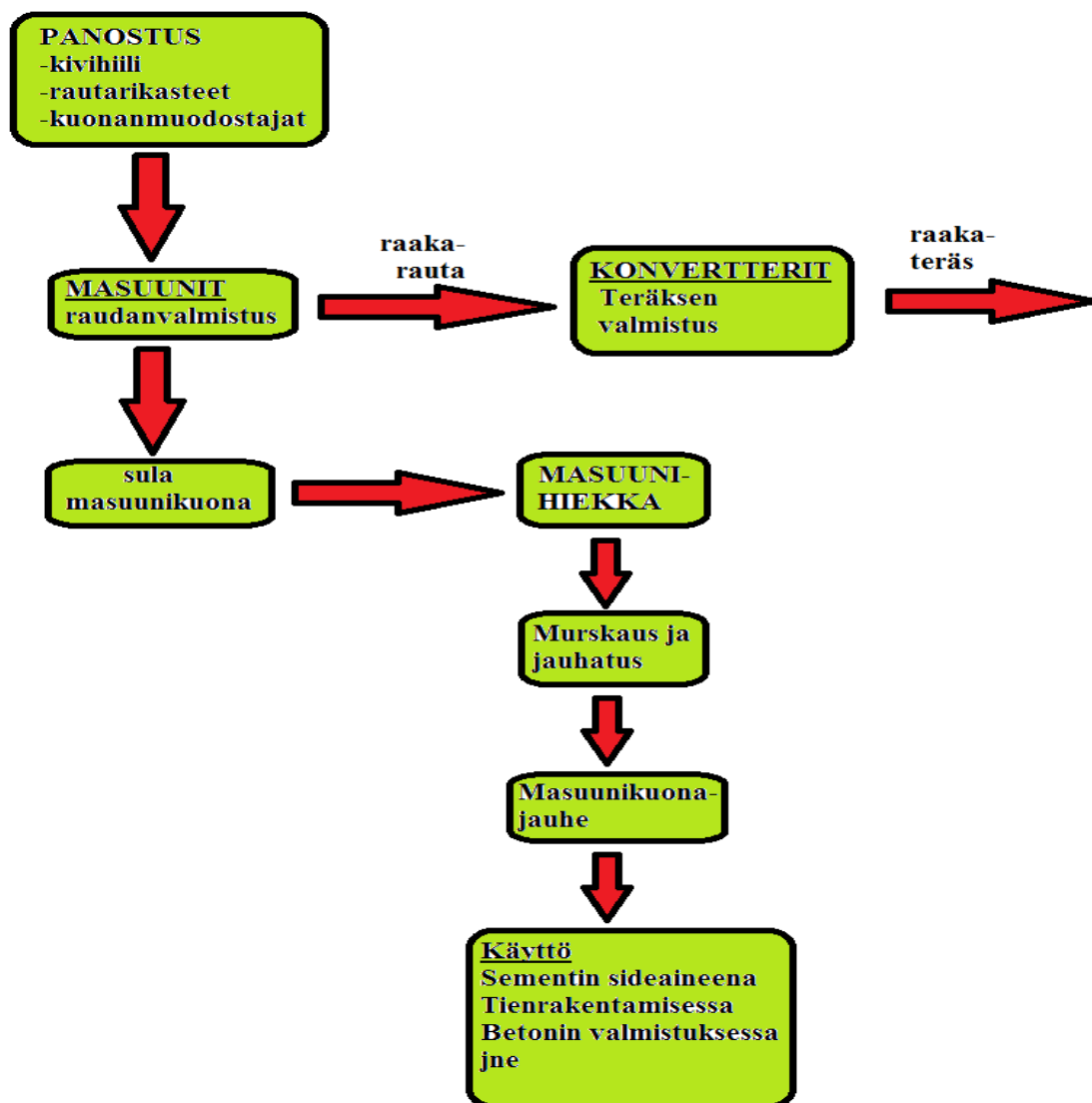
Taulukko 2. Suomessa sallitut sementit ja niiden koostumusvaatimukset [27]

Sementtilaji	Koostumusvaatimukset (%)					
	Klinkkeri	Kuona	Silika	Lentotuhka	Kalkkikivi	Muut
CEM I	95-100	-	-	-	-	0-5
CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	0-5
CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	0-5
CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	0-5
CEM II/A-V	80-94	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-V	65-79	-	-	21-35	-	0-5
CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	6-20	0-5
CEM II/A-M	80-94	6-20				0-5
CEM II/B-M	65-79	21-35				0-5
CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	0-5
CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	0-5

4.1.2 Masuunikuonajauhe

Masuunihiekka on terästeollisuuden sivutuote, jota syntyy raakaraudan valmistuksen yhteydessä. Masuunihiekka syntyy vesijähdytyksen eli granuloinnin tuloksena. Tällöin kuonaan suihkutetaan vettä noin 8 bar:n paineella, jonka seurauksena sulaa kuona rikkoutuu lasimaiseksi ja huokoiseksi tuotteeksi. Syntynyttä masuunihiekkaa voidaan jalostaa masuunikuonajauheeksi kuivaamalla, murskaamalla ja jauhamalla. Tällöin masuunikuonan reaktiivisuus kasvaa reagoivan pinta-alan kasvaessa. [28]. Kuvassa 5 on esitetty masuunikuonan tuotanto kaavion avulla. Suomessa masuunikuonajauhetta valmistaa Suomen ainoa sementinvalmistaja Finnsementti Oy ja sen myyntihinta on noin 60 euroa tonnilta. Valmistus tapahtuu Finnsementin kuonajauhetehtaalla Raahessa.

MASUUNIKUONAN TUOTANTO



Kuva 6. Masuunikuonan valmistus yksinkertaisena kaaviokuvana

Masuunikuona on kemialliselta koostumukseltaan magnesiumsilikaattien ja alumiinosilikaattien muodostama yhdiste. Finnsementin masuunikuonajauheen tuote-esitteessä [29] oleva kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. *Masuunikuonajauheen kemiallinen koostumus*

Yhdiste	%-osuus	Yhdiste	%-osuus	Yhdiste	%-osuus
CaO	36-42 %	SiO ₂	36-40 %	Al ₂ O ₃	8-10 %
MgO	10-12 %	S	1,5-2 %	Ti	0,9-1,3%
K ₂ O	0,5-1,0%	Na ₂ O	0,5-1,0%.		

4.1.3 Lentotuhka

Käsiteltävä lentotuhka tuli leijupetikattilasta, joka on eräs yleisesti käytössä oleva jätteiden polttotekniikka. Leijupetikattiloissa käytetään pääasiassa kahta erilaista tekniikkaa: kerrosleiju- ja kiertoleijukattiloita. Tässä työssä käytetty materiaali tuli kiertoleijukattilasta. Tämä tarkoittaa jätteen polttamista kattilassa, jossa poltettava materiaali leijutetaan ilmavirran avulla hiekan ja tuhkan muodostamassa kerroksessa. [30]. Tässä menetelmässä savukaasujen virtausnopeus on hyvin suuri, joten myös suuria määriä petimateriaalia, hiekkaa ja tuhkaa, poistuu savukaasujen mukana. Kaasu puhdistetaan sykloneissa, joista erotetaan palamaton petimateriaali ja polttoaine. Hienojakoinen tuhka poistuu kattilasta lentotuhkana. Tällaiset kattilat soveltuvat monenlaisille polttoaineille ja jätteille. [30]. Kuvassa 6 on esitetty kiertopetikattilan toimintaperiaate, josta materiaali on otettu tätä työtä varten.



Kuva 7. Kiertoleijukattilan toimintaperiaate[31]

4.2 Stabiloitavat aineet

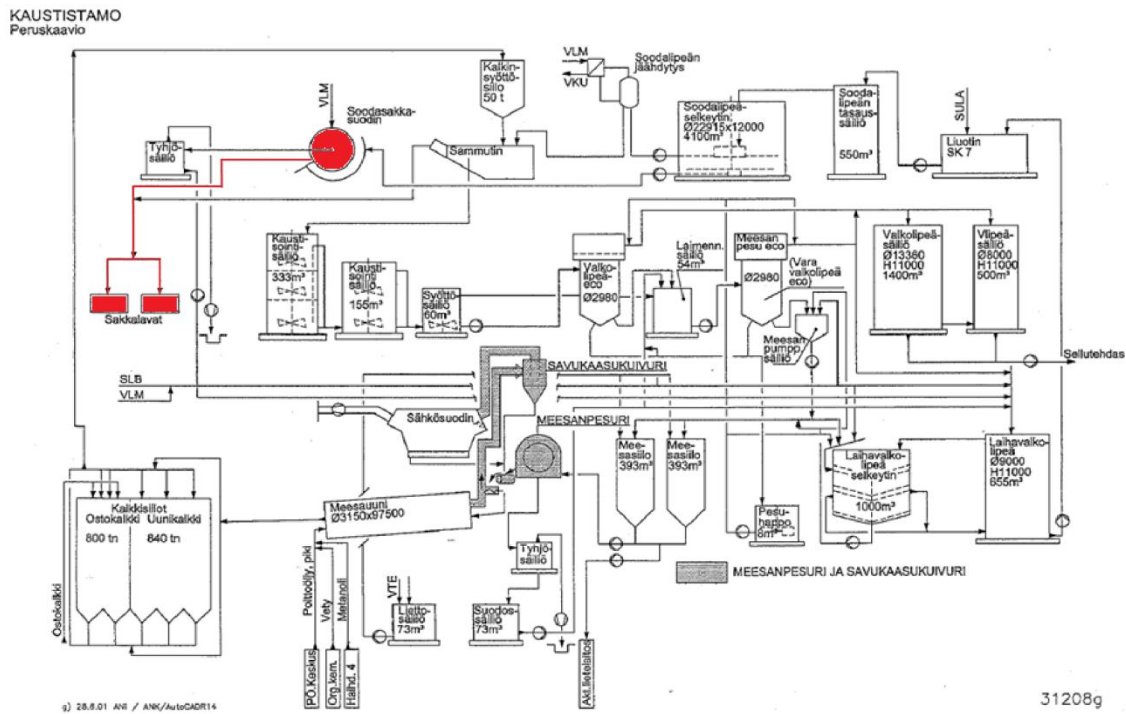
Suomen jäteverolaki määrittää läjitettävän jätteen jäteveroksi 55 euroa tonnilta [1]. Tämän kustannukset yritykset joutuvat maksamaan kaikista läjittämistään sivutuotteista, joille he eivät ole keksineet mitään hyötykäyttöä. Esimerkiksi Kokkolan Boliden tuotti vuonna 2013 [32] jarosiittia noin 120 000 tonnia, josta tuotantolaitos joutuu maksamaan jäteveroa melkein 6 miljoonaa euroa. Tässä työssä stabiloitavia aineita tuotetaan Suomessa suuri määrä eri tuotantolaitoksissa. Paljon muitakin teollisuuden sivutuotteita tutkitaan ja näistä löytyy lisätietoa esimerkiksi UUMA-projektin [23] tuottamista materiaaleista. Sivutuotteiden käyttö esimerkiksi väylärakentamisessa vähentää onnistuessaan rakentamiskustannuksia sekä pienentää tuotantolaitoksen jätekustannuksia. Tähän työhön valikoitui kolme ainetta: jarosiitti nikkelitehtaalta, viherlipeäsakka paperiteollisuudesta sekä rikastushiekka kaivoksesta.

4.2.1 Viherlipeäsakka

Viherlipeäsakka eli soodasakka on yksi suurimmista sellutehtaalla syntyvistä läjitettävistä jätteistä. Täten sen hyötykäytölle etsittävät ratkaisut parantavat sellutehtaiden ympäristökuormituksen vaikutuksia merkittävästi. Sellun valmistusprosessissa käytettävät kemikaalit ja puusta liuenneet aineet otetaan talteen keiton yhteydessä. Tätä ainetta kutsutaan mustalipeäksi. Mustalipeästä haihdutetaan vettä haihduttamalla ja sen jälkeen liemi poltetaan soodakattilassa. Viherlipeäliuos johdetaan soodakattilalta valkolipeän valmistukseen, jonka jälkeen viherlipeä selkeytetään ja siitä erottuva sakka kuivataan ja poistetaan jätteenä prosessista. [33] Kuvassa 8 on esitetty lipeän kiertoprosessi, josta näkee viherlipeä- eli soodasakan muodostumisen. Punaisella on kuvaan merkitty soodasakan muodostumisen ja jätteenkeräyksen loppuvaihe. Taulukossa 4 on esitetty viherlipeäsakan eräiden aineiden pitoisuuksia valmistajan ilmoittamana.

Taulukko 4. *Viherlipeäsakan eräiden aineiden pitoisuudet*

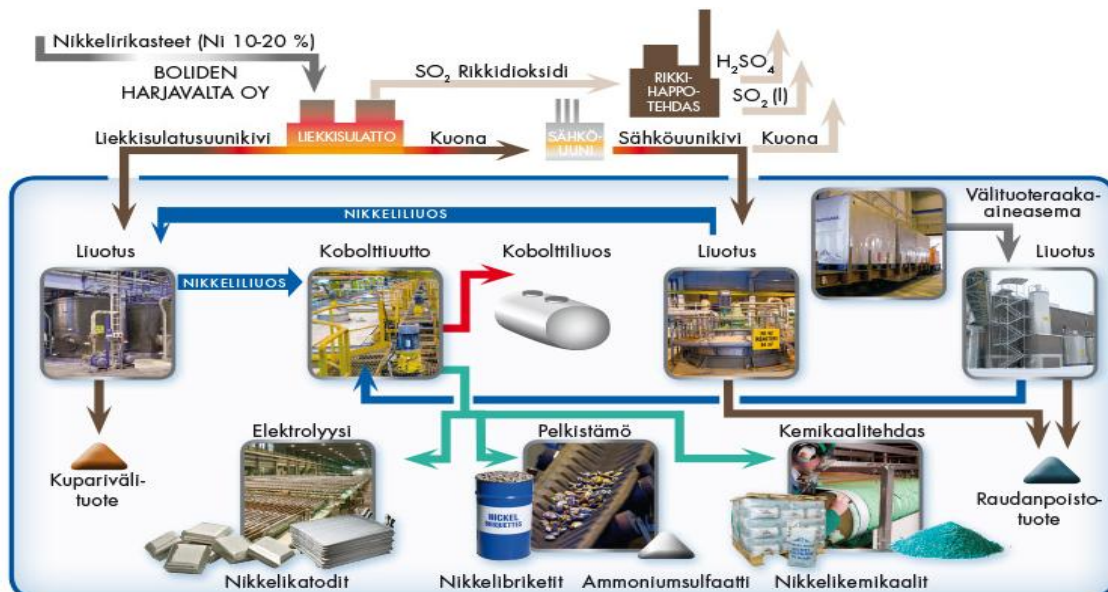
As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
<0,015	0,079	<0,015	<0,1	<0,1	<0,005	0,083	<0,1	<0,015	<0,05	0,17



Kuva 8. Oulun StoraEnson kaustintointiprosessikaavio[34]

4.2.2 Jarosiitti

Jarosiitti syntyy nikkelin valmistusprosessin sivutuotteena. Kuvassa 9 on esitetty nikkelitehtaan prosessikaavio. Prosessikaaviossa jarosiitti on merkitty nimellä raudanpoistotuote. Liuotuksen yhteydessä prosessista rauta erotetaan pois liuoksesta ja tätä kutsutaan jarosiitiksi [35]. Valmistajan antamat jarosiitin eräiden aineiden keskimääräiset pitoisuudet näytteenottopäivältä on esitetty taulukossa 5.



Kuva 9. Jarosiitin eli rautasakan syntyminen [35]

Taulukko 5. *Jarosiitin eräiden aineiden keskimääräiset pitoisuudet*

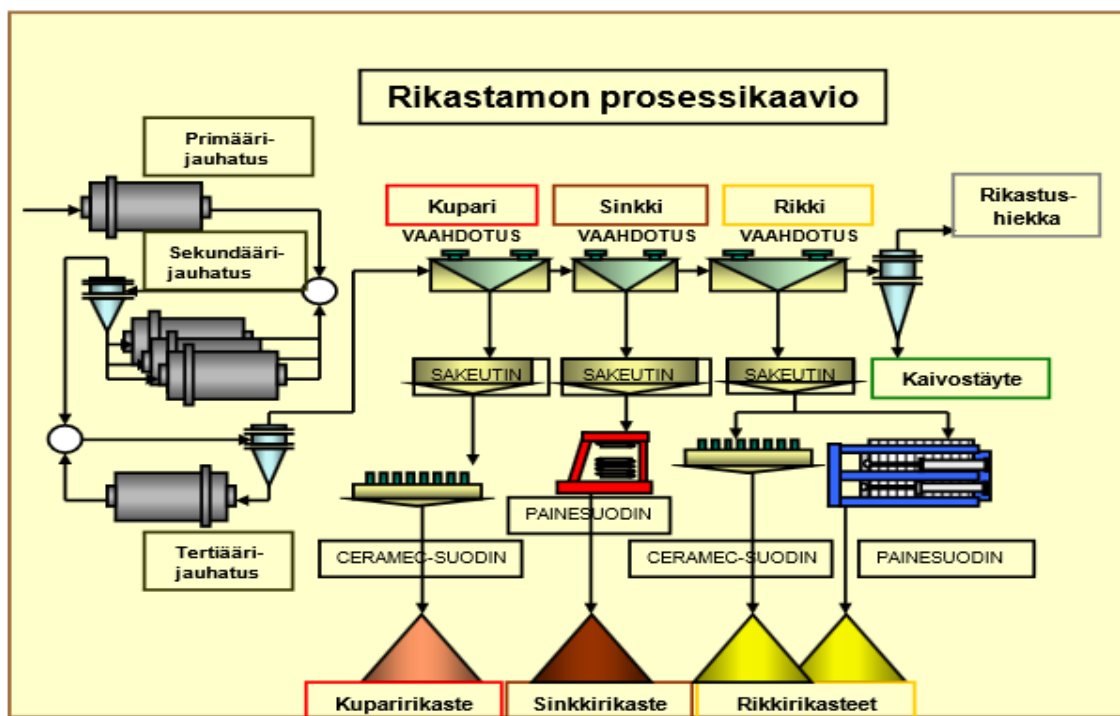
Al	As	Ca	Co	Cu	FE	H2O	Ni	S	Zn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,11	0,136	0,002	0,023	0,764	35,765	21,17	0,949	10,007	0,001

4.2.3 Rikastushiekka

Rikastushiekka on malminrikastuksen yhteydessä syntyvä tuote. Kun malmia rikastetaan, siitä erotetaan samalla hyödyttömät aineet. Näitä aineita kutsutaan rikastushiekaksi ja ne sijoitetaan rikastusaltaisiin. Tällöin hiekka laskeutuu pohjalle ja vesi vapautuu uudelleen kiertoon joko prosessivedeksi tai puhdistuksen kautta vesistöön. [36]. Eri kaivoksien rikastushiekat saattavat poiketa merkittävästi toisistaan. Tässä työssä käytetty rikastushiekka saatiin Pyhäsalmen kaivokselta. Kuvassa 10 on esitetty Pyhäsalmen rikastamon prosessikaavio ja taulukossa 6 on esitetty rikastushiekan osalta eräiden aineiden keskimääräinen vuosikoostumus kaivoksen ilmoittamana.

Taulukko 6. *Rikastushiekan osalta eräiden aineiden keskimääräinen vuosikoostumus*

As	BaSO ₄	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Zn
g/t	%	g/t	%	g/t	%	%	g/t	%
500	6,32	7,3	0,095	0,41	0,008	0,024	70	0,39

Kuva 10. *Pyhäsalmen rikastamon prosessikaavio*[36]

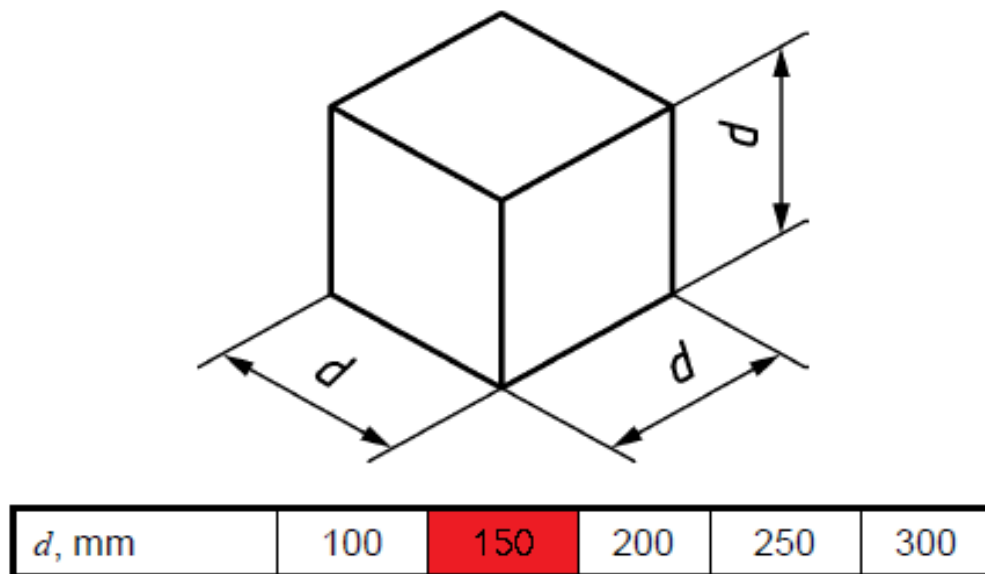
4.3 Koemenetelmät

Työssä käytetyt koemenetelmät työlle ovat puristuslujuus, yksivaiheinen liukoisuuskoe sekä viisivaiheinen sekventiaalinen uutto. Näiden menetelmien avulla saadaan tietoon tärkeimmät vaatimukset liukoisuudelle sekä lujuudelle. Käytettyjä standardeja seurataan tarkasti, jotta todentaminen myöhemmissä kokeissa on mahdollista.

4.3.1 Puristuslujuus

Kaikki tässä kohdassa esitetyt tekstit on referoitu soveltavin osin standardeista SFS-EN 12390-1 [37], 12390-2 [38], 12390-3 [39] ja 12390-4 [40]. Standardissa SFS-EN 12390-1 2009 [37] määritetään koekappaleen mitat. Standardissa SFS-EN 12390-2 2009 [38] määritetään koekappaleiden muoto, mitat ja muut vaatimukset. Standardissa SFS-EN 12390-3 [39] määritetään puristuskokeen tekeminen. Viimeisessä standardissa [40] määritellään puristuslujuuden vaatimukset testauskoneille. Näiden standardien vaatimuksia noudatettiin seuraavilla tavalla:

Koekappale saa olla maksimissaan 300 mm sivumitaltaan. Valitsimme kokeeseen 150 mm sivumitaltaan olevan kuution, joka on esitetty kuvassa 11 alla. Kuvaan on merkitty punaisella taustalla valittu mitta. Koekappaleena voidaan käyttää myös kartiota, mutta valitsimme kuution suuremman saatavissa olevan muottimäärän takia.



Kuva 11. Koekappaleen mitat standardissa[37]

Käyttämämme muotit olivat muovisia ja eikä niitä kalibroitu. Muottien täyttö ja tiivistäminen tapahtuu standardissa esitetyllä tavalla. Täryttämisessä käytettiin tärypöytää ja ylimääräinen betoni poistettiin muotista teräksisellä lastalla. Muoteissa käytettiin muotiniirrotusainetta, joka ei reagoi betonin kanssa. Koekappaleet merkittiin numeroilla ja kirjaimilla ja nämä kirjattiin ylös erilliseen taulukoon, johon merkittiin myös valmistuspäivämäärä ja kellonaika. Ensimmäiset 16 – 24 tuntia koekappalaita säilytettiin huoneenlämmössä noin 22 °C, jonka jälkeen ne

poistettiin muotista ja laitettiin säilytykseen olosuhdealtaaseen. Olosuhdealtaan lämpötila oli vakio 21 °C. [38].

Puristuslujuudet tehtiin 1vrk, 7vrk ja 28vrk ikäisistä näytteistä. Puristuslujuuksien testaaminen tehtiin standardin SFS-EN 12390-3 2009 [39] mukaisesti. Testattava puristin täytti standardin SFS-EN 12390-4 [40] vaatimukset. Kaikki koekappaleet täyttivät koekappaleille asetetut vaatimukset, joten niitä ei tarvinnut tasoittaa. Puristuksessa käytettiin Kajaanin ammattikorkeakoulussa yleisesti käytössä olevia arvoja. Saavutettu puristuslujuus, MPa, kirjoitettiin ylös taulukoon. Käytössä oleva kone laski automaattisesti puristuslujuuden arvon.

4.3.2 Liukoisuuskoe

Tässä kohdassa käsiteltävät asiat on kaikki referoitu standardista SFS-EN 12457-2 [13]. Tämä menetelmä on tarkoitettu vain jätemateriaaleille ja lietteille, joiden kuiva-ainespitoisuuden on minimissään oltava 33 %. Standardissa on määritelty erittäin tarkasti kaikki tarvittavat laitteet.

Kuiva-ainespitoisuuden mittaamiseen käytettiin standardin SFS-EN 12880 [41] mukaista kuivatusta. Kuiva-ainespitoisuusprosentti laskettiin kaavalla 1 standardin mukaisesti.

$$DR = 100 * (M_D / M_W) \quad \text{kaava 1}$$

jossa DR on kuiva-ainespitoisuus % painosta (%)
 M_W on määrän tuotteen massa(g)
 M_D on kuivan tuotteen massa(g)

kosteusprosentti (MC %) määritellään seuraavasti:

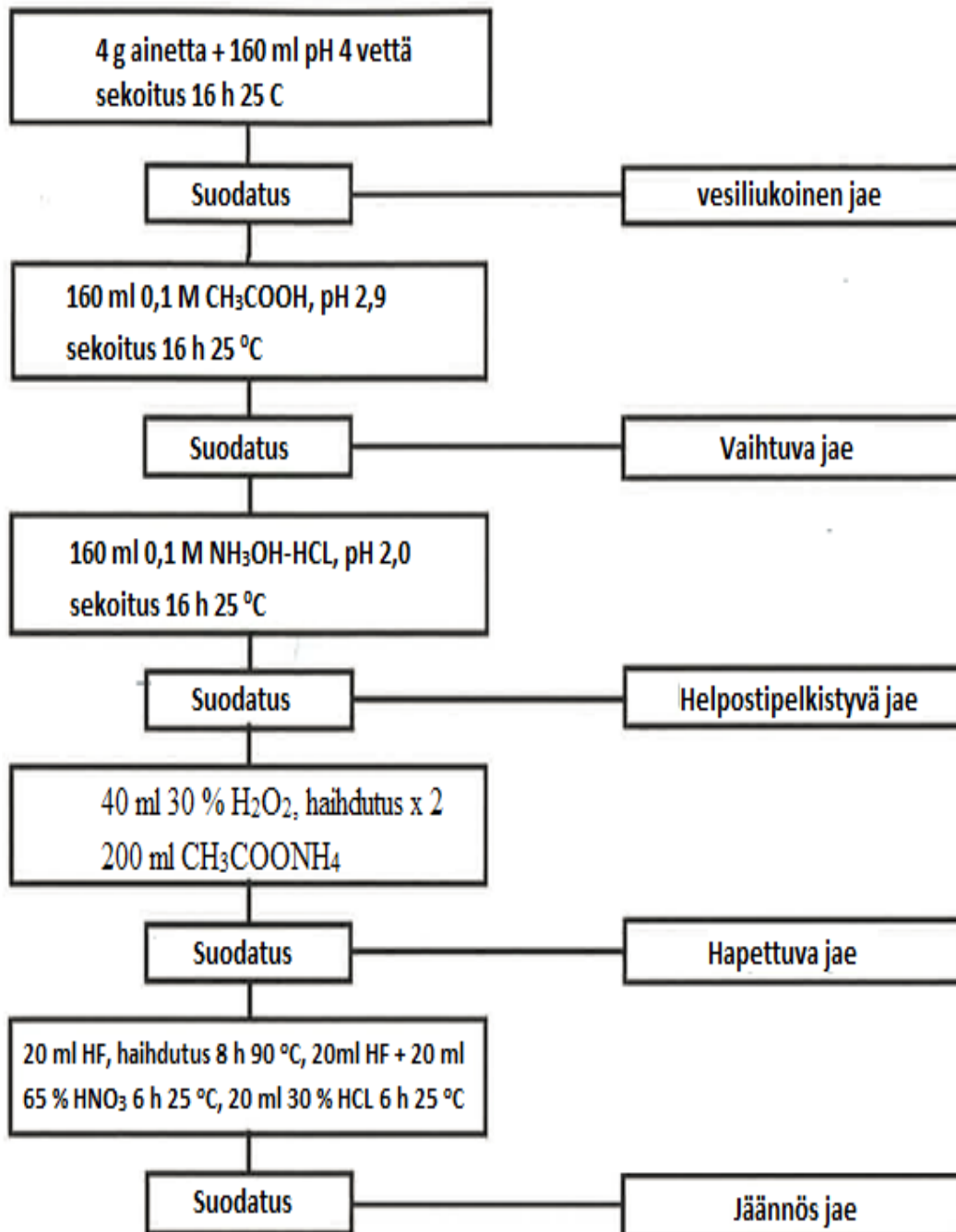
$$MC = 100 \times (M_W - M_D) / M_D \quad \text{kaava 2}$$

Testiannos uuttoon valmistettiin standardin SFS – EN 12457-2 [13] ohjeiden mukaisesti ja testit suoritettiin 21 °C lämpötilassa. Standardi määrittelee, että kuivaa massaa tulee mitata 0,09 kg ± 0,005 kg astiaan. Tämän jälkeen mitataan liuottavaa ainetta neste / kiinteä - aine suhteella L/S = 10 l/kg ± 2 %. Sen jälkeen ravistellaan 24 tuntia ± 0,5 tuntia. Tämän jälkeen liuoksen annetaan laskeutua 15 minuuttia ± 5 minuuttia. Laskeutuksen jälkeen liuos suodatetaan 45µm suodattimen läpi alipaineessa. Saadusta suodoksesta mitataan tarvittavat pitoisuudet. Tässä työssä mitattiin seuraavien alkuaineiden pitoisuudet: arseeni (As), barium (Ba), kadmium (Cd), kromi (Cr), kupari (Cu), elohopea (Hg), molybdeeni (Mo), nikkeli (Ni), lyijy (Pb), antimoni (Sb), seleeni (Se), vanadiini (V), sinkki (Zn).

4.3.3 Sekventiaalinen viisivaiheinen uutto

Tämän uuton tarkoituksena on simuloida luonnossa tapahtuvia olosuhteita ja sitä käytetään erityisesti raskasmetallien liukoisuuden arvioimiseen. Tämä menetelmä eroaa standardin mukaisesta yksivaiheisesta uutosta erittäin paljon. Kuvassa 12 on esitetty viisivaiheisen uuton eri vaiheet.

Viisivaiheisella uutolla halutaan simuloida pahimpia mahdollisia ympäristökatastrofeja ja menetelmää käytetään mm. raskasmetallien liukoisuuden ja ympäristöriskien tutkimiseksi. Ensimmäisessä uutovaiheessa simuloidaan heikkoa haposadetta ja toisessa vaiheessa happoaltituksen vaikutusta. Kolmannen vaiheen tarkoituksena on mallintaa helposti pelkistyvää fraktiota ja neljännessä hapettavien olosuhteiden vaikutusta biosaatavuuteen. Viimeisessä vaiheessa halutaan saada tietoon vain metallien kokonaismäärät eikä tämä vaihe mallinna mitään luonnontilaa. [42].



Kuva 12. Viisivaiheisen uuton vaiheet [42]

4.4 Taloudellinen tarkastelu

Massojen hinta voidaan laskea seuraavan kaavan avulla

$$TH = (sth * spt) + (kath * kapt) + (tath * tapt) + (vkh + vpt) \quad \text{kaava 3.}$$

jossa	TH	on tonnihinta
	sth	on sideaineen tonnihinta
	spt	on sideaineen paino tonneissa
	kath	on kiviaineksen tonnihinta
	kapt	on kiviaineksen paino tonneissa
	tath	on tutkittavan aineen tonnihinta
	tapt	on tutkittavan aineen paino tonneissa
	vkh	on veden kuutiohinta, joka on Kajaanissa 3,46 euroa kuutiolta
	vpn	on veden paino tonneissa

Kaavaa voidaan soveltaa myös vertailumassan laskemiseen, jolloin tutkittavan aineen osa jätetään laskuista pois. Kaavassa ei ole otettu mukaan kuljetuskustannuksia, koska ne oletetaan samoiksi kaikille massoille. Todellisuudessa kuljetuskustannukset vaihtelevat matkojen perusteella ja ne tulee ottaa huomioon. Veden kuukausimaksuja ei myöskään ole otettu huomioon, koska näiden arvot on oletettu samoiksi kaikille massoille. Massojen tilavuuksien avulla mitattiin tiheys tutkittaville aineille. Tiheydet olivat seuraavat: viherlipesakka $1211 \text{ kg} / \text{m}^3$, rikastushiekka $2450 \text{ kg} / \text{m}^3$ ja jarosiitti $1173 \text{ kg} / \text{m}^3$. Plus-sementille ja masuunikuonajauheelle käytetään laskemisessa valmistajan antamia tiheyksiä.

5. KOETULOKSET

5.1 Puristuslujuus

Taulukossa 7 on esitetty kaikki tehdyt massat ja niiden koostumukset sekä puristuslujuustulokset. Massojen valmistaminen tapahtui standardien SFS-EN 12390-1 [37], 12390-2 [38] ja 12390-3 [39] mukaisilla menetelmillä. Kaikki massat valmistettiin samalla laastisekoittajalla sekoittaen noin 10 minuuttia jokaista massaa. Sekoituksen jälkeen valumuotit, jotka olivat kooltaan 150 mm x 150 mm x 150 mm, täytettiin ja tärytettiin ohjeiden mukaisesti. Muotteja säilytettiin 21°C lämpötilassa altaassa. Yhden ja seitsemän vuorokauden puristuslujuuksia ei voinut testata, koska yksikään massa ei ollut kovettunut tarpeeksi. Ainoat puristuslujuudet testattavilla geopolymeereillä antoi masuunikuona rikastushiekan ja viherlipeäsakan kanssa. Kaikki muut testauksessa olleet vaihtoehdot eivät olleet kovettuneet tai puristuslujuudet jäivät alle 4 MPa:n. Massa 3 otettiin mukaan, koska se oli vertailukohtana masuunikuonalle, vaikka tämän massan puristuslujuus jäi alle 4 MPa:n. Kuvassa 13 on esitetty massat ennen niiden sekoittamista ja veden lisäämistä. Vasemmalla on viherlipeäsakkaa, keskellä jarosiittia ja oikealla rikastushiekkää sisältävät massat. Ylimmäisellä rivillä on plus-sementtiä, toiseksi ylimmäisellä masuunikuonaa, toiseksi alimmaisella lentotuhkaa ja alimmaisella masuunikuonaa 50 paino-% / lentotuhkaa 50 paino-% sisältävät massat.



Kuva 13. Massat ennen sekoitusta ja veden lisäämistä

Taulukko 7. *Massatiedot sekä 28 vrk puristuslujuudet*

Massa	Plus kg	Masuuni kg	Lento kg	Kivi kg	Jarosiitti kg	Rikastushiekka kg	Viherlipeä kg	Vesi kg	Puristuslujuus 28 vrk [MPa]
1	2,99			2,01	9,23			1,50	1,543
2	3,01			1,98		19,63		2,18	9,008
3	3,02			2,00			9,64	1,02	2,088
4		3,00		2,00	9,24			2,49	0,83
5		2,99		1,99		19,56		1,41	9,086
6		3,01		1,99			9,58	1,25	4,527
7			3,00	2,01	9,23			3,68	ei tulosta
8			3,00	2,01		19,54		2,20	ei tulosta
9			3,00	2,03			9,61	2,02	ei tulosta
10		1,51	1,49	1,99	9,21			3,11	ei tulosta
11		1,51	1,50	2,02		19,64		1,70	ei tulosta
12		1,50	1,50	2,00			9,59	1,80	ei tulosta

Huomionarvoisia asioita massojen tekemisessä ja niiden säilytyksessä oli, että rikastushiekkaan tehdyt massat erottivat vettä erittäin paljon noin yhden tunnin kuluttua tärytyksestä. Samalla niiden pintaan ilmestyi myös erittäin paljon näkyviä ilmakuplia. Jarosiitilla tehdyt massat oli kaikista helpoimpia täryttää, massat näyttivät erinomaiselta ja ne tuntuivat kädessä hyvältä. Jarosiittimassoja oli myös helppo käsitellä. Viherlipeäsakalliset massat olivat erittäin vaikeita täryttää, vaikka massa oli kädessä hyvääntuntoista ja muovailtavaa. Kaikki massat, joissa mukana oli lentotuhkaa, paisuvat erittäin paljon. Masuunikuonan ja lentotuhkan yhdistelmissäkin oli selvästi nähtävillä paisuminen, vaikka hiukan pienempänä kuin pelkällä lentotuhkalla. Kuvassa 14 on esitetty puristuslujuuden mittaamiseen käytetty laite.



Kuva 14. *Puristuslujuusmittalaite*

Puristuslujuuksien perusteella jatkoon liukoisuustesteihin saatiin vain kaksi koemassaa, joissa oli käytetty masuunikuonaa ja rikastushiekkaa sekä masuunikuonaa ja viherlipeäsakkaa, lisäksi näiden Plus-sementillä tehdyt vertailukappaleet. Nämä näytteet murskattiin ja seulottiin niin, että liukoisuustesteihin näytteet tulivat 1 mm – 4 mm partikkelikoossa. Standardin mukaisessa

liukoisuustestissä sekä viisivaiheisessa uutossa tulee näytteen partikkelikoosta 95 % olla alle 4 mm. Alle 1 mm partikkelikoot rajattiin pois, koska tällöin olisi mahdollista saada tutkittavien aineiden geopolymeereihin tai sementtiin sitoutumattomia partikkeleja mukaan tuloksiin.

5.2 Standardin mukainen liukoisuuskoe

Ennen liukoisuuskoea tutkittaville aineille tehtiin standardin SFS-EN 12880 [41] mukainen kuivatus, jonka tuloksia käytetään myös viisivaiheisen sekventiaalisen uuton yhteydessä. Kohdassa 4.3.2 on esitetty määrittämissä käytetty alkuaineanalyysimenetelmä kokonaismetallipitoisuuksien määrittämiseksi. Kuvassa 15 on esitetty näytteiden kuivaamiseen käytetty uuni.



Kuva 15. Näytteiden kuivaamiseen käytetty uuni

Uuttovaiheessa käytettiin kuivaa massaa 0,09 kg, johon lisättiin uuttoliuosta (deionisoitu vesi) yhteensä 1 kg näytettä kohden. Tämän jälkeen liuosta ravisteltiin 24 tuntia ja annettiin liuoksen laskeutua 15 minuuttia. Välittömästi laskeutumisaajan jälkeen suoritettiin suodatus 45 µm läpäisykyvyn suodatinta ja vesi-imua käyttäen. Tämän jälkeen suodoksesta otettiin näyte, josta tutkittiin seuraavia alkuainepitoisuuksia hivenainelaboratoriossa: As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, V ja Zn. Taulukossa 8 on esitetty alkuaineiden pitoisuudet suodoksessa. Näytteet ovat seuraavat: numero 1 on masuunikuonalla stabiloitu rikastushiekka, 2 on masuunikuonalla stabiloitu viherlipeäsakka, 3 on plussementillä stabiloitu rikastushiekka sekä 4 on plussementillä stabiloitu viherlipeäsakka. Kuvassa 16 on kahdessa vetokaapissa olevat suodatuslaitteistot sekä lähikuva toisesta laitteistosta.

Taulukko 8. Yksivaiheisen liukoisuuskokeen tulokset

NÄYTE	As mg/l	Ba mg/l	Cd mg/l	Cr mg/l	Cu mg/l	Hg mg/l	Mo mg/l
0	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
1	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
2	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
3	<0,01	0,2	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
4	<0,01	1,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1

NÄYTE	Ni mg/l	Pb mg/l	Sb mg/l	Se mg/l	V mg/l	Zn mg/l
0	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
1	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0.1	<0,1
2	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0.8	<0,1
3	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
4	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1



Kuva 16. Liukoisuustesteissä käytetty suodatinlaitteisto

5.3 Viisivaiheinen sekventiaalinen uutto

Seuraavaksi on esitetty eri uuttovaiheiden tulokset kukin omana taulukkonaan. Näyte numerot tarkoittavat seuraavaa: numerot 1 ja 2 ovat plussementillä stabiloitu rikastushiekka, 3 ja 4 on plussementillä stabiloitu viherlipeäsakka, 5 ja 6 ovat masuunikuonalla stabiloitu rikastushiekka sekä 7 ja 8 ovat masuunikuonalla stabiloitu viherlipeäsakka. Kaikkia näytteitä tehtiin 2 kappaletta, jotta voitaisiin vertailla tulosten samankaltaisuutta. Neljännessä vaiheessa näyte numero 1 kaatui, joten siitä ei saatu tuloksia. Taulukoissa on merkitty punaisella valtioneuvoston eräiden jätteiden hyödyntämistä koskevan asetuksen ylittävät liukoisuusarvot. Taulukkojen liukoisuudet on esitetty kumulatiivisesti siten, että vaiheessa 2 on mukana myös vaiheen 1 pitoisuudet, jne. Jos arvo on ollut pienempi kuin tutkimusalaraja, sitä ei ole lisätty seuraavaan vaiheeseen tutkimusalarajana. Tässä oletetaan liukenemisen ko. kohdassa olleen niin pieni, että sillä ei ole vaikutusta seuraavan kohdan liukoisuusarvoihin.

5.3.1 Ensimmäinen vaihe - heikko happosade

Heikkoa happosadetta simuloitiin uuttamalla näytteitä tislattulla vedellä, jonka happamuus oli säädetty typpihapon (HNO_3) avulla arvoon pH 4. Koska näytettä oli 4 g, lisättiin vettä kuhunkin näytteeseen 160 ml. Tämän jälkeen näytteet laitettiin 16 tunniksi pyörösekoittajaan noin 25 asteeseen. Sekoituksen jälkeen näytteet suodatettiin alipaineella. Suodatinpaperit sisältöineen laitettiin takaisin alkuperäisiin näyteastioihin seuraavaa vaihetta varten. Suodattimen läpi pääsee vain 45 μm pienemmät partikkelit. Taulukossa 9 on esitetty tämän vaiheen tulokset.

Taulukko 9. Tulokset heikon happosateen simuloinnista

NÄYTE	As mg/l	Ba mg/l	Cd mg/l	Cr mg/l	Cu mg/l	Hg mg/l	Mo mg/l
0	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
1	<0,01	0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
2	<0,01	0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
3	<0,01	0,3	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
4	<0,01	0,3	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
5	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
6	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
7	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
8	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1

NÄYTE	Ni mg/l	Pb mg/l	Sb mg/l	Se mg/l	V mg/l	Zn mg/l
0	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
1	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
2	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
3	<0,1	0,03	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
4	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
5	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
6	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
7	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,2	<0,1
8	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,1	<0,1

5.3.2 Toinen vaihe – happoaltistus

Happoaltistuksen simulointivaiheessa näytteisiin lisättiin 160 ml 0,1 molaarista etikkahappoa alkuperäisiin pulloihin, joissa on myös mukana edellisen vaiheen suodatimet ja niihin jäänyt kiintoaines. Etikkahapon (CH₃COOH) lisäämisen jälkeen näytteitä sekoitettiin pyörösekoittimella 16 tuntia, jonka jälkeen näytteet suodatettiin samalla tavalla kuin ensimmäisessä vaiheessa. Myös tästä vaiheesta suodatinpaperi ja siihen jäänyt aines laitettiin takaisin alkuperäiseen astiaan. Suodos lähetettiin tarkempia alkuaineanalyysyjä varten hivenainelaboratorioon. Suodoksen tulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Tulokset happoaltistuksen simuloinnista

NÄYTE	As mg/l	Ba mg/l	Cd mg/l	Cr mg/l	Cu mg/l	Hg mg/l	Mo mg/l
0	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
1	<0,01	0,2	<0,01	<0,1	0,8	<0,01	<0,1
2	<0,01	0,2	<0,01	<0,1	0,9	<0,01	<0,1
3	<0,01	0,7	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
4	<0,01	1,4	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
5	<0,01	1	<0,01	<0,1	0,2	<0,01	<0,1
6	<0,01	1,1	<0,01	<0,1	0,1	<0,01	<0,1
7	<0,01	0,9	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
8	<0,01	0,9	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1

NÄYTE	Ni mg/l	Pb mg/l	Sb mg/l	Se mg/l	V mg/l	Zn mg/l
0	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
1	0,2	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	4
2	0,2	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	4
3	0,2	0,03	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
4	0,3	0,02	<0,01	<0,1	<0,1	0,2
5	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	2
6	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	2,2
7	0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,3	<0,1
8	0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,2	<0,1

5.3.3 Kolmas vaihe – helposti pelkistyvät fraktiot

Kolmannessa vaiheessa näytteeseen lisättiin 160 ml hydroksyyliammoniumkloridia (NH₃OH – HCl), johon oli lisätty typpihappoa pH:n säätämiseksi arvoon pH 2. Tämän jälkeen näytettä ravisteltiin jälleen 16 tuntia noin 25 asteen lämpötilassa. Ravistelun jälkeen näyte suodatettiin edellisten tavoin sekä suodatinpaperi ja jäänyt suodos lisättiin alkuperäiseen näytteeseen. Suodoksen tulokset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Tulokset helposti pelkistyvistä fraktioista

NÄYTE	As mg/l	Ba mg/l	Cd mg/l	Cr mg/l	Cu mg/l	Hg mg/l	Mo mg/l
0	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
1	<0,01	1,8	<0,01	<0,1	1,4	<0,01	<0,1
2	<0,01	1,6	<0,01	0,1	1,6	<0,01	<0,1
3	<0,01	2	0,03	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
4	<0,01	2,6	0,03	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
5	<0,01	3,2	<0,01	<0,1	0,2	<0,01	<0,1
6	<0,01	3,2	<0,01	<0,1	0,1	<0,01	<0,1
7	<0,01	2,6	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
8	<0,01	2,9	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1

NÄYTE	Ni mg/l	Pb mg/l	Sb mg/l	Se mg/l	V mg/l	Zn mg/l
0	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	<0,1
1	0,2	<0,01	<0,01	<0,1	0,7	5
2	0,2	0,3	<0,01	<0,1	0,8	5,1
3	0,6	0,03	<0,01	<0,1	1,0	4,9
4	0,7	0,02	<0,01	<0,1	1,0	5,0
5	<0,1	0,03	<0,01	<0,1	1,4	2,8
6	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	1,6	3,1
7	0,3	<0,01	<0,01	<0,1	1,9	0,5
8	0,3	<0,01	<0,01	<0,1	1,8	0,5

5.3.4 Neljäs vaihe – hapettavien olosuhteiden vaikutus biosaatavuuteen

Viimeisenä uuttovaiheena tehtiin hapettavien olosuhteiden vaikutuksen simulointi. Ensiksi näytteisiin lisättiin 40 ml 30 % vetyperoksidia (H_2O_2). Lisäämisessä tuli olla varovainen, koska aine kuohusi helposti. Yhdenkään näytteen kohdalla kuohumista ei tapahtunut näyteastian ulkopuolelle. Tämän jälkeen näyte laitettiin noin 85 asteiseen uuniin, jossa se haihdutettiin kuivaksi. Ensimmäinen käsittely toistettiin toisen kerran täysin samanlaisena. Tämän jälkeen näytteisiin lisättiin 200 ml ammoniumasetaattia (CH_3COONH_3) ja näytteet asetettiin jälleen pyörösekoittimeen 16 tunniksi. Sekoittamisen jälkeen näyte suodatettiin kuten aikaisemmin ja suodoksen tulokset ovat taulukossa 12.

Tässä vaiheessa suodos ei ollut kirkas rikastushiekkaa sisältävissä näytteissä, vaan se oli sekä masuunikuonalla että Plus-sementillä stabiloiduilla massoilla punertavan värinen. Yleensä 45 μm suodattimen läpi tulee kirkasta suodosta. Kaikki muut suodatusnäytteet kokeiden aikana olivat kirkkaita. Kuvassa 17 näkyy suodoksen ja ravistellun näytteen samankaltaisuus. Vasemmalla on masuunikuonaa ja oikealla Plus-sementtiä sisältävä näyte.



Kuva 17. Punertava suodos neljännessä vaiheessa

Taulukko 12. Tulokset hapettavien olosuhteiden vaikutuksesta biosaatavuuteen

NÄYTE	As mg/l	Ba mg/l	Cd mg/l	Cr mg/l	Cu mg/l	Hg mg/l	Mo mg/l
0	<0,01	<0,1	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
2	1,5	1,8	0,01	<0,1	1,6	<0,01	<0,1
3	<0,01	2,5	0,04	0,1	0,1	<0,01	<0,1
4	<0,01	3,1	0,05	<0,1	0,2	<0,01	<0,1
5	1,7	3,3	0,01	<0,1	1,7	<0,01	<0,1
6	1,8	3,4	0,02	<0,1	0,6	<0,01	<0,1
7	<0,01	3,8	0,02	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1
8	<0,01	4,1	0,02	<0,1	<0,1	<0,01	<0,1

NÄYTE	Ni mg/l	Pb mg/l	Sb mg/l	Se mg/l	V mg/l	Zn mg/l
0	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,1	0,2
2	0,2	0,5	<0,01	<0,1	1,1	11,7
3	0,6	0,03	<0,01	<0,1	1,0	5,6
4	0,7	0,02	<0,01	<0,1	1,0	5,7
5	<0,1	0,03	<0,01	<0,1	2,2	10,8
6	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	2,4	11,1
7	0,3	<0,01	<0,01	<0,1	1,9	1
8	0,3	<0,01	<0,01	<0,1	1,8	1,1

5.3.5 Viides vaihe – metallien kokonaispitoisuudet

Tämä vaihe suoritettiin kokonaisuudessaan Oulun yliopiston hivenainelaboratoriossa turvallisuuksista, koska tässä vaiheessa jouduttiin käyttämään kuolettavan vaarallista vetyfluoridia (HF). Pitoisuustuloksiin tämä ei vaikuta, koska käytetyssä menetelmässä saadaan vähintään yhtä luotettavasti selville alkuaineiden kokonaispitoisuudet kuin kappaleessa 3.3.3 on esitetty. Myös siinä olisi jouduttu käsittelemään vetyfluoridia. Näyte kuivattiin standardin ISO 12880 mukaisesti uunissa, joka näkyy kuvassa 15.

Kokonaismetallipitoisuuksien tarkastelu tehtiin hivenainelaboratoriossa seuraavalla tavalla: Aluksi punnittiin tarkasti 0,4g kuivattua näytettä, johon lisättiin 9 ml HNO₃. Tämän jälkeen liuoksen annettiin liueta yön yli. Seuraavaksi liuokseen lisättiin 3 ml suolahappoa (HCl) ja 1 ml HF:a. Liuosta käytettiin mikroaaltouunissa 10 minuuttia 200 °C lämpötilassa, jonka jälkeen jäädytettyyn liuokseen lisättiin 10 ml boorihappo (H₃BO₃) – liuosta. Näin saatu liuos laitettiin uudelleen mikroaaltouuniin 170 °C lämpötilassa. Taulukossa 13 on esitetty kokonaismetallipitoisuudet. Suurin osa mittaustuloksista jäi alle tutkimusalarajan, joten näiden osalta tarkkaa tietoa pitoisuuksista ei ole. Taulukossa 13 näytenumero 1 on masuunikuonalla stabiloitu rikastushiekka, 2 on masuunikuonalla stabiloitu viherlipeäsakka, 3 on Plus-sementillä stabiloitu rikastushiekka ja 4 on Plus-sementillä stabiloitu viherlipeäsakka.

Taulukko 13. Kokonaismetallipitoisuudet

NÄYTE	As mg/kg	Ba mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Hg mg/kg
1	287	810	<20	<20	522	<20
2	<20	300	<20	69	91	<20
3	283	859	<20	<20	452	<20
4	<20	211	<20	83	136	<20

NÄYTE	Mo mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Sb mg/kg	V mg/kg	Zn mg/kg
1	<20	<20	88	<20	102	548
2	<20	34	<20	<20	151	619
3	<20	<20	86	<20	58	553
4	<20	61	<20	<20	59	632

6. TULOSTEN ANALYSOINTI

Aikaisemmissa kappaleissa on kattavasti käsitelty analyysi- ja tutkimusmenetelmiä, joiden avulla tulokset on saatu. Tulokset analysoidaan kahtena erillisenä kappaleena, joista ensimmäinen keskittyy koekappaleiden puristuslujuuteen ja siinä havaittuihin asioihin. Toinen kappale käsittelee tehtyjen liukoisuustestien tuloksia.

6.1 Puristuslujuus

Ensimmäisenä tutkimusvaiheena käytetty testimenetelmä oli puristuslujuuskoe. Ennen koetta tarkoituksena oli saada jarsiitti muodostamaan lujuutta sideaineiden kanssa, jotta liukoisuustestauksia voitaisiin suorittaa näistä massoista. Puristuslujuusvaiheessa huomattiin, että jarsiitilla valmistetut massat eivät kovettuneet ollenkaan. Masuunikuonan kovettumista hidastavat esimerkiksi suolat, kylmyys, humuspitoiset vedet ja orgaaniset aineet. Massojen tekemiseen käytettiin kaikkiin samoja aineita, joten suolojen ja orgaanisten aineiden tuleminen kiviaineksesta on hyvin epätodennäköistä, koska muutama massa kovettui. Vesi oli vesijohtovettä, joten siinä ei ole humusta. Lämpötila betonilaboratoriossa oli koko testauksen ajan sama noin 21 astetta, joten kylmyys ei voi olla kovettumisen ehkäisevä tekijä. Mahdollisesti jarsiitin itsensä sisältämät kloridit tai muut kovettumista hidastavat tekijät ovat voineet aiheuttaa lujuuskadon. Tätä ei valitettavasti voi todistaa käytettävissä olevista kemiallisista analyyseistä, koska niissä ei ole analysoitu klorideja tai orgaanisia aineita. Toinen betonikokeissa huomattu asia oli, että käytetyllä lentotuhkalla ei tapahtunut lujuuden kehittymistä ja massojen paisuminen oli erittäin näkyvää kaikissa lentotuhkamassoissa. Syynä tähän voi olla samat asiat kuin jarsiitin kohdalla. Vaikka massa tuntui hyvältä, liiallinen paisuminen on vähentänyt lujuuden kehitystä ja näin ollen kaikki lentotuhkaa sisältäneet massat jäivät pois liukoisuustestauksesta. Lentotuhkan tarkemmalla tutkimuksella olisi voitu selvittää mahdolliset aiheuttajat, mutta tämä ei kustannuksiltaan ollut mahdollista tässä työssä.

Liukoisuustestaukseen otettiin mukaan kaksi Plus-sementillä tehtyä vertailukappaletta sekä kaksi masuunikuonalla stabiloitua massaa, joissa tutkittavina teollisuuden sivutuotteina olivat rikastushiekka sekä viherlipeäsakka. Näissä kappaleissa puristuslujuudet rikastushiekalla olivat samat sekä masuunikuonaa että Plus-sementtiä käytettäessä eli noin 9 MPa. Täten voidaan sanoa rikastushiekan toimineen puristuslujuuden osalta kummallakin sideaineella. Viherlipeän puristuslujuudet erosivat toisistaan huomattavasti enemmän. Masuunikuonalla stabiloidun viherlipeämangan puristuslujuus oli noin kaksinkertainen verrattuna Plus-sementillä stabiloidun viherlipeämangan puristuslujuuteen. Ensimmäisen massan puristuslujuus oli noin 4,5 MPa, kun vertailumassan puristuslujuus oli noin 2,1 MPa. Tätä eroa on vaikea selittää käytettävissä olevilla kemiallisilla analyyseillä. Mitä luultavimmin viherlipeä pitää sisällään sellaisia aineita, jotka vähentävät lujuutta sementillä, mutta eivät vaikuta niin paljon masuunikuonaan. On huomioitavaa, että Plus-sementissä käytetään sideaineena myös masuunikuonaa ja muita sideaineita.

6.2 Liukoisuustestit

Liukoisuustestit suoritettiin Oulun yliopiston soveltavan kemian tutkimusryhmän tiloissa. Standardin mukaisen liukoisuustestin tulokset ovat nähtävillä kappaleessa 4.2 sekä viisivaiheisen sekventiaalisen uuton tulokset on esitetty kohdassa 4.3 eriteltyinä vaiheittain. Standardi määrittelee erilaisia liukoisuustestejä ja tässä työssä käytettiin standardin SFS-EN 12457-2 [13] mukaista liukoisuustestiä. Tulosten perusteella kaikki arvot olivat reilusti alle Valtioneuvoston asetuksen eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa [12] määrittämistä raja-arvoista, joita tässä työssä käytettiin vertailuarvoina. Standardin mukaisen liukoisuustestin perusteella masuunikuonalla stabiloidut rikastushiekka ja viherlipeäsakka ovat käyttökelpoisia materiaaleja maarakentamiseen.

Viisivaiheisen sekventiaalisen uuton tulokset ensimmäisen vaiheen kohdalla kaikki arvot olivat alle raja-arvojen. Tässä vaiheessa muiden aineiden kuin bariumin (Ba), lyijyn (Pb) ja vanadiinin (V) tulokset olivat alle mittausrajojen. Bariumin (Ba) raja-arvo on 20 mg/kg ja korkein pitoisuus oli 0,3 mg/kg. Lyijyn (Pb) raja-arvo on 0,5 mg/kg ja korkein pitoisuus oli 0,03 mg/kg. Vanadiinin korkein pitoisuus oli 0,2 mg/kg ja raja-arvo on 2 mg/kg. Tämän perusteella tutkitut massat kestävät heikon happosateen.

Toisen vaiheen kohdalla liukoisuusarvot olivat jonkin verran kasvaneet. Näistä arvoista mikään ei kuitenkaan ylittänyt raja-arvoja. Sinkin tulokset plussementtiä ja rikastushiekkaa sisältäneellä massalla olivat samat kuin mikä on määritysraja-arvo eli 4 mg/kg. Masuunikuonan kanssa rikastushiekan kumulatiivinen liukoisuus oli sinkille 2,1 mg/kg. Myös nikkelin pitoisuudet olivat Plus-sementillä stabiloiduilla massoilla lähellä raja-arvoa. Masuunikuonalla stabiloidut massa olisivat selvinneet myös happoaltistuksesta hyvin. Plussementillä valmistetut massat olivat lähellä raja-arvoja, mutta silti läpäisevät happoaltistus simulaation.

Kolmannessa vaiheessa liuotettiin helposti pelkistyviä fraktioita. Tässä vaiheessa kaksi massaa ei ylittänyt määritysraja-arvoja, Plus-sementin ja rikastushiekan sekä Plus-sementin ja viherlipeäsakan avulla valmistetut massat. Raja-arvot rikkoutuivat rikastushiekkaa sisältävällä massalla vain sinkin kohdalla (raja-arvo 4 mg/kg ja kumulatiivinen arvo 5,05 mg/kg). Viherlipeää sisältävällä massalla arvot ylittyivät kadmiumin (raja-arvo 0,02 mg/kg ja saatu arvo 0,03 mg/kg), nikkelin (raja-arvo 0,4 mg/kg ja kumulatiivinen arvo 0,65 mg/kg) ja sinkin (raja-arvo 4 mg/kg ja saatu arvo 4,95 mg/kg) osalta. Muillakin massoilla oli liukoisuuksia näkyvissä bariumin, kuparin, nikkelin, lyijyn ja vanadiinin kohdalla, mutta pitoisuudet olivat reilusti alle raja-arvojen.

Neljännessä vaiheessa kaikki rikastushiekkaa sisältäneet massat rikkoivat jonkun raja-arvon. Rikastushiekkaa sisältävät massat liukenivat liaksi arseeniin ja sinkkiin. Arseenin kohdalla ylitykset olivat yli kolminkertaiset raja-arvoon nähden (raja-arvo 0,5 mg/kg ja saadut kumulatiiviset arvot 1,5 - 1,8 mg/kg) ja sinkin osalta melkein kolminkertaiset (raja-arvo 4 mg/kg ja saadut kumulatiiviset arvot olivat välillä 10,8 - 11,7 mg/kg). Lisäksi masuunikuonalla stabiloitu rikastushiekkaa sisältävä massa ylitti raja-arvot myös vanadiinin kohdalla (raja-arvo 2 mg/kg ja kumulatiivinen arvo 2,3 mg/kg). Raja-arvot olivat kaikilla massoilla kadmiumin kohdalla

lähellä raja-arvoa ja Plus-sementillä stabiloidun viherlipeää sisältävän massan kohdalla yli raja-arvon. Samaisella massalla ylittyivät myös nikkelin (raja-arvo 0,4 mg/kg ja kumulatiivinen arvo 0,65 mg/kg) ja sinkin (raja-arvo 4 mg/kg ja kumulatiivinen arvo 5,65 mg/kg) raja-arvot.

Ainoa massa, jonka kaikki kumulatiiviset liukoisuusarvot pysyivät alle raja-arvojen, oli masuunikuonalla stabiloitu viherlipeäsakkaa sisältävä massa. Tässä massassa ainoastaan kadmium oli lähellä raja-arvoa. Muut arvot olivat reilusti alle raja-arvojen. Kokonaisuudessaan liukoisuustestissä vain yksi massa alitti kaikissa testeissä valtioneuvoston asetuksen eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa määrittämät raja-arvot. Tämä massa oli masuunikuonalla stabiloitu viherlipeäsakkaa sisältävä massa. Muiden osalta ylitykset olivat suhteellisen pieniä, mutta kuitenkin raja-arvojen yläpuolella.

6.3 Taloudellinen tarkastelu

Liitteessä 6 tarkemmin esitettyyn taloudelliseen tarkasteluun on otettu mukaan vain masuunikuonalla ja Plus-sementillä stabiloidut viherlipeäsakkaa sisältävät massat. Finnsementin myymän masuunikuonan ja Plus-sementin tonnihintaero on noin 20 euroa tonnilta. Kiviaineksen hintana on käytetty 20 euroa tonnilta, mutta todellisuudessa hinta vaihtelee kiviaineksesta ja kuljetusmatkasta riippuen. Käytetyt vesimäärät massoilla olivat niin lähellä toisiaan, että niiden kustannukset vaikuttavat vain vähän massojen hintaan. Veden hinnaksi on otettu Kajaanissa tehdyille massoille Kajaanin veden hinnaston mukainen laskutushinta eli 3,46 € / 1000kg, jossa on mukana sekä vesi- että jätevesimaksu ilman kuukausimaksuja. Viherlipeäsakan hinnaksi on otettu -10 euroa tonnilta, eli sen tuottaja maksaa viherlipeän hyötykäytöstä aineen käyttäjälle 10 euroa. Kuljetuskustannukset oletetaan samoiksi, joten niitä ei oteta mukaan tarkasteluun.

Kaavan 3 avulla tutkitun masuunikuonalla stabiloidun viherlipeäsakkaa sisältävän massan hinnaksi saadaan noin 33 euroa kuutiolta ja Plus-sementillä stabiloidulle viherlipeäsakkaa sisältävälle massalle hinnaksi saadaan noin 44 euroa kuutiolta. Mikäli valmistetaan massa, jossa viherlipeäsakkaa ei käytetä lainkaan, saadaan masuunikuonalla valmistetun massan hinnaksi noin 64 euroa kuutiolta ja Plus-sementillä valmistetun massan hinnaksi noin 71 euroa kuutiolta. Kaikissa laskelmissa sideaineen määrä kuutiolla on ollut noin 300 kg / m³. Näiden laskelmien perusteella viherlipeäsakan käyttö on myös taloudellisesti kannattavaa.

7. YHTEENVETO JA JATKOTOIMENPITEET

Tässä lopputyössä tutkittiin kolmen eri teollisuuden sivutuotteen käyttömahdollisuuksia maarakentamisessa. Nämä aineet olivat rikastushiekka kaivoksesta, jarosiitti nikkelitehtaalta sekä viherlipeäsakka sellutehtaalta. Tarkoituksena oli selvittää miten yllä mainitut teollisuuden sivutuotteet saadaan stabiloitua sementin korvikkeilla, jotka tehdään teollisuuden sivutuotteista tai jätteistä. Tutkimusmenetelmiä oli kolme, joista ensimmäinen oli betonin puristuslujuustesti, toinen yksivaiheinen standardin mukainen liukoisuustesti ja kolmas viisivaiheinen sekventiaallinen uutto.

Erilaisia massoja tehtiin kaikkiaan 12 kappaletta, joista vain kuusi massaa kehitti lujuutta. Puristuslujuustestauksesta olleista massoista vain neljä massaa täytti lujuusvaatimukset. Näille massoille tehtiin tarkempi liukoisuustestaus. Liukoisuustesteissä tutkittiin aineiden liukoisuutta standardin mukaisella liukoisuustestillä sekä viisivaiheisella sekventiaalisella uutolla, jossa simuloitiin pahimpia mahdollisia luonnossa tapahtuvia katastrofeja. Saatuja arvoja verrattiin valtioneuvoston asetuksen eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa määrittämiin raja-arvoihin. Standardin mukaisesta liukoisuustestistä saatujen tulosten perusteella kaikki tutkitut massat olisivat käyttökelpoisia maarakentamisessa liukoisuustestien perusteella. Viisivaiheisen uuton tulokset sulki pois muut paitsi masuunikuonalla stabiloidun viherlipeäsakkaa sisältäneen massan. Myös Plus-sementillä tehdyt vertailunäytteet liukenivat tässä testissä liian paljon. Täten tutkimusta ja testausta masuunikuonan sekä viherlipeäsakan osalta kannattaa jatkaa. Tutkimuksissa kannattaa myös tarkastella taloudellisuutta erilaisia kustannusmalleja käyttäen, koska sen merkitys on erittäin suuri rakennushankkeissa.

Tässä työssä tehty tutkimus oli kapea-alainen ja keskittyi tutkimaan vain muutaman teollisuuden sivutuotteen stabiloitavuutta. Lupaavimmaksi stabilointitarkoituksiin osoittautui masuunikuonalla stabiloitu viherlipeäsakkaa sisältävä massa. Näiden tutkimusten avulla viherlipeäsakan käyttämistä maarakentamisessa voidaan lisätä, jolloin teollisuuden maksamat jäteveerot pienenisivät merkittävästi. Nyt tutkittu viherlipeäsakka tuli vain yhdestä sellutehtaasta, joten tuloksia ei voi yleistää kaikkia sellutehtaita koskevaksi. Käytetyn viherlipeäsakan seuraavat tutkimukset kannattaa suunnata kenttäkokeisiin maarakentamisessa ja stabiloinnissa sekä massojen taloudelliseen ja määrälliseen optimointiin. Koska sellutehdas joutuu maksamaan jäteveeroa 55 euroa läjitetyltä tonnilta viherlipeäsakkaa, voidaan kysyä olisiko mahdollista maksaa maarakentajalle ja/tai tilaajalle 10 euroa käytetystä viherlipeäsakka tonnista? Taloudelliset tarkastelut on tehty tästä näkökulmasta, koska tässä tilanteessa voittajia olisivat sekä teollisuus että urakoitsija/tilaaja. Myös neitseellisten kiviainesvarantojen käyttö pienenesi, mikä säästää ympäristöä. Tässä työssä ei optimoitu ollenkaan sideaineen käyttöä viherlipeäsakan kanssa. Optimoinnin avulla voidaan stabilointikustannuksia pienentää ja täten saada viherlipeäsakan käytöstä taloudellisesti vieläkin kannattavampaa. Routiminen on eräs tärkeä asia maarakentamisessa ja sitä ei käsitelty tässä työssä ollenkaan. Routimistutkimukset kannattaa tehdä, jotta varmistutaan viherlipeäsakan soveltuvuudesta stabilointiin Suomessa.

Tutkimuksessa mukana olleita geopolymeerejä on tutkittu suhteellisen paljon ja ne ovat yleisesti käytössä nykyään. Tutkittavia geopolymeerejä kannattaa etsiä uusilta alueilta, esimerkiksi sementin hienouteen hienonnettu kierrätyslasi on mielenkiintoinen tutkimuskohde. Myös muita teollisuudesta tulevia sivuainevirtoja kannattaa tutkia ja tätä työtä on paljon tehty erityisesti UUMA- ja UUMA2 – hankkeissa. Teollisuuden sivutuotteita kannattaa tutkia sekä geopolymeerikäytössä että kiviainesta korvaavana materiaalina maarakentamisessa ja stabiloinnissa. Tässä työssä käytetyt jarosiitti ja rikastushiekka voivat olla potentiaalisia aineita maarakentamiseen erilaisia sideaineita ja massakoostumuksia käyttäen, joten niiden tutkimista erilaisilla annostuksilla ja sideaineilla kannattaa jatkaa.

Teollisuuden sivuvirroista saatavilla tuotteilla voidaan helposti korvata neitseellisistä raaka-aineista tuotettuja kiviaineksia tai sideaineita. Teollisuuden tutkimus sivuvirtojen hyötykäyttöön on kasvanut viime aikoina merkittävästi ja yksi suurimmista syistä on valtiovallan päätökset jätemaksuista. Ilman tällaisia päätöksiä mitä luultavimmin kaatopaikoille menevä materiaali olisi lisääntynyt vielä pitkään. Siksi näiden aineiden tutkimukseen kannattaa panostaa ja tutkimuksia jatkaa, jotta useat sukupolvet meidän jälkeekin voivat nauttia ympäristöstämme.

LÄHTEET

- [1] Hallituksen esitys jäteverolain muuttamiseksi, L HE 35/2015 vp, 2015. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2015/20150035.pdf>.
- [2] TR Stabilisation Ltd. History of soil stabilization. 2015. Saatavissa: <http://www.trstabilisation.co.uk/History-of-Soil-Stabilisation.html>. Luettu 4.6.2015.
- [3] Kujala, K., Yhdyskunnan geotekniikka luento 3.2, Oulu. 2014.
- [4] Tekniikka ja Talous. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/arkisto/2006-01-18/Massastabiloinnin-periaate-3268015.html>. Luettu 4.6.2015
- [5] Liikennevirasto, Syvästabiloinnin suunnitteluohjeet, Liikennevirasto, Helsinki. 2010. Saatavilla: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2010-11_syvastabiloinnin_suunnittelu_web.pdf.
- [6] GeoFirm LLC. Ground Improvement. 2015. Saatavissa: <http://www.geofirmllc.com/groundimprovement.html>. Luettu 4.6.2015.
- [7] Aalto Yliopisto, Luento 6. Pohjavahvistustekniikat / Syvästabilointi. Saatavissa: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-50.3133/luennot/Rak-50_3133_luentomateriaali_5.pdf.
- [8] Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, L 28.6.2006/591, 2006. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20060591>.
- [9] SFS-EN 12457-2, Jätteen karakterisointi. Liukoisuus. Jauhemaisten tai rakeisten jätemateriaalien ja lietteiden liukoisuuden laadunvalvontatesti. OSA 2: Yksivaiheinen ravistelutesti uuttoliuoksen ja kiinteän jätteen suhteessa 10 l / kg jätteen raekoon ollessa alla 4 mm (raekoon pienentäminen tarvittaessa), Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2002.
- [10] Jätelaki, L 17.6.2011/646, 2011. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>.
- [11] Valtioneuvoston asetus jätteistä, L19.4.2012/179, 1993. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120179>
- [12] Ympäristönsuojelulaki, L 27.6.2014/527, 2014. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140527>.
- [13] Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta. L 4.9.2014/713, 2014. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140713>.

- [14] Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista, L 1.3.2007/214, 2007. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2007/20070214>.
- [15] Lannoitevalmistelaki, L 29.6.2007/539, 2006. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060539>.
- [16] Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista, 2.5.2014/331, 2013. Saatavissa: www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130331.
- [17] Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista, 4.9.1997/861, 1997. Saatavissa: www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1997/19970861.
- [18] Huhtinen, K., Lilja, R., Sokka, L., Salmenperä, H., Runsten, S., 2007. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38363>.
- [19] Turunen, T., Sallmèn, M., Meski, S., Ritvanen, U., Partanen, E., 2008. Oulun läänin alueellinen jätesuunnitelma – jätehuollon kehittämissuunnitelma vuosille 2008 – 2018. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38373>.
- [20] Luukkonen, T., Sarkkinen, M., Kempainen, K., 2014, Geopolymeerit taipuvat moneksi. Kemia-lehti, 7/2014, s. 45-47. 2014
- [21] Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D., Thaumaturgo, C., 2000. Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polyalate polymers. Int. J. Inorg. Mater. 2, s. 309-317. [http://dx-doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](http://dx-doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6).
- [22] Inkeröinen, J., Alasaarela E.. Uusiomateriaalien käyttö maarakentamisessa. 2010. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/7913/YM_13-2010_Uusiomateriaalien_kaytto_marakentamisessa_Tuloksia_UUMA-ohjelmasta_2006-2010.pdf.
- [23] Motiva Oy. 2015. Saatavissa: <http://www.uusiomaarakentaminen.fi/uuma2-ohjelma>. Luettu 15.7.2015.
- [24] Sarkkinen M., Gehör S., Luukkonen T. ja Kempainen K., Geomaterials – Geopolymeerien ja –materiaalien käyttösovellukset rakentamisessa, Kajaani, 2014, 194 s.
- [25] Luukkonen, T., Sarkkinen, M., Kempainen, K., 2014, Geopolymeerien vedenkäsittelysovellukset. Kajaani. 2014.
- [26] SFS-EN 197-1, Sementti. Osa 1. Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus, Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2012.
- [27] Finnsementti 1, Suomalainen sementti, 2012 Saatavissa: http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS_Suomalainen_sementti_kirjanen_071112.pdf.

- [28] Mäkikyrö, M., Tien rakennekerrosmateriaalien stabilointi masuunikuonatuotteilla. Tiehallinto. Oulu. 1996.
- [29] Finnsementti 2, Masuunikuonajauheen tuote-esite. 2009. Saatavissa: http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/kj400_1_01102013_160806.
- [30] Vesanto, P., Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä. 2006. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/sy27_pdf1.pdf.
- [31] Kainuun Voima. Energia. 2015. Saatavissa: <http://www.kainuunvoima.fi/energia.html>. Luettu 15.10.2015.
- [32] Ekman, K., Järkevää liiketoimintaa. 2014. Saatavissa: <http://www.slideshare.net/SitraEkologia/kenneth-ekman-teolliset-symbioosit>. Luettu 19.6.2015. Luettu 25.6.2015.
- [33] StoraEnso, Ympäristölupapäätös Dnro PSA-2004-Y-253-111. 2005. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/{4DF61893-A371-4E5B-BA94-337DC17680FE}/81652>. Luettu 21.9.2015
- [34] Laakso, I., Oulun kaustistamon perusprosessikaavio. Oulu. 2015. sähköpostilla Ilkka Laaksolta 5.10.2015.
- [35] Norlisk Nickel. Harjavallan tuotantoprosessikuva. 2015. Saatavissa: <http://www.nornik.fi/openimage/97.jpg?w=800&h=560>. Luettu 7.9.2015.
- [36] Raahen seudun teknologiakeskus Oy, Selvitys kaivoshankkeiden tarjoamista liiketoimintamahdollisuuksista Raahen seutukunnan metalliyrityksille, 2013. Saatavissa: <http://www.prometal.fi/wp-content/uploads/2013/04/1303-Kaivosselvitys-2013.pdf>.
- [37] SFS-EN 12390-1, Muoto, mitat ja muut vaatimukset koekappaleelle, Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2013.
- [38] SFS-EN 12390-2, Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten, Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2009.
- [39] SFS-EN 12390-3, Koekappaleiden puristuslujuus, Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2009.
- [40] SFS-EN 12390-4, Puristuslujuus - vaatimukset testauskoneille, Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki. 2000.
- [41] SFS-EN 12880, Lietteen karakterisointi. Kuiva-aineen ja vesipitoisuuden määrittäminen, Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2000.

- [42] Kaakinen, J., Kuokkanen, T., Kujala, K., Välimäki I., Jokinen H., 2012. The Use of a Five-stage Sequential Leaching Procedure for Risk Assessment of Heavy Metals in Waste Rock Utilized in Railway Ballast. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, s 322-334. Saatavissa:
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15320383.2012.664183>

LIITTEET

Liite 1	Kokonaispitoisuudet
Liite 2	Kemialliset analyysit
Liite 3	Viherlipesakan materiaalien alkuainearvot valmistajien ilmoittamana
Liite 4	Jarosiitin materiaalien alkuainearvot valmistajien ilmoittamana
Liite 5	Rikastushiekan materiaalien alkuainearvot valmistajien ilmoittamana
Liite 6	Taloudellisuuslaskelmat

Liite 1: Kokonaispitoisuudet

Hivenainelaboratorio

PL 3000
90014 OULUN YLIOPISTO
puh. 029 448 1674
puh. 029 448 1685

ANALYYSITODISTUS

42/2015

Kiinteät näytteet

Pvm:23.9.2015

Tilaja: SusChem Kyösti Rajaniemi

Osoite:

NÄYTE	As mg/kg	Ba mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg
Maku + rikas	287	810	<20	<20	522
maku + viher	<20	300	<20	69	91
plus + rikas	283	859	<20	<20	452
plus + viher	<20	211	<20	83	136
	Hg mg/kg	Mo mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Sb mg/kg
Maku + rikas	<20	<20	<20	88	<20
maku + viher	<20	<20	34	<20	<20
plus + rikas	<20	<20	<20	88	<20
plus + viher	<20	<20	61	<20	<20
	V mg/kg	Zn mg/kg			
Maku + rikas	102	548			
maku + viher	151	619			
plus + rikas	58	553			
plus + viher	59	632			

Näytteitä punnitti tarkasti n.0,4g.Lisätty 9ml HNO₃.Annettu liueta yön yli.Lisätty 3ml HCl:a ja 1ml HF:a.
Mikroalltounissa 10min 200°, jäädytys,lisätty 10ml H₃BO₃liuosta.Mikroalltounissa 170°.

Yllä olevat tulokset pätevät ainoastaan tässä selosteena mainituille näytteille. Tämän selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa kopiointista on saatava kirjallinen lupa Hivenainelaboratoriolta.

Maku + rikas = masuunikuonalla stabiloitu rikastushiekka

Maku + viher = masuunikuonalla stabiloitu viherlipeäsakka

Plus + rikas = Plus-sementillä stabiloitu rikastushiekka

Plus + viher = Plus-sementillä stabiloitu viherlipeäsakka

Liite 2: Kemialliset analyysit

Hivenainelaboratorio

PL 3000
90014 OULUN YLIOPISTO
puh. 029 448 1674
puh. 029 448 1685

ANALYYSITODISTUS

43/2015 I

Liuosnäytteet

Pvm: 2015

Tilaja: SusChem Kyösti Rajaniemi

Osoite:

NÄYTE	Ba mg/l	Cr mg/l	Cu mg/l	Mo mg/l
0 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
1.26.8	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
2 26.8	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
3 26.8	0,3	<0,1	<0,1	<0,1
4 26.8	0,3	<0,1	<0,1	<0,1
5 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
6 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
7 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
8 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
0 27.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
1 27.8	0,1	<0,1	0,8	<0,1
2 27.8	0,1	<0,1	0,9	<0,1
3 27.28	0,4	<0,1	<0,1	<0,1
4 27.8	1,1	<0,1	<0,1	<0,1
5 27.8	1,0	<0,1	0,2	<0,1
6 27.8	1,1	<0,1	0,1	<0,1
7.27.8	0,9	<0,1	<0,1	<0,1
8.27.8	0,9	<0,1	<0,1	<0,1
0 28.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
1 28.8	1,6	<0,1	0,6	<0,1

.Alkuaineet määritetty ICP-OES:lla

Yllä olevat tulokset pätevät ainoastaan tässä selosteena mainituille näytteille. Tämän selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa kopiointista on saatava kirjallinen lupa Hivenainelaboratoriolta.

Hivenainelaboratorio

PL 3000
90014 OULUN YLIOPISTO
puh. 029 448 1674
puh. 029 448 1685

ANALYYSITODISTUS
43/2015 II
Liuosnäytteet

Pvm.:2015

Tilaaja: SusChem Kyösti Rajaniemi

Osoite:

NÄYTE	Ni mg/l	Se mg/l	V mg/l	Zn mg/l	
0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
1.26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
2 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
3 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
4 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
5 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
6 26.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
7 26.8	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	
8 26.8	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	
0 27.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
1 27.8	0,2	<0,1	<0,1	4,0	
2 27.8	0,2	<0,1	<0,1	4,0	
3 27.28	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	
4 27.8	0,3	<0,1	<0,1	0,2	
5 27.8	<0,1	<0,1	<0,1	2,0	
6 27.8	<0,1	<0,1	<0,1	2,2	
7.27.8	0,1	<0,1	0,1	<0,1	
8.27.8	0,1	<0,1	0,1	<0,1	
0 28.8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
1 28.8	<0,1	<0,1	0,7	1,0	

Yllä olevat tulokset pätevät ainoastaan tässä selosteena mainituille näytteille. Tämän selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa kopioinnista on saatava kirjallinen lupa Hivenainelaboratoriolta.

Hivenainelaboratorio

PL 3000
90014 OULUN YLIOPISTO
puh. 029 448 1674
puh. 029 448 1685

ANALYYSITODISTUS
43/2015 III
Liuosnäytteet

Pvm.:2015

Tilaaja: SusChem Kyösti Rajaniemi

Osoite:

NÄYTE	Se mg/l	V mg/l	Zn mg/l	
2 28.8	<0,1	0,8	1,1	
3 28.8	<0,1	1,0	4,9	
4 28.8	<0,1	1,0	4,8	
5 28.8	<0,1	1,4	0,8	
6 28.8	<0,1	1,4	0,9	
7 28.8	<0,1	1,6	0,5	
8.28.8	<0,1	1,6	0,5	
3.9	<0,1	<0,1	<0,1	
13.9	<0,1	0,1	<0,1	
23.9	<0,1	0,8	<0,1	
33.9	<0,1	<0,1	<0,1	
43.9	<0,1	<0,1	<0,1	
04.9	<0,1	<0,1	0,2	
2.4.9	<0,1	0,3	6,6	
34.9	<0,1	<0,1	0,7	
44.9	<0,1	<0,1	0,7	
54.9	<0,1	0,8	8,0	
64.9	<0,1	0,8	8,0	
74.9	<0,1	<0,1	0,5	
84.9	<0,1	<0,1	0,6	

Yllä olevat tulokset pätevät ainoastaan tässä selosteena mainituille näytteille. Tämän selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa kopioinnista on saatava kirjallinen lupa Hivenainelaboratoriolta.

Hivenainelaboratorio

PL 3000
90014 OULUN YLIOPISTO
puh. 029 448 1674
puh. 029 448 1685

ANALYYSITODISTUS
43/2015 IV
Liuosnäytteet

Pvm.:2015

Tilaaja: SusChem Kyösti Rajaniemi

Osoite:

NÄYTE	Ba mg/l	Cr mg/l	Cu mg/l	Mo mg/l	Ni mg/l
2 28.8	1,4	0,1	0,5	<0,1	<0,1
3 28.8	1,3	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
4 28.8	1,2	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
5 28.8	2,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
6.28.8	2,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
7.28.8	1,7	<0,1	<0,1	<0,1	0,2
8 28.8	2,0	<0,1	<0,1	<0,1	0,2
0 3.9	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
1 3.9	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
2 3.9	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
3 3.9	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
4 3.9	1,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
0 4.9	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
2 4.9	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1
3 4.9	0,5	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
4 4.9	0,5	<0,1	0,2	<0,1	<0,1
5 4.9	0,1	<0,1	1,5	<0,1	<0,1
6 4.9	<0,1	<0,1	0,5	<0,1	<0,1
7 4.9	1,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
8 4.9	1,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Yllä olevat tulokset pätevät ainoastaan tässä selosteena mainituille näytteille. Tämän selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa kopiointista on saatava kirjallinen lupa Hivenainelaboratoriolta.

Hivenainelaboratorio

PL 3000
90014 OULUN YLIOPISTO
puh. 029 448 1674
puh. 029 448 1685

ANALYYSITODISTUS
43/2015 V
Liuosnäytteet

Pvm.:2015

Tilaaja: SusChem Kyösti Rajaniemi

Osoite:

NÄYTE	Cd mg/l	Sb mg/l	Pb mg/l	As mg/l	Hg mg/l
2 28.8	<0,01	<0,01	0,3	<0,01	<0,01
3 28.8	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
4 28.8	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
5 28.8	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01
6 28.8	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01
7 28.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
8 28.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
0 3.9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
1 3.9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
2 3.9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
4 3.9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
3 3.9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
4 3.9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
0 4.9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
2 4.9	0,01	<0,01	0,2	1,5	<0,01
3 4.9	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
4 4.9	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
5 4.9	0,01	<0,01	<0,01	1,7	<0,01
6 4.9	0,02	<0,01	<0,01	1,8	<0,01
7 4.9	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
8 4.9	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Alkuaineet määritetty ICP-MS:lla

Yllä olevat tulokset pätevät ainoastaan tässä selosteena mainituille näytteille. Tämän selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa kopioinnista on saatava kirjallinen lupa Hivenainelaboratoriolta.

Hivenainelaboratorio

PL 3000
90014 OULUN YLIOPISTO
puh. 029 448 1674
puh. 029 448 1685

ANALYYSITODISTUS

43/2015 VI

Liuosnäytteet

Pvm.:2015

Tilaaaja: SusChem Kyösti Rajaniemi

Osoite:

NÄYTE	Cd mg/l	Sb mg/l	Pb mg/l	As mg/l	Hg mg/l
0 26.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
1 26.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
2 26.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
3 26.8	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01
4 26.8	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01
5 26.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
6 26.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
7 26.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
8 26.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
0 27.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
1 27.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
2 27.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
3 27.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
4 27.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
5 27.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
6 27.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
7 27.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
8 27.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
0 28.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
1 28.8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Alkuaineet määritetty ICP-MS:lla

Yllä olevat tulokset pätevät ainoastaan tässä selosteena mainituille näytteille. Tämän selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa kopioinnista on saatava kirjallinen lupa Hivenainelaboratoriolta.

Liite 3. Viherlipesakan eräitä alkuainearvoja valmistajan ilmoittamana.

Näytteen nro **001** Näytteen tunnus **220/14**
 Näytetyyppi **Kiinteä näyte**

Mittaus suure		Yksikkö	Analyysitulokset
Alumiini, Al (L/S 10)	**	mg/kg kuiva-ainetta	3,0
Arseeni, As (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,15
Boori, B (L/S 10)	**	mg/kg kuiva-ainetta	1,4
Barium, Ba (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	0,079
Beryllium, Be (L/S 10)		mg/kg kuiva-ainetta	<0,05
Kalsium, Ca (L/S 10)		mg/kg kuiva-ainetta	12,5
Kadmium, Cd (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,015
Koboltti, Co (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,05
Kromi, Cr (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,1
Kupari, Cu (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,1
Rauta, Fe (L/S 10)	**	mg/kg kuiva-ainetta	<0,15
Kalium, K (L/S 10)		mg/kg kuiva-ainetta	925
Magnesium, Mg (L/S 10)		mg/kg kuiva-ainetta	<0,25
Mangaani, Mn (L/S 10)	**	mg/kg kuiva-ainetta	0,29
Molybdeeni, Mo (L/S 10)		mg / kg kuiva-ainetta	0,083
Natrium, Na (L/S10)		mg/kg kuiva-ainetta	11600
Fosfori, P (L/S 10)		mg/kg kuiva-ainetta	1,8
Nikkeli, Ni (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,1
Lyijy, Pb (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,15
Rikki, S (L/S 10)		mg / kg kuiva-ainetta	4050
Antimoni, Sb (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,05
Seleen, Se (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,05
Tina, Sn (L/S 10)		mg / kg kuiva-ainetta	<0,15
Titaani, Ti (L/S 10)		mg / kg kuiva-ainetta	<0,15
Vanadiini, V (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<0,05
Sinkki, Zn (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	0,17
Elohopea, Hg (L/S 10)		mg / kg kuiva-ainetta	<0,005
Fluoridi (L/S 10)		mg / kg kuiva-ainetta	<5
Kloridi (L/S 10)		mg / kg kuiva-ainetta	60
Sulfaatti (L/S 10)		mg / kg kuiva-ainetta	620
DOC (L/S 10)	**	mg / kg kuiva-ainetta	<50
L/S10 uutteen pH			12,5
L/S10 uutteen johtokyky		mS / m	1030
Fenoli-indeksi (L/S 10)	(a)	mg / kg kuiva-ainetta	<0,1

SFS-EN 12457-2 (L/S10)

Liite 4. Jarosiitin eräitä alkuainearvoja valmistajan ilmoittamana.**Jarosiitti**

Sähköposti 5.8.2015

Hei

Tässä on analyysi

Al	As	Ca	Co	Cu	Fe	H2O	Ni	S	Zn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.011	0.136	0.002	0.023	0.764	35.765	21.17	0.949	10.007	0.001

Tuo analyysi on näytteenottopäivän keskiarvo. Vuorokausianalyysit eivät kuitenkaan paljoa vaihtele.

Liite 5. Rikastushiekan eräitä alkuainearvoja valmistajan ilmoittamana.

Rikastushiekka

sähköposti 29.7.2015

		Jäte
Cu	%	0.095
Zn	%	0.39
Fe	%	26.8
S	%	30.1
Pb	%	0.024
BaSO4	%	6.32
L:ton	%	27.33
Cd	g/t	7.3
Hg	g/t	0.41
Co	%	0.029
Ni	%	0.008
Al	%	2.14
TI	g/t	4.8
Se	g/t	24.4
Te	g/t	<10
As	g/t	500
Sb	g/t	70
Sn	g/t	<20
Bi	g/t	<50
Na	%	0.47
K	%	0.318
Mg	%	2.54
Ca	%	4.56
Mn	%	0.058
P	%	0.026
F	g/t	400
Cl	g/t	140
SiO2	%	17.3

Liite 6. Taloudellisuuslaskelmat

Taloudellisuuslaskelmat tehdyille massoille sementin määrän ollessa noin 300 kg / m³

	Hinta	Tiheys	Määrä	hinta
Masuunikuonalle	€/1000kg	1000 kg / m ³	paino % / m ³	€/m ³
Masuunikuona	60	2,9	19,01 %	33,09 €
Kiviaines	20	2,67	12,57 %	6,71 €
Viherlipeäsakka	-10	1,211	60,52 %	-7,33 €
Veden hinta	3,46	1	7,90 %	0,27 €
YHTEENSÄ			100 %	32,74 €

	Hinta	Tiheys	Määrä	hinta
Plus-sementille	€/1000kg	1000 kg / m ³	paino % / m ³	€/m ³
Masuunikuona	80	2,9	19,27 %	44,71 €
Kiviaines	20	2,67	12,70 %	6,78 €
Viherlipeäsakka	-10	1,211	61,52 %	-7,45 €
Veden hinta	3,46	1	6,51 %	0,23 €
YHTEENSÄ			100 %	44,27 €

Taloudellisuus laskelmat pelkällä kiviaineksella sementin määrän ollessa n. 300 kg / m³

	Hinta	Tiheys	Määrä	hinta
Masuunikuonalle	€/1000kg	1000 kg / m ³	paino % / m ³	€/m ³
Masuunikuona	60	2,9	11,00 %	19,14 €
Kiviaines	20	2,67	84,43 %	45,09 €
Veden hinta	3,46	1	4,57 %	0,16 €
YHTEENSÄ			100 %	64,39 €

	Hinta	Tiheys	Määrä	hinta
Plus-sementille	€/1000kg	1000 kg / m ³	paino % / m ³	€/m ³
Masuunikuona	80	2,9	11,07 %	25,67 €
Kiviaines	20	2,67	85,20 %	45,49 €
Veden hinta	3,46	1	3,74 %	0,13 €
YHTEENSÄ			100 %	71,30 €