

Tiia Lehtola

**MÄRKÄPURETUN LENTOTUHKAN HYÖDYNTÄMINEN KAIVOK-  
SEN LOUHOSTÄYTÖSSÄ**

# **MÄRKÄPURETUN LENTOTUHKAN HYDYNTÄMINEN KAIVOKSEN LOUHOSTÄYTÖSSÄ**

Tiia Lehtola  
Opinnäytetyö  
Kevät 2017  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, talonrakennustekniikka

---

Tekijä: Tiia Lehtola

Opinnäytetyön nimi: Märkäpuretun lentotuhkan hyödyntäminen kaivoksen louhostäytössä

Työn ohjaaja: Hannu Kääriäinen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: 04/2017 Sivumäärä: 22

---

Lentotuhkaa syntyy kivihiilen ja orgaanisen aineen polttoprosessissa palamistuotteena. Kivihiilituhka on hyväksytty betonin lisäaineeksi, mutta orgaanista tuhkaa ei saa käyttää nykymääräysten mukaan betonin sideaineena. Tässä työssä tutkitaan niin sanotun orgaanisen tuhkan käyttöä kaivoksen louhostäytötarkoitukseen. Orgaanista tuhkaa syntyy turpeen, puuhakkeen, kantojen tai muun vastaavan aineen polttoprosessin palamistuotteena. Lentotuhkaa pystytään osittain hyödyntämään kaivoksen louhostäytössä. Sitä syntyy kuitenkin enemmän kuin ehditään käyttää, ja suuri osa lentotuhkasta joudutaan varastoimaan ulos, jolloin se pääsee kostumaan.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, voidaanko märkäpurettua lentotuhkaa käyttää kuivapuretun lentotuhkan tapaan kaivoksen louhostäytössä, reagoiko kostunut lentotuhka enää uudelleen ja saavuttaako koekappaleet 1 MPa:n puristuslujuuden.

Työ suoritettiin laboratoriotestein. Lentouhkalle määritettiin kosteusprosentti, jotta saatiin muodostettua kullekin lentotuhkanäytteelle oma resepti. Prisma-koekappaleet valmistettiin aktiivisuusindeksin määrittelevän standardin mukaisella menetelmällä. Näiden kappaleiden puristuslujuus testattiin seitsemän ja 28 vuorokauden iässä. Kappaleiden tuloksia verrattiin kuivasta lentotuhkasta tehtyjen kappaleiden tuloksiin. Myös sideainelietteestä tehtiin koekappaleita, joiden annettiin kovettua 28 vuorokatta. Näiden kappaleiden tuloksia ei kuitenkaan voitu käyttää varsinaiseen vertailuun, koska tuloksia oli vähän ja myöhäisemmässä vaiheessa tehdyt kappaleet eivät ehtineet kovettua.

Työn ansiosta saatiin selville, että märkäpurettu lentotuhka reagoi heikosti ja hitaasti kuivapurettuun lentotuhkaan verrattuna. Kosteusprosentti vaikuttaa lentotuhkan käytettävyyteen. Lujuudenkehitystä ei juuri tapahdu ensimmäisen viikon jälkeen kosteasta lentotuhkasta valmistetuilla kappaleilla. Kaikki prismakoekappaleet saavuttivat kuitenkin halutun 1 MPa:n lujuuden. Märkä, ulos varastoitu lentotuhka soveltuu huonosti sellaisenaan kaivoksen louhostäytössä käytettäväksi.

---

Asiasanat: lentotuhka, puristuslujuus, lujuudenkehitys, louhostäyttö

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Civil Engineering, House Building Engineering

---

Author: Tiia Lehtola

Title of thesis: Recycling of Wet Demolished Fly Ash in Quarry Filling Of Mines

Supervisor: Hannu Kääriäinen

Term and year when the thesis was submitted: 04/2017

Pages: 22

---

Fly ash is generated when coal or organic material is burned in thermal and electric power plants. Fly ash can be partly recycled in quarry fill of mine. The amount of fly ash may be so large that it is not possible to use all of it at once. Leftovers are stored outside without any shelter so it absorbs dampness. Coal fly ash is accepted material in concrete but organic fly ash is not because it is generated from burning organic materials, for example peat or stump.

The purpose of this thesis was to study if wet demolished organic fly ash can be used in quarry fill of mines. The main questions were: Will wet fly ash react again after bond is broken and will it achieve compressive strength of the 1 MPa.

The work was performed by different laboratory tests. The moisture percentage of fly ash was defined and based on that each fly ash got own recipe for the test piece paste. The standard of Activity index was the base on testing process. The test pieces were made of wet demolished fly ash and dry demolished fly ash. The pieces were tested in seven and twenty-eight days. The results of wet demolished fly ash pieces was compared to pieces which were made of dry demolished fly ash. Bigger test pieces were made of adhesive slurry. These pieces took much time to get solid and for this reason there are no any results of it.

The results of this thesis showed that wet demolished fly ash reacts weakly and slowly compared to dry demolished fly ash. The progress of compressive strength was slight after the first week. However all pieces achieved the aim of the 1 MPa compressive strength. In conclusion it can be said that wet fly ash, as it stated, suits poorly for quarry fill of mine.

---

Keywords: fly ash, compressive strength, progress of compressive strength, quarry fill

# SISÄLLYS

1 JOHDANTO	4
2 BETONIN KOOSTUMUS	6
2.1 Runkoaines ja vesi	6
2.2 Sideaine	6
2.3 Seosaineet	7
2.3.1 Lentotuhka	7
3 LENTOTUHKAN TESTAUS	10
3.1 Tuhkanäytteet	10
3.2 Testaustavat ja käytetyt standardit	10
3.3 Kosteuden määrittäminen	10
3.4 Aktiivisuusindeksin hyödyntäminen	11
3.5 Prismakoekappaleiden valmistus	12
3.6 Sideainelietekoekappaleet	14
4 TULOKSET	17
5 POHDINTA	20

# 1 JOHDANTO

Betonin valmistuksessa käytettävä sementti voidaan korvata osittain lentotuhkalla. Lentotuhkaa syntyy kivihiilen ja orgaanisen polttoaineen, esimerkiksi turpeen palamistuotteena. Vain kivihiilen polttoprosessissa syntynyttä lentotuhkaa voidaan käyttää betonin valmistamiseen. Lentotuhkaa on sekä kuiva- että märkämpurettua. Kuivapurettu tuhka on nimensä mukaisesti kuivaa, ja sitä voidaan käyttää sellaisenaan yhtenä betonin osa-aineena. Märkämpurettuun lentotuhkaan on pölyämisen estämiseksi lisätty hieman vettä, jolloin sen ominaisuudet eroavat kuivasta tuhkasta. Kun lentotuhka joutuu kosketuksiin veden kanssa, se muodostaa sidoksia ja kovettuu. Tämän reaktion pitäisi tapahtua vasta betoniseoksessa, joten ei ole varmuutta, voidaanko märkämpurettua lentotuhkaa käyttää osa-aineena betonin valmistamisessa.

Lentotuhkaa syntyy enemmän kuin sitä ehditään kuluttaa ja säilöä. Osa tuhkasta joudutaan varastoimaan ulos, jolloin se kastuu ja kosteuspitoisuus voi olla jopa yli 50%:a. Varastoitu tuhka muuttuu jätteeksi tietyn ajan jälkeen ja aiheuttaa kustannuksia. Tämän työn tarkoituksena on selvittää, voidaanko märkämpurettua ja märkämpurettua, välivarastoitua lentotuhkaa käyttää hyödyksi kaivoksen louhostäytössä. Louhostäyttöön tarkoitettulla sideaineliitteellä ei ole yhtä kovia vaatimuksia kuin betonilla, joten voidaan käyttää orgaanisen polttoaineen palamistuotteena syntyvää lentotuhkaa.

Työn tilaajana toimii Tornion Voima Oy, joka tuottaa lämpöä ja sähköä Tornion, Haaparannan ja Kemin alueella. Tornion voima Oy:n yhteyshenkilö Marko Pongkala toimitti tuoretta, märkämpurettua ja märkämpurettua välivarastoitua lentotuhkaa testauksia varten. Näistä lentotuhkanäytteistä valmistetaan sovelletun SFS-standardin mukaisia prismakoekappaleita ja sideaineliitteen reseptillä valmistettuja koekappaleita. Kovettuneille kappaleille tehdään puristuskoe ja tuloksia vertaillaan keskenään. Tuloksista voidaan päätellä reagoiko märkämpurettu lentotuhka enää sidosten purkamisen jälkeen uudelleen ja soveltuuko se käytettäväksi kai-

voksen louhostäyttöön. Kovettuneen massan vähimmäislujuusarvoksi on asetettu 1 MPa. Tornion voiman tehtaalla ei polteta kivihiltä, vaan ainoastaan jyrsin-  
turvetta ja puupohjaisia hakkeita.

## **2 BETONIN KOOSTUMUS**

Betoni koostuu runkoaineesta, sideaineesta ja vedestä. Runkoaineena toimii sora ja sideaineena sementti. Näiden aineiden keskinäisellä suhteella voidaan vaikuttaa betonin ominaisuuksiin. Seosaineilla ja lisäaineilla voidaan muokata betonin ominaisuuksia haluttuun suuntaan. (1; 2, s. 38.)

### **2.1 Runkoaines ja vesi**

Tilaajan käyttämässä täyteaineessa runkoaineena toimii kalliomurske. Murskeessa on hyvin vaihtelevan kokoisia kiviä ja lohkareita. Itse runkoaineella ei ole tekemistä sementin reaktioiden kanssa. Kiviaineksen tulee olla puhdasta, eikä se saa sisältää sementin kovettumista häiritseviä aineita, kuten humusta tai elopeärisiä aineksia. (2, s.38.)

Sementin reaktiot tapahtuvat sen joutuessa kosketuksiin veden kanssa. Betonissa käytettävän veden tulee olla puhdasta. Tavallinen vesijohtovesi käy hyvin betonin valmistamiseen. Veden ja sementin suhde vaikuttaa lopulliseen lujuteen ja tiiveyteen. Mitä pienempi vesimäärä on sementtiin verrattuna, sitä kestävämpää ja tiiviimpää betoni on. (1; 2, s. 40.)

### **2.2 Sideaine**

Sementti koostuu kalkkikivestä, kvartsista ja savesta. Sementti toimii sideaineena ja reagoidessaan veden kanssa, se sitoo runkoaineet yhteen. Tämä saa betonin kovettumaan kestäväksi lopputuotteeksi. Sementtejä on eri laatuja ja niitä voidaan valmistaa seostamalla Portland-sementtiä esimerkiksi masuunikuonalla tai lentotuhkalla. Sementin päälajeja ovat SFS-EN 197-1 standardin mukaan CEM I Portlandsementti, CEM II Portlandseossementti, CEM III Masuunikuonasementti, CEM IV Pozzolaaniseimentti ja CEM V Seossementti. Näillä päälajeilla on alaluokkia, jolloin erilaisia sementtejä on yhteensä 27 kappaletta. (1; 2, s.38.)



## **2.3 Seosaineet**

Seosaineet ovat hienojakoisia ja epäorgaanisia osa-aineita, joilla pyritään vähentämään ympäristökuormaa ja vaikuttamaan sementin ominaisuuksiin. Reaktiot vaikuttavat sementtikiven lujuuden kehitykseen ja kestävyYTEEN yleensä suotuisasti. Seosaineita on kahta tyyppiä lähes reagoimattomia ja piilevästi hydraulisia, pozzolaanisia seosaineita. Pozzolaanisen aineen reagoiDESSA sementin ja veden kanssa syntyy kalsiumsilikaattihydraattigeeliä, joka antaa lujuutta betonille. Lähes reagoimaton seosaine vaikuttaa betonin tiivistymiseen ja lisää lujuutta. (2, s. 38; 3, s. 31; 4, s.14.)

### **2.3.1 Lentotuhka**

Lentotuhkan käytön perusteena voidaan pitää taloudellisia, teknisiä ja ympäristönsuojeluun liittyviä seikkoja. Jokaista käytettyä lentotuhkatonna kohden voidaan vähentää Betoninormin mukaan 400 kg sementtiä. Lentotuhkan käyttö betonissa vähentää kalleimpien ainesosien käyttöä, joten betonin hinta on huokeampi. Sementin tuotannossa syntyy 700 - 800 kg:a hiilidioksidia sementtitonna kohden. Lentotuhka voi korvata 40 % painostaan Portland-sementistä, joten lentotuhkan käyttö vähentää noin 300 kg hiilidioksidipäästöjä. Tähän viitaten voidaan sanoa lentotuhkan käytön olevan ympäristöteko (4, s.6.).

Lentotuhka on sideaineena vanhempi kuin portlandsementti. Ajanlaskun alussa betonin kovettuminen perustui tulivuoren tuhkan kykyyn reagoida sammutetun kalkin kanssa. Nykyään käytettävän lentotuhkan käyttö perustuu juuri tähän reaktioon. (4, s.13.)

Lentotuhkan koostuu pääosin piin, alumiinin, raudan ja kalsiumin yhdisteistä. Lentotuhka voi sisältää myös vaihtelevan määrän raskasmetalleja esimerkiksi molybdeeniä, kromia tai lyijyä. Pilaantuneille maa-aineksille asetetut raja-arvot ylittyvät kuitenkin vain harvoin. (4, s. 3; 5.)

Lentotuhkan kuulamaiset partikkelit lisäävät betonin notkeutta ja tällöin veden tarve vähenee ja viskositeetti alenee. Tuhkan määrä vaikuttaa myös lujuudenke-

hitykseen ja siihen, milloin lujuus saavutetaan. Betonin sisältämä lentotuhka alentaa varhaislujuutta ja kasvattaa loppulujuutta. Lentotuhka toimii sementin kanssa ikään kuin liima, joka saa betonin pysymään koossa paremmin. Toisaalta lentotuhka vähentää vedenerottumista aiheuttaen mahdollisesti plastista kutistumista. Lentotuhkan käyttö tekee betonimassasta liisterimäistä, jolla voi olla sekä hyviä että huonoja puolia. Massan työstäminen voi olla kohteessa haasteellisempaa ja hitaamman lujuudenkehityksen vuoksi jälkihoitoa tarvitaan pidempään. Mahdolliset plastiset halkeamat pienevät ja niitä on vaikeampi havaita. Samat asiat pätevät myös korkealujuusbetoniin. Lisäksi on havaittu, että lentotuhkaa sisältävän korkealujuusbetonin vastustuskyky emäksisiä reaktioita kohtaa kasvaa. (4, s.12; 6, s. 8; 7, s.38.)

Betoniin soveltuvan kivihiilituhkan tulee täyttää SFS-EN 450 Standardin vaatimukset. Betoniin käytettävä lentotuhka on jaettu A ja B luokkaan hehkutushäviön mukaan. A-luokan lentotuhkan hehkutushäviön tulee olla pienempi tai yhtä pieni kuin viisi painoprosenttia ja B-luokan lentotuhkan hehkutushäviö saa olla korkeintaan seitsemän painoprosenttia. Vaatimukset rajoittavat palamattoman hiilen määrää lentotuhkassa. Mitä vähemmän hiiltä lentotuhka sisältää, sitä paremmin betoni on työstettävissä. Mikäli hiilipitoisuus on suuri, betonin vedentarve voi kasvaa. (6, s.4; 8, s.130)

Portland-sementtiä käytettäessä suurin sallittu lentotuhkalisäys on 45 %:a rasi-  
tusluokissa X0, XC1, XC2, XC3, XS1, XD1 ja XA1. Rasitusluokissa XC4, XS2,  
XS3, XD2, XD3, XF1, XF2, XF3 ja XF4 sallitaan 30 %:n lentotuhkalisäys. Määrät  
sallitaan vain silloin, kun lentotuhka on ainoa seosaine sementissä. (9, s. 16-17)

Lentotuhkabetoni suhteitetaan samalla tavalla kuin tavallinen betoni. Sementin määrää voidaan vähentää 40 % käytettävästä lentotuhkamäärästä. Yleensä myös hienoinesta joudutaan vähentämään, jotta lentotuhkalle saadaan tarpeeksi tilaa. (9, s.18)

Lentouhkaa käytettäessä lujuudenkehitys nopeutuu lämpimissä olosuhteissa. Esimerkiksi huoneenlämpöä korkeammissa lämpötiloissa lentotuhkabetonin lu-

juus savuttaa Portland-sementtibetonin lujuuden noin seitsemässä vuorokaudessa, mutta noin viiden asteen lämpötilassa saman lujuuden saavuttamiseen menee noin 28 vuorokautta. Lujuuden kehitys jatkuu tämänkin jälkeen ja lopullinen lujuus saavutetaan noin kolmen kuukauden kuluessa. (9, s.28-30.)

Lentotuhka voidaan jakaa syntytapansa mukaan kivihiilen polttoprosessissa syntyvään ja orgaanisen aineen polttoprosessissa syntyvään lentotuhkaan. Kivihiilen polttoprosessissa syntynyt kivihiililentotuhka on hyväksytty betonin seosaineeksi, mutta orgaanista lentotuhkaa ei voi käyttää betonin valmistamiseen. Orgaanista lentotuhkaa syntyy esimerkiksi puuhakkeen, turpeen, kantojen tai olkien polttoprosessi palamistuotteena. Tässä opinnäytetyössä on käytetty vain orgaanisen aineen palamistuotteena syntynyttä lentotuhkaa. (4, s. 3; 9, s.3.)

## **3 LENTOTUHKAN TESTAUS**

### **3.1 Tuhkanäytteet**

Tuhkanäytteet toimitettiin Tornion voiman tehtaalta laboratorioon. Tuhkien koostumusta ei ole tutkittu. Tuhkat on numeroitu satunnaisessa järjestyksessä.

1. Tuore lentotuhka, trukkilavojen vierestä, kosteus 50,6 %
2. Tuore lentotuhka ulos varastoidun kasan päältä, kosteus 48,0 %
3. Vanha lentotuhka, kosteus 52,5 %
4. Vanha lentotuhka. kosteus 56,0 %
5. Vanha lentotuhka, kosteus 51,8 %
6. Kuivapurettu tuore lentotuhka, kosteus 0,2 %
7. Märkäpurettu tuore lentotuhka, kosteus 16,1 %
8. Märkäpurettu tuore lentotuhka, kosteus 15,8 %
9. Kuivapurettu tuore lentotuhka, kosteus 0,5 %

### **3.2 Testaustavat ja käytetyt standardit**

- Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 1: Määritelmät, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus SFS-EN 450-1
- Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength SFS-EN 196-1:2016
- Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 5: Kosteuspitoisuuden määrittäminen kuivaamalla tuuletetussa lämpökaapissa SFS-EN 1097-5
- Kovettuneen betonin testaus. Osa 1: Muoto, mitat ja muut koekappaleiden ja muottien vaatimukset SFS-EN 12390-1

### **3.3 Kosteuden määrittäminen**

Kosteutta määritettäessä lentotuhkanäyte saavuttaa vakiopainonsa lämpökaapissa, jonka lämpötila on 105 °C. Kosteuspitoisuus määritetään prosentteina massan muutoksen avulla. Kosteusprosentin avulla saadaan selville lentotuhkan sisältämä vesimäärä ja voidaan muokata reseptejä sen mukaisesti.

TAULUKKO 1. Kosteusprosentti.

TUHKA	kosteus
1	50,60 %
2	48,00 %
3	52,50 %
4	56,00 %
5	51,80 %
6	0,20 %
7	16,10 %
8	15,80 %
9	0,50 %

### 3.4 Aktiivisuusindeksin hyödyntäminen

Aktiivisuusindeksin määrittäminen on SFS-EN 450-1 Standardin mukainen menetelmä, jolla valmistetaan prismamuoteilla koekappaleita. Koekappaleiden massa valmistetaan sementistä, standardihiekastahiekasta ja vedestä. Vertailukoekappaleeseen tulee 450 g sementtiä, 225 g vettä ja 1350 g standardihiekkaa. Standardihiekka ei vaikuta prismakoekappaleen lujuuden kehittymiseen lainkaan.

Tässä työssä vertailukoekappaleissa käytettiin kuivaa, tuoretta lentotuhkaa ja sementtiä. Kuivan lentotuhkan osuus sementti - lentotuhkaseoksesta oli 25 % ja sementin osuus 75 %. Tämän lisäksi reseptiä sovellettiin neljällä eri tavalla.

Ensimmäisessä versiossa käytettiin märkää lentotuhkaa, jonka vesimäärä oli selvitetty ja vähennetty standardin mukaisesta vesimäärästä. Märän lentotuhkan määrä oli suhteutettu vastaamaan kuivan lentotuhkan määrää.

Toisessa versiossa sovellettiin reseptiä kuten ensimmäisessä versiossa, mutta tuhkan ja sementin suhde oli sama kuin Outokummun sideainelietereseptissä. Sementin osuus oli 40 % ja lentotuhkan määrä 60 % sementti - lentotuhkaseoksesta. Kolmannessa versiossa käytettiin kosteaa lentotuhkaa, joka oli kuivattu. Reseptinä käytettiin samaa reseptiä kuin vertailukoekappaleessa eli 25 % sementti-lentotuhkaseoksesta oli lentotuhkaa ja loput sementtiä.

Neljännessä versiossa sekoitettiin lentotuhkan osuudesta 50 % kuivapurettua lentotuhkaa ja 50 % kosteaa lentotuhkaa, joka oli kuivattu. Resepti sisälsi sementti – lentotuhkaseoksen määrästä 75 % sementtiä ja 25 % lentotuhkaa. Näillä resepteillä valmistettujen kappaleiden prismalujuuksia verrattiin kuivapuretusta lentotuhkasta valmistettujen kappaleiden prismalujuuksiin.

### 3.5 Prismakoekappaleiden valmistus

Tässä työssä yhdestä massasta valmistettiin aina kuusi prismakoekappaletta. Ainekset mitattiin puntarilla gramman tarkkuudella. Vesi ja sementti annosteltiin sekoitusastiaan ja seosta sekoitettiin alhaisella nopeudella 30 sekuntia. Sen jälkeen seokseen lisättiin standardihiekka ja sekoitusta jatkettiin 30 sekuntia samalla nopeudella. Tämän jälkeen nopeutta nostettiin ja sekoitettiin jälleen 30 sekuntia, jonka jälkeen kulhon reunoille jäänyt massa kaavittiin seoksen keskelle. Sekoitusta jatkettiin vielä 60 sekuntia samalla nopeudella.



*KUVA 1. Sekoitusastia*

Valmis massa annosteltiin kahteen voideltuun prismamuottiin, joilla saatiin valmistettua kuusi samankokoista prismaa. Yhden prisman koko oli 40 x 40 x 160 mm:ä. Prismat täytettiin ensin puoleen väliin asti, jonka jälkeen prismamuottia täryytettiin pudotuspöydällä 60 kertaa. Tämän jälkeen prismat täytettiin loppuun asti ja täryytettiin toiset 60 kertaa. Lopuksi prismojen pinnat tasattiin ja jätettiin kovettumaan kostean laatikon alle.

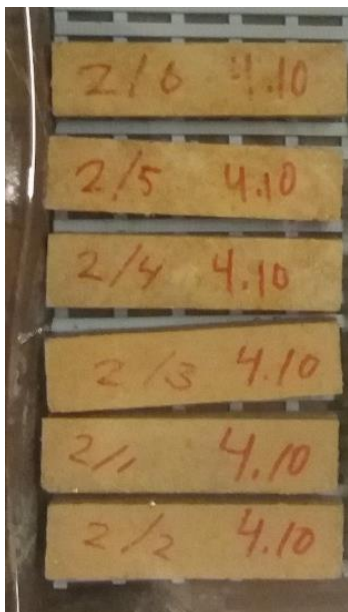


*KUVA 2. Puoleen väliin täytetty prismamuotti*



*KUVA 3. Pudotuspöytä*

Prismojen annettiin kovettua vuorokauden verran kostean laatikon alla, jonka jälkeen muotit purettiin ja kappaleet numeroitiin juoksevalla numeroinnilla. Numeroinnin jälkeen prismat asetettiin huoneenlämpöiseen veteen odottamaan testausta. Kolme prismaa testattiin seitsemän vuorokauden iässä ja loput kolme 28:n vuorokauden iässä. Jokaisen prismakappaleen kumpikin pää testattiin, joten kolmelle prismakoekappaleelle saatiin kuusi puristuslujuutta.



*KUVA 4. Numeroidut prismakappaleet vedessä.*

### **3.6 Sideainelietekoekappaleet**

Aluksi ei ollut tietoa kuinka löysää sideaineliete on ja käsityksen lietteen koostumuksesta sai parhaiten valmistamalla sitä Outokummun käyttämän reseptin mukaisesti. Lentotuhkan sisältämä vesimäärä vähennettiin reseptin vesimäärästä ja ainekset sekoitettiin myllyssä keskenään.

Liete jaettiin neljään eri muottiin. Ensimmäisen muotin pohjan reikä peitettiin suodatinpaperilla ja muotti täytettiin runkoaineella, jonka raekoko oli 16 mm:ä. Tämän jälkeen lisättiin sideaineliettä, kunnes runkoaineen pinta peittyi. Toisessa muotissa reikä oli auki. Muotti täytettiin samalla runkoaineella ja lisättiin sideaine-



lietettä, kunnes kiviaineksen pinta peittyi. Kolmannen muotin reikä oli tukittu tiiviisti. Se täytettiin samankokoisella runkoaineella kuin kaksi aiempaa muottia, mutta runkoaines oli valmiiksi sekoitettu sideainelietteen sekaan. Neljäs muotti oli täysin tiivis ja se täytettiin pelkällä sideainelietteellä.



*KUVA 6. Kolme ensimmäistä koekappaletta vasta valettuina*

Tuhkasta 1 valmistettujen kappaleiden annettiin kovettua muovin alla 28 vuorokautta. Kovettuneet kappaleet mitattiin ja testattiin. Sideainelietteessä pyöritelty runkoaines (kappale 3) ei muodostanut pysyvää sidosta, joten sitä ei voitu testata.



*KUVA 7. Sideaineliete kappaleet 1, 2 ja 4 kovettuneina. Kappale 3 ei näy kuvassa.*

Sideainelietteestä valmistettiin myös 150 x 150 x 150 mm:n kokoisia koekappaleita vanhasta lentotuhkasta, jonka kosteus oli 51,8 %, kuivapuretusta tuoreesta lentotuhkasta, jonka kosteus oli 0,2 % ja märkäpuretusta tuoreesta lentotuhkasta, jonka kosteus oli 15,8 %. Nämä kappaleet valmistettiin prismakoekappaleiden jälkeen eivätkä ne ehtineet vielä reilun kuukauden jälkeen kovettua. Näille koekappaleille ei saatu tuloksia työn aikana. Huomattiin kuitenkin, että tuoreesta, kuivapuretusta lentotuhkasta valmistettu koekappale kovettui eniten.

Sideainelietettä ei käytetä sellaisenaan vaan se sekoittuu kalliolouhoksen kanssa, jossa on hyvin erikoisia ja kulmikkaita kivilohkareita. Laboratorio-oloissa oli mahdotonta jäljitellä alkuperäistä käyttötarkoituskohdetta. Tuloksiakaan ei voi verrata suoraan käyttötarkoitukseen.

## 4 TULOKSET

Tuhkaa 1 käytettiin sideainelietteestä valmistettaviin koekappaleisiin. Kappaleiden annettiin kovettua 28 vuorokautta, jonka jälkeen niitä kuormitettiin nopeudella 1 kN/s.

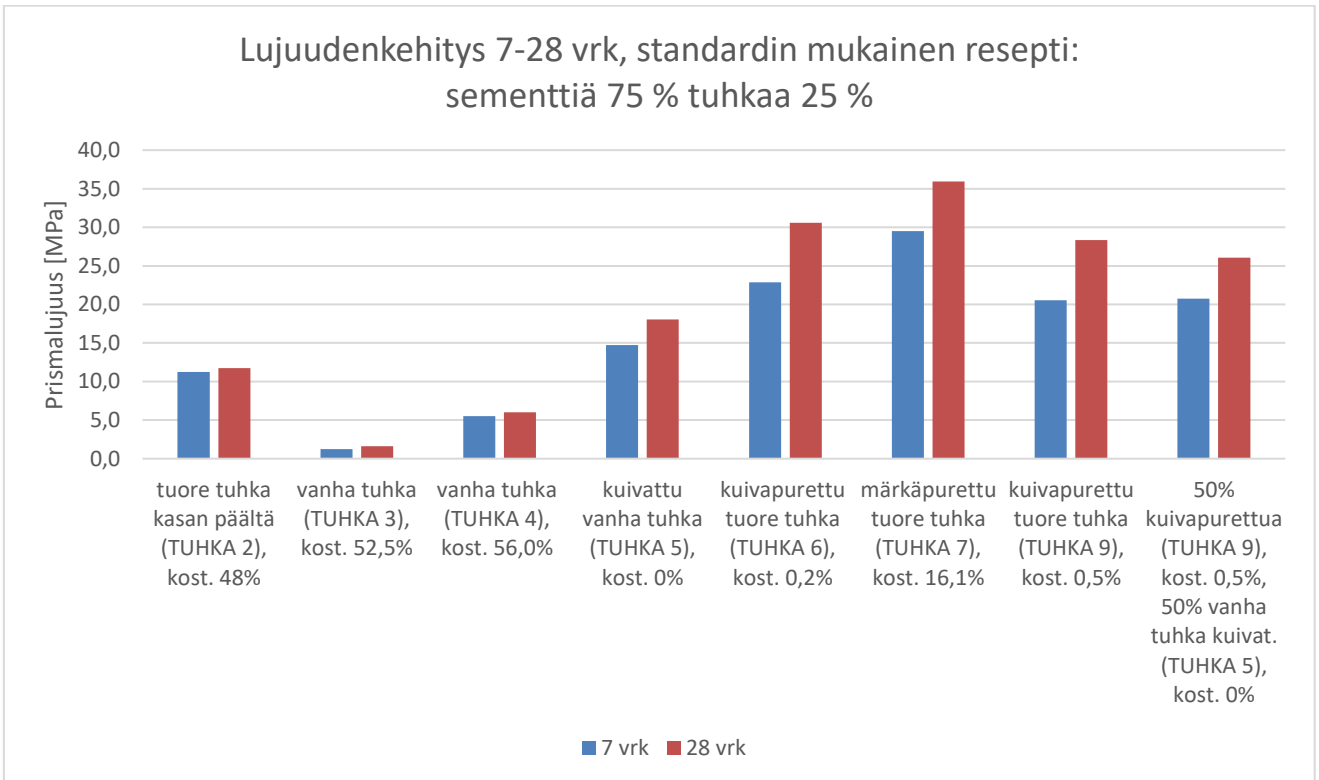
*TAULUKKO 2. Sideainelietteestä valmistettujen koekappaleiden puristuslujuus*

tunnus	ikä	lujuus [MPa]
1	28	0,028
2	28	0,014
3	28	Kappale ei pysynyt kasassa, ei voitu testata
4	28	0,007

Lentouhkanäytteitä 2-7 ja 9 käytettiin prismakoekappaleiden valmistamiseen. Kustakin tuhkasta tehtiin kaksi prismasarjaa, joista toinen sarja puristettiin seitsemän ja toinen 28:n vuorokauden iässä. Yhdellä prismasarjalla saatiin tehtyä kolme koekappaletta. Koekappaleiden kumpikin pää puristettiin, joten yhdelle tuhkalle saatiin kuusi prismalujuutta seitsemän ja 28:n vuorokauden iässä. Kummallekin ikäluokalle laskettiin tulosten pohjalta keskiarvo. Eri tuhkanäytteistä valmistettujen prismakoekappaleiden prismalujuuksien keskiarvoja vertailtiin toisiinsa ja erityisesti kuivasta lentotuhkasta valmistettujen kappaleiden prismalujuuksiin.

TAULUKKO 3. Prismakoekappaleiden prismalujuus

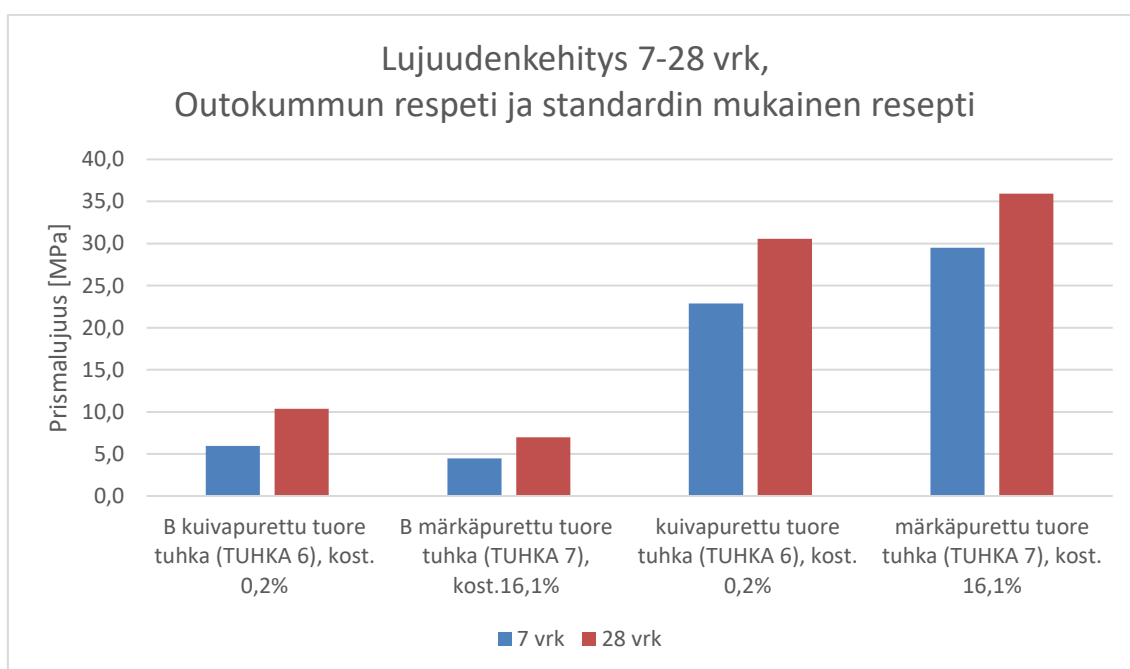
STANDARDIN MUKAINEN RESEPTI: 75% SEMENTTIÄ, 25% LENTOTUHKAA		
	LUJUUS 7 VRK [MPa]	LUJUUS 28 VRK [MPa]
tuore tuhka kasan päältä (TUHKA 2), kosteusprosentti 48%	11,2	11,8
vanha tuhka (TUHKA 3), kosteusprosentti 52,5%	1,3	1,6
vanha tuhka (TUHKA 4), kosteusprosentti 56,0%	5,5	6,0
vanha tuhka (TUHKA 5 kuivattuna), kosteusprosentti 0%	14,7	18,0
kuivapurettu tuore tuhka (TUHKA 6), kosteusprosentti 0,2%	22,9	30,6
märkäpurettu tuore tuhka (TUHKA 7), kosteusprosentti 16,1%	29,5	35,9
kuivapurettu tuore tuhka (TUHKA 9), kosteusprosentti 0,5%	20,5	28,3
50% kuivapurettua (TUHKA 9), kosteusprosentti 0,5%, 50% vanhaa tuhkaa kuivat- tuna (TUHKA 5), kosteusprosentti 0%	20,7	26,1



KUVA 7. Lujuudenkehitys 7-28 vuorokauden iässä, standardin mukaisen reseptillä. Sementti-lentotuhkaseoksesta 75 % sementtiä, 25 % lentotuhkaa. Tuhka 5 on kuivattu ja kuvassa viimeisenä oikealla olevan tuloksen koekappaleessa on 50 % tuoretta tuhkaa ja 50 % vanhaa tuhkaa kuivattuna. Taulukossa vasemmalta reunalta voidaan lukea kunkin lentotuhkanäytteen keskiarvo prismalujuutena.

TAULUKKO 4. Prismakoeekappaleiden prismalujuus, Outokummun reseptin suhde.

20 PV. RESEPTIN SUHDE: 40% SEMENTTIÄ, 60% TUHKAA		
	LUJUUS 7 VRK [MPa]	LUJUUS 28 VRK [MPa]
B kuivapurettu tuore tuhka (TUHKA 6), kosteusprosentti 0,2%	5,9	10,4
B märkäpurettu tuore tuhka (TUHKA 7), kosteusprosentti 16,1%	4,5	7,0



KUVA 7. Lujuudenkehitys 7-28 vuorokauden iässä, Outokummun reseptillä. Sementti-lentotuhkaseoksesta 40 % sementtiä, 60 % lentotuhkaa verrattuna standardin mukaiseen reseptiin 75 % sementtiä, 25 % lentotuhkaa. Taulukossa vasemmalta reunalta voidaan lukea kunkin lentotuhkanäytteen keskiarvo prismalujuutena.

## 5 POHDINTA

Sideainelietteestä tehtyjen kappaleiden puristuslujuus jäi alhaiseksi (taulukko 2). Tämä johtuu seoksessa käytetystä lentotuhkasta. Tuhka on ollut ulkosäilytyksessä sääoloille alttiina ja päässyt kostumaan. Tuhkan kosteusprosentti on korkea (taulukko 1) ja tuhka reagoi hyvin laiskasti uudelleen. Kappaleista vain yksi saavutti vaaditun 1 MPa:n lujuuden.

Prismojen tuloksissa vertailun lähtökohtana toimii tuhka 6, eli kuivapurettu lentotuhka. Kuivapurettun lentotuhkan reagointikyky on ennallaan ja tulokset ovat hyviä. Alkulujuus vaatimuksiin nähden on riittävä, mutta kappaleet lujittuivat huomattavasti seuraavan kolmen viikon aikana. Kosteilla tuhkillä alku- ja loppulujuuden välillä ei ollut niin huomattavaa eroa.

Tuloksista voidaan päätellä, että kertaalleen reagoinut tuhka reagoi uudelleen, mutta hyvin heikosti ja hitaasti. Mitä enemmän märkää lentotuhkaa koekappaleessa käytettiin, sitä heikompi oli lopullinen prismalujuus. Huomioitavaa on, että suurellakin lentotuhkamäärällä, huolimatta siitä oliko se märkää vai kuivaa, päästiin suhteellisen hyvään prismalujuuteen verrattuna haluttuun lujuuteen. Sementtiin osuus on kuitenkin merkittävä ja dominoiva, joten tuloksia ei voi suoraan käyttää kaivouksen louhostäytössä hyväksi.

Kostean tuhkan reagointikyky paranee, mikäli se kuivataan ennen käyttöä. Myös tuoreen kuivapurettun ja kuivatun kostean lentotuhkan sekoittaminen keskenään vaikutti positiivisesti tuloksiin. Kaikki kappaleet saavuttivat 1 MPa:n lujuuden. Voidaan huomata myös, että mitä kosteampi tuhka on, sitä heikommin se reagoi. Märkäpurettu tuore lentotuhka yllätti tuloksellaan, sillä sen prismalujuus oli samaa luokkaa kuivapurettun tuoreen lentotuhkan kanssa.

Sideainelietteestä valmistettujen koekappaleiden tulokset tukevat päätelmää, että kuivapurettu, tuore lentotuhka reagoi nopeammin ja paremmin. Koekappaleiden pintaa kokeiltiin sormella painaen ja havaittiin, että kuivasta, tuoreesta len-

totuhkasta valmistettua koekappale oli kovettunut kaikista eniten. Kuivan koekappaleen pinta painui vähiten sitä painettaessa. Koekappaleet eivät ehtineet työn aikana kovettua täysin lopulliseen lujuuteensa.

Työn suorittamisen aikataulu oli suhteellisen lyhyt verrattuna koekappaleiden kovettumisaikaan. Työskentelyn tuloksena huomattiin, että kaikista tuhkalajeista olisi kannattanut tehdä testit myös kuivatulle versiolle. Näin saataisiin vielä paremmin selville reagoiko märkäpurettu tuhka uudelleen sidosten purkamisen jälkeen.

Toisaalta tuhkan kuivaaminen ei ole kustannustehokasta, eikä se ole tilaajan kannalta järkevää. Tällä hetkellä vain tuoretta, kuivapurettua tuhkaa käytetään sideainelietteessä. Tuloksiin pohjautuen märkäpurettu kuivalle lentotuhkalle kannattaisi suorittaa jatkotutkimuksia, voisiko sitä käyttää sellaisenaan Outokummun tehtaalla.

Reseptejä voisi lähteä kehittämään niin, että selvitettäisiin, kuinka paljon sementistä voidaan korvata kuiva- tai märkäpurettu tuoreella lentotuhkalla. Varastoitu märkäpurettu, kostunut tuhka soveltuu sellaisenaan huonosti käytettäväksi. Jatkotutkimusten kautta kannattaisi selvittää, voiko Outokumpu käyttää resepteissään kuivan, hyvin reagoivan ja ulosvarastoidun märän lentotuhkan sekoitusta. Lujuusvaatimus on kuitenkin suhteellisen alhainen 1 MPa:a.

Työn tuloksena heräsi myös kysymys soveltuisiko märkäpurettu tuhka käytettäväksi, jos sitä säilytettäisiin katetussa tilassa? Tällä hetkellä sitä säilytetään sääoloille alttiina ilman suojaa. Olisiko mahdollista rakentaa katos, joka estäisi suoran vedenpääsyn lentotuhkaan? Kuinka paljon siinä tilanteessa lentotuhka saisi ilmasta kosteutta?

## LÄHTEET

1. Mitä betoni on? 2016. Saatavissa: [https://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita\\_betoni\\_on.html](https://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita_betoni_on.html) . Hakupäivä 16.3.2017.
2. Mitä betoni on? 2016. Saatavissa: [http://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502\\_38-43.pdf](http://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502_38-43.pdf). Hakupäivä 16.3.2017.
3. Perustietoa betonista 2016. Risto Mannonen, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa: <http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonin-perusteet.pdf>. Hakupäivä: 19.4.2017
4. Lentotuhkan käyttö betonissa 2008. 2008. By 52. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
5. Yleistietoa lentotuhkasta. 2016. Saatavissa: <http://www.ashpower.fi/tietoa.html>. Hakupäivä 16.3.2017
6. Seosaineiden sovellusohje 1987. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
7. Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Proceedings Fourth International Conference Istanbul, Turkey, May 1992. 1993. Detroit, Michigan: American Concrete Institute.
8. Betoninormit 2016 By 65. 2016. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki: BY-koulutus Oy.
9. Betoninormit 2012 By 50. 2011. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki: BY-koulutus Oy.