

# B

## BIOPOLTON LENTOTUHKAT

UUDET SYMBIOOSITUOTTEET JA KÄYTTÖSOVELLUTUKSET  
(GEOSYNERGY)

Minna Sarkkinen, Kimmo Kempainen, Kauko Kujala, Seppo Gehör



SSAB  
RUUKKI



morenia



Juuan  
Dolomittikalkki Oy



KAJAANIN  
AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Kajaanin ammattikorkeakoulu Oy

Kajaani University of Applied Sciences

**BIOPOLTON LENTOTUHKAT**  
**UUDET SYMBIOOSITUOTTEET JA**  
**KÄYTTÖSOVELLUTUKSET (GEOSYNERGY)**

Minna Sarkkinen, Kimmo Kemppainen, Kauko Kujala, Seppo Gehör

Kajaanin ammattikorkeakoulun julkaisusarja B

Raportteja ja selvityksiä 57

**Yhteystiedot:**

Kajaanin Ammattikorkeakoulun kirjasto

PL 240, 87101 KAJAANI

Puh. 044 7157042

Sähköposti: [amkkirjasto@kamk.fi](mailto:amkkirjasto@kamk.fi)

<http://www.kamk.fi>

Kajaanin ammattikorkeakoulun julkaisusarja B 57 / 2016

ISBN 978-952-9853-93-9

ISSN 1458-915X

## TIIVISTELMÄ

GeoSynergy-projektin tässä osassa käsitellään tutkimuksia, jotka kohdistuivat biopolton lentotuhkien käyttöön primäärisinä raaka-aineina. Tutkimukset sisälsivät pääasiassa laboratorioissa tehtyjä sideainetutkimuksia ja raaka-aineanalyysyjä. Biotuhkien käyttöä tutkittiin lisäksi tiekorjauspilottikohteessa.

### **Yhteenveto Kainuun Voima Oy:n ja Stora Enso Oyj Oulun biopolton lentotuhkilla tehtyjen tutkimusten tuloksista GeoSynergy-projektissa**

#### *KAVO:n biopolton lentotuhkien toimivuus sideaineena:*

- Alkalisten seosaineiden (esim. CaO) käyttö lisäsi kaasunmuodostusta ja siitä seurauksena olevaa paisumista KAVO:n biopolton lentotuhkissa.
- Paisuminen tapahtui massoissa veden lisäyksen jälkeen ennen sitoutumista, ei estänyt lujuudenkehitystä, mutta ylimääräinen ilma heikensi loppulujuutta.
- Ylimääräisen kaasun ja sitä seurannut huokoisuuden kasvu lisäsi lujuutta parantavien seosaineiden kuten sementin tarvetta.

#### *Stora Enson Oulun biopolton lentotuhkien toimivuus sideaineena:*

- Stora Enson biopolton lentotuhkien CaO-pitoisuus vaihteli huomattavasti vaikuttaen erityisesti masuunikuonajauheen ja dolomiitin toimintaan seosaineena.
- Masuunikuonajauhe tai masuunikuonajauheen ja sementin yhdistelmä oli tehokkain seosaine Stora Enson Oulun biopolton lentotuhkan kanssa testatuista seosaineista.
- Käyttämällä pelkkää masuunikuonajauhetta lentotuhkan kanssa voitiin saavuttaa lähes yhtä hyvä puristuslujuus kuin käyttämällä vastaava määrä sementtiä ja masuunikuonajauhetta lentotuhkan kanssa.
- Dolomiitin toiminnan tehokkuuteen Stora Enson biopolton lentotuhkan kanssa seosaineena vaikutti lentotuhkan CaO-pitoisuus.

#### *Biopolton lentotuhkien käyttö murskeen stabilointiaineena:*

- Sekä KAVO:n että Stora Enson biopolton lentotuhkat toimivat hyvin murskeen stabilointiaineena seosaineen kanssa käytettäessä.
- KAVO:n lentotuhkan (13 %) kanssa parhaiten seosaineena toimi sementti (2 %), jonka avulla saavutettiin lähinnä tavoitelujuutta (4-6 MPa) vastaava puristuslujuus.
- Stora Enson lentotuhkan kanssa murskeen stabiloinnissa toimivat parhaiten seokset: biotuhka 12 % + sementti 3 %, biotuhka 11 % + sementti 2 % + masuunikuonajauhe 2 % ja biotuhka 11 % + masuunikuonajauhe 4 %.
- CaO:n määrän vaihtelu vaikutti huomattavasti Stora Enson lentotuhkan ja käytettävien seosaineiden avulla saavutettuihin lujuuksiin

#### *Sideaineseossuosituksset Saviniementien pilottikohteessa:*

Koetulosten perusteella huomioiden stabilointityön toteutettavuuden kannalta optimituhkamäärä ja lisäseosaineiden määrä:

- Käytettäessä KAVO:n lentotuhkaa primäärisenä stabilointiaineena optimiannostus oli 9 % biolentotuhkaa + 4 % Rapid-sementtiä.
- Stora Enson tuuhkaa käytettäessä lähinnä tavoitelujuutta vastaava tulos saatiin käyttämällä biolentotuhkaa 8 % + Rapid-sementtiä 4 %.

#### *Rakenneyhtälömallin perusteella voi todeta, että*

- Koekappaleiden tiheys indikoi parhaiten lujuutta.
- Biotuhkan osuus sideainemäärästä indikoi hyvin sekä tiheyttä että lujuutta.
- Vesisideainesuhte ei ollut merkittävä indikaattori stabilointimassojen toimivuudelle.

*Biopolton lentotuhkien esikastelun vaikutus niiden reaktiivisuuteen.*

- Biopolton lentotuhkan kastelu 2 vrk etukäteen heikensi selvästi molempien testattujen biopolton lentotuhkien reaktiivisuutta säilytettäessä tuhkia huonelämpötilassa.
- Käytettäessä korkeampaa vesimäärää (25 %) vaikutus testattujen biopolton lentotuhkien reaktiivisuuteen oli haitallisempi kuin käytettäessä pienempää vesimäärää (12,5 %).
- Pienemmällä vesimäärällä (10 %) ei ollut haitallista vaikutusta tuhkien reaktiivisuuteen 4 h kuluttua veden lisäyksestä huonelämpötilassa.

## Sisällys

TIIVISTELMÄ .....	1
PROJEKTIN TAUSTA .....	4
TUTKIMUS- JA KEHITYSTYÖN TOTEUTUS JA TULOKSET .....	6
1 BIOTUHKIEN KÄYTÖN KEHITTÄMINEN GEOSYNERGY-PROJEKTISSA .....	8
1.1 Biopolton lentotuhkien käyttö sideaineena maarakenteiden stabiloinnissa.....	9
1.2 Koetuhkien ominaisuudet .....	11
<i>KAVO:n biotuhkat.....</i>	<i>11</i>
<i>KAVON biolentotuhkan TGA .....</i>	<i>13</i>
<i>KAVO:n lentotuhkanäytteiden XRD-analyysit 2015.....</i>	<i>14</i>
<i>KAVO:n biotuhka stabilointimateriaalina .....</i>	<i>14</i>
1.3 Stora Enson Oulun biotuhka .....	17
<i>Stora Enson Oulun tehtaan biopolton lentotuhkan kemiallinen koostumus .....</i>	<i>17</i>
<i>Stora Enson Oulun lentotuhkien TGA .....</i>	<i>18</i>
<i>Stora Enson Oulun lentotuhkien XRD-analyysit.....</i>	<i>18</i>
<i>Stora Enson Oulun biopolton lentotuhka stabilointimateriaalina .....</i>	<i>19</i>
2 KENTTÄTUTKIMUKSET – SAVINIEMENTIEN KORJAUS .....	21
2.1 Koekuoppatutkimukset.....	21
2.2 Sideaineseokset .....	24
2.3 Sideainekokeet murskeella .....	24
2.4 Sideainekokeet Saviniementien runkoaineella.....	27
<i>Runkoaine .....</i>	<i>27</i>
<i>Sideaineseokset.....</i>	<i>28</i>
2.5 Jäädytys-sulatuskokeet stabilointimassalla.....	32
2.6 Tilastolliset rakenneyhtälömallit biolentotuhkaseoksien käytöstä .....	33
2.7 Etukäteen kastellun lentotuhkan lujuudenkehitys ja itsekovettuminen .....	35
2.8 Pilottikokeen toteutus.....	37
<i>Runkoaineen murskaus ja stabilointityön toteutus kohteessa .....</i>	<i>37</i>
2.9 Pilotointitavan valintaan vaikuttavat kustannustekijät.....	43
<i>Elinkaarikustannukset .....</i>	<i>46</i>
3 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	47

## PROJEKTIN TAUSTA

Pohjois-Suomen haasteena osana EU:n pohjoista harvaan asuttua seutua on vastata ilmaston muutoksen, energiapolitiikan ja energiakustannusten asettamiin kehitystarpeisiin. Pitkät maantieteelliset etäisyydet Euroopan markkinakeskuksiin edellyttävät kykyä hyödyntää paikallisia resursseja (glokalisatio). Kainuun alueella näihin haasteisiin voidaan vastata kehittämällä luonnonvarojen kestävää käyttöä, jatkojalostusta ja luomalla edellytyksiä niiden mahdollistamalle uudelle liiketoiminnalle.

Alueellisella synergialla eli teollisella symbioosilla tarkoitetaan mm. teollisuuden jäännösvirtojen hyödyntämistä ja siihen liittyvää yritysten ja prosessien symbioosin kaltaista vuorovaikutusta. Symbioosituotteella tarkoitetaan tuotetta, jossa hyödynnetään teollisten yksiköiden sekundäärisiä raaka-aineita kuten kaivannais- ja energiateollisuuden jätteitä. Teolliseen symbioosiin liittyy tyypillisesti maantieteellinen läheisyys (lyhyet kuljetusetäisyydet) ja poikkiteollinen yhteistyö tavoitteena palvella teollisen ekologian realisoitumista eli energiatehokkuutta ja jätteiden kierrätystä uusia ratkaisuja luomalla. Teollisen symbioosin kehittämisen ajureita ovat mm. kasvava kuluttajakysyntä ekologisille tuotteille, tiukentuneet jätelait, niukkenevat luonnonvarat ja uusien teknologioiden luomat mahdollisuudet symbioosituotteiden kehittämiseen. Luonnonvarojen rajallisuus ja kasvava mineraalien tarve toimivat ajureina sekundääristen mineraalien kuten kaivosteollisuuden sivukivien ja energiatuotannon tuhkien hyödyntämiselle. Teollinen symbioosi syntyy yleensä mineraalien sivuvirtoja tuottavan yrityksen ympärille, joka voi olla esimerkiksi kaivos tai energialaitos. Hyödyntäminen tapahtuu tyypillisesti joko mineraalivirroissa olevien reaktiivisten aineiden erottamisena esim. lentotuhkasta tai sivuvirtojen käyttönä materiaalina tai symbioosituotteina (osakomponentteina). SITRA:n tekemän tutkimuksen mukaan valtaosa teollisissa symbioosissa mukana olevista yrityksistä hyötyy kustannussäästöistä ja materiaalitehokkuudesta [1].

### *Teollisuuden sivutuotteet*

VTT:n tutkimusten [2] perusteella massamääräisesti tarkasteltuna sivuvirtojen hyödyntämispotentiaali on suurin kaivannaisteollisuudessa (hyötykäyttö n. 30 %). Kaivannaisjätteellä tarkoitetaan kallio- tai maaperässä luonnollisesti esiintyvän orgaanisen tai epäorgaanisen aineksen irrotuksessa, varastoinnissa, rikastamisessa tai muussa jalostamisessa syntyvää jätettä [3], joita ovat metallimalmikaivosten, teollisuusmineraali- ja kiviutuotannon sekä luonnonkivilouhimoiden sivukivet, rikastushiekat ja prosessijätteet. Sivukiven suhteellinen osuus on lähes yhtä suuri kuin metallimalmien ja teollisuusmineraalien osuus [4]. Kaivannaisjäte muodostaa ekologisen riskin ja toisaalta mahdollisen raaka-aineen toisissa käyttökohteissa. Ympäristövahinkojen estämisen kannalta kehittämiskohteita ovat mm. pato- ja vesialtaiden turvallisuus, stabilointi ja jätevesien vuotamisen hallinta. Projekti vastasi myös Kainuun kaivosalan toimintaohjelmassa määritettyihin tavoitteisiin pyrkimällä edistämään kaivannaisjätteiden hyötykäyttöä. Lisäksi biomassaa käyttävien energialaitosten synnyttämän biotuhkan jatkojalostuksen tarve ja sen edellytysten kehittäminen on kasvava ongelma Suomessa ja Euroopassa.

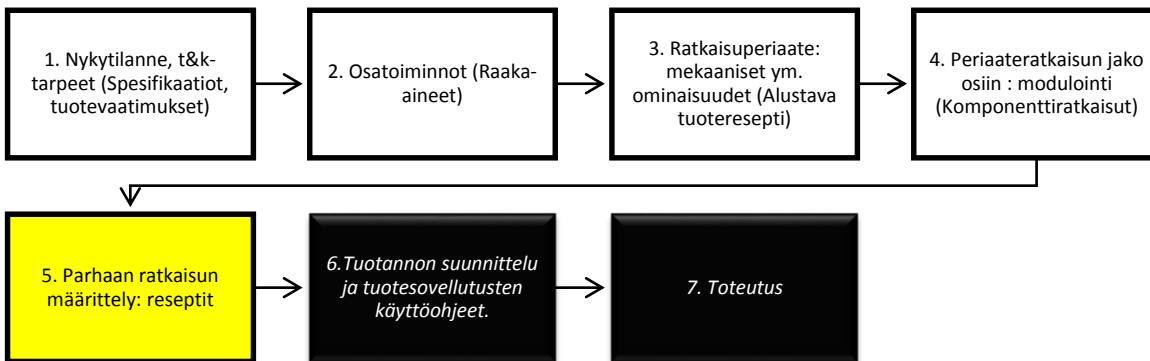
Teollisuuden sivutuotteita kuten terästeollisuuden masuunikuonia, mikrosilikaa ja kivihiilen poltossa syntyviä lentotuhkia on jo laajasti tutkittu, standardisoitu ja hyödynnetty erityisesti betoniteollisuudessa normaalin portlandsementin seosaineena ja osittaisena korvikkeena jo siinä määrin, että niiden hinta on suhteellisen korkea (esim. mikrosilika n. 400 EUR/t). Kaivannaisteollisuuden vielä hyödyntämättömiä jätemateriaaleja jalostamalla voidaan täydentää jo tunnettujen ja käytettyjen sivutuotteiden ominaisuuksia sekä kehittää uusia taloudellisia ja ekologisia käyttösovellutuksia uusia materiaalitekniologioita soveltamalla. Hyödyntämistä edistävät hyvä tuntemus kivien laadusta, suuri inertin sivukiven osuus ja suuret tuotantomäärät, kun taas tiedon puute käyttömahdollisuuksista on yksi hyödyntämisen este [5]. Uudet materiaalitekniologiat (mm. geopolymeeritekniologia) mahdollistavat teknisesti parempien ratkaisujen löytämisen verrattuna esimerkiksi portlandsementin käyttöön sideaineena. Yleisesti tiedetään, että sekundääristen raaka-aineiden hyödyntämisessä kannattaa pyrkiä korkeaan jalostusarvoon niiden kaupallisen kilpailuedun optimoimiseksi [2]. Kehittyneisiin materiaalitekniologioihin perustuvia uusia sideaineita voidaan käyttää portlandsementin vaihtoehtona ja siten vähentää kasvihuonepäästöjä ja edistää vähähiilisyttä. Normaalin portlandsementin valmistus tuottaa 5-8 % maapallon hiilidioksidista (1t CO<sub>2</sub>/1t sementtiä) ollen merkittävin CO<sub>2</sub>-tuottaja fossiilisten polttoaineiden jälkeen.

Bio- ja kierrätyspolttoaineiden käyttö on lisääntynyt energiantuotannossa viime vuosina kiristyvien päästädirektiivien sekä kasvavan energian kulutuksen vuoksi. EU:n niin kutsuttu 20–20–20 tavoite tarkoittaa, että vuoteen 2020 mennessä tulisi EU:n energiankulutuksesta 20 prosenttia saada uusiutuvista lähteistä, kasvihuonekaasupäästöjä tulisi vähentää 20 prosenttia sekä energiatehokkuutta lisätä 20 prosenttia. Suomen osalta uusiutuvan energian käyttötavoite on 38 % vuoteen 2020 mennessä, mikä tarkoittaa 16 % vähennystä kasvihuonekaasuissa. Bioenergian käyttöä on lisättävä merkittävästi tavoitteen saavuttamiseksi. Biomassan poltossa syntyvä tuhka aiheuttaa kuitenkin ongelmia. Kiristyvän jäteverotuksen vuoksi on taloudellisesti kannattavaa kehittää erityisesti biotuhkalle uusia käyttökohteita kaatopaikkasijoituksen sijaan. Lisäksi inerteillä (kemiallisesti reagoimattomilla) sekundäärisillä raaka-aineilla (tai inerteiksi modifioituilla jäteaineilla) on mahdollista korvata uusiutumattomien luonnonvarojen: soran, hiekan, kalliomurskeen ja –louheen käyttöä, joita kulutetaan vuosittain n. 70 miljoonaa tonnia [8].



## TUTKIMUS- JA KEHITYSTYÖN TOTEUTUS JA TULOKSET

Geosynergy-projektin tavoite oli tutkia vaihtoehtoisia sideainemateriaaleja, jotka pohjautuvat sekundääristen raaka-aineiden ja paikallisten mineraalien käyttöön. Tutkimus painottui soveltavaan tutkimukseen määriteltyjen käyttösovellutusten osalta. T&K-metodi sovelsi teknisten systeemien ja tuotteiden suunnittelulle tarkoitettuja yleisiä systeemilähestymistapaan perustuvia ohjeita (Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products [6], jonka periaateprosessi on esitetty kuvassa 1.

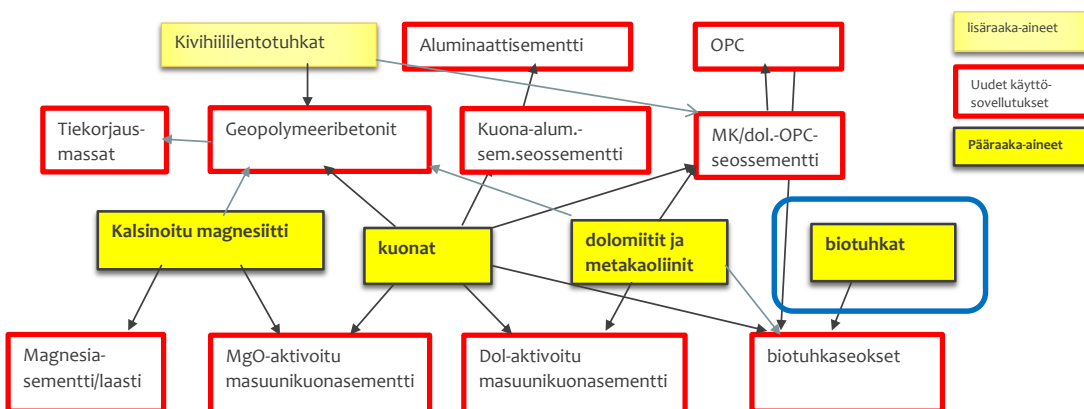


Kuva 1. Projektissa sovellettu T&K –prosessikaavio.

Projekti sisälsi kaavion vaiheet 1-5. Kaaviossa esitetty prosessi seurasi iteratiivista prosessia sisältäen tarvittaessa useita testisarjoja. Projektin puitteissa lopputuloksena syntyi suosituksia tuoteratkaisuille (vaihe 6 kaaviossa).

### Raaka-aineiden synergiavaikutukset

Projektin yhtenä lähtökohtaisena tavoitteena oli tutkia siinä mukana olevien raaka-aineiden välisiä toisiaan täydentäviä vaikutuksia eli synergioita. Kokonaiskuva hankkeessa mukana olleista pääraaka-aineista, niitä täydentävistä tai niillä korvattavista materiaaleista sekä tutkituista käyttösovellutuksista on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Projektin T&K-kaavio ja tämän raportin fokusalue rajattuna.

Lähtökohtana oli projektissa käytetyt pääraaka-aineet: kuonat, biopolton lentotuhkat, rikastushiekka, kaoliini ja dolomiitit, jotka ovat kuvassa 2 keltaisella pohjalla. Täydentävänä sivutuotteena käytettiin kivihiilenpolton lentotuhkaa joissakin sovellutuksissa. Aluminaattisementti ja portlandsementti (OPC) olivat kehitettyjen sideaineseosten korvauksen kohteena. Punaisella kehystetyt laatikot kuvaavat käyttösovellutuksia ja tuotteita, joissa eri raaka-aineita tai niiden yhdistelmiä hyödynnettiin. Kalsinoidun magnesiitin osalta synergiavaikutuksia tutkittiin erityisesti masuunikuonan kanssa sekä korjauslaasteissa käytettävissä tuotesovellutuksissa. Kuonilla tutkittiin synergiavaikutuksia magnesiitin lisäksi dolomiittien ja metakaoliinien sekä biotuhkien kanssa. Dolomiittien ja metakaoliininen synergiavaikutusta tutkittiin niiden kesken sekä lisäksi masuunikuonan ja kivihiilenpolton lentotuhkan kanssa. Biotuhkien kanssa synergiavaikutuksia tutkittiin kuonien lisäksi myös dolomiittien, metakaoliinin ja magnesiumin kanssa. Tämä raportti keskittyy biotuhkien käytön tutkimiseen ja kehittämiseen.

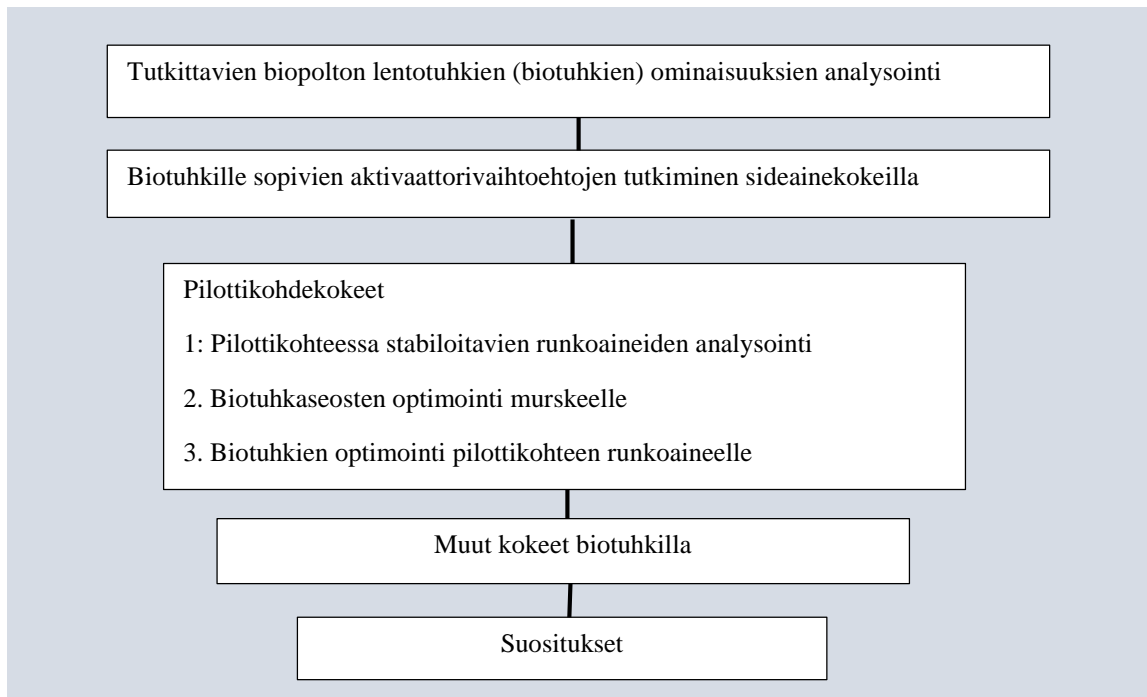
## 1 BIOTUHKIEN KÄYTÖN KEHITTÄMINEN GEOSYNERGY-PROJEKTISSA

Kiinnostus biopoltossa syntyvien tuhkien uusien ja tehokkaampien kierrätysmenetelmien ja käyttösovellutusten kehittämiseksi on kasvanut viime vuosina biopolttoaineiden yhä lisääntyvän käytön ja kasvaneiden jätteidenkäsittelykustannusten seurauksena. On arvioitu, että Euroopassa biopolton lentotuhkien kierrätysaste on tällä hetkellä vain noin 20 % [7]. GeoSynergy-projektin yhtenä tavoitteena on edistää biopolton tuhkien tuotteistamista. Projektin puitteissa tutkittiin biopolton tuhkien soveltuvuutta stabiloinnissa käytettävänä sideaineena laboratoriossa ja kenttäkokeessa.

Biotuhkien käytöstä tierakenteiden stabiloinnissa on kokemusta jo usean vuoden ajalta, mutta tuloksia ei voida suoraan yleistää, koska energialaitosten tuhkat ja maarakennuskohteissa käytettävät maaperät ovat yksilöllisiä. Esimerkiksi Lahtinen [8] on todennut tutkimustensa perusteella, että biopolton tuhkat saattavat teknisesti ja ympäristöllisesti toimia maarakennuskäytössä jopa paremmin kuin kivihiilen polton tuhkat ja, että niillä voidaan korvata perinteisesti käytettyjä stabilointiaineita. Laajojen tuhkien haitta-aineiden liukoisuutta mittaavien tutkimusten perusteella tuhkat ovat vaarattomia maaperälle ja pohjavesille [esim. 10 ja 11]. Suurimman esteen lentotuhkien käytölle rakentamisessa on todettu olevan viranomaisten ja ammattilaisten tietämättömyys lainsäädännöllisten tekijöiden lisäksi [8].

Tehtyjen tutkimusten perusteella lähtökohtaisena olettamuksena on, että biopolton lentotuhkat soveltuvat käytettäväksi tiekorjauskohteiden stabilointisideaineena ja, että biopolton lentotuhkilla voidaan korvata osin normaalia portlandsementtiä ja murskattua kiviainesta. Suomessa käytetään keskimäärin 70 miljoonaa tonnia kivimateriaalia maarakentamisessa vuosittain, josta arviolta 60 % on soraa ja hiekkaa. Tästä määrästä arviolta 24 % voitaisiin korvata hyödyntämällä sekundäärisiä raaka-aineita [8].

Biopolton lentotuhkien käytön tutkiminen on perusteltua, koska niitä syntyy Oulussa ja Kainuussa. Lisäksi useat muut sementille vaihtoehtoiset sideaineet, kuten masuunikuona, kalkit ja masuunihiekan/teräskuonan sekoitus, ovat jo kaupallistettu. Kivihiililentotuhkaa puolestaan ei tuoteta Kainuun alueella. Tutkimusprosessin periaatekaavio on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Biotuhkien tutkimusprosessin periaatekaavio.

Tutkimuksen ensimmäinen osa koostuu sideainekokeista, joissa pyrittiin optimoimaan koetuhkien (KAVO ja Stora Enson Oulun energialaitos) sideaineominaisuuksia käyttämällä runkoaineena neutraalia normihiekkaa (kvartsipitoinen, raekoko 0-2 mm, DIN EN 196-1). Tulokset antavat suuntaa kummankin laitoksen lentotuhkien laadunvaihtelusta ja sideainekäyttäytymisestä sekä parhaiten testatuille tuhille soveltuvista seosaineista. Toisessa osassa keskityttiin tutkittavien lentotuhkien soveltuvuuteen pilottikohteessa käyttämällä runkoaineena mursketta ja pilottikohteen runkoainetta.

Kainuussa on vähän kokemusta biopolton lentotuhkien käytöstä tiekorjauskohteessa, joten tutkimus antoi tietoa ja kokemusta lentotuhkien stabilointisideaineominaisuuksien lisäksi niiden käyttöön liittyvästä logistiikasta, lupamenettelystä, tarvittavista laitteista, olosuhteista, työmenetelmistä, laadunhallinnasta ja niihin liittyvistä kustannuksista. Tutkimuksen lähtökohdat ovat tiivistetysti alla olevassa taulukossa 1.

*Taulukko 1. Tutkimuksen lähtökohdat.*

Tarve	<ul style="list-style-type: none"> <li>• portlandsementille vaihtoehtoinen sideaine</li> <li>• biolentotuhkan hyödyntäminen</li> </ul>
Teknologia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sideaineteknologia</li> </ul>
Hyödyt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pozzolaanisuus</li> </ul>
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> <li>• edullinen raaka-aine</li> <li>• lyhyet kuljetusmatkat Oulun ja Kainuun seuduilla</li> </ul>
Tuotesovellutukset (projektin puitteissa)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabilointi</li> <li>• massiivirakenne</li> <li>• eristemateriaali</li> </ul>
Tuotehyödyt/ kustannukset verrattuna muihin vaihtoehtoihin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• edullisuus</li> <li>• paikallisuus</li> <li>• portlandsementtiin verrattuna ekotehokkuus ja uusiutumattomien luonnonvarojen säästäminen</li> </ul>
Muut yleisimmin käytetyt vaihtoehtoiset tuotteet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• portlandsementti, kivihiilituhka, masuunikuona, masuunihiekka, teräskuona, kipsi, poltettu ja sammutettu kalkki</li> </ul>

## 1.1 Biopolton lentotuhkien käyttö sideaineena maarakenteiden stabiloinnissa

Tierakenteiden hyvä pitkäaikainen kestävyys riippuu usein alla olevien maarakenteiden kantavuudesta, joka vaatii vahvistamista. Vahvistamiseen käytetään kemiallisia tai mekaanisia menetelmiä tai maaperän modifiointia. Kemiallinen vahvistaminen tarkoittaa kemiallisesti aktiivisten aineiden, kuten portlandsementin, kalkin ja lentotuhkan sekoittamista tai injektioimista maa-ainekseen. Perinteiset stabilointimenetelmät perustuvat pozzolaaniseen reaktioon joka voi maaperän mineralogiasta riippuen jatkua jopa vuosia [14].

Eri sideaineyhdistelmien avulla voidaan optimoida esimerkiksi lujuuden kehityksen nopeutta, loppulujuutta, runkoaineen kosteuspitoisuuteen, muodonmuutosominaisuuksiin ja vedenläpäisevyyteen, pitkäaikaiskestävyyteen ja kustannuksiin. Stabilointikustannuksista arviolta 50 – 70 % muodostuu sideaineesta, johon sekundäärisiä raaka-aineita käyttämällä voidaan huomattavasti vaikuttaa [15]. Biopolton lentotuhkien käyttöä stabilointisideaineena on tutkinut esimerkiksi Hansson [16]. Tutkimuksissa pelkkää biopolton lentotuhkaa käyttämällä saatiin heikkoja lujuustuloksia ja todettiin biotuhkan lujuudenkehityksen olevan riippuvainen CaO-pitoisuudesta sekä käytetyistä biotuhkamääristä. Erityisesti sementin lisäyksen todettiin vaikuttavan alkuvaiheen lujuudenkehitykseen, kun taas biotuhkan lujuudenkehitys saattoi jatkua kuukausia. Tutkimuksissa todettiin myös biopolton tuhkien olevan lujuudenkehityksen suhteen huomattavasti heikompia kuin kivihiilen poltossa syntyvien lentotuhkien.

Sideaine maarakenteiden stabilointiin valitaan yleensä maaperän ominaisuuksien perusteella. Kalkki ja sementti ja niiden sekoitus ovat yleisimmin käytettyjä sideaineita. Lisäksi käytetään kivihiilen polton tuhkaa, masuunikuonaa, masuunihiekkaa, teräskuonaa ja kipsiä.

### *Portlandsementti stabilointiaineena*

Portlandsementti ja kalkki ovat yleisimmin käytettyjä stabilointiaineita, jotka ovat tyypillisesti mukana myös eri sivuvirtoja hyödyntävissä sideaineyhdistelmissä aktivaattorina. Portlandsementti koostuu pääasiassa trikalsiumsilikaateista (C3S), dikalsiumsilikaateista (C2S), trikalsiumaluminaateista (C3A) ja tetrakalsiumalumiiniferriteistä (C4AF), (C=CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ja F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [2]. Veden kanssa syntyvässä hydrataatioprosessissa muodostuva kalsiumsilikaattihydraatti (CSH) stabiloi maa-ainesta muodostaen kovan rakenteen maapartikkeleiden ympärille ja kalsiumhydroksidi stabiloi maa-ainesta ionivaihdon kautta, savipartikkeleita flokkuloimalla sekä pitemmän ajan kuluessa muodostamalla sekundäärisiä sementtimateriaaleja vapauttamalla silikaatteja savesta ja niiden yhdistelmiä kalsiumhydroksidin kalsiumin kanssa [10]. On todettu, että kalsiumsilikaattien hydrataatiosta syntyvä kalsiumhydroksidi on reaktiivisempi kuin hydratoitunut kalkki, koska kalsiumsilikaateista muodostunut kalsiumhydroksidi on hyvin hienoa ja siten sekoittuu hyvin maa-ainekseen [16]. Siten partikkelikooltaan hienommat sementit toimivat tehokkaammin stabiloinnissa. Sementti soveltuu sora- ja hiekkapitoisten maiden stabilointiin, joissa on riittävästi hienoaainesta [8]. Sementtilisäystä biotuhkaan on suositeltu käytettäväksi myös parantamaan pakkasenkestävyyttä varsinkin kun biotuhkan määrä on alle 30 % [20]

### *Kalkki stabilointiaineena*

Toisin kuin sementin lisäyksellä, kalkin määrällä on yläraja saavutettavan maa-aineksen lujuuden suhteen riippuen maaperän tyypistä ja mineralogiasta [19]. Esimerkiksi montmorilloniittipitoisen saven optimikalkkimäärä on suurempi kuin kaoliniittipitoisen saven. Kalkki reagoi savipitoisten maiden stabiloinnissa lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Lyhyen aikavälin reaktioon sisältyy ioninvaihto kalkin kalsiumionien ja savipartikkelien pinnan lähellä olevien kationien kanssa, kun kalsiumioneilla on korkeampi varaus tai suurempi pitoisuus kuin kationeilla. Ioninvaihdossa maa-aineksen heikko rakenne muuttuu vahvaksi flokkuloituneeksi rakenteeksi. Pitkän aikavälin pozzolaaniset reaktiot alkavat kalkin hydroksyyli-ionien lisääntymisellä nostamalla maa-aineksen veden pH-pitoisuutta, jolloin saven silikaatti- ja aluminaattirakenteet alkavat liueta. Silikaattien ja/tai aluminaattien vapautuessa ne voivat yhdistyä kalsiumin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraatteja ja/tai kalsiumaluminaattihydraatteja, jotka voivat sitoa savipartikkeleita yhteen. Kalkki soveltuu yleensä savimaiden stabilointiin, kun savipitoisuus on vähintään 7 % [8]. Poltettu kalkki on yleisimmin stabiloinnissa käytetty kalkkityyppi [20]. Poltettu kalkki sisältää suuren määrän vapaata kalkkia ja muodostaa sitoutuessaan lämpöä kiihdyttäen lujuudenkehitystä ja sitoo vettä noin 32 % omasta painostaan.

### *Lentotuhkien käyttö stabiloinnissa*

Lentotuhkien käytölle stabilointiaineena ei ole vielä selviä ohjeita. Kuitenkin tutkimuksissa on todettu, että lentotuhka soveltuu erilaisten kiviainesten kuten hiekan, soran, murskeen ja kuonien stabilointiin [8]. Lentotuhkien on todettu soveltuvan erityisesti karkeiden partikkeleiden stabilointiin, joissa voidaan pozzolaanisten ominaisuuksien lisäksi hyödyntää niiden filleriominaisuutta. Lentotuhkan kanssa käytetään tavallisesti aktivaattoria (20 - 30 % tuhkan määrästä), joka tyypillisesti on portlandsementti tai kalkki. Hienojakoisten heikosti pozzolaanisten savimaiden stabiloinnissa voidaan käyttää lentotuhkaa yhdessä kalkin kanssa lisäämään pozzolaanisuuksia ja parantamaan lujuutta. Huomattava on, että lentotuhkia käsittelevät tutkimukset koskevat pääsääntöisesti kivihiilenpolton lentotuhkia, joiden pozzolaaniset ominaisuudet ovat yleensä huomattavasti paremmat kuin biopolton lentotuhkien. Korkeamman CaO-pitoisuuden omaavia tuhkia on käytetty myös yksinään stabilointiaineena, koska stabilointi perustuu vapaan kalkin määrään, jota vapautuu tuhkan hydrataatioprosessissa. Hienojakoisten maiden stabilointikohteita on toteutettu onnistuneesti sekoittamalla maahan ensin sementtiä tai kalkkia ja lisäämällä sen jälkeen lentotuhkaa. Lentotuhkan vaikutus riippuu huomattavasti lentotuhkan pozzolaanisuudesta, käytetystä aktivaattorista ja lentotuhkan itsekovettumisominaisuudesta [8].

Lentotuhkat jaetaan niiden heikutushäviön eli hiilipitoisuuden mukaan luokkaan A (heikutushäviö  $\leq 5$  %) ja B (heikutushäviö  $\leq 10$  %). Itsekovettuvilla tuhilla tarkoitetaan yleensä luokan B tuhkia, joiden CaO-pitoisuus on suurempi kuin luokan A tuhkien. Tyypillisesti biopolton tuhkien CaO-pitoisuus on korkeampi kuin luokan A-tuhkien. Tuhkien pozzolaanisuus riippuu niiden SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO-pitoisuuksista, hienoudesta ja veden määrästä. Korkea CaO-pitoisuus parantaa tuhkien itsekovettumiskykyä, joka stabiloitaessa savipitoisia maita vähentää niiden plastisuutta ja paisumista. Korkeampi itsekovettuvan tuhkan määrä stabiloinnissa (n. 20 %) vastaa 8 % kalkin lisäystä kaoliini- (85 %) ja bentoniittipitoisissa maissa [14]. Tuhkien reaktiivisuuteen

sideaineena vaikuttavat hehkutushäviö (loss on ignition, LOI), CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ja ominaispinta-ala [21]. Suurempi ominaispinta-ala lisää tuhkien reaktiivisuutta ja korkeampi CaO-pitoisuus lisää tuhkien itsekovettumiskykyä ja kasvattaa optimivesipitoisuutta. Korkeampi LOI heikentää reaktiivisuutta ja lujuudenkehitystä samoin kuin lyijy ja sinkki [32]. Myös lentotuhkien korkea (> 3 %) SO<sub>3</sub>-pitoisuus voi aiheuttaa paisumista. Biotuhkien suhteellisen osuuden nousu sideaineessa yleensä lisää vedentarvetta, joka puolestaan heikentää lujuutta. Aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu, että erityisesti CaO ja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ja Na<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vaikuttavat sitoutumisaikaan itsekovettuvissa tuhissa [14].

Geosynergy-projektin puitteissa tehdyissä kokeissa tutkittiin Stora Enson Oulun tehtaan ja Kainuun Voiman biolentotuhkia, joiden ominaisuuksia on tarkasteltu seuraavaksi.

## 1.2 Koetuhkien ominaisuudet

GeoSynergy-projektissa KAVO:n ja Stora Enson Oulun tehtaan biotuhkan käyttösovellutusten kehittämisen osalta keskityttiin niiden käytettävyyteen primaarisena stabilointiaineena.

### *KAVO:n biotuhkat*

Kainuun Voiman tutkittu lentotuhka syntyy turpeen, kiinteiden biopoltoaineiden, kierrätyspuun ja REF II poltosta, joiden osuus vaihtelee. Kattila on tyypiltään kiertopetikattila.

### *KAVON: biopolton lentotuhkien kemiallisen koostumuksen vaihtelu*

Taulukossa 2 on vuosien 2013-2015 aikana otettujen tuhkanäytteiden tuloksia, jotka on tehty KAMK:n laboratoriossa XRF-laitteistolla. Kyseiset tuhkanäytteet eivät edusta summatuhkaa, vaan tuhkanäytteet on kerätty 2-vedon pohjan tuhkalähettilmiltä kokeita varten, joka on hieman karkeampaa kuin summatuhka.

Taulukko 2. XRF: KAVO:n lentotuhkat(NT 11-12 original, 2014, 2015), KA=kesiarvo, s= keskihajonta.

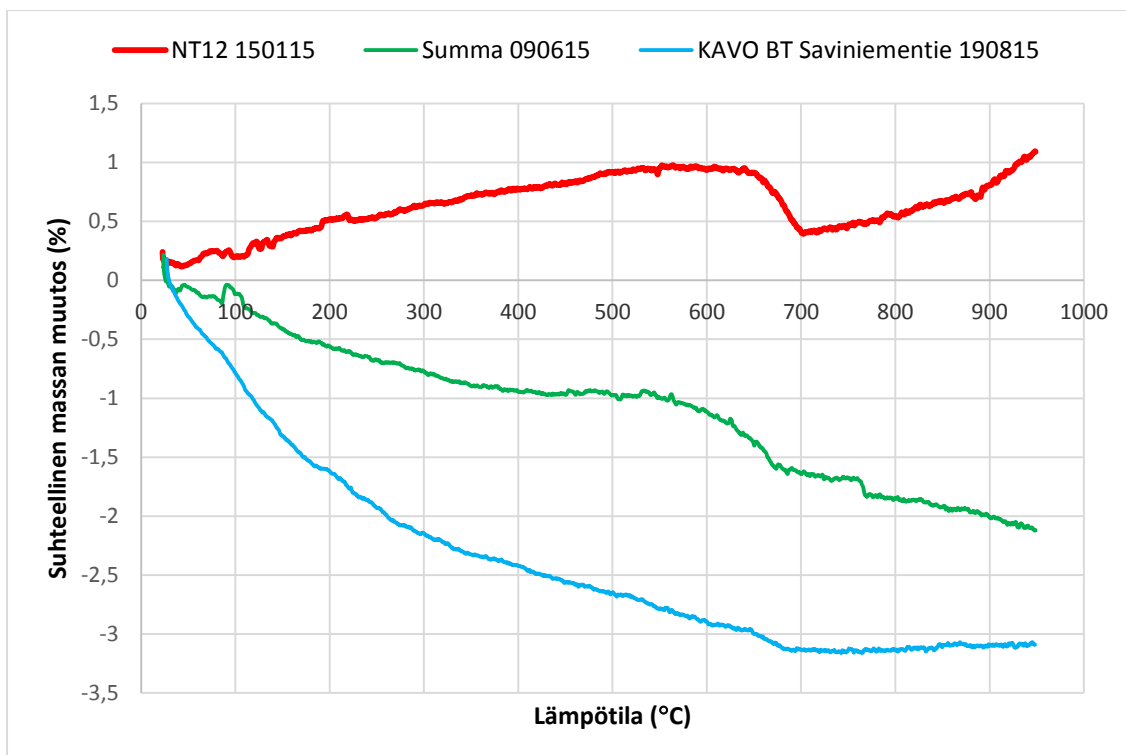
	2.veto (oikea) NT-12 030114	NT-12 200114 60214	NT- 11A 200114 60214	NT-11 B 200114 60214	NT- 11A 200114 180214	NT- 11B 200114 180214	NT-12 200114 180214	NT 12 Origina l 1	NT 11 Origina l 1	NT 11 original uusi 251114	NT 12 original uusi 251114	NT-11 150115 280115	NT-12 150115 280115	NT-11 ja NT-12 150115 280115	KA	s
Na <sub>2</sub> O	1,207	1,573	1,584	1,495	1,589	1,52	1,576	1,54	1,705	1,396	1,28	1,476	1,538	1,515	1,500	0,13
MgO	2,904	2,316	2,313	2,258	2,393	2,251	2,386	1,557	1,756	1,689	1,458	2,26	3,033	3,624	2,300	0,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,056	13,293	13,151	12,862	13,523	12,802	13,462	13,127	14,35	12,586	11,556	12,891	13,945	12,922	12,96	0,85
SiO <sub>2</sub>	37,632	36,396	35,782	35,284	36,719	34,963	36,848	41,587	46,273	40,168	37,072	33,384	34,879	37,054	37,43	3,30
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,121	1,723	1,72	1,68	1,766	1,67	1,739	1,484	1,698	1,409	1,227	1,354	1,458	1,532	1,613	0,22
S	2,217	2,11	2,167	2,095	2,22	2,08	2,134	1,124	1,497	1,213	0,902	1,953	2,072	1,433	1,801	0,46
Cl	0,06	0,207	0,246	0,256	0,244	0,257	0,215	0,164	0,136	0,134	0,17	0,096	0,133	0,114	0,174	0,06
K <sub>2</sub> O	3,272	2,901	2,921	2,905	2,92	2,902	2,902	3,548	3,571	3,369	3,438	3,324	3,467	3,55	3,214	0,29
CaO	14,166	10,742	10,804	10,89	10,871	10,854	10,738	9,538	10,125	9,979	9,363	12,178	12,411	10,746	10,95	1,25
TiO <sub>2</sub>	0,576	0,99	0,991	0,902	1	0,972	0,988	0,851	0,821	0,811	0,854	0,989	0,966	0,983	0,907	0,12
V	0,007	0,018	0,019	0,011	0,017	0,017	0,018	0,01	0,011	0,011	0,011	0,015	0,016	0,014	0,014	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,015	0,038	0,035	0,036	0,037	0,039	0,039	0,019	0,017	0,017	0,019	0,028	0,03	0,024	0,028	0,01
MnO	0,634	0,395	0,4	0,405	0,403	0,408	0,39	0,319	0,344	0,349	0,323	0,417	0,434	0,387	0,401	0,08
FeO	14,358	9,49	9,467	9,995	9,454	9,932	9,408	6,734	7,073	7,207	6,851	7,644	7,884	7,177	8,762	2,03
Ni	0,008	0,01	0,009	0,01	0,01	0	0,01	0,007	0,006	0,006	0,007	0,009	0,009	0,007	0,008	0,00
Cu	0,013	0,054	0,057	0,062	0,057	0	0,053	0,034	0,04	0,041	0,036	0,057	0,059	0,046	0,044	0,02
Zn	0,047	0,177	0,178	0,178	0,175	0,175	0,176	0,097	0,097	0,104	0,106	0,156	0,173	0,138	0,141	0,04
Ga	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,00
As	0,002	0,013	0,014	0,013	0,014	0,014	0,012	0,002	0,003	0,002	0,002	0,004	0,004	0,003	0,007	0,01
Br	0,006	0,003	0,005	0,005	0,004	0,005	0,003	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,00
Rb	0,013	0,012	0,012	0,013	0,012	0,012	0,011	0,013	0,012	0,013	0,014	0,013	0,014	0,013	0,013	0,00
Sr	0,057	0,049	0,049	0,05	0,05	0,049	0,049	0,043	0,041	0,044	0,045	0,05	0,049	0,047	0,048	0,00
Y	0,005	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,004	0,004	0,004	0,004	0,00
Zr	0,022	0,026	0,024	0,028	0,024	0,028	0,025	0,026	0,025	0,027	0,028	0,034	0,032	0,03	0,027	0,00
Pb	0,006	0,035	0,038	0,043	0,038	0,042	0,036	0,022	0,021	0,023	0,023	0,044	0,044	0,025	0,031	0,01
Yht.	90,525	82,577	81,992	81,603	83,547	80,999	83,224	81,854	89,627	80,604	74,792	78,384	82,659	81,392		

XRF-tulosten perusteella KAVO:n lentotuhkien suurin vaihtelu niiden koostumuksessa on CaO-, SiO<sub>2</sub>- ja FeO-pitoisuuksissa. Biotuhkan laadunvaihtelu riippuu pääasiassa käytettävästä polttoaineesta, jota vakioimalla voidaan parantaa myös biotuhkan tasalaatuisuutta ja hyödynnettävyyttä.

KAVO:n lentotuhkalle tehdyissä kokonaispitoisuustutkimuksissa kuparin pitoisuus (670 mg/kg) ylitti tuhkan hyötykäytölle asetetun raja-arvon (400 mg/kg) maaliskuun 2015 näytteessä. Kaksivaiheisen ravistelutestin perusteella lentotuhkan sulfaatin liukoisuus (17 000 mg/kg) ylitti sekä peitetyille (1000 mg/kg) että päällystetyille rakenteille (10000 mg/kg) asetetut raja-arvot [29]. Sulfaatti on pysyvä rikin hapettunut muoto, joka on helppoliukoinen ja siten helposti kulkeutuva. Suurina annoksina sulfaatti voi olla ihmisille ärsyttävä ja talousvesissä lisää niiden korroosioriskiä [14]. Myös kloridin (1700 > 800 mg/kg), kromin (2,4 > 0,5 mg/kg), molybdeenin (3,7 > 0,5 mg/kg) ja seleenin (0,20 > 0,1 mg/kg) liukoisuudet ylittivät peitetyille rakenteille asetetut raja-arvot. Siten maaliskuussa 2015 tutkitun tuhkanäytteen perusteella KAVO:n lentotuhka ei soveltunut hyötykäytettäväksi MARA-asetuksen mukaisissa kohteissa. Koetulosta ei kuitenkaan pidetty riittävän edustavana maarakennuspilottikohteen osalta, koska näytteenottohetkellä polttoaineena oli käytetty kierrätysmateriaalia (REF), jota ei käytetty enää loppukevällä ja kesällä, jolloin lentotuhka varastoitiin pilottikohdetta varten, mutta jota ei käytetty pilottikokeessa. Pilottikokeessa käytettiin tuoretta tuhkaa suoraan kattilan startista.

### **KAVON biolentotuhkan TGA**

Kuvassa 4 on vuonna 2015 otettujen kolmen näyte-erän TGA-kuvaajat, joiden perusteella tammikuussa otetulla tuhkanäytteellä (NT12 150115) ei ollut hehkutushäviötä (LOI). Tämä johtuu talvella käytettävistä korkeista kattilalämpötiloista, jolloin kalsinoituvat komponentit kalsinoituvat poltossa lähes täysin. NT12-käyrässä näkyvä alle prosentin paino-osuuden muutos noin 600°C lämpötilassa voi johtua piin faasimuutoksesta (inversiosta).

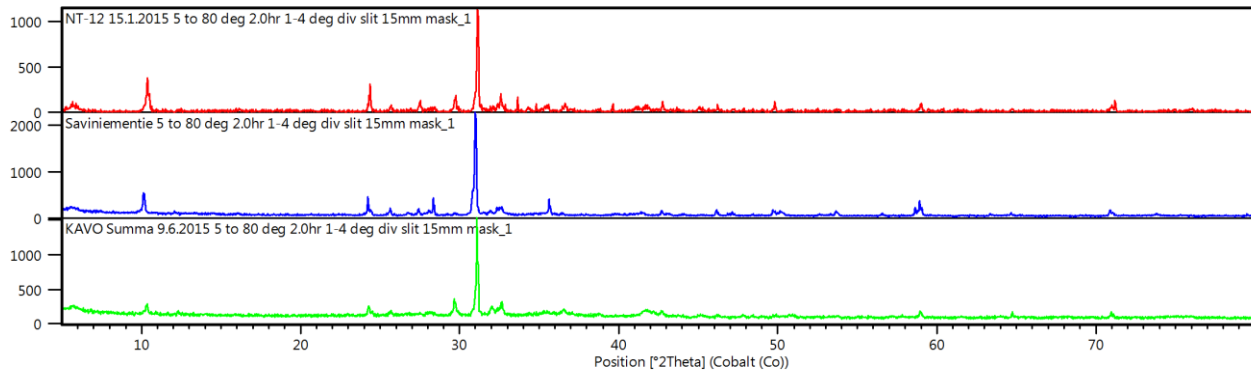


Kuva 4. TG KAVO:n biotuhkista NT12 ja NT11/12 (15.1.2015). Massan muutos (%) suhteessa lämpötilaan.



### KAVO:n lentotuhkanäytteiden XRD-analyysit 2015

Kuvassa 5 on vuoden 2015 aikana KAVO:n lentotuhkista NT-11 ja NT-12 sekä yhdistelmätuhkasta (summa) otettujen näytteiden XRD-kuvaajat. Summa-näyte vastasi lähinnä pilottikohteessa käytettävää tuhkaa.



Keskellä KAVO BT Saviniement.15.8.2015	Alin KAVO summatuhka 9.6.2015	Ylin KAVO NT12 15.1.2015
Compund (Score)	Compund (Score)	Compund (Score)
Quartz low (48)	Quartz (47)	Quartz low (45)
Magnesioferrite (24)	Anhydrite (26)	Albite (16)
Cristobalite (18)	Magnetite (23)	Oligoclase (16)
Enstatite (16)	Oligoclase (19)	Gordonite (16)
Lime (25)	Phengite (12)	Biotite (12)
Diopside (12)	Rutile (22)	Metavoltine (12)
Microcline (10)	Clinomimetite (10)	

Kuva 5. XRD-kaavioiden vertailu kolmesta KAVO:n tuhkanäytteestä tammi-elokuussa 2015.

Kuvassa 5 on kolmen vuonna 2015 otetun biolentotuhkan XRD-analyysi. Ylin näyte on tammikuussa otettu NT-12 näyte, jossa verrattuna keskellä olevaan elokuun tuhkanäytteeseen erottuvat piikit pisteissä 29, 33 ja 34 [°Theta] (albiitti, oligoklaasi, gordonite ja metavoltine). Keskellä on näyte Saviniementien pilottikohteessa käytetystä elokuussa otetusta tuhkasta, jossa summatuhkaan ja NT12-näytteeseen verrattuna erottuu pisteissä 28,36 ja 59 [°Theta] (kristobaliitti, mikrokliini, enstatiitti ja diopsidi).

### KAVO:n biotuhka stabilointimateriaalina

Alustavissa kokeissa tutkittiin KAVO:n biotuhkan sideaineominaisuuksia käyttämällä sekundäärisenä stabilointiaineena dolomiittia, kalsinoitua dolomiittia, jauhettua masuunikuonaa, kalsinoitua magnesiittia ja sementtiä.

### Ensimmäinen koesarja

Ensimmäisissä kokeissa käytettiin biotuhkanäyte-erää, joka oli toimitettu tammikuussa 2015. Kokeissa vesisideainesuhde (w/b) vaihteli välillä 0,33...0,74 käytetystä seosaineesta riippuen ja sideainekiviainesuhde (b/s) oli 0,33. Kiviaineena käytettiin normihiekkaa ja koekappaleet tehtiin 100x100x100 mm betonimuotteihin tiivistämällä massat tärypöydällä. Koekappaleet säilytettiin huonelämpötilassa muovilla peitettynä. Osa koekappaleista lämpökäsiteltiin 60°C uunissa 7 vrk tarkoituksena kiihdyttää lujuudenkehitystä. Taulukko 3 esittää koostetusti seosyhdistelmiä, joiden lujuudenkehitys oli niin heikko, että puristuslujuutta ei voitu määrittää.

Taulukko 3. Ensimmäinen koesarja vuonna 2015 tammikuussa otetulla KAVO:n biotuhkanäytteellä.

Sideaineyhdistelmä (100%)	Lämpökäsittely 7d/ 60°C	Muodonmuutos massassa (paisuminen)
Biotuhka 100%		x
Biotuhka 80% + magnesiumfosfaattisementti 20%		
Biotuhka 70% + magnesiumfosfaattisementti 30%		
Biotuhka 70% + metakaoliini (PalmetaRapidPlus)		x
Biotuhka 70% + masuunikuonajauhe 30%		
Biotuhka 70% + masuunikuonajauhe 20% + kalkkifilleri 10%		
Biotuhka 70% + SMA:n dolomiitti 30%		x
Biotuhka 70% + CaO 30%	x	x
Biotuhka 66% + CaO 34%	x	x
Biotuhka 66% + kalsinoitu saksalainen dolomiitti 34%	x	
Biotuhka 66% + SMA:n dolomiitti 34%	x	x

Kokeiden perusteella aktivoitu poltetu magnesiitti (magnesiumfosfaattisementti) ei sovellu KAVO:n biolentotuhkan seosaineeksi. Myös metakaoliini, masuunikuonajauhe, dolomiitti, kalsinoitu dolomiitti ja poltetu kalkki (CaO) eivät riittäneet testatuilla määrillä parantamaan selvästi KAVO:n biolentotuhkan sideaineominaisuuksia. Myöskään lämpökäsittely ei edistänyt merkittävästi poltetun kalkin, dolomiitin ja kalsinoidun dolomiitin käyttöä seosaineena.

KAVO:n tuhille on todettu olevan tyypillistä herkkyys kaasunmuodotukseen ja sitä seuraavaan voimakkaaseen paisumiseen, joka ilmeni jo pelkkää biotuhkaa sekoitettaessa veteen ja reaktio korostui alkalipitoisia seosaineita (esim. CaO) käytettäessä. GeoMaterials-projektin puitteissa tehdyissä tutkimuksissa todettiin sulamattoman alumiinimetallin olevan potentiaalinen kaasunmuodostuksen aiheuttaja. Myös esimerkiksi Ruotsissa tehdyissä Värmeforskin tutkimuksissa [23 ja 24] on todettu metallisen alumiinin aiheuttavan vetykaasun muodostusta erityisesti leijupetikattilyttypien lentotuhkissa ja käytettäessä kierrätyspoltoaineita.

KAVO:n tuhkien hyötykäyttökelpoisuutta arvioivien koetulosten mukaan maaliskuussa 2015 tutkitun lentotuhkanäytteen sulfaattipitoisuus oli korkea, joka voi myös aiheuttaa haitallista tilavuudenmuutosta. Sulfaatit ja sulfidit voivat reagoida kalsiumin ja alumiinin kanssa riittävän korkeassa pH-ympäristössä ja vesipitoisuudessa muodostaen kalsiumsulfoaluminaattia (ettringiittiä) tai thaumasiittiä aiheuttaen paisumista, joka voi häiritä stabilointitulosta [18,20]. Sulfaatti joko tuhkassa tai stabiloitavassa runkoaineessa ja siitä seuraava paisuminen voi huomattavasti vähentää kestävyyttä ja lujuutta pitkällä aikavälillä. Jos sulfaattipitoisuus on yli 10 % tuhkaa ei suositella käytettäväksi stabiloinnissa [14]. Sulfaattipitoisen materiaalin kanssa suositellaan käytettäväksi sulfaatinkestävää SR-sementtiä [15].

Taulukko 4 ja kuva 6 alla esittävät koostetusti seosaineyhdistelmiä, jotka edistivät KAVO:n biotuhkan toimintaa sideaineena. Seosaineina käytettiin portlandsementtiä, masuunikuonan ja poltetun kalkin yhdistelmää sekä sementin ja poltetun kalkin yhdistelmää. Lisäksi kahdessa kokeessa käytettiin dolomiittia ja kalsinoitua dolomiittia. Kokeissa vesisideainesuhde vaihteli välillä 0,44 - 0,47 ollen suurin käytettäessä seosaineena mukana poltettua kalkkia tai dolomiittia. Sideainekiviainesuhde (b/s) oli kaikissa koemassoissa 0,3. Kiviaineksena käytettiin ensimmäisissä koesarjoissa normihiekkaa.

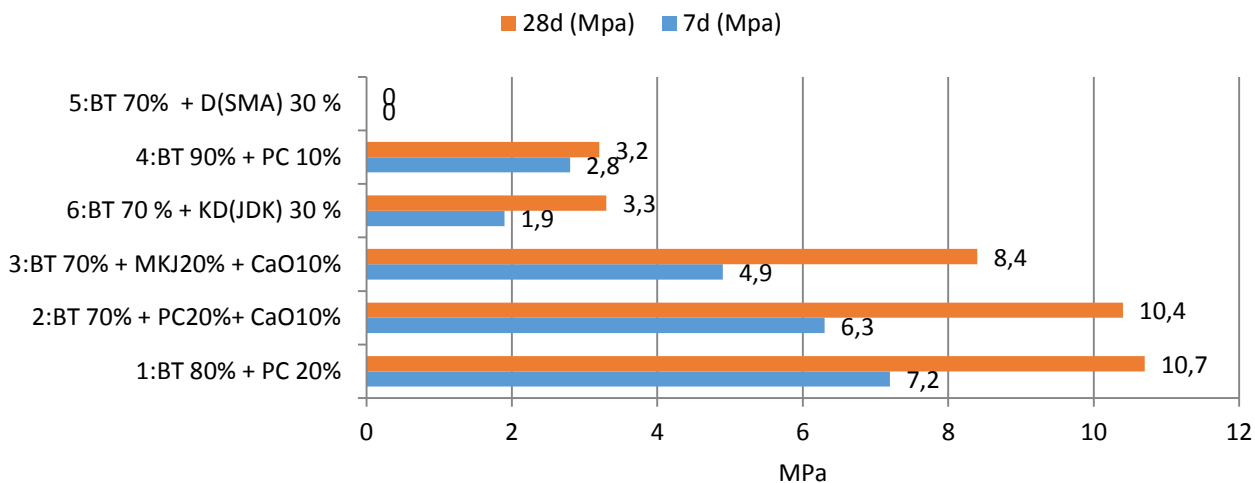
Taulukko 4. Seosaineyhdistelmät KAVO:n lentotuhkalla.

BT= KAVO:n biotuhka N1 2015, D(SMA)=SMA:n dolomiitti, PC=Rapid-sementti, KD(JDK)=JDK:n kalsinoitu dolomiitti 2014,

MKJ=masuunikuonajauhe.

	KAVO BT N1 (%)	PC (%)	MKJ (%)	CaO (%)	Dol. (SMA)	KD JDK 2014	paisuus	b/s	w/b	7d (MPa)	28d (MPa)	7d (kg/m3)	28d (kg/m3)
1	80	20					x	0,3	0,44	7,2	10,7	2139	2050
2	70	20		10			x	0,3	0,47	6,3	10,4	2145	2145
3	70	0	20	10			x	0,3	0,47	4,9	8,4	2182	2188

	KAVO BT N1 (%)	PC (%)	MKJ (%)	CaO (%)	Dol. (SMA)	KD JDK 2014	paisuu	b/s	w/b	7d (MPa)	28d (MPa)	7d (kg/m <sup>3</sup> )	28d (kg/m <sup>3</sup> )
4	90	10					x	0,3	0,42	2,8	3,2	1864	1806
5	70				30		x	0,3	0,47	0	0	x	x
6	70					30	x	0,3	0,47	1,9	3,3	2061	2053



Kuva 6. Toisen koesarjan tulokset KAVO:n biopolton lentotuhkalla. BT= KAVO:n biotuhka N1 2015, D(SMA)=SMA:n dolomiitti, PC=Rapid-sementti, KD(JDK)=JDK:n kalsinoitu dolomiitti 2014, MKJ=masuunikuonajauhe.

Kaikkissa koemassoissa tapahtui selvää kaasunmuodostusta eli massat paisuivat muotissa muutaman minuutin jälkeen muottiin tiivistämisen jälkeen. Kaasunmuodostus ja paisuminen sekä siitä seuraava huokoisuuden kasvu vaikuttivat heikentävästi lujuudenkehitykseen ja tiiviyyteen, mutta eivät estäneet sitä käytetyillä seosaineilla lukuun ottamatta koetta no 5, jossa biotuhkan kanssa käytettiin seosaineena dolomiittia 30 % kokonaissideainemäärästä. Kalsinoitua dolomiittia käytettäessä (koe no 6) lujuudenkehitys oli selvästi heikompi kuin kokeissa 1-3, mutta kuitenkin parempi kuin käytettäessä 10 % sementtiä ja 90 % biotuhkaa (koe no 4). Lujuudenkehitys oli paras käytettäessä sementtiä seosaineena 20 % kokonaissideainemäärästä. Poltetun kalkin lisääminen ei parantanut lujuudenkehitystä yhdessä sementin kanssa, osaksi koska vedentarve kasvoi. Poltetun kalkin käyttö sen sijaan paransi masuunikuonan toimivuutta seosaineena verrattuna edelliseen koesarjaan, jossa pelkkää masuunikuonajauhetta käytettäessä biotuhkan seosaineena selvää lujuudenkehitystä ei tapahtunut.

Johtopäätöksinä sideainekoesarjasta voi todeta, että:

- Alkalisten seosaineiden (esim. CaO) käyttö lisäsi kaasunmuodostusta ja siitä seurauksena olevaa paisumista ja huokoisuuden kasvua KAVO:n biopolton lentotuhkissa.
- Paisuminen tapahtui massoissa veden lisäyksen jälkeen ennen sitoutumista, ei estänyt lujuudenkehitystä, mutta ylimääräinen huokoisuus heikensi loppulujuutta.
- Paisuminen ja siitä seurauksena ollut huokoisuuden kasvu lisäsi lujuutta lisäävien seosaineiden kuten sementin tarvetta.

### 1.3 Stora Enson Oulun biotuhka

#### *Stora Enson Oulun tehtaan biopolton lentotuhkan kemiallinen koostumus*

Stora Enson Oulun biopolton lentotuhkista analysoitiin ja käytettiin kokeissa näyte-eriä, joista neljä näytettä oli vuoden 2013 loppupuolelta, yksi vuodelta 2014 ja kolme vuodelta 2015 (taulukko 5).

Taulukko 5. Stora Enson Oulun lentotuhkanäytteiden koostumus.

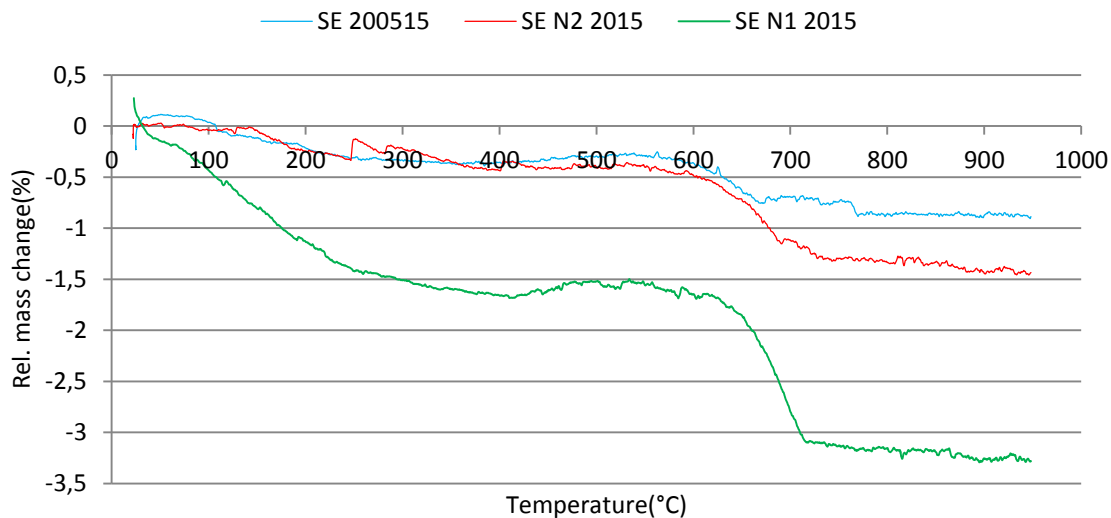
	SE/2013	SELT/2013	SEpieni/2013	SELT/2013	SE/2014	SE1/2015 (N1)	SE2/2015 (N2)	SE3/2015 (N3)	Ka	s
CaO	39,21	38,59	41,33	60,53	31,413	48,29	38,63	23,007	40,13	11,08
SiO <sub>2</sub>	18,97	18,21	16,06	13,15	24,165	17,259	25,092	30,172	20,38	5,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,08	14,99	15,29	9,02	19,524	25,15	17,278	22,905	17,40	5,08
SO <sub>3</sub>	8,16	9,22	8,91	4,98	5,756	2,534	5,307	3,235	6,01	2,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,57	6,58	7,39	4,62	7,009	8,976	10,528	12,892	8,20	2,56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,34	3,46	3,41	1,88	3,373	3,392	3,152	3,573	3,20	0,55
MgO	2,93	2,5	2,9	1,96	3,569	2,937	6,025		3,26	1,31
K <sub>2</sub> O	2,34	2,47	2,23	1,86	2,709	2,267	2,576	2,804	2,41	0,30
Mn	0,7	0,8	0,72	0,45	0,524			0,451	0,61	0,15
Cl	0,59	0,92	0,66	0,4	0,218	0,328	0,148	0,096	0,42	0,28
Ti	0,24	0,24	0,23	0,21	0,178	0,271	0,243	0,368	0,25	0,06
In	0,18	0,15	0,18	0,33	0,179	0,229	0,173		0,20	0,06
Ba	0,16	0,19	0,15	0,12	0,112	0,163	0,143	0,135	0,15	0,03
Zn	0,13	0,2	0,13	0,08	0,128	0,09	0,066	0,092	0,11	0,04
Sr	0,08	0,08	0,08	0,16	0,084	0,109	0,079	0,101	0,10	0,03
Br	0,03	0,03	0,03	0,02		0,039	0,012	0,017	0,03	0,01
Cu	0,02	0,02	0,02	0,01		0,021	0,013	0,023	0,02	0,00
Cr	0,02	0,02	0,02	0,03		0,031	0,021	0,025	0,02	0,00
Zr	0,01	0,01	0,01	0,02		0,024	0,026	0,023	0,02	0,01
Pb	0,01	0,02	0,01	0,01		0,009	0,006	0,015	0,01	0,00
Rb	0,01	0,01	0,01	0,01		0,012	0,012	0,014	0,01	0,00
V	0,01	0,01	0,01	0,01		0,041	0,018	0,026	0,02	0,01
Ru	0,01	0	0,01	0,01				0,001	0,01	0,01
Ce	0,01	0	0	0					0,00	0,01
As	0	0,01	0	0		0,004	0,004	0,004	0,00	0,00
Na <sub>2</sub> O	0	1,07	0	0		0,764	0,758		0,43	0,49
yht. (%)	100	100	100	100	100	100	100	100		

Stora Enson Oulun tehtaan lentotuhkien koostumus vaihteli enemmän kuin KAVO:n tuhkan, mikä näkyi esimerkiksi suurempina CaO-, SiO<sub>2</sub>-, SO<sub>3</sub>-, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- ja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-pitoisuuksien hajontoina. Syynä vaihteluun voi olla paperiteollisuuden puhdistamolietteidien poltto, jotka sisältävät paljon muun muassa kalsiumia. Lietteidien energiaosuus on pieni, mutta sen osuus tuhkasta on huomattava.

Stora Enso Oulun lentotuhkien K3 lentotuhkan (2.6 - 25.6.2014) kaikkien tutkittujen alkuaineiden liukoiset pitoisuudet alittivat päällystetylle rakenteelle VNA:ssa 591/2006 (muutos 1825/2009) asetetut vastaavat raja-arvot. Kromin, molybdeenin, seleenin, kloridin ja sulfaatin liukoiset pitoisuudet ylittivät peitettylle rakenteelle asetetut raja-arvot.

### Stora Enson Oulun lentotuhkien TGA

Kuvassa 7 alla on TGA-kuvaajat Stora Enson Oulun biopolton lentotuhkanäytteiden SE N1 ja SE N2 maaliskuulta 2015 ja SE 200515 toukokuulta 2015.

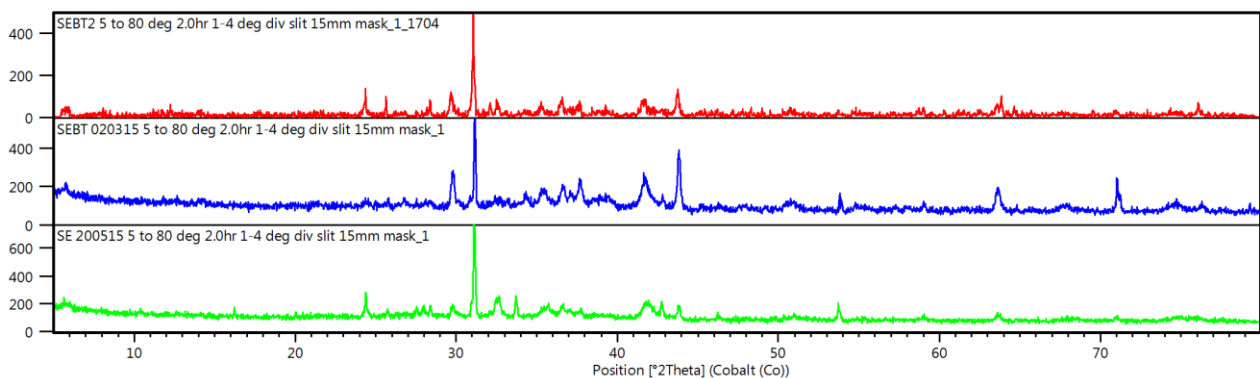


Kuva 7. TGA StoraEnson Oulun biotuhkan näytteistä N1, N2 ja 200515.

TG-analyysien perusteella Stora Enson Oulun tuhkien suhteellinen massahävikki oli suurempi kuin KAVO:n lentotuhkan, mutta hehikutushäviö oli näytteiden perusteella suhteellisen pieni myös näytteessä N1 (< 3,5 %), jossa se oli suurin. N1 poikkesi analyysin perusteella kahdesta muusta näytteestä, mikä koetulosten ja muiden analyysien perusteella (XRF, XRD) oli seurausta korkeammasta CaO-pitoisuudesta.

### Stora Enson Oulun lentotuhkien XRD-analyysit

Stora Enson Oulun lentotuhkien näytteiden XRD-kuvaajat kolmesta eri näytteestä (kuva 8).



N3 SE 200515 Compound (Score)	N1 SEBT 020315 Compound (Score)	N2 SEBT2 Compound (Score)
Quartz (39)	Lime (40)	Ca2 (36)
Lime (31)	Magnesioferrite (35)	Quartz (35)
Magnetite (19)	Anhydrite (16)	Lime (32)
Coesite (12)	Quartz low (24)	Anhydrite (18)
Albite (9)	Clinomimetite (13)	Albite (18)
Gordonite (7)	Choloalite (12)	Magnesioferrite (25)
	Serandite (12)	Pseudorutile (12)
	Ferrobustamite (12)	Larsenite (13)
		Fermorite (18)

Kuva 8. Stora Enson Oulun lentotuhkien näytteiden XRD-kuvaajat. Keskellä näyte N1 maaliskuulta 2015, ylhäällä näyte N2 maaliskuulta 2015 ja alimpana näyte N3 toukokuulta 2015.

XRD-kaavioissa erottuu keskimäinen näyte-erä N2 SEBT2 muista suurempana kalsiumin ja kalkin esiintymisenä esimerkiksi pisteissä 30, 44 ja 64 [ $^{\circ}$ Theta]. Keskimäisessä näytteessä esiintyy muista poiketen myös pseudorutiili, larseniitti ja fermoriitti. Kahdessa muussa näytteessä ylimpänä ja alimpana korostuu kvartsiipiikki pisteissä 25 [ $^{\circ}$ Theta] keskimäistä näytettä enemmän.

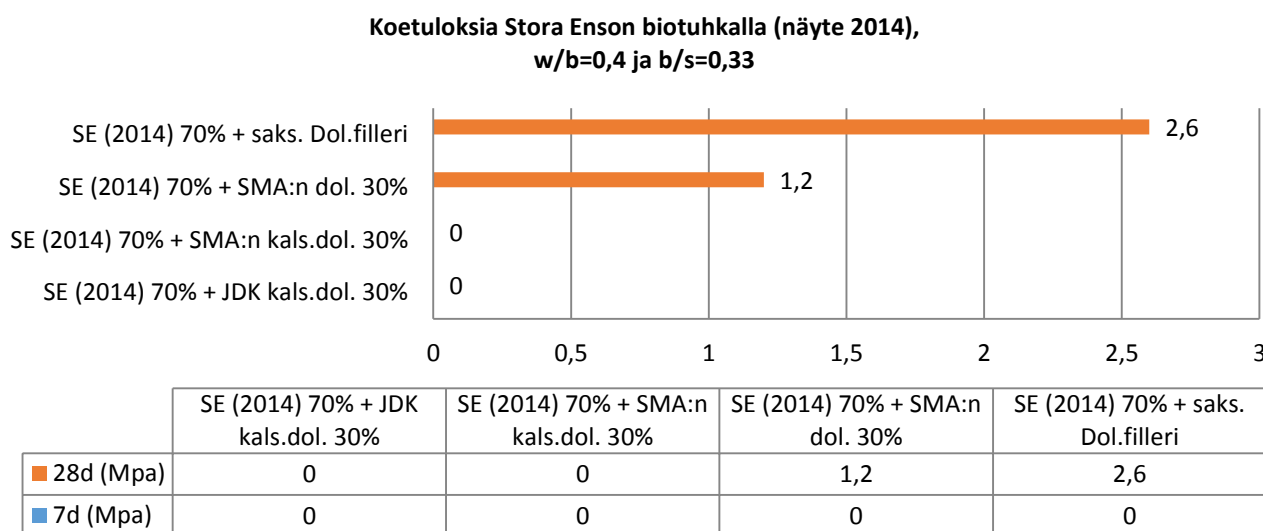
### **Stora Enson Oulun biopolton lentotuhka stabilointimateriaalina**

GeoSynergy-projektissa Stora Enson Oulun biotuhkan osalta keskityttiin sen käytettävyyteen stabilointiaineena tiekorjauskohteessa. Alustavissa kokeissa tutkittiin Stora Enson biotuhkan sideaineominaisuuksia käyttämällä seosaineena dolomiittia, kalsinoitua dolomiittia, jauhettua masuunikuonaa ja Rapid-sementtiä.

#### **Ensimmäinen koesarja**

Ensimmäisissä kokeissa käytettiin biotuhkanäyte-erää, joka oli toimitettu vuonna 2014. Kokeissa tutkittiin eri dolomiittityyppien toimintaa seosaineena, koska aikaisempien tulosten (GeoMaterials-projekti) perusteella dolomiitin oletettiin toimivan hyvin erityisesti Stora Enson Oulun biotuhkan kanssa sen suhteellisen korkean CaO-pitoisuuden ansiosta.

Kokeissa vesisideainesuhde (w/b) ja sideainekiviainesuhde (b/s) olivat vakioita. Kiviaineena käytettiin normihiekkaa ja koekappaleet tehtiin 100x100x100 mm betonimuotteihin tiivistämällä massat tärypöydällä. Koekappaleet säilytettiin huonelämpötilassa muovilla peitettynä. Ensimmäisen koesarjan koetulokset ovat kuvassa 9.



Kuva 9. Ensimmäinen koesarja vuonna 2014 toimitetulla biotuhkalla.

Paras tulos saatiin käyttämällä seosaineena saksalaista hienoa dolomiittifilleriä (0-20  $\mu$ m) ja toiseksi paras tulos käyttämällä seosaineena SMA:n dolomiittia (0-4 mm). Kokeen perusteella dolomiitin hienousasteella oli vaikutus sen tehokkuuteen (saksalainen dolomiittifilleri oli hienompaa kuin suomalainen). Sekä SMA:n että JDK:n (2014) kalsinoitu dolomiitti toimivat kokeissa seosaineena heikosti. Massoissa ei tapahtunut kaasunmuodostusta ja paisumista kuten KAVO:n koemassoissa.

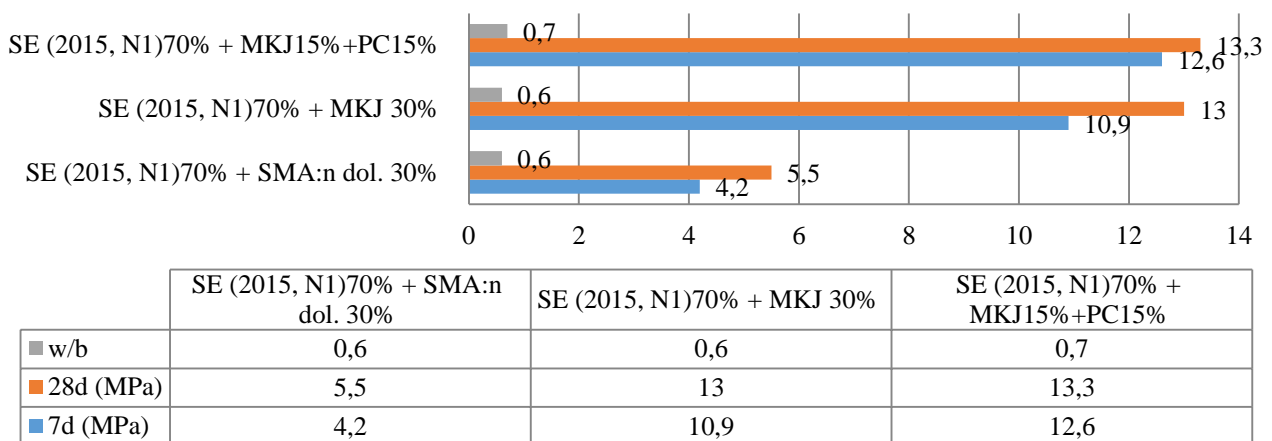
#### **Toinen koesarja**

Toinen koesarja tehtiin tammikuussa 2015 toimitetun näyte-erän ensimmäisestä näyteastiasta otetulla tuhalla (N1), jonka CaO-pitoisuus oli n. 17 % korkeampi kuin edellisessä näyte-erässä (2014) käytetyssä tuhassa. Seosaineena käytettiin jauhettua masuunikuonaa, Rapid-sementtiä ja SMA:n dolomiittia (kuva 10).

Ensimmäisessä koesarjassa puristuslujuustulokset olivat suhteellisen matalia, jonka vuoksi kokeissa käytettiin lisäksi Rapid-sementtiä ja masuunikuonaa seosaineena, joiden tiedettiin muun muassa GeoMaterials-projektin koetulosten mukaan parantavan biotuhkan toimintaa sideaineena. Lisäksi kokeissa pyrittiin keskittymään kustannuksiltaan edullisimpiin seosainevaihtoehtoihin.

Koemenetelmässä sovellettiin ASTM-standardia, jonka mukaan 7d säilytys lämpökaapissa vastaa 28d tulosta huonelämpötilassa. Koekappaleet säilytettiin kuivassa lämpökaapissa 60°C viikon ajan, jonka jälkeen ne siirrettiin huonelämpötilaan. Kiviaineksena oli normihiekka, jonka suhde sideaineeseen pidettiin vakiona (0,33).

#### Koetuloksia Stora Enson biotuhkalla (näyte 2015 N1), b/s=0,33



Kuva 10. Toisen koesarjan tulokset. Koetuhkana Stora Enson tammikuussa 2015 toimittama näyte (N1).

Paras tulos saavutettiin käytettäessä seosaineena sekä jauhettua masuunikuonaa 15 % että sementtiä 15 % kokonaissideainemäärästä, vaikka vesisideainesuhde 0,7 oli korkeampi kuin kahdessa muussa koemassassa (0,6), joissa seosaineena oli joko masuunikuonajauhe 30 % tai SMA:n dolomiitti 30 %. Myös dolomiittia käytettäessä saavutettiin kohtalainen puristuslujuus (5,5 MPa/28d). Se oli kuitenkin alle puolet vastaavasta puristuslujuudesta, joka saavutettiin käyttämällä biolentotuhkan seosaineena masuunikuonajauhetta 30 % kokonaissideainemäärästä (13 MPa/28d) ja lähes yhtä hyvä kuin käytettäessä seosaineena sementtiä 15 % ja masuunikuonaa 15 % (13,3 MPa/28d). Lisäksi tulee huomioida, että masuunikuonajauhetta ja dolomiittia sisältävien massojen alkulujuudenkehitys on hitaampaa ja jatkuu pidempään (useita kuukausia) kuin Rapid-sementtiä sisältävien massojen.

Alustavien sideainekokeiden perusteella voi todeta, että:

- Stora Enson biopolton lentotuhkien CaO-pitoisuus vaihteli huomattavasti vaikuttaen erityisesti masuunikuonajauheen ja dolomiitin toimintaan seosaineena.
- Joko masuunikuonajauhe tai masuunikuonajauheen ja Rapid-sementin yhdistelmä oli tehokkain seosaine Stora Enson Oulun biopolton lentotuhkalle.
- Käyttämällä pelkkää masuunikuonajauhetta lentotuhkan kanssa voitiin saavuttaa lähes yhtä hyvä lujuus kuin käyttämällä vastaava määrä Rapid-sementtiä ja masuunikuonajauhetta lentotuhkan kanssa.
- Dolomiitin toiminnan tehokkuus Stora Enson biopolton lentotuhkan kanssa seosaineena riippui lentotuhkan CaO-pitoisuudesta.

## 2 KENTTÄTUTKIMUKSET – SAVINIEMENTIEN KORJAUS

Saviniementie kuuluu alempiasteisiin teihin, joissa tarvitaan hyvää muodonmuutoskestävyyttä, kantavuutta ja lämmöneristävyttä. Tiellä on pehmenemistä, joka tavallisesti on seurausta toistuvista jäätymis- ja sulamisjaksoista, jolloin hienoaines sekoittuu rakenteelliseen kerrokseen ja rakennekerros painuu maaperään. Vaurio on tyypillistä vanhoilla teillä, joissa rakenteelliset kerrokset ovat suhteellisen ohuita ja osittain sekoittuneita maaperään [8]. Stabiloinnin avulla voidaan parantaa kantavuutta (E-moduulia) ja tasata routaliikkeitä. Tarvittavan murskeen määrää voidaan pienentää ja sivutuotteiden, kuten biotuhkan, avulla on mahdollista pienentää kustannuksia verrattuna pelkkien kaupallistensideaineiden käyttöön.

Pilottikokeen tarkoitus oli tierakenteen vahvistaminen stabiloimalla ja siten estää vauriotumista. Stabiloinnissa käytetään yleisimmin sementtiä ja kalkkia tai niiden seoksia. Tässä kohteessa tutkittiin biolentotuhkien toimintaa primäärisenä stabilointimateriaalina. Pilottitiekorjauskohde oli ELY:n ehdottama kohde Kajaanin Saviniementiellä, jossa oli kelirikkovaurioita (kuva 11). Pilottikokohteiksi valittiin kaksi 100 m pitkää tien huonokuntoisinta osuutta.





Kuva 11. Pilottikohde Saviniementie, Kajaani. Kuva otettu ennen stabilointityötä.








### 2.1 Koekuoppatutkimukset

Maa-ainenyttöt otettiin Saviniementieltä kolmesta kohdasta kolmesta eri syvyydestä (taulukko 6), joista tutkittiin pH, hehkutushäviö (LOI) ja humuspitoisuus sekä tiheys. Tiheys mitattiin laboratoriossa punnitsemalla koekuopista kerätyistä näytteistä, jolloin ne ovat todellista pienempiä.

Taulukko 6. Kooste koekuoppien maa-aineista.

Kohde/ syvyys	Paksuus (mm)	kuvaus	laatu	Tiheys $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	pH	LOI 800°C (%)	humus
1/1	5-200	savi, ei suurikiviä		x	11,9	0,7	0-1
1/2	200-400	savi, 1 suuri kivi		x	8,6	0,8	1



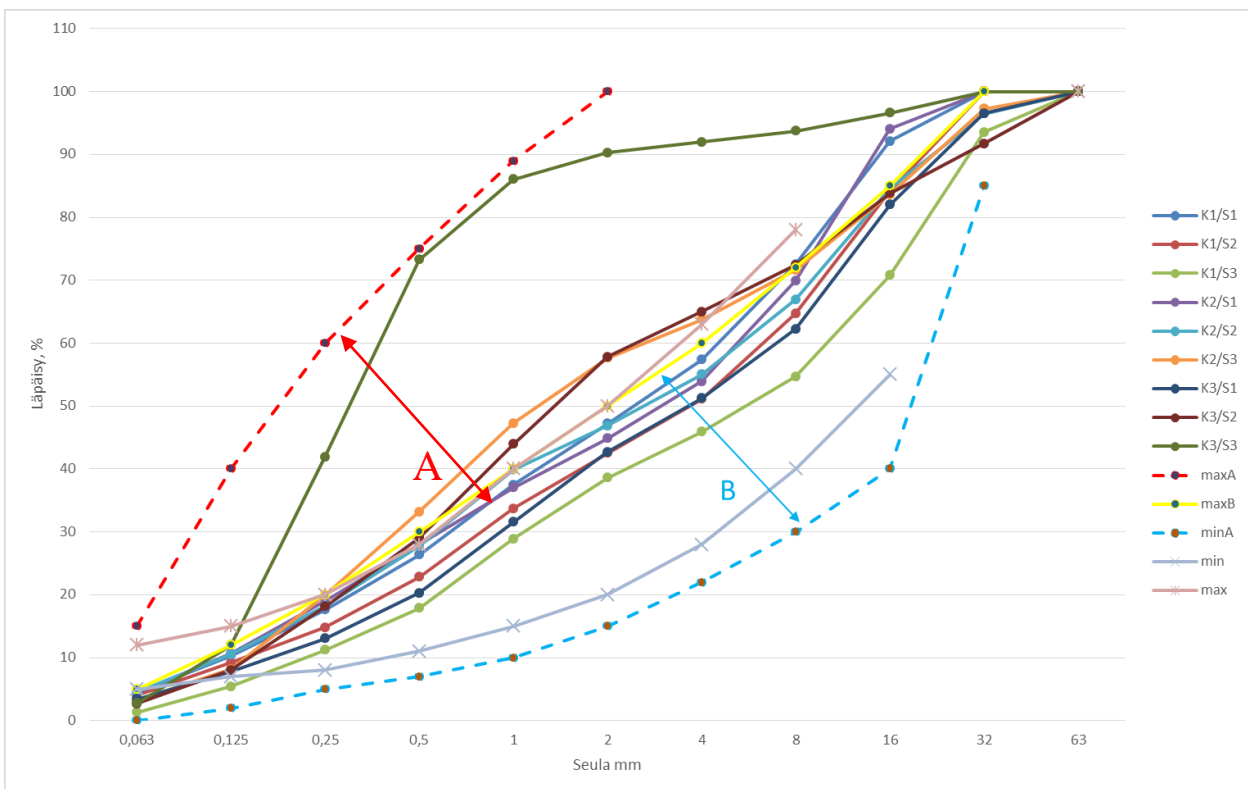
Kohde/ syvyys	Paksuus (mm)	kuvaus	laatu	Tiheys $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	pH	LOI 800°C (%)	humus
1/3	400-600	hiekkä, vesipinta 50cm, suuria kiviä		x	7,8	1,0	1
2/1	5-200	savi, hiekkä, ei suuria kiviä		1700	9,3	1,3	0-1
2/2	200-400	savi, hiekkä, muutama suuri kivi		1700	8,4	0,9	0-1
2/3	400-600	hiekkä, vesipinta 60cm, muutama suuri kivi		1600	7,7	0,6	0-1
3/1	5-200	hiekkä,,muutama suuri kivi		1700	9,0	1,0	1
3/2	200-400	hiekkä, suuria kiviä		1700	8,3	0,8	0-1
3/3	400-600	hiekkä, savi, ei suuria kiviä		1600	7,8	0,4	0-1

<sup>a</sup> näytesankot laboratoriossa 4vrk ennen mittausta

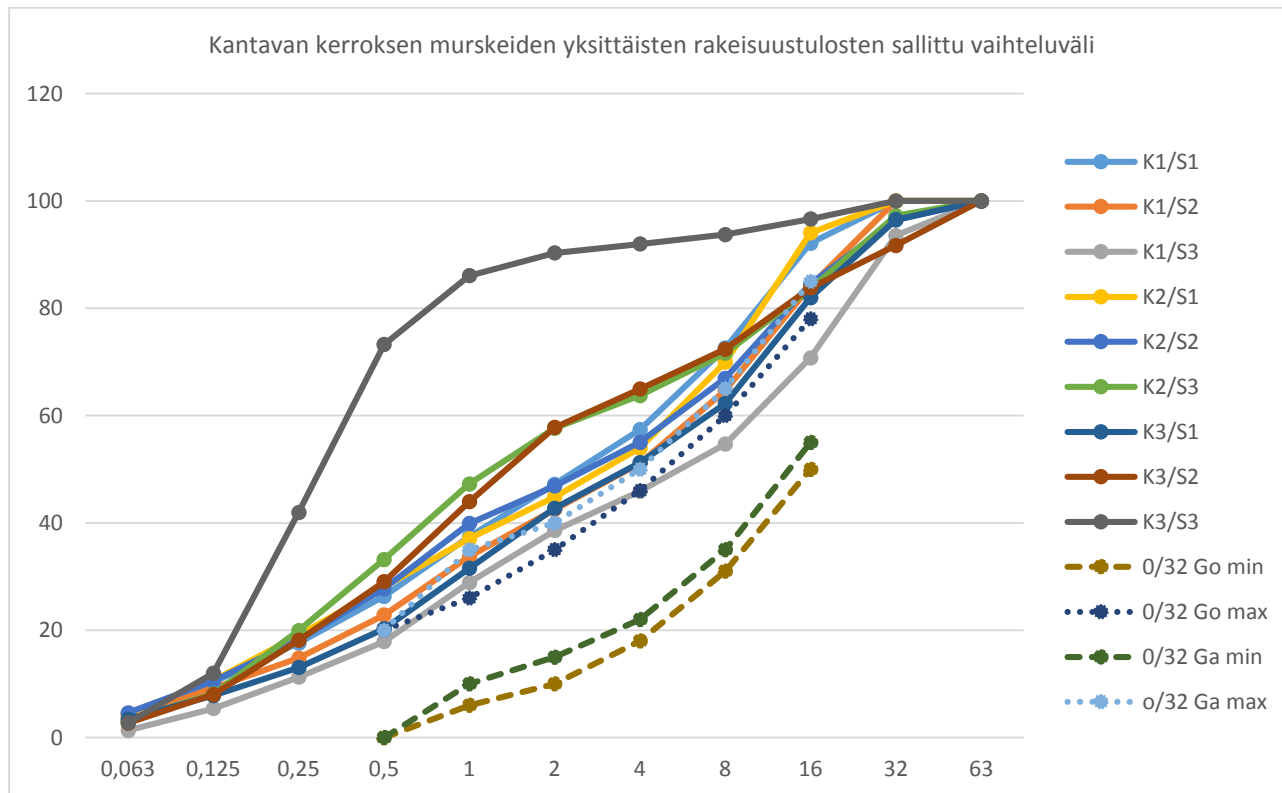
Rakeisuudet koekuopista otetuista näytteistä ovat koostetusti kuvattuina taulukossa 7 ja kuvassa 12. Näytteistä poistettiin suuret (nyrkinkokoiset) kivet ennen seulontaa. Kuvassa 12 on lisäksi rakeisuusohjealueet sementillä stabiloitaville kiviaineksille (prEN WI 227-140, 1999). Suomessa vaadittu alue on alueella B, paitsi 0,063 mm max läpäisyprosentti 9 %. Alue B edustaa hyvin suhteistuneita kiviaineksia ja alue A sisältää myös tiivistyskelppoiset hiekat. Min ja Max-arvot ovat Päälyysrakenteiden stabilointiohjeiden [25] mukaan. Kuvissa 13 ja 14 kuvattuna lisäksi koekuppanäytteiden rakeisuudet ja ohjearvot InfraRYL:n kantavan kerroksen murskeiden rakeisuusalueen mukaan.

Taulukko 7. Saviniementien näytteiden rakeisuudet (K=kohde ja S=syvyys).

seula, mm	K1/S1, %	K1/S2, %	K1/S3, %	K2/S1, %	K2/S2, %	K2/S3, %	K3/S1, %	K3/S2, %	K3/S3, %	ka	s
0,063	4,47	4,01	1,33	4,43	4,6	3,24	3,42	2,69	2,74	3,4	1,1
0,125	10,34	9,21	5,43	10,67	10,51	8,14	7,82	8,02	12,02	9,1	2,0
0,25	17,61	14,81	11,25	19,07	18,25	19,95	13,06	18,11	41,95	19,3	9,0
0,5	26,34	22,85	17,89	28,05	27,76	33,19	20,27	29,05	73,24	31,0	16,5
1	37,46	33,73	28,88	37,05	39,9	47,25	31,54	43,94	86,06	42,9	17,2
2	47,19	42,52	38,58	44,85	46,87	57,63	42,72	57,79	90,3	52,1	15,8
4	57,36	51,12	45,92	53,94	55,02	63,74	51,23	64,96	91,97	59,5	13,6
8	72,58	64,72	54,7	69,95	66,94	71,64	62,26	72,39	93,72	69,9	10,7
16	92,13	84,13	70,78	94,06	84,54	83,63	81,97	83,8	96,62	85,7	7,7
32	100	100	93,54	100	96,44	97,25	96,5	91,71	100	97,3	3,1
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0



Kuva 13. Näytteiden rakeisuudet (K=kohde ja S=syvyys) ja rakeisuusohjealueet sementillä stabiloitaville kiviaineksille (prEN WI 227-140, 1999). Suomessa vaadittu alue B, paitsi 0,063 mm max läpäisyprosentti 9 %. Alue B edustaa hyvin suhteistuneita kiviaineksia ja alue A sisältää myös tiivistyskelpoiset hiekat. Min ja Max-arvot ovat Päälyysrakenteiden stabilointiohjeiden [8] mukaan.



Kuva 14. Koekuppanäytteiden rakeisuudet ja ohjearvot InfraRYL:n mukaan.

Koekuopista otettujen näytteiden perusteella maaperän koostumus vaihteli paikoittain ja eri syvyyksissä. Rakeisuuskäyrien perusteella maa-aines oli enemmän hiekkaa ja soraa kuin savea. Näytteiden väri vaihteli

ruskeasta harmaaseen. Näytteen 1/1 muita korkeampi pH oli seurausta tiellä käytetystä suolauksesta. Näytteiden pH-arvot olivat keskimäärin välillä 8-9. Saven pozzolaanisen reaktion hyödyntämiseksi stabilointisideaineen tulisi nostaa pH arvoon 10,5. Humuspitoisuus oli stabiloinnin kannalta kohtuullinen (0-I). Hehkutushäviöllä mitattu orgaanisen aineksen määrä oli kolmea näytettä lukuun ottamatta alle 1 %. On todettu, että 1-2 prosentin orgaanisen aineksen määrä voi vaikeuttaa stabilointia tai voi vaatia huomattavan suuria määriä stabilointiainetta, joka ei ole enää taloudellisesti kannattavaa. Orgaanisen aineksen määrä haittaa normaalia hydrataatioprosessia ja lujuudenkehitystä [8]. Maanäytteiden koostumus vaihteli savipitoisuuden suhteen. Vesipitoisuus näytteissä oli keskimäärin pieni (n. 5 %). Kivipitoisuus vaihteli koekuopittain. Raekokojakaumat olivat stabiloitavuuden suhteen ohjerajoissa. Rakeisuudeltaan muista poikkeava oli yksi hiekkapitoinen näyte, joka todennäköisesti oli lisätty tierakenteeseen jälkikäteen. Kyseinen näytepaikka oli kosteuspuiteosuudeltaan muita huomattavasti suurempi. Rakeisuuden osalta runkoaine oli lähinnä luonnon soraa (harmaa alue kuvassa), mutta oli ohjeellista rakeisuutta (katkoviivat) hienompaa.

## 2.2 Sideaineseoskokeet

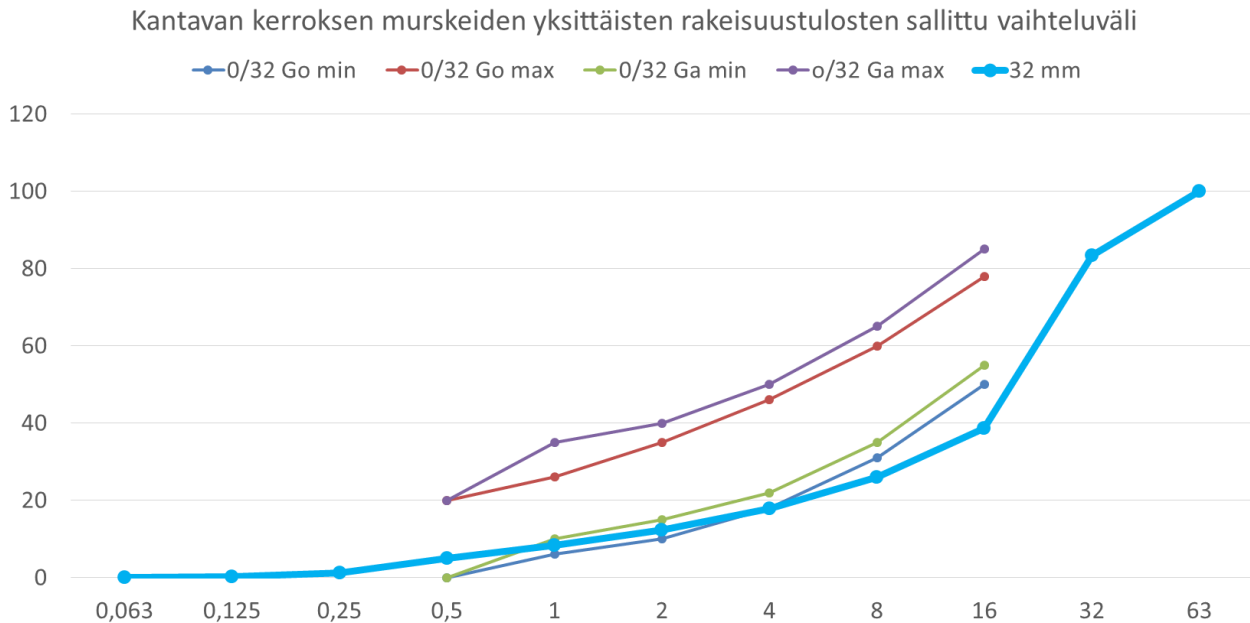
Suunniteltu stabilointimenetelmä oli kerrosstabilointi, jossa stabiloitavan kerroksen päälle levitetään sideainemateriaali, joka sekoitetaan optimivesipitoisuuteen stabilointijyrsimellä. Stabilointivaihtoehtoina tutkittiin tierakenteen päälle lisättävää mursketta ja rakenteessa olevaa runkoainetta. Ensimmäinen sideainekoesarja tehtiin käyttämällä mursketta, jonka jälkeen kokeita jatkettiin Saviniementien koekuopista kerätyllä runkoaineksella. Sideainekokeiden tavoitteena oli optimoida sideaineen kokonaismäärä sekä seosainesuhteet käyttämällä primäärisenä stabilointiaineena KAVO:n ja Stora Enson lentotuhkia. Kainuun pohjoisen sijainnin huomioiden sideaineseosten lujuudenkehitystä arvioivissa kokeissa pääpaino oli varhaisvaiheen (7d ja 28d) hyvässä lujuudenkehityksessä, koska lämmin kesäjakso Kainuun leveysasteilla on suhteellisen lyhyt hyvän alkulujuudenkehityksen saavuttamiseksi.

## 2.3 Sideainekokeet murskeella

Koesarjassa käytettiin kiviaineksena mursketta 0-32 mm, joka vastasi laadultaan Saviniementien tiekorjauskohteessa suunnitelluksi käytettävää mursketta. Murske oli peräisin NCC Roads Oy:n Karankalahden kallioalueelta Kajaanista. Stereomikroskooppilla tehdyn petrografisen kuvauksen (Destia) mukaan, kivilajin koostumus oli seuraava:

- Vaaleankirjavanharmaa, keski- ja tasarakeinen, heikosti suuntautunut ja rapautumaton granodioriittigneissi, jonka päämineraalit ovat plagioklaasi- ja kalimaasälvät, kvartsi ja biotiitti -kiille; 75 %.
- Lohenpunainen, keski- ja tasarakeinen, suuntautumaton ja rapautumaton graniitti, jonka päämineraalit ovat plagioklaasi- ja kalimaasälvät, kvartsi ja vähäisellä osuudella muskoviitti -kiille; 15 %.
- Tumma, pieni- ja tasarakeinen, suuntautunut, rapautumaton sarvivälkegneissi, jonka päämineraalit ovat plagioklaasi, kvartsi, sarvivälke ja biotiitti; 10 %.

Sideainekokeissa käytetyn murskeen rakeisuus on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Murskeen 32 mm rakeisuus ja ohjearvot InfraRYL2006 mukaan.

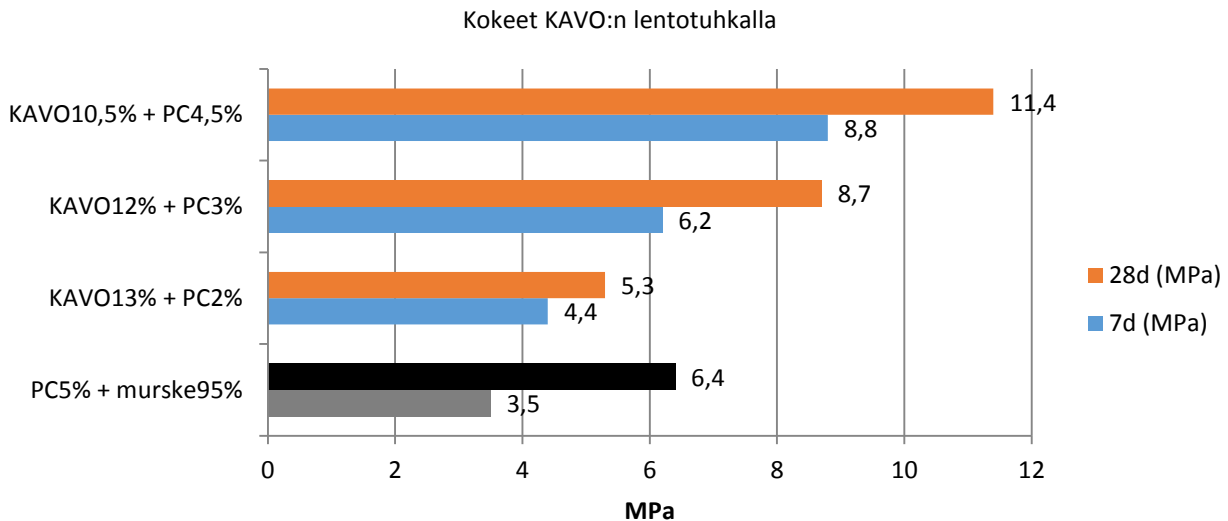
Tarkoituksena oli tutkia mahdollisuutta korvata osa murskeesta biotuhkaseoksella stabiloimalla (taulukko 8 ja kuvat 16-17). Päälysrakenteiden stabilointiohjeen mukainen tavoitelujuus sementtistabiloinnissa on 3-8 MPa (7d) ja 5-13 MPa (28d).

Kokeissa käytettiin sideainekiivaussuhdetta b/s (0,18) paitsi pelkällä sementillä (5 %) tehdyssä kokeessa, jossa b/s oli 0,05. Vesisideainesusuhde (w/b) kokeissa vaihteli välillä 0,42 - 0,49 paitsi sementillä tehdyssä vertailukokeessa, jossa w/b oli 0,84. Koekappaleet säilytettiin säilytysaltaassa ritilän päällä muovilla peitettynä. Säilytysaltaan pohjalla oli vettä, jonka lämpötila oli 20°C.

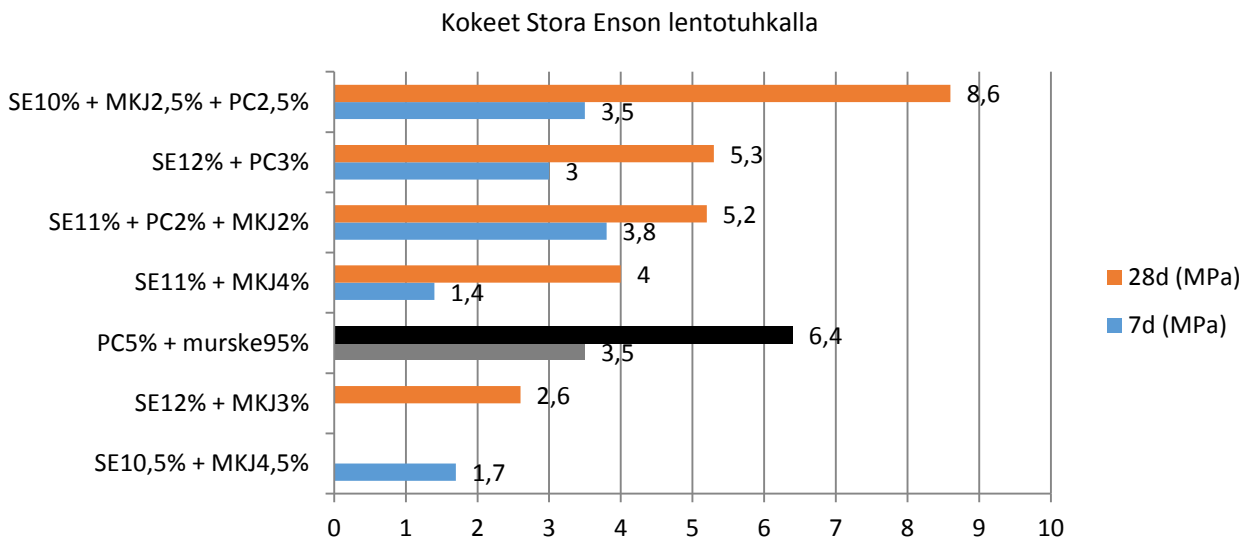
Stora Enson biotuhkana käytettiin kokeissa maaliskuussa 2015 toimitettua näyte-erää (N2) ja KAVO:n tuhka oli näyte-erästä tammikuulta 2015.

Taulukko 8. Murskekokeiden seossuhteet ja lujuustulokset.

Koe	murske 0..32, %	PC, Rapid, %	biotuhka		mkj, %	w, %	w/b	b/s	Puristuslujuus, MPa		Tiheys kg/m <sup>3</sup>	
			KAVO, %	Stora Enso, %					7d	28d	7d	28d
1	85	15				8,86	0,59	0,18	29,4	33,4	2445	2380
2	85	4,5	10,5			6,24	0,42	0,18	8,8	11,4	2209	2180
3	85			10,5	4,5	7,32	0,49	0,18	1,7	x	1796	
4	85	3	12			7,24	0,48	0,18	6,2	8,7	2225	2247
5	85			12	3	7,64	0,51	0,18	?	2,6	1429	1764
6	85			11	4		0,49	0,18	1,4	4	vajaa	2261
7	85	2		11	2	7,32	0,49	0,18	3,8	5,2	2161	2156
8	85	3		12		7,32	0,49	0,18	3	5,3	2200	2100
9	85	2	13			7,32	0,49	0,18	4,4	5,3	2251	2139
10	85	2,5		10	2,5	7,32	0,49	0,18	3,45	8,6	2109	2147
11	95	5				4,18	0,84	0,05	3,5	6,4	2031	2105



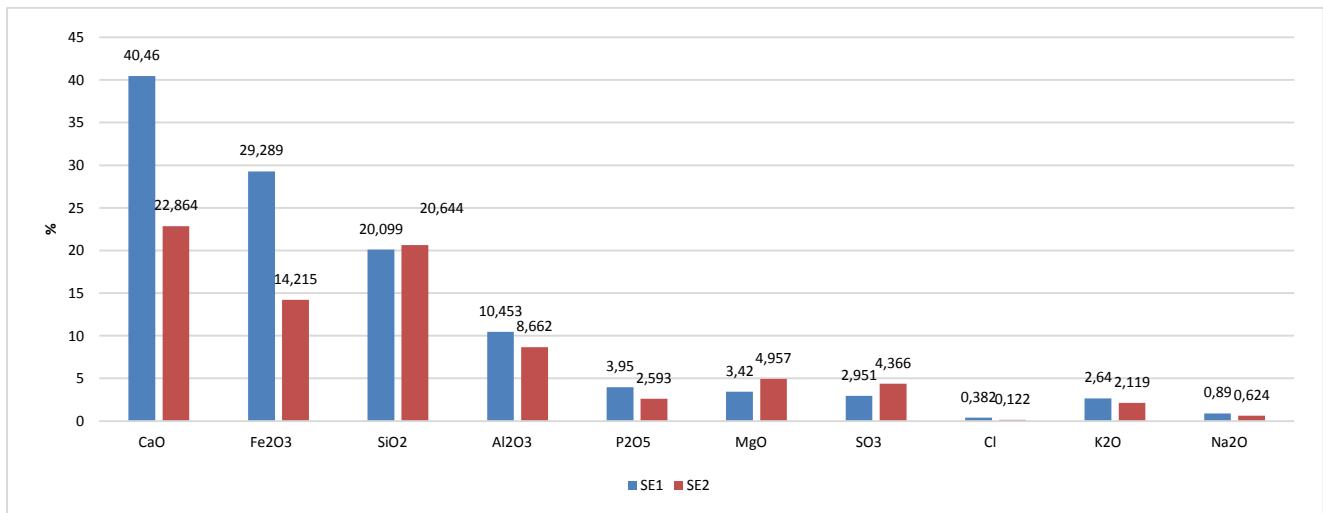
Kuva 16. Sideainekokeet KAVO:n lentotuhkalla ja murskeella. Sideaineen määrä 15 % paitsi koemassassa, jossa sideaineena pelkkää sementtiä (musta palkki). Puristuslujuuden kehitys.



Kuva 17. Sideainekokeet Sora Enso:n Oulun lentotuhkalla ja murskeella. Sideaineen määrä 15 % paitsi koemassassa, jossa sideaineena pelkkää sementtiä (musta palkki 28d). Puristuslujuuden kehitys.

Tulokset olivat KAVO:n lentotuhkalla tehdyissä kokeissa odotetusti pienemmällä sideainekiviainesuhteella heikompia kuin aiemmissa koesarjoissa. Tavoiteltu puristuslujuusalue oli välillä 4-6 MPa, jota parhaiten vastasi sideaineyhdistelmä: biotuhkaa 13 % + Rapid-sementti 2 %.

Kokeiden perusteella sideaineyhdistelmällä Stora Enson biotuhka 11 % + MKJ 4 %, SE biotuhka 12 % + Rapid-sementti 3 % ja biotuhka 11 % + Rapid-sementti 2 % + masuunikuonajauhe 2 % saavutettiin tavoitelujuus (4-6 MPa). Koesarjan tulokset olivat edellisen koesarjan tulosten perusteella odotettuja heikompia käytettäessä seosaineena Stora Enson lentotuhkaa, masuunikuonaa, Rapid-sementtiä ja niiden yhdistelmiä. Ero ilmeni verrattaessa muilla biotuhkilla (KAVO) saatuja tuloksia, jotka olivat selvästi parempia samalla sideaineseosuhteella esimerkiksi käytettäessä biotuhkaa 12 % ja sementtiä 3 %, jolloin KAVO:n tuhkalla 28d saavutettu lujuus oli 8,7 MPa ja Stora Enson tuhkalla 5,3 MPa. Syytä selvitettiin analysoimalla tarkemmin kahdessa eri näyteastiassa olleita Stora Enson lentotuhkia (kuva 18).



Kuva 18. XRF-analyysin tulos StoraEnson biotuhkan näyte-erästä tammikuussa 2015 otettuna astiasta N1 (SE1) ja astiasta N2 (SE2).

Kuvan 18 tuloksista voi havaita että erityisesti CaO- ja Fe2O3-pitoisuudet olivat näyteastiassa N2 huomattavasti pienemmät kuin näyteastiassa N1, mikä selitti odotettua heikompia lujuusarvoja kolmannessa koesarjassa.

#### Tulosten perusteella

- Sekä KAVO:n että Stora Enson biopolton lentotuhkat toimivat hyvin murskeen stabilointiaineena seosaineen kanssa käytettäessä.
- KAVO:n lentotuhkan (13 %) kanssa parhaiten seosaineena toimi Rapid-sementti (2 %), jonka avulla saavutettiin lähinnä tavoitelujuutta (4-6 MPa) vastaava puristuslujuus.
- Stora Enson lentotuhkan kanssa murskeen stabiloinnissa toimivat parhaiten seokset: biolentotuhka 12 % + Rapid-sementti 3 %, biolentotuhka 11 % + Rapid-sementti 2 % + masuunikuonajauhe 2 % ja biolentotuhka 11 % + masuunikuonajauhe 4 %.
- CaO:n määrän vaihtelu vaikutti huomattavasti Stora Enson lentotuhkan ja käytettävien seosaineiden avulla saavutettuihin lujuuksiin.

## 2.4 Sideainekokeet Saviniementien runkoaineella

### Runkoaine

Näyteastiat olivat laboratoriossa 4 vrk ennen näytteiden analysointia. Runkoaine homogenisoitiin yhdeksästä näyteastiasta. Laboratorion lämpötila oli noin 18-19°C. Runkoaineen lämpötila oli kokeita aloitettaessa 14,5°C. Runkoaineen vesipitoisuus oli 5,04 %. Humusaste natriumhydroksidikokeella oli I-II. Runkoaineen kemiallisen analyysin (XRF) tulokset ovat taulukossa 9.

Taulukko 9. Runkoaineen koostumus.

Na2O	Al2O3	SiO2	SO3	Cl	K2O	CaO	Ti	V	Cr	Mn	Fe2O3
2.188	11.102	58.787	0.190	0.054	2.871	2.090	0.183	0.005	0.004	0.022	2.190

### Sideaineseokset

Koemassat sekoitettiin astiassa teräslastalla. Koemassat tiivistettiin betonikoekappalemuotteihin 100x100x100 mm tärypöydällä 2 min. Koekappaleet säilytettiin muoteissa muovin alla 7 vrk ennen purkamista, jonka jälkeen koekappaleet siirrettiin säilytysaltaaseen. Biopolton lentotuhkia ei kasteltu etukäteen. Kooste koemassojen sekoitussuhteista ja lujuudenkehittämisestä ovat taulukossa 10.

Ensimmäisessä koesarjassa (kokeet 1-9) käytettiin runkoainemäärää 85 %. Sideaineseos (15 %) koostui eri määristä biolentotuhkia, Rapid-sementtiä, poltettua kalkkia ja jauhettua masuunikuonaa. KAVO:n lentotuhkana kokeissa käytettiin vuoden 2015 ensimmäisen erän tuhkua N1 ja Stora Enson lentotuhka oli näyte-erästä vuodelta 2014. Käytetty lisävesimäärä kokeissa oli vakio.

Taulukko 10. Sideaineseoskokeet Saviniementien näytteillä. Koesarja 1 (kokeet 1-9).

Koe	Lentotuhka (p%)		Seosaine (p%)		Runko- aine (p%)	Yht. (%)	w/b	Sitoutuminen 1d (18-19°C)	Pur. lujuus (MPa)		Tiheys $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )		
	KAVO N1/ 2015	SE 2014	Rapid- sem.	CaO					MKJ	7d	28d	7d	28d
1	10,5		2,25	2,25	85	100	0,45	kovettunut	hajoaa purettaessa	x	x	x	
2	4,5		5,25	5,25	85	100	0,45	osin kovettunut	x	x	x	x	
3	4,5		5,25		5,25	85	100	0,45	paissunut kovettunut	halkeaa purettaessa	x	x	x
4			7,5	7,5		85	100	0,45	höttö, paissunut	x	x	x	
5	15					85	100	0,45	osin kovettunut	hajoaa purettaessa			
6		10,5	2,25	2,25		85	100	0,45	heikosti kovettunut	heikko, hajoaa pur.	x	x	x
7		4,5	5,25	5,25		85	100	0,45	höttö, paissunut	x	x	x	
8		4,5	5,25		5,25	85	100	0,45	kovettunut	halkeaa purettaessa	x	x	x
9		15				85	100	0,45	pehmeä	hajoaa purettaessa	x	x	x

Vesimäärä oli juuri riittävä koossapysyvän massan aikaan saamiseksi. Vuorokauden kuluttua oli havaittavissa, että korkea CaO-pitoisuus aiheutti massassa paisumista ja heikensi liikaa lujuudenkehitystä. Parhaiten koemassoista lujittuivat koemassat, joissa ei käytetty poltettua kalkkia eli koemassat 3 ja 8. Molemmat kappaleet olivat 7 vrk ikäisenä kovettuneet, mutta halkesivat muottia paineilmalla purettaessa. Muut koekappaleet hajosivat muotteja purettaessa. Pelkää biotuhkaa sideaineena sisältäviä koekappaleita (5 ja 9) ei voitu purkaa muotista vielä 7 vrk:n kuluttua.

Toisessa koesarjassa (kokeet 10-15, taulukko 11) nostettiin sideainemääräksi 25 % paitsi vertailumassassa, jossa käytettiin vain Rapid-sementtiä sideaineena (kokeet 14 ja 15). Koemassoissa 10-13 käytettiin biotuhkien lisäksi Rapid-sementtiä ja jauhettua masuunikuonaa eri suhteissa. KAVO:n ja Stora Enson biolentotuhkat olivat samoista näyte-eristä kuin ensimmäisessä koesarjassa. Runkoaine homogenisoitiin samoin kuin ensimmäisessä koesarjassa. Runkoaine oli kuivattu.

Taulukko 11. Sideaineseoskokeet Saviniementien näytteillä. Koesarja 2 (kokeet 10-14).

Koe	Lentotuhka (p%)		Seosaineet (p%)		Runko- aine (p%)	Yht. (%)	w/b	Sitoutuminen 1d (18-19°C)	Pur. lujuus (MPa)		Tiheys $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	
	KAVO N1/ 2015	SE 2014	Rapid-sem. (p%)	MKJ (p%)					7d	28d	7d	28d
10	20		5		75	100	0,48	suht.kove, lievää pais.	4,0	5,1	1979	1880
11		18,3	3,3	3,3	75	100	0,50	heikommin kovettunut	2,4	7,0	2025	1922
12	8,3		8,3	8,3	75	100	0,47	suht.kove, lievää pais.	9,7	15,4	2137	2114
13		8,3	8,3	8,3	75	100	0,47	kovettunut	14,2	27,5	2183	2199
14			8,3		91,7	100	0,35	kovettunut	11,4	14,5	2183	2164
15			5		95	100	1,5	kovettunut	5,8	8,2	2142	2037

Lisävesimäärä oli korkeampi suuremman sideainemäärän ja kuivemman runkoaineen seurauksena. Lisäksi vettä lisättiin niin paljon, että massa oli hyvin tiivistyvä. Koekappaleet voitiin purkaa jo 2 vrk ikäisenä, jolloin ne siirrettiin säilytysaltaaseen. KAVO:n biolentotuhkaa eniten sisältävät koekappaleet (10 ja 12) olivat lievästi paisuneet. Koekappaleiden lujuudenkehitys oli hyvä. Käyttämällä KAVO:n lentotuhkaa 20 % ja Rapid-sementtiä 5 % saavutettiin 5,1 MPa loppulujuus (28d) ja käyttämällä Stora Enson lentotuhkaa 18,3 % + Rapid-sementtiä 3,3, % + masuunikuonajauhetta 3,3, % saavutettiin 7,0 MPa/ 28d, jotka vastasivat lähinnä tavoitelujuutta (4-6 MPa). Käyttämällä pelkkää Rapid-sementtiä 5 % Saviniementien runkoaineena saavutettiin tavoitelujuuden ylittävä loppulujuus 8,2 MPa/28d. Suuremmilla sementti- ja seosainemäärillä loppulujuudet nousivat yli tavoitelujuuden.

Seuraavissa koesarjoissa pyrittiin optimoimaan seosaineet KAVO:n lentotuhkalle (Taulukko 12) ja Stora Enson lentotuhkalle (Taulukko 13).

KAVO:n lentotuhkana käytettiin näyte-erän N1 lentotuhkaa 2015 ja yhdessä kokeessa kesäkuussa haettua näytettä N2 (koe 32). Seosaineena biolentotuhkan lisäksi käytettiin Rapid-sementtiä. Lisäksi tehtiin yksi koe, jossa aktivaattorina kokeiltiin NaOH-liuosta (koe 27).

Taulukko 12. Sideaineseoskokeet Saviniementien näytteillä. Koesarja 3 kokeet KAVO:n lentotuhkilla.

Koe	Lentotuhka (p%)		Seosaineet (p%)		Runko- aine (p%)	Yht. (%)	w/b	Pur. lujuus (MPa)		Tiheys $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	
	KAVO N1/ 2015	KAVO N2/ 2015	Rapid- sem.	NaOH 10M				7d	28d	7d	28d
19	12		3		85	100	0,70	2,6	2,8	2160	2071
22	13		2		85	100	0,75	1,4	1,8	2115	2043
24	10		3		87	100	0,75	2,6	3,4	2124	2065
25	9		4		87	100	0,71	4,1	6,4	2105	2026
27	10			5	90	100	1,2	0 (paisunut)	0	x	x
32		9	4		87	100	0,86	2,7	6,3	1960	2034

Käytettäessä KAVO:n biotuhkaa 9 % + Rapid-sementtiä 4 % saavutettiin lähinnä tavoitelujuutta vastaava loppulujuus (6,4 MPa/28d). Tulos oli lähes sama (28d) käytettäessä KAVO:n lentotuhka eriä N1 ja N2. NaOH ei soveltunut kokeilulla annosmäärällä 10M 5 % käytettäväksi KAVO:n biotuhkan kanssa, koska se aiheutti massassa paisumista ja lujuuden kehitys jäi heikoksi.

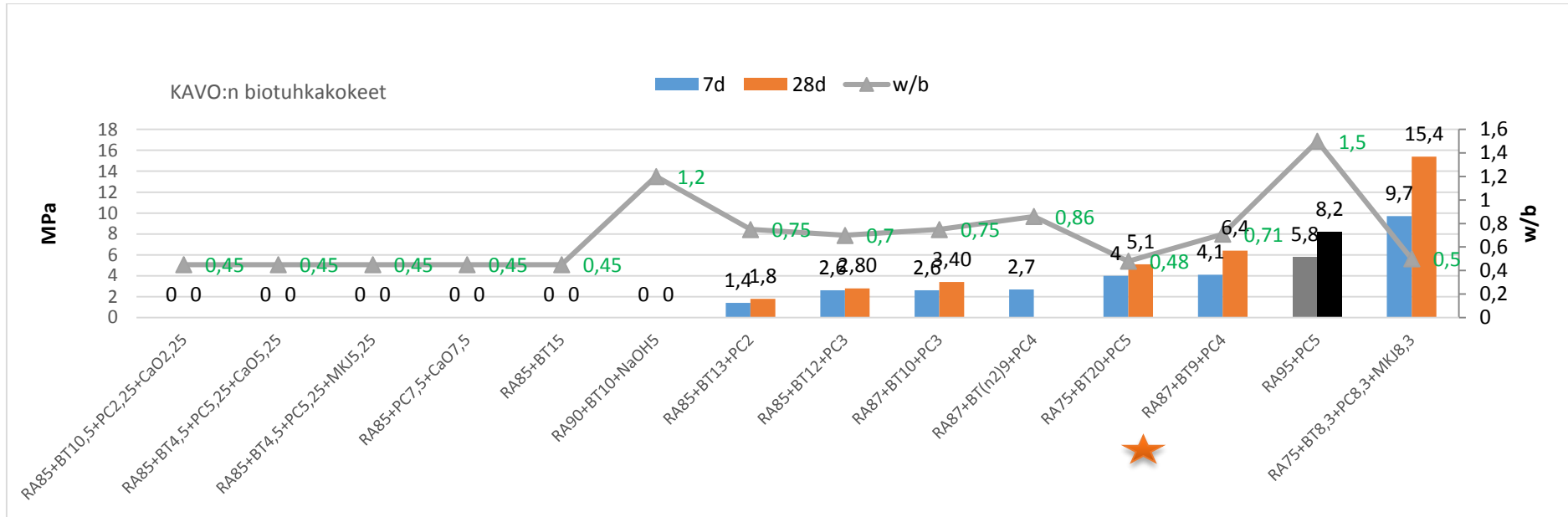
Stora Enson biolentotuhkakokeissa käytettiin osin vuodelta 2014 olevaa näyte-erää ja osin vuonna 2015 saatua kolmatta näyte-erää N3. Seosaineina käytettiin Rapid-sementtiä ja masuunikuonajauhetta. Yksittäisiä kokeita tehtiin lisäksi NaOH-liuoksella (koe 28), JDK:n dolomiittifillerillä (koe 34) sekä poltetulla kalkilla (koe 33).



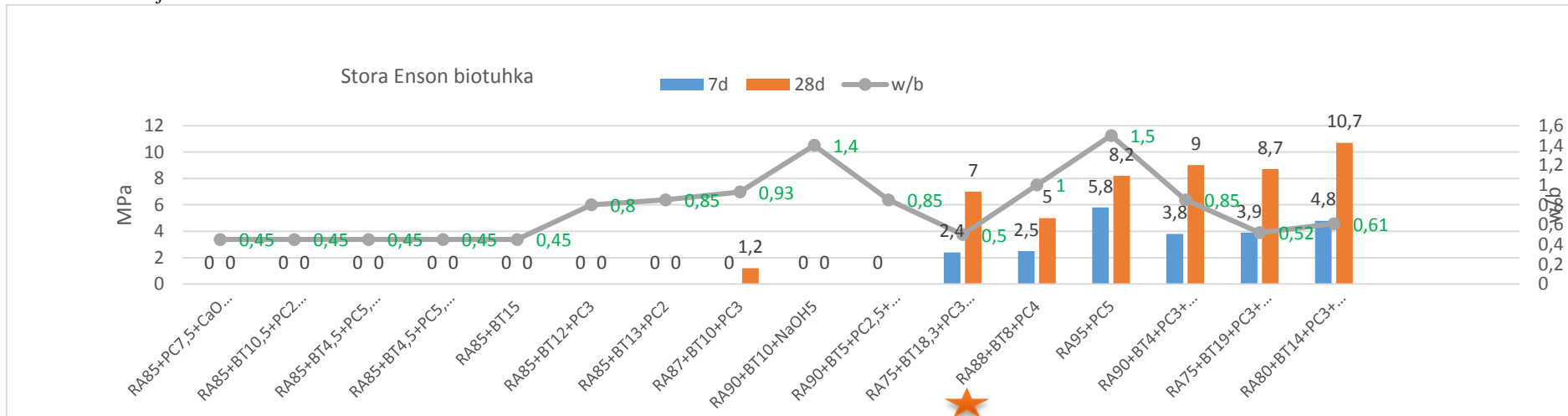
Taulukko 13. Sideaineseoskokeet Saviniementien näytteillä. Koesarja 4 kokeet Stora Enson lentotuhkilla. SE=Stora Enson lentotuhka, MKJ=masuunikuonajauhe, DF JDK=Juuan Dolomiittikalkki Oy:n dolomiittifilleri.

Koe	Lentotuhka (p%)			Seosaineet (p%)				Runko- aine (p%)	Yht. (%)	w/b	Pur. lujuus (MPa)		Tiheys $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	
	SE 2014	SE N3 2015	Rapid- sem.	CaO	MKJ	DF JDK	NaOH				7d	28d	7d	28d
<b>16</b>	19		3		3			75	100	0,52	3,9	8,7	2055	1996
<b>17</b>	14		3		3			80	100	0,61	4,8	10,7	2123	2111
<b>18</b>	4		3		3			90	100	0,85	3,8	9,0	2101	2083
<b>20</b>		12	3					85	100	0,80	0	x	x	x
<b>21</b>		13	2					85	100	0,85	0	x	x	x
<b>23</b>		10	3					87	100	0,93	0	1,2	x	1507
<b>26</b>		8	4					88	100	1,0	2,5	5,0	2089	2014
<b>28</b>		10					5	90	100	1,4	0	<1	x	1867
<b>33</b>		5	2,5	2,5				90	100	0,85	<1	1,5	1648	1709
<b>34</b>		5	3			2		90	100	0,85	x	1,2	x	1750

Stora Enson lentotuhkaseoksia käyttämällä parhaiten tavoitelujuutta vastaava loppulujuus (5,0 MPa/28d) saavutettiin käyttämällä näyte-erän N3 (2015) lentotuhkaa 8 % ja Rapid-sementtiä 4 %. Vuoden 2014 lentotuhka-erän CaO-pitoisuus oli noin 8 % korkeampi kuin vuoden 2015 N3 näyte-erän. Vuoden 2014 lentotuhkalla parhaiten tavoitelujuutta (9,0 MPa/28d) vastasi seos, jossa käytettiin biolentotuhkaa 4 % + Rapid-sementtiä 3 % + masuunikuonajauhetta 3 %. NaOH-liuosta (10M 5,0 %) käytettäessä biolentotuhkan kanssa lujuuden keitys jäi heikoksi (<1 MPa/28d). Lujuudenkehitys jäi heikoksi myös käytettäessä sementin lisäksi lentotuhkan kanssa seosaineena poltettua kalkkia tai dolomiittia (1,2 ja 1,5 MPa/28d). Kuvissa 19 ja 20 on kooste KAVO:n ja Stora Enson lentotuhkilla tehdyistä stabilointimassakokeista.



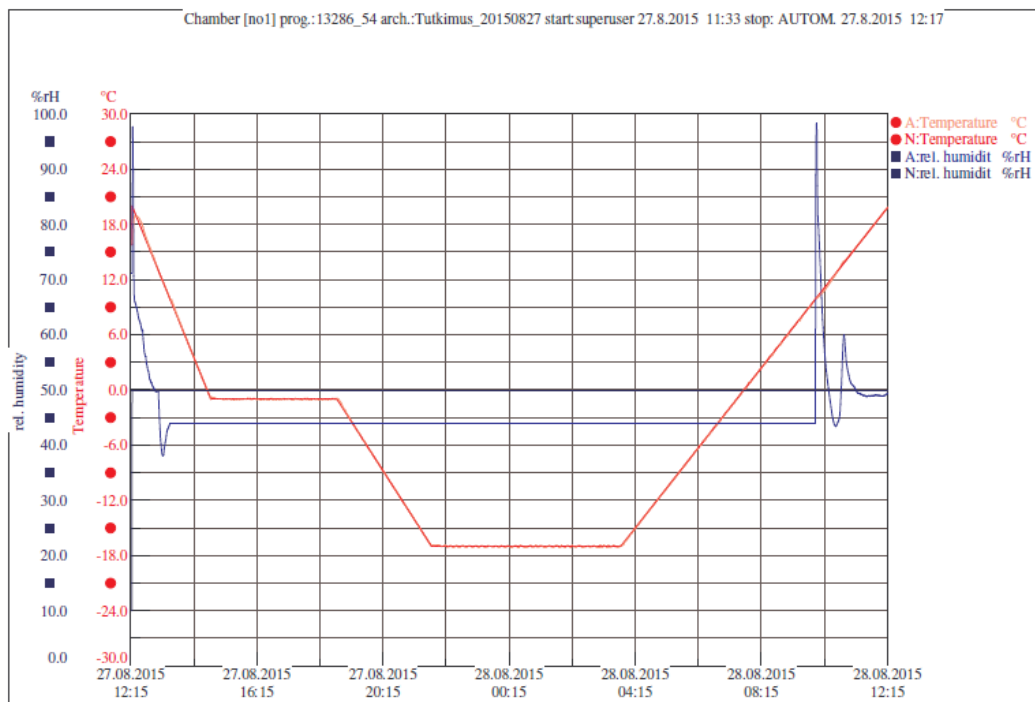
Kuva 19. Lujuudenkehitys KAVO:n biotuhkaseoksilla ja Saviniementien runkoaineella. Mustalla ja harmaalla lujuudenkehitys käytettäessä vain sementtiä. Tähdellä merkitty lähinnä tavoitelujuutta vastaava tulos.



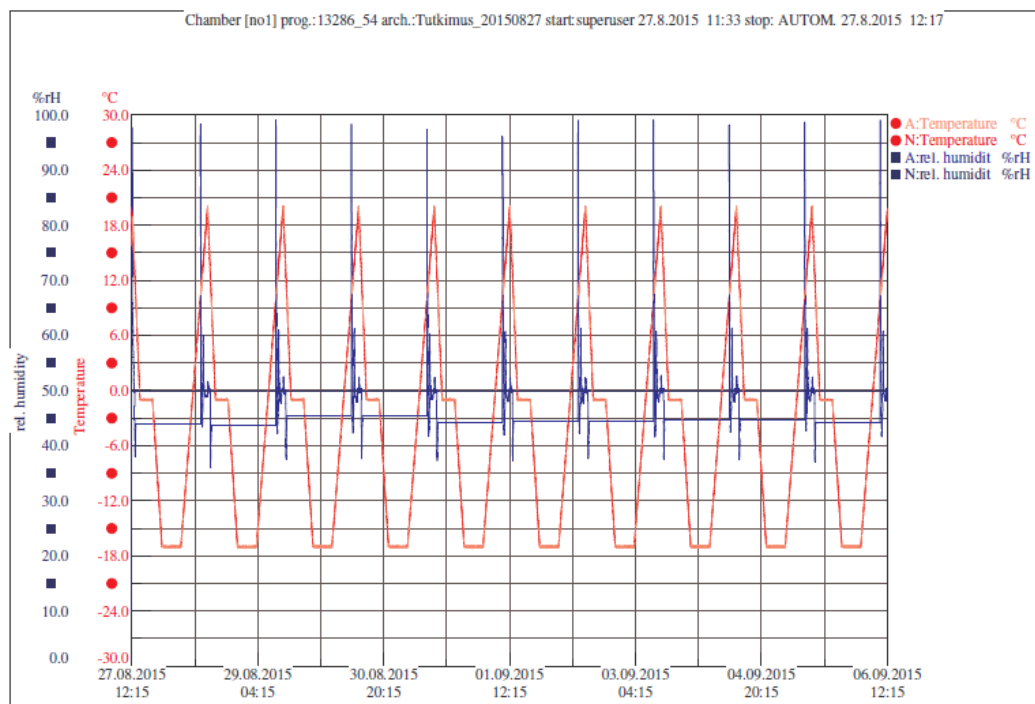
Kuva 20. Lujuudenkehitys Stora Enson biotuhkaseoksilla ja Saviniementien runkoaineella. Mustalla ja harmaalla lujuudenkehitys käytettäessä vain sementtiä. Tähdellä merkitty lähinnä tavoitelujuutta vastaava tulos

## 2.5 Jäädytys-sulatuskokeet stabilointimassalla

Stabilointimassalla, jossa käytettiin KAVO:n lentotuhkaa 9 % + Rapid-sementtiä 4 % tehtiin lisäksi standardia FprCEN/TS 13286-54 (Unbound and hydraulically bound mixtures- Part 54: Test method for the determination of frost susceptibility- Resistance to freezing and thawing of hydraulically bound mixtures) soveltava jäädytys-sulatus testi KAMK:n olosuhdekaapissa. Kuva 21 esittää yhden syklin aikaista lämpötilan ja kosteuden vaihtelua ja kuva 22 esittää kymmenen jäädytys-sulatuskierroksen aikaista muutosta.



Kuva 21. Lämpötilan ja kosteuden vaihtelu olosuhdekammiossa yhden syklin aikana.



Kuva 22. Lämpötilan ja kosteuden vaihtelu olosuhdekammiossa 10 jäädytys-sulatuskierroksen aikana.

Testin jälkeen mitattiin koekappaleiden tiheys ja puristuslujuus, jota verrattiin normaalisäilytyksessä olleiden vertailukoekappaleiden vastaaviin arvoihin (Taulukko 14).

Taulukko 14. Lujuusvertailu jäädytys-sulatusrasituksessa.

	vertailupaino 28 vrk (g)	vertailupuristuslujuus, R <sub>B</sub>	puristuslujuus j-s- testin jälkeen, R <sub>A</sub>	paino j-s- testin jälkeen (g)	R <sub>A</sub> /R <sub>B</sub>
KAVO:n kentotuhka 9%+Rapid- sementti 4%+Savinimentien runkoaine 87%	1990	6,1	7,4	2048	1,2

Jäädytys-sulatuskokeen perusteella stabiloitu runkoaine kesti jäädytys-sulatusrasitusta erittäin hyvin ( $R_A/R_B > 1,0$ ).

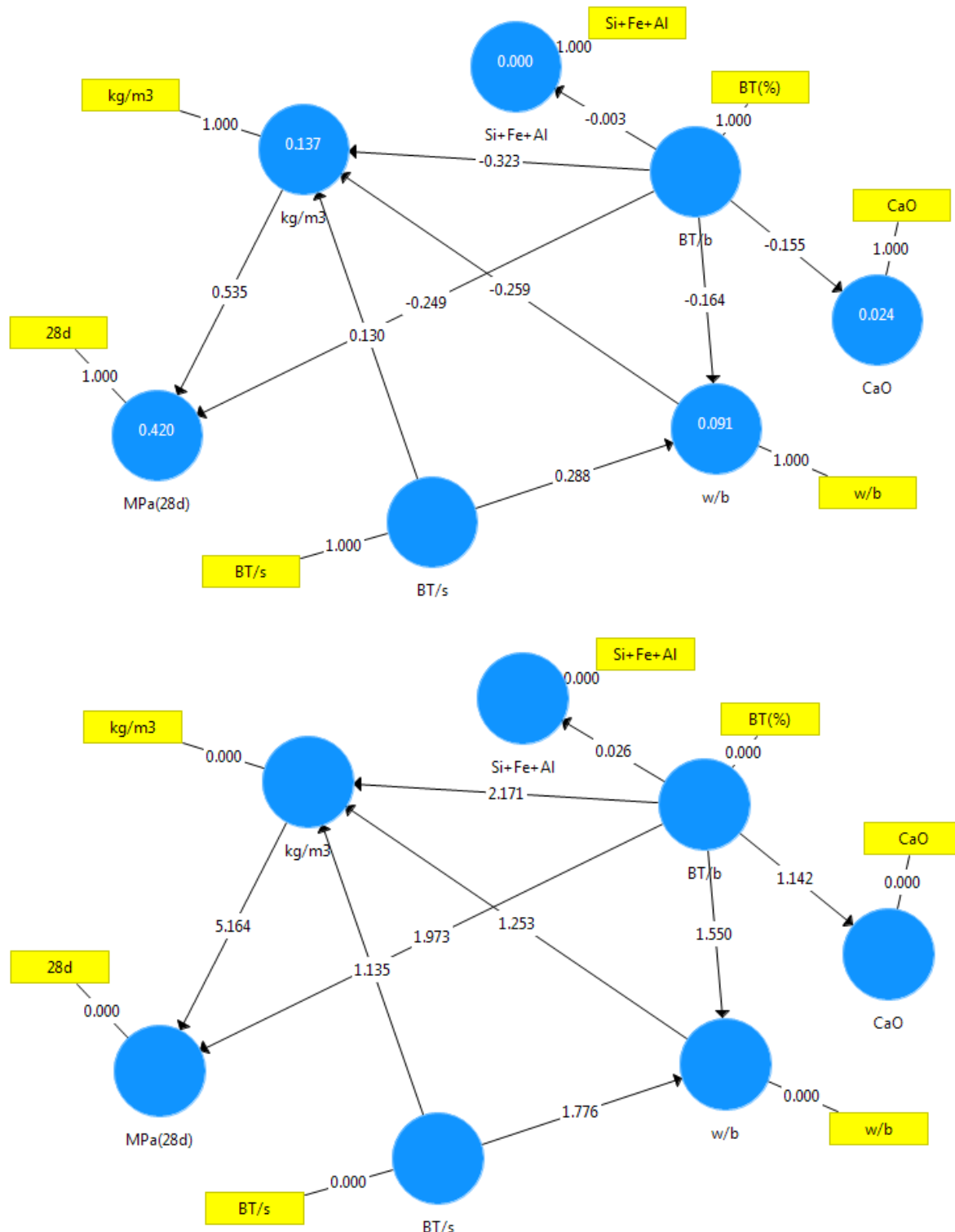
Koetulosten perusteella huomioiden stabilointityön toteutettavuuden kannalta optimituhkamäärä ja lisäseosaineiden määrä:

- käytettäessä KAVO:n lentotuhkaa primäärisenä stabilointiaineena optimiannostus oli 9 % biolentotuhkaa + 4 % Rapid-sementtiä.
- Stora Enson lentotuhkaa käytettäessä lähinnä tavoitelujuutta vastaava tulos saatiin käyttämällä biolentotuhkaa 8 % + Rapid-sementtiä 4 %.

Tulokset koskevat vain Saviniementien kohdetta eivätkä ole yleistettävissä muihin tiekorjauskohteisiin. Tulos kuitenkin on lähellä yleistä näkemystä, jonka mukaan lentotuhkien kanssa kannattaa käyttää 20-30 % sementtiä [8]. Esimerkiksi Lahtisen tekemissä moreenimaiden stabilointikokeissa saatiin 5-7 % sideaineseosmäärillä 28d lujuudeksi 5-7 MPa käytettäessä kivihiilenpolton lentotuhkaa ja sementtiä suhteessa 1:1, kun taas lujuudet jäivät alle 2 MPa:n 12 % sideaineseoksella, joka sisälsi turvetuhkaa alle 1 % ja lisäksi kipsiä n. 7 %, sementtiä 2 % ja masuunikuonaa 2 %.

## 2.6 Tilastolliset rakenneyhtälömallit biolentotuhkaseoksien käytöstä

PLS-SEM (Partial Least Square – Structural Equation Modelling) menetelmällä tehtiin yksinkertainen rakenneyhtälömalli, johon tekijöiksi valittiin puristuslujuus MPa (28d), vesisideainesuhte (w/b), biolentotuhkan osuus sideainemäärästä (BT(%)), sideaineissa käytettyjen SiO<sub>2</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ja CaO osuudet raaka-aineiden XRF-analyysitulosten perusteella, massojen tiheys mitattuna koekappaleista 28d kuluttua (kg/m<sup>3</sup>) sekä biolentotuhkan suhde runkoaineeseen (BT/s), (kuva 23). Mallissa käytettiin edellä esitettyjen koesarjojen tuloksia sisältäen sekä KAVO:n että Stora Enson tuhkilla tehdyt kokeet ja normihiekalla, murskeella ja Saviniementien runkoaineella tehdyt kokeet (n=55).



Kuva 23. PLS-SEM muuttujien väliset polkukertoimet ylhäällä ja alapuolella muuttujien välinen tilastollinen merkittävyys (T-arvo).

Yläpuolella olevien polkukertoimien mukaan biotuhkan suhteellisen osuuden kasvu sideaineessa vähensi sekä CaO että  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  -pitoisuuksien osuutta. CaO-pitoisuuden laskun vaikutus oli huomattavasti suurempi kuin vaikutus  $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ -pitoisuuteen, mikä indikoi käytettyjen seosaineiden suurempaa CaO-määrää. Biotuhkan osuuden kasvulla oli heikentävä vaikutus massojen tiheyteen ja lujuuteen sekä vesisideainesuhteeseen (w/b), mikä viittasi mahdollisesti joidenkin seosaineiden vedentarvetta lisäävään vaikutukseen. Toisaalta biotuhkan osuuden kasvu verrattuna runkoaineeseen (BT/s) kasvatti vedentarvetta ja

vedentarpeen kasvulla oli negatiivinen yhteys koekappaleiden tiheyteen eli vesisementtisuhteen nousu indikoi pienempää tiheyttä. Koekappaleiden tiheydellä oli selvästi positiivinen yhteys lujuteen eli tiheyden noustessa lujuus kasvoi.

Yläpuolella olevassa mallissa näkyy myös  $R^2$ -arvo sinisissä palloissa. Arvo indikoi kyseisen latentin muuttujan varianssin suhdetta koko rakenneyhtälömallin varianssiin eli kuvaa muuttujan selittävää merkittävyyttä. Lujuuden MPa (28d)  $R^2$ -arvo 0,420 oli keskitasoa ( $> 0,33$ ), kun puolestaan vesisideaineen ja tiheyden selittävä merkittävyys oli vaatimaton ( $< 0,19$ ). Latenttien muuttujien ennustava merkittävyys määritetään niin sanotulla ”blindfolding”-menetelmällä.  $Q^2$ -arvo  $> 0$  indikoi ennustavaa relevanssia ja korkeampi arvo indikoi suurempaa merkittävyyttä. Lujuutta kuvaava  $Q^2$ -arvo oli 0,274 ja tiheyden  $Q^2$ -arvo oli 0,09 eli molemmilla oli positiivinen arvo. Sen sijaan vesisementtisuhteen  $Q^2$ -arvo oli negatiivinen indikoiden w/b-suhteen heikkoa ennustavaa merkittävyyttä, mikä oli loogista huomioiden sen, että kysymys oli stabilointimassoista, joissa pyritään optimivesipitoisuuteen, jolloin w/b-suhde vaihteli optimin ylä- ja alapuolella eli w/b-suhde ei ollut mallin mukaan hyvä indikaattori kuvaamaan sideaineen toimivuutta.

Polkukertoimien tilastollinen merkittävyys laskettiin kaksisuuntaisella ”bootstrapping”-testillä. Rakenneyhtälömallissa erottuu tilastollisesti erittäin merkittävänä tiheyden suhde lujuteen ( $t=5,164$ ). Merkittäviä olivat biotuhkan suhteellisen osuuden vaikutus tiheyteen ( $t=2,171$ ) ja puristuslujuuteen ( $t=1,973$ ). Lisäksi biotuhkarunkoainesuhteen vaikutus vedentarpeeseen oli tilastollisesti merkittävä ( $t=1,776$ ).

Näytemäärän riittävyys arvioitiin jokaiselle muuttujien väliselle suhteelle Cohenin  $f^2$ -arvolla, joka perustuu  $R^2$ -arvoihin. Kyseisessä mallissa  $f^2$ -arvo oli suuri ( $f^2 > 0,35$ ) tiheyden vaikutukselle lujuteen, pieni ( $f^2 > 0,02$ ) biotuhkasideainesuhteen (BT/b) vaikutukselle CaO-pitoisuuteen, tiheyteen, vesisideainesuhteeseen ja lujuteen. Biotuhkarunkoainesuhteen vaikutuksen  $f^2$ -arvo oli pieni vesisideainesuhteeseen ja vesisideainesuhteen vaikutuksen  $f^2$ -arvo suhteessa tiheyteen. Sen sijaan biotuhkasideainesuhteen vaikutuksen  $f^2$ -arvo suhteessa  $Al_2O_3+Fe_2O_3+SiO_2$ -määrään oli näytemäärän osalta alle arvon pieni, samoin kuin biotuhkarunkoainesuhteen vaikutus tiheyteen.

Yhteenvetona rakenneyhtälömallista voi todeta, että

- koekappaleen tiheys indikoi parhaiten puristuslujuutta.
- biotuhkan osuus sideainemäärästä indikoi hyvin sekä tiheyttä että puristuslujuutta.
- vesisideainesuhde ei ollut merkittävä indikaattori stabilointimassojen toimivuudelle.

## 2.7 Etukäteen kastellun lentotuhkan lujudenkehitys ja itsekovettuminen

Suurin osa tuhkasta syntyy marras- ja maaliskuun välisenä aikana, jolloin sen käyttömahdollisuus rakentamisessa on vähäisempää. Tämä tarkoittaa sitä, että tuhkaa joudutaan yleensä varastoimaan ennen sen käyttöä. Kasavarastointi ulkona vaatii yleensä veden käyttöä pölyämisen estämiseksi. Kalsiumpitoisen tuhkan ominaisuudet alkavat muuttua välittömästi sen jälkeen kun siihen lisätään vettä. Tuhkan kastelun ja kasavarastoinnin on useissa tutkimuksissa todettu selvästi vähentävän tuhkan reaktiivisuutta ja lujutta [esim. 24]. Lisätyn veden määrä vaikuttaa merkittävästi kalkin hydratoitumiseen, sähköjohtavuuteen ja tuhkan pH-arvoon, joka laskee sitä enemmän, mitä enemmän vettä käytetään. Suomessa kasavarastoitujen tuhkien vesipitoisuus on tyypillisesti 40 – 60 % [27]. Lisäksi tuhkan kastelu vaikuttaa sen rakeisuuteen siten, että veden lisäyksen jälkeen tuhka muuttuu sitä karkeammaksi mitä enemmän se sisältää vapaata kalkkia.

Veden määrän lisäksi varastointilämpötila vaikuttaa selvästi tuhkassa tapahtuviin reaktioihin ja mineralogisiin muutoksiin. Tuhkassa tapahtuvat reaktiot riippuvat myös siitä, onko tuhka kasan pinnalla vai keskellä. Karbonatisoituminen tapahtuu paremmin kasan pinnalla olevassa tuhkassa vaikuttaen pH-arvoon laskevasti, tehden tuhkan kuivemmaksi ja mahdollisesti katkaisee ettringiittimineraalisaation. Tutkimusten mukaan [25] yli 112 d varastointi tuhoaa tuhkan kyvyn toimia sideaineena stabiloinnissa riippuen tuhkan laadusta ja erityisesti vapaan kalkin määrästä. Pozzolaanisuus ja tuhkan aktivoinnin vaikutus vähenee selvästi pitkän

varastoinnin (4-6 kk) jälkeen. Tulokset ovat olleet kuitenkin osin ristiriitaisia eri tuhkien osalta ja riippuvat tuhkien laadun lisäksi stabiloitavan/tiivistettävän maa-aineksen laadusta. Esimerkiksi UUMA-raportissa todetaan, että ilman suojausta kasavarastoitu tuhka käyttää sen sisältämän vapaan kalkin lujittumiseen jo varastointiaikana eikä enää lujitu uudelleen rakennusvaiheessa [28].

Eräiden tutkimusten mukaan runsaasti kalsiumia sisältävien itsekovettuvien lentotuhkien käyttö stabiloinnissa on haasteellista, koska sitoutuminen voi alkaa jo 10 minuutin kulutta veden lisäyksestä, joka aiheuttaa lujuuden menetyksiä mikäli sekoittaminen ja tiivistäminen viivästyvät yli kaksi tuntia [14]. Siksi itsekovettuvia lentotuhkia käytettäessä suositellaan paikalla tapahtuvaa sekoittamista. Käytännössä viive ennen tuhkan sekoittamista stabiloitavaan runkoainekseen saattaa olla useita tunteja silloinkin kun käytetään suoraan siilosta saatavaa kuivaa tuhkua. Tehtyjen tutkimusten perusteella laboratoriokokeissa tulisi käyttää 1-2 tunnin viiveaikaa, jotta koetulokset vastaisivat paremmin todellista tilannetta [8]. Suurin nopeaan sitoutumiseen vaikuttava tekijä on trikalsiumalumiinaatin hydratoituminen, joka aiheuttaa ongelmia tiivistymisen viivästyessä. Lujuudenkehityksen 28 vrk jälkeen on todettu riippuvan kalsiumoksidin, alumiinin ja piin välisistä pozzolaanisista reaktioista [14].

Projektin puiteissa tehtiin kaksi koesarjaa, joissa tutkittiin tuhkien esikastelun vaikutusta stabilointimassojen lujuudenkehitykseen. Ensimmäisessä koesarjassa KAVO:n aja Stora Enson Oulun biotuhkiin lisättiin vettä 0 %, 12,5 % ja 25 % vuorokausi enne niiden käyttöä (taulukko 15).

Taulukko 15. Koemassat ja tulokset lentotuhkan esikastelun vaikutuksesta lujuudenkehitykseen.

Koe	Lentotuhka (p%)			Runko- -aine (p%)	Yht. (p%)	kok. vesi (p%)	w/b	Lentotuhkan esikäsittely	Pur. (MPa) 7d	lujuus		Tiheys $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	
	KAVO	SE 2014	Rapid- sem. (p%)							28d	7d	28d	
1	20		5	75	100	12	0,48	kuiva tuhka	3,1	4,7	1813	1866	
2	20		5	75	100	12	0,48	tuhka kostutettu 1vrk ennen 12,5 %	<1	<1	1600	1547	
3	20		5	75	100	12	0,48	tuhka kostutettu 1vrk ennen 25 %	0	x	x	x	
4		20	5	75	100	12,5	0,5	kuiva tuhka	1,9	3,4	1839	1736	
5		20	5	75	100	12,5	0,5	tuhka kostutettu 1vrk ennen 25 %	0	x	x	x	

Kokeen perusteella tuhkan esikastelu 1vrk ennen heikensi huomattavasti sen reaktiivisuutta verrattuna kuivan lentotuhkan reaktiivisuuteen. Esikastelussa käytetty vesimäärä vaikutti myös tuhkan reaktiivisuuteen. Kokeiden perusteella KAVO:n lentotuhka menetti huomattavasti reaktiivisuuttaan jo pienempää (12,5 %) esikasteluvesimäärää käytettäessä. Suuremmalla vesimäärällä (25 %) oli sekä KAVO:n että Stora Enson tuhkaan jo niin haitallinen vaikutus, että koekappaleet olivat liian heikkoja purettaviksi viikon ikäisinä.

Toisessa koesarjassa tutkittiin esikastelun vaikutusta lyhemällä aikavälillä. Lentotuhkaan lisättiin 10 % vettä ja koemassat valmistettiin 4h kulutta (taulukko 16). Vesimäärää 10 % käytettiin, koska KAVO:n biolentotuhkien osalta sen on todettu olevan riittävä vesimäärä estämään lentotuhkan pölyämisen lavakuljetuksen aikana.

Taulukko 16. Koemassojen koostumus ja lujuudenkehitys huonelämpötilassa (n. +19 °C).

Koe	Lentotuhka (p%)				Runko- -aine (p%)	Yht. (p%)	w/b	Lentotuhkan esikäsittely	Pur. lujuus (MPa)		Tiheys $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	
	KAVO N3	SE N3	Rapid- sem. (p%)	MKJ (p%)					7d	28d	7d	28d
0	9		4		87	100	0,9	kastelu 10 % 2h etukäteen	2,3	4,2	2126	2117
1		4	3	3	90	100	0,9	kastelu 10 % 2h etukäteen	1,5	3,5	1854	1870
2	9		4		87	100	1	kastelu 10 % 4h etukäteen	2,7	5,2	2129	2114
3		4	3	3	90	100	0,9	kastelu 10 % 4h etukäteen	1,7	4,1	1826	1752

Molemmilla tuhilla tehdyissä kokeissa, lujuudenkehitys ei osoittanut heikkenemistä tehtäessä koekappaleet 2h ja 4h kuluttua tuhkan esikastelusta.

Kokeiden perusteella voi todeta, että:

- Biopolton lentotuhkan kastelu 2 vrk etukäteen heikensi selvästi molempien testattujen tuhkien reaktiivisuutta, kun tuhkat säilytettiin huonelämpötilassa.
- Käytettäessä korkeampaa vesimäärää (25 %) vaikutus testattujen biopolton lentotuhkien reaktiivisuuteen oli haitallisempi kuin käytettäessä pienempää vesimäärää (12,5 %).
- Käytettäessä vesimäärää 10 % biopolton lentotuhkien esikasteluun, sillä ei ollut tuhkien reaktiivisuutta heikentävää vaikutusta 4h varastoinnin jälkeen.

## 2.8 Pilottikokeen toteutus

Materiaalien sekoitustavan on todettu olevan stabilointityön onnistumisen kannalta merkittävä tekijä. Aikaisemmissa kokeissa on saatu hyviä tuloksia käyttämällä esimerkiksi asemasekoitinta tai aumasekoitinta, tuhcaseoksen levitykseen asfalttilevitintä ja tiivistykseen valssijyrää [28]. Vesi lisättiin koekohteissa yleensä tarvittaessa vasta ennen jyräystä. Muita työn onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat tuhkan laadun lisäksi käytetty vesimäärä, seosaineiden annostelun onnistuminen ja tiivistäminen sekä olosuhteet (lämpötila, sade, tuuli) [8].

Käytettäessä lentotuhkia alle 10°C lämpötilassa sitoutuminen on hyvin hidasta ja pysähtyy, kun lämpötila on alle 4°C. Pozzolaaniset reaktiot stabiloitavassa materiaalissa voivat kuitenkin jatkua useita kuukausia ja jopa vuosia niin kauan kuin stabiloitavassa materiaalissa on jäljellä vapaata kalkkia ja vettä [15,28]. Joissakin tutkimuksissa [14] on myös todettu, että stabilointi alle jäätyislämpötilan ja sitä seuraava altistuminen vedelle aiheuttavat helposti merkittävää lujuudenmenetystä ja jäätyneeseen runkoaineeseen stabilointia ei tulisi tehdä [14].

### *Runkoaineen murskaus ja stabilointityön toteutus kohteessa*

Runkoaine murskattiin käyttämällä niin sanottua Tirkkoson menetelmää, joka murskaa runkoaineessa olevat suuret kivet kokoluokkaan max 60 mm noin 25 mm syvyydellä. Murskauksen jälkeen koalueelle levitettiin Rapidsementti (4 %) ja KAVO:n biopolton esikasteltu lentotuhka (9 %). Sementti levitettiin murskatun runkoaineen päälle ensin ilman kastelua (kasteluautoa ei ollut saatavilla). Sementistä osa levisi päällä olevan liikenteen seurauksena ennen kuin lentotuhka saatiin levitettyä päälle. Lentotuhkan kosteus oli arviolta 15 %, mikä esti hyvin lentotuhkan pölyämisen. Lentotuhka levitettiin tiehöylällä, kasteltiin ja sekoitettiin runkoaineeseen murskaimella (kuvat 24-27). Kuva 28 esittää runkoaineen rakeisuuden muutosta ennen murskausta, murskauksen jälkeen ja sideaineseoksen lisäyksen jälkeen. Pilottikokeen toteutuksesta on myös video, joka on ladattavissa osoitteessa:

[https://www.youtube.com/watch?v=J3AMvRV\\_jvI](https://www.youtube.com/watch?v=J3AMvRV_jvI)





*Kuva 24. Runkoaineen murskaus vasemmalla ja keskellä. Oikealla sementin levitys tielle.*



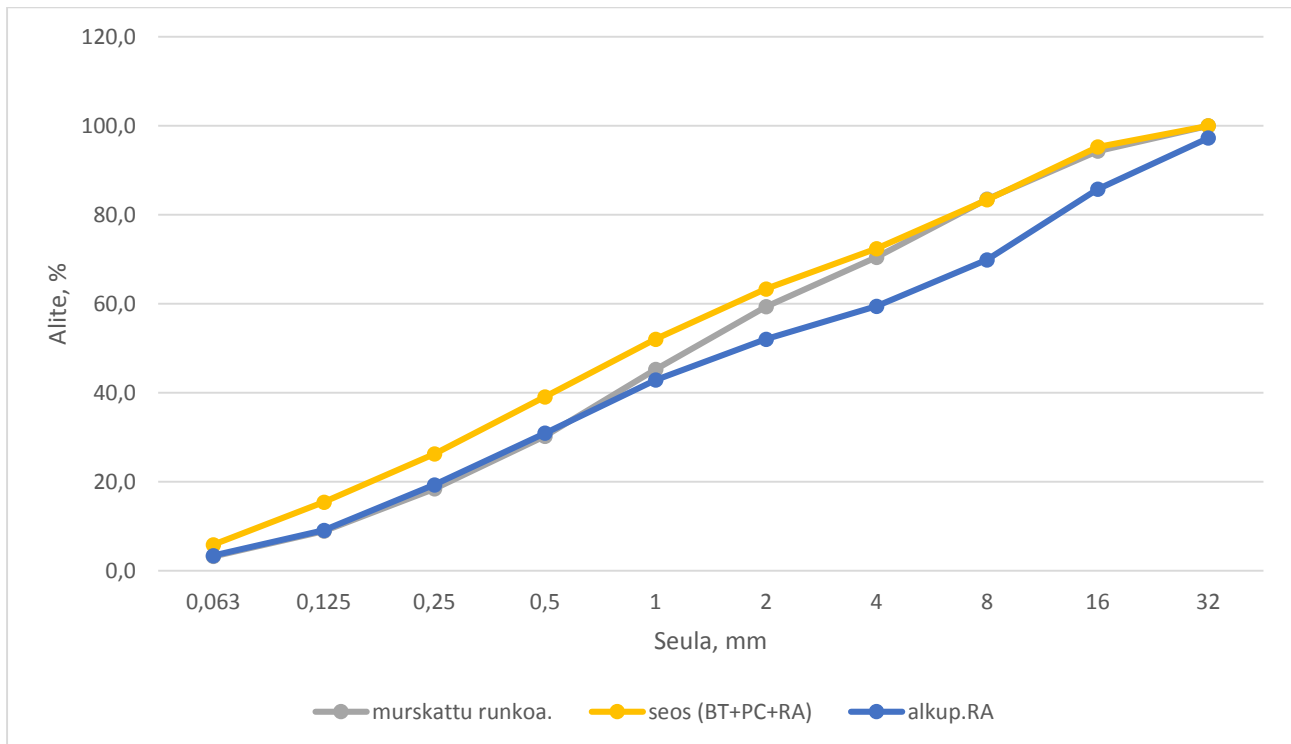
*Kuva 25. Sementtikerroksen päälle tuotu tuhka ennen levitystä.*



*Kuva 26. Sideainekerroksen sekoitus ja tasoitus.*



Kuva 27. Kastelu vasemmalla, tiivistys ja valmis pinnoitettu tie oikealla.

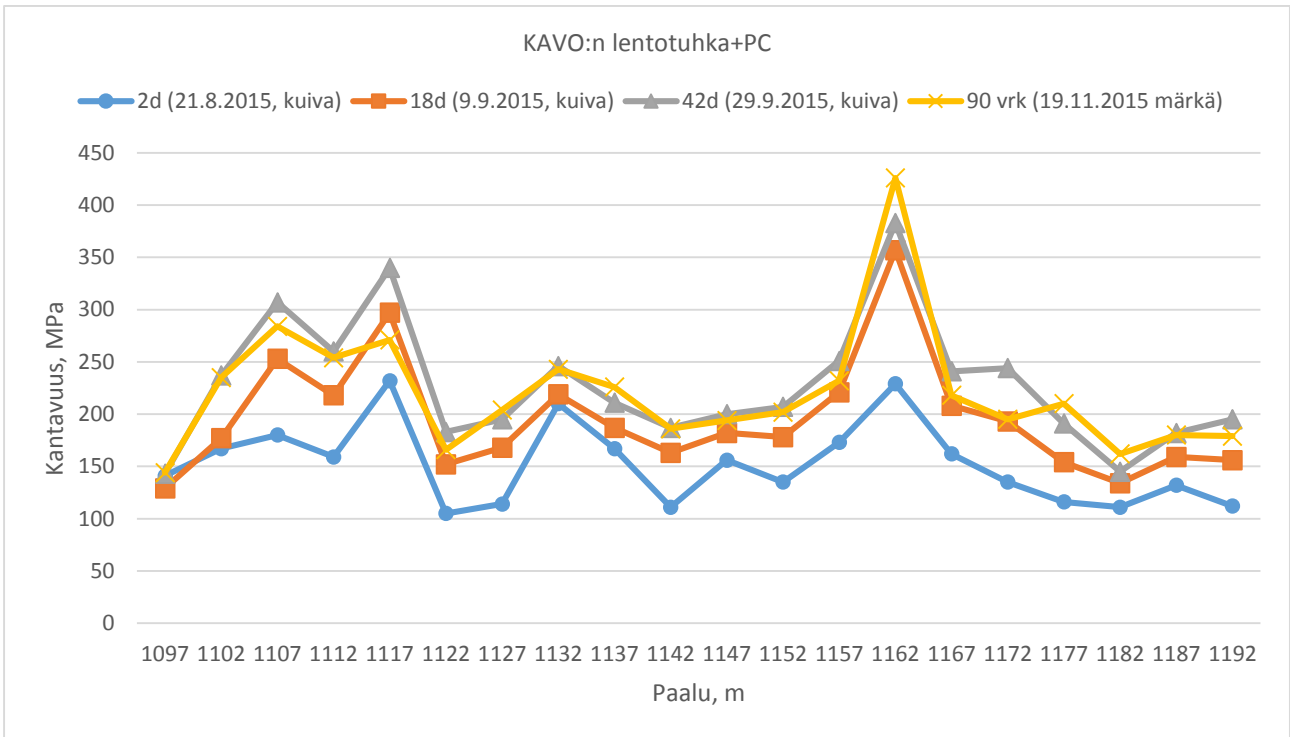


Kuva 28. Runkoaineen rakeisuus ennen murskausta (alkup. RA) ja murskauksen jälkeen (murskattu runkoa.) sekä sideaineseoksen lisäyksen jälkeen (seos).

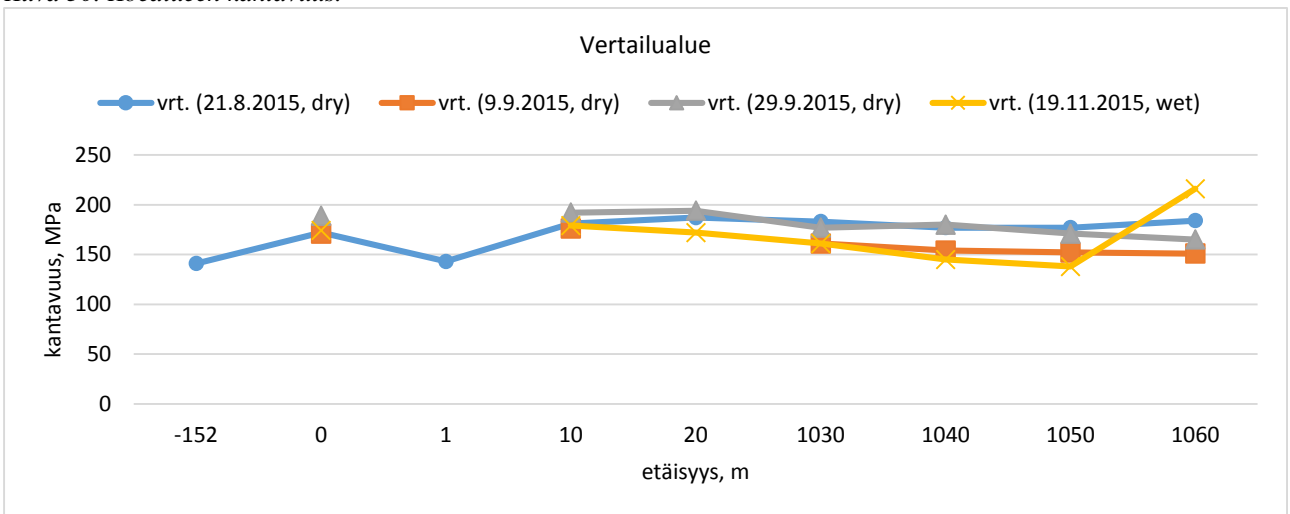
Murskauksen avulla voidaan paikalla olevaa kiviainesta hyödyntämällä parantaa alkuperäistä rakeisuuskäyrää paremmin vastaamaan tavoitekäyrää. Kuvan 28 rakeisuuskäyrissä erottuu runkoaineen hienontuminen alkuperäisestä runkoaineesta murskauksen jälkeen noin 1 mm suuremmissa rakeissa sekä edelleen sideaineseoksen lisäyksen jälkeen. Käyriä verrattaessa voidaan havaita, että muutos alkuperäiseen rakeisuuteen oli vähäinen. Taulukossa 17 on runkoaineesta ja runkoainesideaineseoksesta mitatut pH-arvot ja kosteuspitoisuudet.



Koalue peitettiin murskeella kerrospaksuudella noin 10 cm seuraavana päivänä. Ensimmäiset kantavuusmittaukset tehtiin seuraavana päivänä KUAB-laitteella (kuva 30). Kantavuusmittausten tulokset ovat kuvissa 31 ja 32.



Kuva 30. Koalueen kantavuus.



Kuva 31. Vertailualueen kantavuus.



Kuva 32. Kantavuusmittaus KUAB-laitteella.

Ensimmäisen kantavuusmittauksen perusteella koalueen kantavuuden keskiarvo on riittävä (>150 MPa). Hajonta oli kuitenkin suuri ja kantavuus koalueen ulkopuolella oli hieman korkeampi kuin koalueella. Koalueen kantavuustuloksia verrattaessa vertailualueen kantavuustuloksiin on huomioitava, että vertailualueen kantavuus oli alun perin parempi kuin koalueella, joka edusti tien huonokuntoisinta osuutta. Koalueella mitattujen kantavuustulosten vaihteluun vaikutti osin sideaineiden epätasainen levitys tiealueelle ennen sekoittamista. Lisäksi vasta levitetty irtosora koalueen päällä saattoi jonkin verran heikentää ja lisätä vaihtelua tuloksissa. Koalueen kantavuusmittausten keskiarvot ja min- ja max-arvojen muutosten vaihtelu on kuvattu taulukossa 19. 18vrk ja 41 vrk:n jälkeen kantavuusarvot olivat nousseet ja ylittivät vertailualueen kantavuuden jo 18 vrk:n kuluttua. 90 vuorokauden kantavuusmittaukset tehtiin marraskuussa runsaiden vesisateiden jälkeen noin 20 mm vahvan lumipolanteen päältä märästä tien pinnasta. Lisäksi lämpötila oli ollut lähellä nollaa edellisestä mittauksesta lähtien, jonka seurauksena kantavuusarvot olivat suhteellisen matalat edelliseen mittaukseen verrattuna. Kantavuusarvoja on arvioitava suhteessa vertailualueella mitattuihin arvoihin, jolloin lämpötilan ja kosteuden vaikutukset suodattuvat.

Taulukko 19. Kantavuusmittausten keski-, min- ja maxarvot.

	<b>Kantavuus (MPa), koalueella (sorakerroksen päältä)</b>				<b>Kantavuus (MPa) vertailualueella</b>			
	2vrk (19.8.2015, kuiva)	18vrk (9.9.2015, kuiva)	41vrk (29.9.2015, kuiva)	90vrk (19.11.2015, märkä)	2vrk (19.8.2015, kuiva)	18vrk (9.9.2015, kuiva)	41vrk (29.9.2015, kuiva)	90vrk (19.11.2015, märkä)
min	105	129	143	144	141	151	165	138
max	232	357	383	426	187	176	194	216
ka	152,35	195,25	227,4	220,6	175,50	160,83	181,14	169,3

Pilottikokeen perusteella voi todeta, että

- KAVO:n biopolton lentotuhkan esikastelu esti tuhkan pölyämistä tehokkaasti.
- Stabilointityön onnistumisen kannalta tehokas ja tasainen sideaineen levittäminen ja sekoittaminen stabiloitavaan runkoaineeseen on tärkeää.
- Kantavuustulosten perusteella koestabilointia KAVO:n biotuhkan ja sementin seoksella voi pitää onnistuneena.

## 2.9 Pilotointitavan valintaan vaikuttavat kustannustekijät

Koerakenne valittiin tarvittavaan lujuuteen yltävistä rakenteista ottaen huomioon myös rakenteen kustannustekijät. Taloudellisuustarkastelu on tehty 4 rakenteelle, jonka pohjalta valinta suoritettiin verraten tuloksia laboratoriokokein saavutettuihin puristuslujuus tuloksiin. Rakenteille on tehty myös elinkaarilaskelmia. Laskelmiin sisältyvä suuri oletuksien määrä, on otettava huomioon tarkastelussa.

Vertailun lähtökohtana on ns. bulkkirakenne – korjausmenetelmä (taulukko 20). Bulkkirakenne - korjausmenetelmän kustannus on noin 43 000 – 45 000 €/km, joten tämä on viitekustannus valitulle stabilointirakenteen kustannukselle.

Taulukko 20. vertailtavan ns. bulkkikorjausmenetelmän kustannukset

	TONNIMÄÄRÄT (tn/km)	MATERIAALIT (EUR/km)	TYÖ JA KONEET (EUR/km)	KUSTANNUS €/km
<b>PERUSRAKENNE</b>				
a. Sivu- ja laskuojien tarkastus ja puhdistus			3 000 €	
b. Nykyinen tiepinta tasataan 5 %:n sivukaltevuuteen			3 000 €	
c. suodatinkangas		3 000 €	2 000 €	
d. Kantavan kerroksen tasaus ja tiivistys 5 % kaltevuuteen			1 500 €	
kantava kerros <b>220 mm</b> (murske 0-56 mm)	2032,8	19 312 €		
välikerros <b>60 mm</b> (murske 0-32 mm)	554,4	5 544 €		
kulutuskerros <b>70 mm</b> (murske 0-16 mm)	646,8	6 791 €		
e. Kulutuskerrosmurskeen tasoitus ja tiivistys			1 500 €	
<b>yht. (tn) ;(€)</b>	<b>3234,0</b>	<b>34 647 €</b>	<b>11 000 €</b>	<b>45 647 €</b>

Toisena vertailevana rakenteena on tarkastelussa SSAB Ruukki:n LD-Masuunihiekkatuote (taulukko 21). Kyseessä on valmis tuoteratkaisu ja laboratoriokokeissa ei saavutettu tavoitellun suuruista lujuuskehitystä (6 MPa/28vrk) Saviniementien runkoaineella, joten näistä kahdesta syystä rakenne rajautui pois tästä korjauspilotoinnista.

Taulukko 21. toinen vertailu, LD -masuunihiekka tuote

	TONNIMÄÄRÄT (tn/km)	MATERIAALIT (EUR/km)	TYÖ JA KONEET (EUR/km)	KUSTANNUS €/km
<b>TIRKKOSEN MENETELMÄ (teräs-masuunihiekka 15 %)</b>				
a. Sivu- ja laskuojien tarkastus ja puhdistus			3 000 €	
b. teräs-/masuunikuonahiekka seoksen <b>15%</b> sekoitus tierakenteeseen ( <b>kerros 300 mm</b> )	505,5	12 131 €	10 800 €	
c. Tasaus ja tiivistys 5% kaltevuuteen			3 000 €	
kulutuskerros <b>70 mm</b> (murske 0-16 mm)	646,8	6 791 €		
d. kulutuskerroksen tasoitus ja tiivistys			1 500 €	
<b>yht. (tn) ;(€)</b>	<b>1152,3</b>	<b>18 922 €</b>	<b>18 300 €</b>	<b>37 222 €</b>

Tarkastelussa ollut 1. pilotointivaihtoehto (taulukko 22) On lentotuhkan ja LD – masuunihiekan seos. Tässä rakenteessa ei päästy laboratoriokokein tarvittaviin lujuuksiin. Koekappaleiden puristuslujuutta ei voitu mitata eli se oli alle 1 MPa vielä 90 vuorokauden kuluttua.

Taulukko 22. 1. pilotointirakennevaihtoehto, jossa ei päästy vaadittuihin lujuuksiin / lujuuskehitykseen.

TIRKKOSEN MENETELMÄ ( tuhka-teräs- masuunihiekka)	TONNIMÄÄRÄT (tn/km)	MATERIAALIT (EUR/km)	TYÖ JA KONEET (EUR/km)	KUSTANNUS €/km
a. Sivu- ja laskuojien tarkastus ja puhdistus			3 000 €	
b. tuhka-teräs-/masuunihiekka seoksen sekoitus vanhaan kulutuskerrokseen ja pohjamaahan ( <b>kerros 300 mm; tuhkaa 9%</b> )	318,3	2 546 €	10 800 €	
b. tuhka-teräs-/masuunihiekka seoksen sekoitus vanhaan kulutuskerrokseen ja pohjamaahan ( <b>kerros 300 mm; teräs-/masuunihiekka 10%</b> )	353,6	8 487 €	500 €	
c. Tasaus ja tiivistys 5% kaltevuuteen kulutuskerros 70 mm (murske 0-16 mm)	646,8	6 791 €	3 000 €	
d. kulutuskerroksen tasoitus ja tiivistys			1 500 €	
<b>yht. (tn) ;(€)</b>	<b>1318,7</b>	<b>17 824 €</b>	<b>18 800 €</b>	<b>36 624 €</b>

Laboratoriokoetulosten mukaan valituista rakenteista valittiin lentotuhkan ja sementin seos (taulukko 23). Rakenteella saavutettiin Saviniementien runkoaineella tavoiteltu lujuus. Tuloksista on nähtävissä, että kuljetuskosteuteen kostutettu biotuhka ei vie merkittävästi lujuutta vielä 4h aikana. Tämä kuitenkin otettiin huomioon työsuunnittelussa ja tuhkan noutohetkestä tierakenteen tiivistykseen kului alle 6 tuntia. Kuten taulukosta 23 on nähtävissä, on sementin määrä merkittävässä osassa kustannuksissa.

Runkoaine 87 % + KAVO:n lentotuhka 9 % + Rapidsementti 4 %                      6,3 MPa (28d)  
Runkoaine 87 % + KAVO:n lt (kasteltu 4h ennen) 9 % + RC 4 %                      5,2 MPa (28d)

Taulukko 23. 2. pilotointirakenne, joka on valittu toteutukseen

TIRKKOSEN MENETELMÄ ( tuhka-sementti)	TONNIMÄÄRÄT (tn/km)	MATERIAALIT (EUR/km)	TYÖ JA KONEET (EUR/km)	KUSTANNUS €/km
a. Sivu- ja laskuojien tarkastus ja puhdistus			3 000 €	
b. tuhka-sementti seoksen sekoitus vanhaan kulutuskerrokseen ja pohjamaahan ( <b>kerros 300 mm; tuhkaa 9%</b> )	296,3	2 370 €	10 800 €	
b. tuhka-sementti seoksen sekoitus vanhaan kulutuskerrokseen ja pohjamaahan ( <b>kerros 300 mm; sementtiä 4%</b> )	131,7	17 334 €	500 €	
c. Tasaus ja tiivistys 5% kaltevuuteen kulutuskerros 70 mm (murske 0-16 mm)	646,8	6 791 €	3 000 €	
d. kulutuskerroksen tasoitus ja tiivistys			1 500 €	
<b>yht. (tn) ;(€)</b>	<b>1074,8</b>	<b>26 496 €</b>	<b>18 800 €</b>	<b>45 296 €</b>

Bulkkikorjausmenetelmää ja stabiloivia menetelmiä verrattaessa kannattaa kiinnittää huomiota kohteelle ajettaviin tonnimääriin. Bulkkikorjausmenetelmässä ne ovat noin 3200 tn/km, kun stabilointia käytettäessä vastaavasti 1000 – 1300 tn/km koostuen suurimmaksi osaksi ajetusta kulutuskerroksesta.

Laskennassa käytetyt hinta- ja oletustiedot ovat nähtävissä taulukoissa 24 – 26. Tiedot on kerätty parhaan mahdollisen saatavissa olevan tiedon pohjalta. Stabiloinnissa käytettyjen kalsinoitujen tuotteiden ja aktivaattoreiden, kuten portlandsementin, sopimushinta vaikuttaa merkittävästi menetelmän taloudelliseen kannattavuuteen.

Taulukko 24. Laskelmissa käytetyt oletustiedot

Tien leveys	6
Kalliomurske Irtotilavuuspaino (tn/m3)	1,54
Lentotuhka Irtotilavuuspaino (tn/m3)	1
masuunikuonahiekan Irtotilavuuspaino 1,35... 1,5 tn/m3	1,4
Masuunikuonajauheen ja sementin irtotiheys 1 000...1 400 kg/m3	1,2
Saviniementien irtotilavuuspaino (sullottu) 1,6... 1,7 tn/m3 (kosteus 5%)	1,59
Elinkaarilaskelmissa käytetty korko -%	4,00 %
Jyrsitty tiemassa jyrsintä 300 mm syvyydeltä (tn/km)	2864
Kasettikuorma	40 tn

Taulukko 25. laskelmissa käytetyt materiaalikustannukset

Materiaali	kustannus €/t (alv0)	kuljetus kohteeseen (€/t)	Hinta kohteessa (€/t)
Biotuhka (kuorma-autokuljetus)	- €	5,00 €	5,00 €
Portlandsementti (CEM II, Rapid)	120,00 €	11,63 €	131,63 €
Jauhettu masuunikuona	60,00 €	8,00 €	68,00 €
masuuni-/teräskuonahiekka	10,00 €	14,00 €	24,00 €
Suodatinkangas (€/m2 ja asennus €/m2)	0,45 €	0,18 €	0,63 €
Murske 0-56 mm (bulkkirakenne; 22 cm)	6,00 €	3,50 €	9,50 €
Murske 0-32 mm (bulkkirakenne; 6 cm)	6,50 €	3,50 €	10,00 €
Murske 0-16 mm (bulkkirakenne; 7 cm)	7,00 €	3,50 €	10,50 €

Taulukko 26. laskelmissa käytetyt työ- ja konekustannukset

Menetelmä	Kustannus (€/t)	Kustannus (€/km)
Tuhkasidaineseoksen sekoitus pohjamaahan tai murskeeseen (300 mm)	6	10 800 €
Tuhkan levitys/tasaus 5 % kaltevuuteen ja tiivistys	3	3 600 €
Pohjamaan/tuhkan tiivistys		2 400 €
Sivu- ja laskuojien tarkastus ja puhdistus		3 000 €
Vanhan kulutuskerroksen poisto		4 000 €
Nykyinen tiepinta tasataan 5 %:n sivukaltevuuteen		3 000 €
Suodatinkankaan hinta (€/km) ja hinta asennettuna	3000	5 000 €
Kantavan kerroksen tasaus ja tiivistys 5 % kaltevuuteen		1 500 €
Kulutuskerrosmurskeen tasoitus ja tiivistys		1 500 €



Taulukko 27. Elinkaarilaskelmissa käytetyt oletustiedot [8] (harmaalla oma arvio)

Rakenne	Elinkaari (vuosia)	Kunnossapito (EUR/km)	Ylläpito (EUR/km)	Korjaus+ylläp. Yht (EUR/km)
Lentotuhka sideaineena	30	175	100	275
Lentotuhka massiivirakenteena	30	140	50	190
Lentotuhka/kuona/sementtiseos sideaineena	40-50	<b>140</b>	<b>50</b>	<b>190</b>
Murske	6...8	<b>230</b>	<b>150</b>	<b>380</b>
Murske 30 cm+ suodatinkangas	10...15	<b>210</b>	<b>150</b>	<b>360</b>

### Elinkaarikustannukset

Tuotteen elinkaarella tarkoitetaan yleisesti tuotteen kaikkia vaiheita raaka-aineiden hankinnasta, rakentamisesta, käytöstä, kunnossapidosta, korjauksista sekä mahdollisesta kierrätyksestä aina purkamiseen tai jätteeksi päätymiseen asti. Ajatusta voidaan soveltaa periaatteessa mihin tahansa tuotteeseen tai tuoteosaan [30].

Elinkaarilaskelmissa on käytetty nykyarvomenetelmää. Nykyarvomenetelmän [31] perusajatuksena on, että eriaikaiset suoritukset diskontataan valittuun vertailuajankohtaan, joka tavallisesti on nykyhetki. Yleensä tehdään se yksinkertaistus, että suoritusten perusinvestointia lukuun ottamatta oletetaan tapahtuvan kunkin vuoden lopussa, tällöin suorituksen nykyarvo saadaan kertomalla kustannus diskonttaustekijällä. Diskonttaustekijän lasketaan kaavalla 1.

$$c_k = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (1)$$

missä

$c_k$  = diskonttaustekijä vuonna  $n$

$i$  = laskentakorkokanta, käytetty 4 %

$n$  = aika vuosina laskentahetkestä

Yksittäisen suoritteen nykyarvo laskentahetkellä saadaan kaavasta 2.

$$K_k = q_k * c_k \quad (2)$$

missä

$K_k$  = vuodelle  $k$  kohdistuvan suoritteen  $q_k$  nykyarvo laskentahetkellä

$c_k$  = diskonttaustekijä

Tietyille vuodelle kohdistuva suorite on yleensä kyseisenä vuonna tehdyn korjauksen arvo tai rakenteen jäännösarvo tarkastelujakson lopussa. Pohjarakenteiden osalta elinkaaren kaikkien kustannusten nykyarvoa voidaan arvioida kaavalla 3.

$$EKN = IK + KP + YP + TK - JN \quad (3)$$

missä

EKN = elinkaarikustannusten nykyarvo

IK = investointikustannusten nykyarvo

KP = vuosittaisten kunnossapitokustannusten (hoitokustannukset) nykyarvo

YP = ylläpitokustannusten (rakenteen ylläpitokorjaukset) nykyarvo

TK = tienkäyttäjän kustannusten nykyarvo (ei kuulu urakkahinnoitteluun, joten ei tässä Tarkastelussa)

JN = suunnitteluajan lopussa olevan jäännösarvon nykyarvo

Taulukko 28. Elinkaarilaskelma

Rakenne	Elinkaari (vuosia)	EKN	IK	KP	YP	JN	(EKN/a)
<b>PERUSRAKENNE</b>	<b>15</b>	<b>36 998 €</b>	<b>45 647 €</b>	2 347 €	1 677 €	12 673 €	<b>2 467 €</b>
<b>TIRKKOSEN MENETELMÄ (tuhka-teräs-/masuunihiekka)</b>	<b>20</b>	<b>31 982 €</b>	36 624 €	2 364 €	1 351 €	8 357 €	<b>1 599 €</b>
<b>TIRKKOSEN MENETELMÄ (tuhka-sementti)</b>	<b>40</b>	<b>44 047 €</b>	<b>45 296 €</b>	2 556 €	913 €	6 500 €	<b>1 101 €</b>

Elinkaarikustannuksista on hyvin nähtävissä elinkaaren pituuden vaikutus elinkaaren aikaisiin vuosikustannuksiin. Tierakentamisessa (kuten rakentamisessa yleensä) on investointikustannus suhteellisen suuri verrattuna kunnossapitokustannuksiin. Perusrakenteen ja käytetyn pilotoinnin investointikustannus sattui suhteellisen lähelle toisiaan. Kuitenkin elinkaaren aikaisten vuosikustannusten osalta on stabilointimenetelmä noin 2,2 kertaa edullisempi.

### 3 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä projektissa tehtyjen sideainetutkimusten ja kokeiden perusteella biopolton lentotuhka tarvitsee lisäaktivaattoria toimiakseen riittävän tehokkaasti sideaineena stabiloinnissa. Kokeiden perusteella parhaiten aktivaattorina toimii sementti ja masuunikuonajauhe. Aktivaattorin avulla voidaan tasoittaa myös lentotuhkan laadunvaihtelun vaikutusta. Molemmat tutkitut lentotuhkat toimivat hyvin karkean murskeen stabilointiaineena, jolloin korostuu lentotuhkan fillerivaikutus sideainevaikutuksen lisäksi. Pilottikokeen perusteella aktivoidun biotuhkan käytön vaikutus lujuuteen ja kantavuuteen stabilointiaineena kyseisen tyyppisellä maa-aineksella (luonnon sora ja hiekka) on vähäisempi verrattuna esimerkiksi murskeen stabilointiin, joka näkyi esimerkiksi tuhkien suurempana aktivaattorin tarpeena suhteessa tuhkan määrään. Lisäksi verrattuna rinnakkain aktivoidulla kuonalla (6 %) tehdyllä stabiloinnilla kantavuuden lisäys samalla ajanjaksolla (90 d) oli yli 60 % parempi kuin biotuhkasementtiseoksella suuremmasta stabilointiaineen kokonaisuudesta huolimatta (13 %) (rinnakkaiskoe kuvattu tarkemmin erillisessä raportissa). Pilottikokeen osalta todellisia tuloksia voidaan kuitenkin arvioida vasta vähintään vuoden kuluttua stabiloinnista. Stabiloimalla saavutettiin kokeessa kantavuudeltaan hyvä rakenne, mutta muita esimerkiksi plastisuuteen vaikuttavia tekijöitä ei arvioitu.

Pilotoidun rakenteen laskennalliset kustannukset olivat hyvin lähellä toisiaan (perusrakenne 45 647 €/km ja tuhka/sementtirakenne 45 296 €/km). Laskennalliset elinkaarenaikaiset kustannukset poikkesivat kuitenkin huomattavasti stabiloidun lujittuneen rakenteen eduksi (2 467 €/v ja 1 101 €/v), eli elinkaaren aikaisten kustannusten osalta on stabilointimenetelmä noin 2,2 kertaa edullisempi.

Tarkastellessa tuhkan sopivuutta tierakentamiseen esiin nousee kysymyksiä, 1.) mikä on tuhkan rooli pilotoinnissa; onko se täyteaine vai sideaine, 2.) onko tärkeintä löytää ratkaisu tuhkan loppusijoitukseen, 3.) millä hinnoittelulla tuhka on teknistaloudellinen ja 4.) vaatiiko tuhka sementin, masuunikuonan tai jotain muuta vastaavaa seosaineksi aktivointiin. Tarkastellessa kustannuksia, on taloudellisuus saavutettavissa hyödyntämällä olemassa olevaa kiviainesta stabiloimalla. Kokonaan uusi stabilointikerros on helposti (joka tapauksessa?) kalliimpi kuin bulkkikorjausmenetelmä. Käytetyllä stabilointitavalla kustannusten kannalta ydinkysymyksenä on, mihin syvyyteen on koerakenteen rakentamisessa mahdollista ja kannattavaa mennä ja tätä kautta myös, kuinka paljon on mahdollista korvata tuotavaa kiviainesta tien rakennetta stabiloimalla. Tarkastellessa suoritettujen pilotoinnin onnistumista tarkemmin saavutettuun kantavuuteen suhteessa kustannuksiin voidaan todeta, että a.) stabilointikerroksen vahvuudesta (300 mm) voidaan tinkiä ja b.) Tirkkosen menetelmää käytettäessä stabilointia kannattaa käyttää vain tarvittaviin ongelmakohtiin ongelman suuruuden suhteessa. Osalle tieosuudesta kävisi pelkästään ylisuuren jakeen murskaus ja tien kantavan rakenteen homogenointi. Pilottikoe osoitti, että tuhkalta löytyy tarkastellussa rakennustavassa sideainefunktio (kysymykset 1. ja 2.). Toteutus kuitenkin vaatii a.) oikean työmenetelmän, b.) kohteen mukaista mitoittamiseen perustuvaa sideainesuunnittelua tien runkoaineeseen, c.) hyvän työsuunnittelun ja d.) onnistuneen toteutuksen. Pilotointikokeen mukaan tuhkalle on määriteltävissä hinta (kysymys 3.), joka on suhteessa juuri sen tuottamaan lisäarvoon sideaineena kokonaisrakenteessa, joka vaatii lisäaktivaattorin (kysymys 4.).



*Kuva 33. Biotuhkaseoksella stabiloitu tieosuus marraskuussa 2015.*



*Kuva 34. Stabiloidun rakenteen kairaus marraskuussa 2015. Rakenne on luja, mutta kairasydämmen irrottaminen ehyenä ei onnistu (Kaira ei yllä rakenteen läpi – sydän ei katkea).*

## VIITTEET

- [1] Arponen J. & Perko, S. (2014) Teollisten symbioosien hyödyt yrityksille, Teolliset Symbioosit Foorumi 2014, SITRA.
- [2] Salmi O, Haapalehto T, Harlin A, Häkkinen T, Kangas H, Mroueh U-M & Qvintus P. (2013) Materiaalitehokkuuden kehittäminen Suomen teollisessa rakenteessa, VTT.
- [3] Tornivaara A. (GTK). (2012) Kaivannaisjätteiden ominaisuuksien määrittäminen, MUTKU-päivät, Suomenlahti, seminaariesitys.
- [4] Aaltonen R, Alapassi M, Karhula M, Karhunen E, Korhonen I, Loukola-Ruskeeniemi K. (toim.), Nybergh P, Peltonen P. & Uusisuo M. (2012) Suomen kaivosteollisuuden tilannekatsaus vuonna 2012, TEM raportteja 23/2012.
- [5] Nikkarinen M. (GTK). (2012) Kaivannaisjätteiden määrittely, määrä ja hyötykäytön problematiikka, Kestävä kaivostoiminta – kaivannaisjätteistä uutta liiketoimintaa, seminaariesitys.
- [6] RT. (2014) Rakennusteollisuus RT, <http://www.rakennusteollisuus.fi> (190914)
- [7] Vainio T. (2012) Rakentamisen yhteiskunnalliset vaikutukset, Asiakasraportti, VTT.
- [8] Lahtinen P. (2001) Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads, Finnra Reports 70/2001, s.102
- [9] Rakennuslehti, 19.9.2014.
- [10] Papayianni I., Tsimas S. & Moutsatsou, A. Standardization aspects concerning high calcium fly ashes. [www.flyash.info](http://www.flyash.info) 2.2, 2.2.2.
- [11] Kim, A.G. Kazonich G. (1999) Mass release of trace element from coal combustion by-products. A paper for the International Ash Utilization Symposium. Lexington.
- [12] Vestin J., Arm M., Nordmark D, Lagerkvist A., Hallgren P. & Lind B. (2012) fly ash as a road construction material, WASCON 2012 Conference proceedings, s.8
- [13] Ribbing C. (2007) Environmentally friendly use of non-coal ashes in Sweden, Waste Management, vol. 27, pp. 1428-1435
- [14] Center for Portland cement concrete pavement technology (2005) Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils, volume 1: Engineering properties and construction guidelines, Final report, s. 171
- [15] Ramboll (2014) Massastabilointityökirja, s.63
- [16] Hansson N. (2008) Deep soil stabilization with fly ash, Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden, pp. 48
- [17] Prusinski J.R. & Bhattacharja S. (1999) Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils, Transportation Research Record, s.215-227
- [18] Herzog A. & Mitchell J.K. (1963) Reactions accompanying stabilization of clay with cement, Highway Research Record, vol. 36, s.146-171
- [19] Little D.N. (1995) Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall/Hunt Publishing company, Dubuque, Iowa
- [20] Makusa G.P. (2012) Soil stabilization methods and materials in engineering practice, State of the art review, Department of civil, environmental and natural resources engineering, division of mining and geotechnical engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, s. 38.
- [21] Majumdar A.K. (1999) Performance of fly ash as fill material and construction of pavements. Paper 83 for the 13th International symposium on Use and Management of Coal Combustion Products (CCPs). ACAA
- [22] Tiehallinto (2007), Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa, suunnitteluvaiheen ohjaus, Edita Prima Oy, Helsinki s.80
- [23] Arm M., Lindeberg J., Rodin, Å., Öhrström A., Backman R., Öhman M. & Boström D. (2006) Gasbildning i aska, Värmeforsk, 957
- [24] Backman R., Berg M., Boström D., Hirota C., Öhman M. & Öhrström A. (2007) Metalliskt aluminium I förbränningen, Värmeforsk, 1008
- [25] Tiehallinto (2007) Stabilointiohje (suunnitteluvaiheen ohjaus), s.56
- [26] Lagerlund J. & Jansing C. (2012) Långtidspåverkan av kalkrika flygaskor vid våtlagring för användning inom markstabilisering, Miljöriktig användning av askor, 1226, Värmeforsk, s. 138
- [27] Tiainen M. (2014) Voimalaitostuhkien hyödyntämismahdollisuudet, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta, LUT Energia, Ympäristötekniikan koulutusohjelma, s.68
- [28] Berg K.C., Bergeson K.L. (1999) Durability and strength of reclaimed class C fly ash in road bases. Paper 85 for the 13th International symposium on use and management of coal combustion products (CCPs). ACAA.
- [29] Kainuun Voima Oy, lentotuhkan hyötykäyttökelpoisuus, laadunvalvonta-analyysit 25.3.2015, Ramboll, viite 15100 17065/3-4
- [30] RIL 216-2001, Rakenteiden elinkaartekniikka. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL r.y. Helsinki 2001. 301s.
- [31] Juntunen P. (2004) Elinkaarikustannukset ja painumariskit tien perustamistavan valinnassa, Tiehallinnon selvityksiä 20/2004
- [32] Ribbing C. (2007) Environmentally friendly use of non-coal ashes in Sweden, Waste Management, vol. 27, pp. 1428-1435

Symbioosituotteella tarkoitetaan tuotetta, jossa hyödynnetään teollisten yksiköiden sekundäärisiä raaka-aineita kuten energiateollisuuden jätteitä. Teolliseen symbioosiin liittyy tyypillisesti maantieteellinen läheisyys yhteistyö tavoitteena palvella teollisen ekologian realisoitumista eli energiatehokkuutta ja jätteiden kierrätystä uusia ratkaisuja luomalla. Teollisen symbioosin kehittämisen ajureita ovat mm. kasvava kuluttajakysyntä ekologisille tuotteille, tiukentuneet jätelait, niukkenevat luonnonvarat ja uusien teknologioiden luomat mahdollisuudet symbioosituotteiden kehittämiseen. Luonnonvarojen rajallisuus ja kasvava mineraalien tarve toimivat ajureina sekundääristen mineraalien energiatuotannon tuhkien hyödyntämiselle.

Raportti on osaraportti projektin GeoSynergy (Uudet symbioosituotteet ja käyttösovellukset) aikana biopolton lentotuhkilla tehdyistä tutkimuksista. Kokeet keskittyivät kahden tehtaan lentotuhkan käyttöön tierakenteiden stabiloinnissa. Tutkimusten tavoitteena oli optimoida stabiloinnissa käytettävän sideaineen koostumus erityisesti huomioiden syksyllä 2015 toteutetun pilottikohteen vaatimukset. Raportissa annetaan suosituksia tutkittujen biopolton lentotuhkien käytöstä, kuvataan pilottikohteen toteutusta ja siihen liittyviä kustannusvertailuja.



ISSN 1458-915X

ISBN 978-952-9853-93-9