

Juha-Pekka Angeria

**TUHKAN LAADUNVAIHTELUN VAIKUTUS SIDOSLUJUUTEEN
JA SOVELTUVUUS KAIVOSTÄYTTÖIHIN**

TUHKAN LAADUNVAIHTELUN VAIKUTUS SIDOSLUJUUTEEN JA SOVELTUVUUS KAIVOSTÄYTTÖIHIN

Juha-Pekka Angeria
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, talonrakennuksen suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Juha-Pekka Angeria
Opinnäytetyön nimi: Tuhkan laadunvaihtelun vaikutus sidoslujuuteen ja soveltuvuus kaivostäyttöihin
Työn ohjaaja: Hannu Kääriäinen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2014
Sivumäärä: 26 + 1 liite

Vihreä ajattelu on noussut pinnalle viime vuosina, ja teollisuuden yritykset haluavat tutkia mahdollisia tapoja hyötykäyttää teollisuuden prosesseissa syntyviä sivutuotteita. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Stora Enson Oulun tehtaissa syntyvien sivutuotteiden, kuten lentotuhkan, käytön mahdollisuutta kaivostäyttöjen sidosaineena ja tuhkan laadunvaihtelun vaikutuksia sidoslujuuteen.

Tilaaaja valitsi viisi erilaista lentotuhkaseosta, joita käytettiin korvaamaan osaa sementin osuudesta sidosaineena. Työ aloitettiin esitesteillä, joiden perusteella päädyttiin tiettyihin seososuuksiin, joille varsinaiset testit suoritettiin. Työssä tehtiin yhteensä 13 massaa, joille määritettiin notkeus. Massoista valmistettiin prismoja, joille suoritettiin tiheyden määrittäminen ja puristuslujuuden testaus 14, 28 ja 56 päivän iässä valmistuksesta. Työt suoritettiin syksyn 2013 ja talven 2014 aikana Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion tiloissa ja välineillä.

Puristuslujuustutkimuksista kävi ilmi, että esitesteissä käytetty tuhkaseos 1 oli selvästi muita parempi puristuslujuuden kehityksessä, sillä ainoastaan tuhkaseos 5:n toinen massa ylitti kaivostäyttöille asetetun puristuslujuusvaatimuksen 2,8 - 3,3 MPa. Kolmestatoista massasta viisi ylitti tämän vaatimuksen, ja loput kahdeksan massaa jäivät puristuslujuudessa alle vaaditun rajan.

Tutkimus osoitti, että muidenkin tuhkaseosten massat todennäköisesti saataisiin ylittämään asetetut lujuusvaatimukset lisäämällä sementin osuutta ja mahdollisesti muuttamalla vesimäärää massoissa. Kenttäkokeiden tekeminen paljastaisi massojen käyttäytymisen oikeissa olosuhteissa. Jatkotutkimukset aiheelle ovat paikallaan, sillä vihreän ja ekologisen ajattelun jalostaminen on tärkeää.

Asiasanat: sideaine, tuhka, puristuslujuus, kaivostäyttö

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme in Civil Engineering, Option of House Building Engineering

Author: Juha-Pekka Angeria

Title of thesis: Effect of Quality Variation of Ash on Bond Strength and its Suitability for Backfills

Supervisor: Hannu Kääriäinen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2014

Pages: 26 + 1 appendix

Nowadays environmentally friendly thinking has become more important for the customers and companies. Companies are trying to find different utilizations for their by-products that are formed in different industrial processes. The purpose of this thesis was to research by-products such as fly ash from Stora Enso's Oulu factories and research the possibility to use the ashes as a part of an adhesive in backfills and how the variations in the quality of the ash effect on compressive strength features.

There were five different mixtures of the fly ash that were selected by the company. The mixtures were used to replace a part of the cement as an adhesive in masses. Preliminary tests lead to making of 13 different masses in total for more precise testing. The mass making lead to determination of density of masses and casting prisms. The prisms were strength tested in three different age categories of 14, 28 and 56 days. All the work was made in the construction laboratory of the Oulu University of Applied Sciences during the autumn 2013 and winter 2014.

The strength test results showed that mixture number one of the fly ashes was more effective in the development of compressive strength than other mixtures. Mixture number five was the only one along number one that exceeded the set 2,8 - 3,3 Mpa strength requirement of backfills.

Further studies need to be conducted in this area and the development of environmentally friendly thinking of by-products will be important. Improvements for the development of the strength could be to change the amount of water or adding more cement in the process of mass making.

Keywords: Adhesive, ash, compressive strength, backfill

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 LENTOTUHKA	7
2.1 Lentotuhka yleisesti	7
2.2 Lentotuhka betonin valmistuksessa	7
2.3 Lentotuhkan käyttö kaivostäytöissä	9
3 RAAKA-AINEET	10
3.1 Lentotuhkat	10
3.2 Rapidsementti	11
3.3 Vesi ja runkoaine	11
4 MASSOJEN VALMISTUS JA TESTAUS	12
4.1 Esitestien ja massojen koostumukset	12
4.2 Massojen valmistus	13
4.2.1 Notkeuden määrittäminen	13
4.2.2 Prismamuotin täyttö	15
4.3 Prismamuotin purku ja tiheyden määrittäminen	16
4.4 Puristuslujuuden määrittäminen	17
5 TESTIEN TULOKSET	19
5.1 Tiheys ja notkeus	19
5.2 Puristuslujuus	20
6 YHTEENVETO	24
LÄHTEET	25
LIITE 1. TYÖLOMAKE	

1 JOHDANTO

Paperi- ja selluteollisuuden prosesseista syntyvien sivutuotteiden hyötykäyttö on kasvamassa vihreän ajattelun myötä suurempaan rooliin. Tämä opinnäytetyö on tehty tarpeesta tutkia Stora Enson tehtaiden sivutuotteiden mahdollista hyötykäyttöä.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia Stora Enson Oulun tehtaiden sivutuotteiden puristuslujuutta ja soveltuvuutta käyttöön kaivostäyttöissä. Työssä käytetään Stora Enson toimittamia eri seoksia lentotuhkia, Oamkin laboratorion kiviaineita, Finnsementin Rapidsementtiä ja Oulun vesijohtovettä.

Opinnäytetyössä haetaan sopivaa suhdetta, jolla saadaan kaivostäyttöjen puristuslujuusvaatimus ylitettyä. Vesi- ja kivimäärä pidetään vakiona eikä valmistuksessa käytetä notkistimia tai muita lisäaineita, jotta eri tulosten vertailu on selkeämpää.

Tutkittavat massat valmistetaan sideaineesta (tuhkan ja sementin yhdistelmä), runkoaineesta ja vedestä. Notkeus massoille määritetään iskupöydällä. Massoista tehdään $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$:n prismoja muoteilla. Massojen lujituttua ne puretaan ja koekappaleet punnitaan tiheyden määrittämiseksi. Prismat keräävät lujuutta vesisäilytyksessä, ja ne testataan puristuslujuuden osalta 14, 28 ja 56 päivän iässä prismojen valusta.

2 LENTOTUHKA

2.1 Lentotuhka yleisesti

Voimalaitoksissa syntyvästä tuhkasta suurin osa on lentotuhkaa. Tuhkaa muodostuu esimerkiksi kivihiilen, turpeen, puupolttoaineiden ja biolietteiden poltossa. Tuhkan laatu vaihtelee vuodenaikojen mukaan riippuen käytetystä turpeen määrästä ja polttoprosessien vaihtelusta. Suuri osa lentotuhkasta päätyy Suomessa kaatopaikoille ja läjitysalueille. (1, s. 12; 2, s. 4.)

Lentotuhka on hienojakoista ja silttimäistä rakenteeltaan. Lentotuhkan geoteknisiä ominaisuuksia voidaan parantaa lisäämällä sekaan esimerkiksi betonimursketta, kalkkia tai sementtiä. Lentotuhkaa voidaan käyttää muun muassa tierakenteissa, asfaltin lisäaineena, betonin lisäaineena ja maarakentamisessa. (3, s. 4–6.)

Kierrättämällä lentotuhkaa säästetään uusiutumattomia kiviaineksia ja vähennetään jätteen ja kuljetuksen määrää. Käyttämällä lentotuhkaa rakentamisessa säästetään kaatopaikka- ja läjitysalueita, joten säästetään kaatopaikkamaksuilta ja jäteverolta. (4.)

Kivihiilen poltosta syntynyt lentotuhka erotetaan savukaasuista sähkösuodattimilla. Lentotuhka varastoidaan siiloon, josta se toimitetaan säiliöautoilla asiakkaalle. Betonin valmistamiseen käytettävästä lentotuhkasta analysoidaan ainakin heikutushäviö ja hienous. Lentotuhkan tärkeimmät fyysiset ominaisuudet tyypillisesti ovat

- irtotiheys 700 - 1000 kg/m³
- kiintotiheys 2200 kg/m³
- hienous n. 250 m²/kg (Blaine) (5, s. 6–7).

2.2 Lentotuhka betonin valmistuksessa

Lentotuhkan käyttö betonin valmistuksessa alentaa varhaislujuutta ja samalla nostaa loppulujuutta. Betonin koossapysyvyys paranee erityisesti itsetiivistyvisissä ja pumpattavissa betoneissa. Vihreän ja ympäristöystävällisyyden näkökul-

masta sementin valmistaminen tuottaa ilmakehään noin 800 kg hiilidioksidia sementtitonnia kohden, joten lentotuhkan käyttö on perusteltua ilmaston muutoksen näkökulmasta. (6, s. 4–9.)

Betoniteollisuudelle lentotuhkan käyttö vähentää materiaalikustannuksia, sillä säästyvän sementin hinnassa säästö on merkittävä. Betoninormin mukaan käytettyä lentotuhkatonnia kohden voidaan vähentää 400 kg sementtiä. Betonin hydraatio hidastuu lentotuhkaa käyttämällä, joten betonin työstämisaika pitenee. (7.)

Lentotuhkille on suoritettava toimituseristä laadunvalvontasopimuksen mukaisia näytteenottoja. Yleisnäytteiden määrä riippuu toimituserien koosta. Näytteet ottaa Turvatekniikan keskuksen hyväksymä näytteenottaja. Betonin valmistajan on ilmoitettava rakenteen valmistajalle lentotuhkan käytöstä ja mahdollisesta vaikutuksesta rakentamiseen. Lentotuhkan, jota käytetään betonissa, on oltava standardin SFS-EN 450 vaatimukset täyttävä ja joko A- tai B-luokan lentotuhkaa. Lentotuhkan käyttöä on vältettävä, jos betonille on asetettu pakkasenkestävyysvaatimuksia, sillä se voi vaikeuttaa huokostamisen onnistumista merkittävästi. Lentotuhkaa käytettäessä on kiinnitettävä huomiota muun muassa betonin työstettävyyteen, väriin, jälkihoitoon, lujuudenkehitykseen ja lämpötilan vaikutukseen. (8, s. 174–175.)

Suurin sallittu lentotuhkalisäys CEM I -portlandsementtiin rasitusluokissa X0, XC1, XC2, XC3, XS1, XD1 ja XA1 on 45 % ja luokissa XC4, XS2, XS3, XD2, XD3, XF1, XF2, XF3 ja XF4 on 30 %. Nämä normien rajoitukset estävät sementin korvaamisen täysin tai suurilta osin lentotuhkalla. (5, s. 16.)

Normin mukaan pakkasrasitettuihin betoneihin voidaan lisätä lentotuhkaa 30 % portlandsementin määrästä. Lisävaatimuksena on asetettu, että lentotuhkan hehkutushäviö saa olla korkeintaan 5 %, sillä hehkutushäviön jäännöshiili saattaa kerätä massan valmistuksessa lisättyä huokostinta itseensä ja vaikuttaa suojahuokosmäärän vaihteluun. (5, s. 24.)

2.3 Lentotuhkan käyttö kaivostäytöissä

Kaivosteollisuudessa maanalaisiin louhittuihin louhoksiin prosesseista tulevan rikastushiekan palauttamista kutsutaan kaivostäytöksi. Kaivostäytön tarkoituksena on lujittaa rakennetta. Kovettuvassa kaivostäytössä rikastushiekkaan lisätään kovettavia aineita, kuten sementtiä, masuunikuonaa tai lentotuhkaa. Kovettu kaivostäyttö mahdollistaa vieressä olevan malmin louhinnan ilman pelkoa hallitsemattomasta sortumisesta. (9, s. 30.)

Kaivostäyttömenetelmiä ovat muun muassa kivi-, pasta- ja hydraulinen täyttö ja näiden yhdistelmät. Kaivostäyttöjen onnistuminen on edellytys tuotannolle. Lentotuhkaa voidaan käyttää sideaineena täytöissä parantaen kustannustehokkuutta. (10, s. 4–8.)

Kaivostäytöille asetetut puristuslujuusvaatimukset riippuvat monesta asiasta, kuten olosuhteista, täytteen korkeudesta, kaivostäytön tyypistä ja varmuuskerroimista. Yleisesti puristuslujuuden osalta vaadittu lujuus kaivostäytöille 28 vuorokauden iässä on 0,5 - 3,0 MPa. Laboratoriotesteissä vaaditut lujuudet ovat suurempia, ja lujuuden tulee olla vähintään 2,8 - 3,3 MPa, jotta mittakaavatekijät ja lajittuminen tulee otettua huomioon. (11, s. 17.)

3 RAAKA-AINEET

Raaka-aineet, joita massojen valmistuksessa käytettiin, olivat tutkittavat lentotuhkat, Rapidsementti, runkoaine ja vesijohtovesi. Lentotuhkalla pyrittiin mahdollisimman paljon korvaamaan sementin osuutta massoissa, jotta taloudellinen näkökulma tulisi myös huomioitua.

3.1 Lentotuhkat

Tutkittavana olevat lentotuhkat saatiin työn tilaajalta Stora Enson Oulun tehtaalta. Tuhkia oli viittä erilaista, ja ne on nimetty tässä raportissa taulukon 1 mukaan.

TAULUKKO 1. Tutkittavana olevat lentotuhkat ja talteenottopäivämäärät

Nimi	Talteenottopäivämäärä
Tuhkaseos 1	20.9.2013
Tuhkaseos 2	3.12.2013
Tuhkaseos 3	4.12.2013
Tuhkaseos 4	5.12.2013
Tuhkaseos 5	9.12.2013

Lentotuhkat haettiin ja säilytettiin kannellisissa astioissa (kuva 1). Tuhkat olivat ulkomuodoltaan erilaisia, mutta tarkempia tietoja tuhkien laaduista ei tässä työssä käsitellä, vaan ne on numeroitu seoksiksi 1-5.



KUVA 1. Lentotuhkat 2-5 säilytysastioissaan

3.2 Rapidsementti

Sideaineena työssä käytettiin Finnsementin Rapidsementtiä, joka on nopeasti kovettuva portlandseossementti. Rapidsementin erityisominaisuutena on sen nopea lujuuden alkukehitys, ja se soveltuu erityisesti elementtituotantoon ja talvibetonointiin. Sementti valittiin testeihin, koska se on tarpeeksi hienoa ja kerää tarvittavan alkulujuuden nopeasti, jotta prismamuotit voidaan purkaa kohtuullisessa ajassa.

Rapidsementin lujuus kehittyy huomattavasti lopullisesta lujuudesta jo seitsemän päivän aikana, ja sementille on saatu seitsemän päivän ikäisenä testeissä lujuusarvoja 42 - 51 MPa:n väliltä. Vastaavasti 28 päivän lujuudelle on saatu arvoja 50 - 60 MPa:n väliltä, joten Rapidsementin lujuuden kehittyminen painottuu erityisesti alkupuolelle. Sementin sitoutumisajan alku tapahtuu 140 - 200 minuutin sisällä. Rapidsementti on CE-merkitty, täyttää standardin SFS-EN 197-1: 2011 vaatimukset ja sen hienous (Blaine) on 450 - 530 m²/kg. (12, s. 1.)

3.3 Vesi ja runkoaine

Veden määrä pidettiin massoissa vakiona, jotta tulosten vertailu on yksinkertaisempaa. Vetenä käytettiin puhdasta Oulun vesijohtovettä. Runkoaineena työssä käytettiin Oamkin laboratoriosta löytyviä raekooltaan 0 - 2 mm:n ja 0 - 8 mm:n kiviaineksia. Kiviainekset kuivatettiin, jotta niissä ei ollut ylimääräistä kosteutta mukana.

4 MASSOJEN VALMISTUS JA TESTAUS

Massat valmistettiin ja testattiin Oulun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön rakennuslaboratoriossa. Massojen valmistuksessa, notkeuden ja tiheyden määrittämisessä sekä puristuslujuuden testauksessa käytettiin standardien mukaisia ja kalibroituja laitteita.

Kunkin massan notkeus mitattiin iskupöydällä standardin SFS-EN 1015-3 mukaan. Massat valettiin 160x40x40 mm³-prismamuotteihin, ja ne täytettiin tärypöydällä. Prismat olivat muoteista purkukelpoisia noin reilun viikon jälkeen niiden valmistuksesta. Tiheydet prismoille määritettiin muoteista purkamisen jälkeen käyttäen vesipunnitusta apuna. Prismojen puristuslujuudet testattiin 14, 28 ja 56 päivän iässä niiden valmistuksesta.

4.1 Esitestien ja massojen koostumukset

Työ aloitettiin esitesteillä kartoittamalla oikeat suhteet Rapidsementin ja tuh-kaseoksien välillä. Kartoitus tehtiin tuh-kaseos 1:lle, jossa haettiin 2,8 - 3,3 MPa:n puristuslujuutta kaivostäyttöjen lujuusvaatimuksia silmällä pitäen. Esitesteissä käytettyjen sideaineiden prosenttiosuudet esitetään taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Esitesteissä käytetyt sideainesuhteet

Massat	Sideaineet (%)	
	Rapidsementti	Tuhkaseos 1
I.	50	50
II.	25	75
III.	15	85
IV.	5	95
V.	0	100

Myöhempänä ilmenevien esitestitulosten perusteella muille myöhemmin saaduille neljälle tuh-kaseokselle valittiin taulukossa 3 näkyvät sideainesuhteet, joissa Rapidsementin osuus oli 5 - 10 % sideaineesta. Yhteensä koemassoja tehtiin 13 kappaletta, joista esitestien massoille I-V tehtiin 2-3 prismaa per massa ja massoille VI-XIII 6 prismaa per massa.

TAULUKKO 3. Varsinaisissa testeissä käytetyt sideainesuhteet

Massat	Sideaineet (%)				
	Rapid	Tuhkaseos 2	Tuhkaseos 3	Tuhkaseos 4	Tuhkaseos 5
VI.	5	95	-	-	-
VII.	5	-	95	-	-
VIII.	5	-	-	95	-
IX.	5	-	-	-	95
X.	10	90	-	-	-
XI.	10	-	90	-	-
XII.	10	-	-	90	-
XIII.	10	-	-	-	90

Massojen koostumukseksi valittiin käyttökohdetta ajatellen seuraava koostumus: sideainetta 200 kg/m³, vesi-sementtisuhde 0,6 ja kiviaines-sementtisuhde 4,2. Veden ja kiviaineksen määrä pidettiin vakiona. Kiviaines 0 - 8 mm:sta seulottiin yli 8 mm:n rakeet pois. Kiviaineksien suhteena käytettiin 70 % 0 - 2 mm:n ja 30 % seulottua 0 - 8 mm:n kiviainesta. Yhdistetyn kiviaineksen suurin raekoko oli tällöin 4 mm.

4.2 Massojen valmistus

Koemassojen valmistus lähti kuiva-aineiden (sementin, tuhkan ja kiviaineksen) punnituksesta, jotka lisättiin laastisekoittimeen. Liitteessä 1 ovat raaka-aineiden punnitukset ja käytetyt reseptit. Kuiva-aineita sekoitettiin hetki keskenään, jonka jälkeen lisättiin punnittu vesi hiljalleen massan sekaan koko ajan sekoittaen.

Massat valmistettiin Oamkin rakennuslaboratorion tiloissa ja välineillä. Välineinä massojen valmistuksessa käytettiin laboratoriosta löytyviä astioita, kauhoja, lusikoita, tasoittimia, vaakoja, laastisekoitinta, isku- ja tärypöytää. Muotteina käytettiin 160x40x40 mm³:n prismamuotteja, joihin massat valettiin.

4.2.1 Notkeuden määrittäminen

Veden lisäyksen ja sekoituksen jälkeen massan notkeus määritetään iskupöydällä. Notkeuden määrittäminen tehtiin standardin SFS-EN 1015-3 "Tuoreen laastin notkeuden määrittäminen iskupöydällä" mukaan.

Notkeuden määrittämisessä metallinen katkaistun kartion muotoinen muotti täytetään kahdessa osassa massalla täyteen, poistetaan muotti ja suoritetaan määrätty määrä iskuja ja mitataan leviämä.

Aluksi kartio ja iskupöydän levy pyyhitään puhtaaksi kostealla kankaalla ennen testausta. Levylle asetetaan metallinen kartio, joka täytetään massalla aluksi puoleen väliin ja sullontasauvalla tiivistetään kymmenellä lyhyellä iskulla. Toisella kerroksella täytetään muotti täyteen ja suoritetaan sama tiivistys. Lopuksi tasoitetaan pinta tasoitusvälineellä (kuva 2) ja poistetaan kartio. Iskupöytää pyöritetään 15 kertaa vakiotajuuudella, joka on noin kerta sekunnissa, ja annetaan massan levitä levyllä. Leviämän halkaisija mitataan työntömitalla ristimittauksella, ja lasketaan mittausten keskiarvo pyöristettynä lähimpään millimetriin. Saatu keskiarvo on massan leviämän arvo (13, s. 4–5). Notkeuden arvoa pidettiin tässä työssä vain lisätietona, sillä niitä ei verrattu normaalin betonin arvoihin. Tulokset on esitetty liitteessä 1.



KUVA 2. Massa kartiossa iskupöydällä

4.2.2 Prismamuotin täyttö

Massan notkeuden määrittämisen jälkeen vuorossa on muottien täyttö. Prismamuotti, josta saadaan kolme 160x40x40 mm³:n prismaa, täytetään ja tärytetään kahdessa osassa.

Ensin täytetään tärypöydässä kiinnitettynä oleva prismamuotti puoleen väliin massalla ja käytetään tärypöytää päällä 40 iskun ajan, jonka jälkeen lisätään muotti täyteen ja kone käynnistetään uudelleen 40 iskun ajaksi (kuva 3). Muotti irrotetaan pöydästä ja siirretään tasaiselle alustalle erikseen valmistetun kostean astian alle odottamaan muotin pintojen tasoitusta.



KUVA 3. Prismamuotti kiinnitettynä tärypöytään

Pintojen tasoituksen jälkeen muotit jätettiin odottamaan niiden purkamista erityisesti valmistetun ja kosteutta pitävän astian alle. Esitestien massoista valmistettiin yksi muotti ja kustakin varsinaisten testien massoista kaksi muotillista prismaa massaa kohti, yhteensä kuusi prismaa.

4.3 Prismamuotin purku ja tiheyden määrittäminen

Prismat (kuva 4) purettiin muoteista, kun ne olivat kerryttäneet riittävän lujuuden ja näyttivät kestävästi purkamisen. Purkaminen suoritettiin kumivasaran avulla varovaisesti noin viikko valun jälkeen.



KUVA 4. Vesisäilytyksessä ollut 160x40x40 mm³:n kokoinen prisma

Ennen prismojen siirtämistä vesisäilytykseen niille suoritetaan tiheyden määrittäminen vesipunnituksen avulla. Tiheys lasketaan Arkhimedein lain avulla kaavalla 1.

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_n$$

KAAVA 1

ρ = koekappaleen tiheys (kg/m³)

ρ_n = nesteen tiheys (kg/m³)

m_1 = kappaleen massa ilmassa punnittuna (kg)

m_2 = kappaleen massa nesteessä punnittuna (kg)

Tiheyden määrittämisen jälkeen prismat säilytetään huoneenlämpöisessä vesialtaassa rakennuslaboratorion tiloissa. Testauspäivänä prismat otettiin altaasta pois kuivumaan noin pariksi tunniksi ennen puristuslujuuden määrittystä.

4.4 Puristuslujuuden määrittäminen

Puristuslujuudet kappaleille testattiin 14, 28 ja 56 vuorokauden ikäisinä. Kullekin ikäluokalle saatiin kaksi prismaa massaa kohti. Prismat katkaistiin keskeltä, ja siten saatiin kaksi puristuslujuustulosta jokaisesta prismasta kaavan 2 mukaan. Näistä kahdesta lujuustuloksesta laskettiin keskiarvo.

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

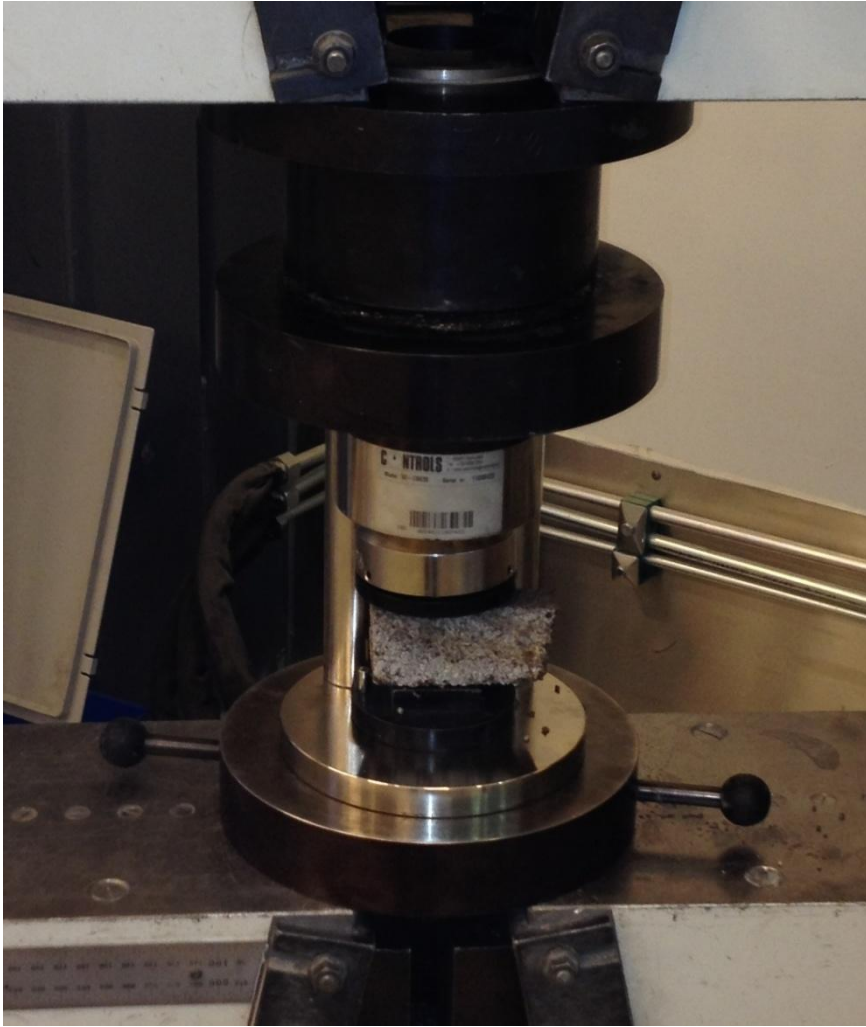
KAAVA 2

f_c = puristuslujuus (N/mm²)

F = kuorma murtohetkellä (N)

A_c = kuormituspinnan pinta-ala (mm²)

Puristuslujuustestaukset tehtiin kalibroidulla 400 kN:n Dartec-yleisaineen-koetuslaitteella, johon lisättiin prismojen testaukseen tarkoitettu lisälaitte (kuva 5). Lisälaitte kohdistaa puristuksen 40 x 40 mm² pinnalle. Prismojen päät testattiin laitteella, ja ajonopeutena testauksessa käytettiin 0,25 kN/s. Testin tulos eli puristuskuorman arvo prisman murtuessa otettiin talteen.



KUVA 5. Prisma puristuslujuustestauksessa Dartec-laitteessa

5 TESTIEN TULOKSET

Prismojen puristuslujuudet vaihtelivat paljon eri tuhkaseosten välillä. Lujuuden-kehitys oli prismoilla alkuun aika hidasta, mutta kehitys jatkui selvästi vielä 28 vrk:n iän jälkeen vielä kehitystä. Massojen notkeudet ja prismojen tiheydet eivät paljoa eronneet toisistaan paria poikkeusta lukuun ottamatta.

5.1 Tiheys ja notkeus

Massoille määritettiin tiheys vesipunnituksella (katso luku 4.3). Tiheydet vaihtelivat arvojen 2170 - 2350 kg/m³ välillä. Pienin tiheys oli massalla XIII ja suurin massalla VI.

Notkeudet olivat keskenään pääosin samanlaisia, mutta massoilla VII ja XI notkeus oli selvästi suurempi kuin muilla massoilla. Poikkeavat massat olivat tuhkaseos 3:sta tehtyjä. Niiden erikoisuutena oli massojen lämpeneminen valmistusvaiheessa. Mahdollisesti veden, sementin ja lentotuhkan reaktiot alkoivat niissä nopeammin kuin muissa. Taulukko 4 kertoo tiheyden ja notkeuden määrityksellä saadut arvot.

TAULUKKO 4. Tiheyden ja notkeuden arvot

Massat	Tiheys [kg/m ³]	Notkeus [mm]
I.	2220	102
II.	2220	102
III.	2200	101
IV.	2230	111
V.	2210	110
VI.	2350	188
VII.	2310	213
VIII.	2330	113
IX.	2280	105
X.	2290	146
XI.	2330	208
XII.	2290	131
XIII.	2170	103

5.2 Puristuslujuus

Kaivostäytöille on asetettu laboratorio-olosuhteissa puristuslujuusarvoja 2,8 - 3,3 MPa 28 vuorokauden iässä. Nämä arvot ylittivät vain esitestien I-IV ja varsinainten testien XIII massojen lujuusarvot. Kaivostäytöille 28 päivän iässä asetettujen kevyempien vaatimusten arvot 0,5 - 3,0 MPa täyttivät kaikki muut massat paitsi VII ja XI (11, s. 17). Kyseisten massojen mahdollinen syy heikolle lujuuden kehittymiselle voi olla massojen lämpeneminen niitä valmistettaessa, jolloin veden, sementin ja lentotuhkan reaktioissa on voinut tapahtua jotain poikkeavaa.

Ennakkotesteissä käytetty tuhkaseos 1 on selvästi paremmin lujittuvaa verrattuna muihin tuhkaseoksiin. Massa V, jossa ei käytetty sementtiä ollenkaan, sai 28 vuorokauden iässä puristuslujuusarvon 1,9 MPa. Arvo ylittää usean muun massan lujuusarvon, vaikka niissä käytettiin sementtiä apuna lujuuden kehityksessä.

Ennakkotestien prismoille ei suoritettu kuin 28 vuorokauden testi, sillä se oli tärkein ennakkovertiluarvon kannalta. Osalle prismoista ei suoritettu 14 vuorokauden testejä, sillä ne eivät keränneet tarpeellista lujuutta testejä varten.

Vertailuna sidosaineena Rapidsementillä tehty prisma saa puristuslujuudelle 28 päivän ikäisenä arvon 53 MPa (14, s. 24). Tuhkan lisääminen hidastaa selkeästi nopeaa alkulujuuden kehitystä, mutta prismojen oletetaan keräävän lujuutta vielä 56 vuorokauden jälkeen. Taulukko 5 sisältää testattujen prismojen puristuslujuuksien keskiarvot.

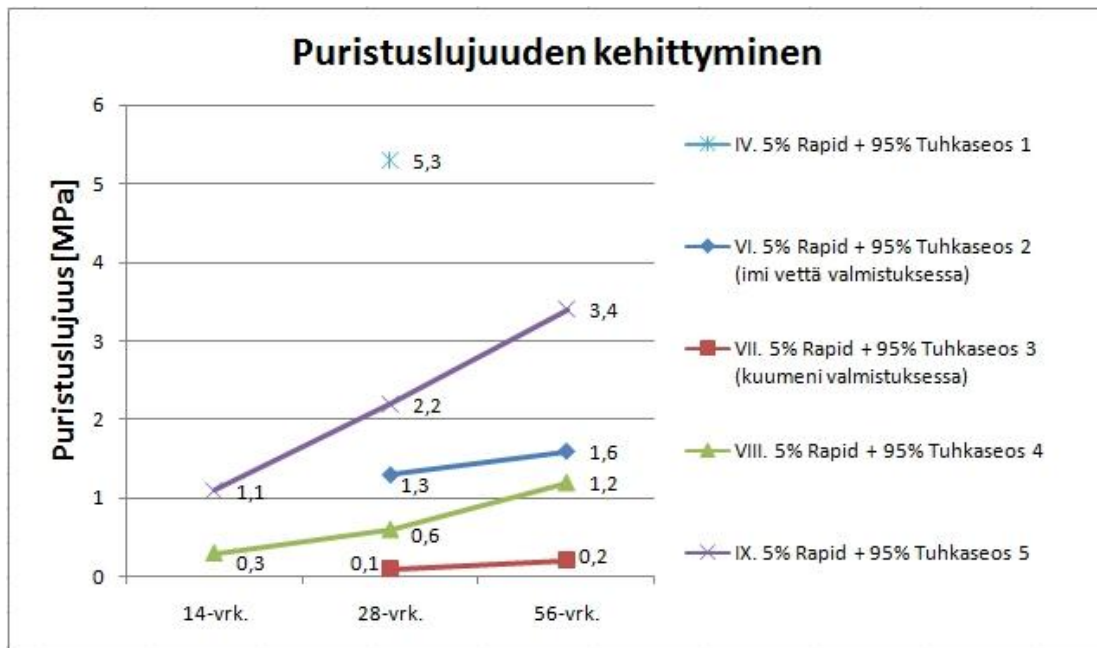
TAULUKKO 5. Puristuslujuuksien keskiarvot 14, 28 ja 56 päivän ikäisinä

Massat	Puristuslujuus [MPa]		
	14-vrk.	28-vrk.	56-vrk.
I.	-	17,1*	-
II.	-	11,3*	-
III.	-	5,5*	-
IV.	-	5,3	-
V.	-	1,9	2,6
VI.	-	1,3	1,6
VII.	-	<0,5	<0,5
VIII.	<0,5	0,6	1,2
IX.	1,1	2,2	3,4
X.	1,3	1,8	2,1
XI.	<0,5	<0,5	0,5
XII.	0,5	1,0	1,4
XIII.	2,1	3,7	4,4

* Testattiin 29-vrk:n ikäisenä.

Tuhkaseoksien vertailussa päätettiin keskittyä kahteen eri seososuuteen. Ensimmäisessä osassa oli 95 % tuhkaseoksien osuus sidosaineesta, ja jälkimmäisessä Rapidsementin osuutta hieman lisättiin, jotta tuhkaseoksien osuus oli 90 % sidosaineesta.

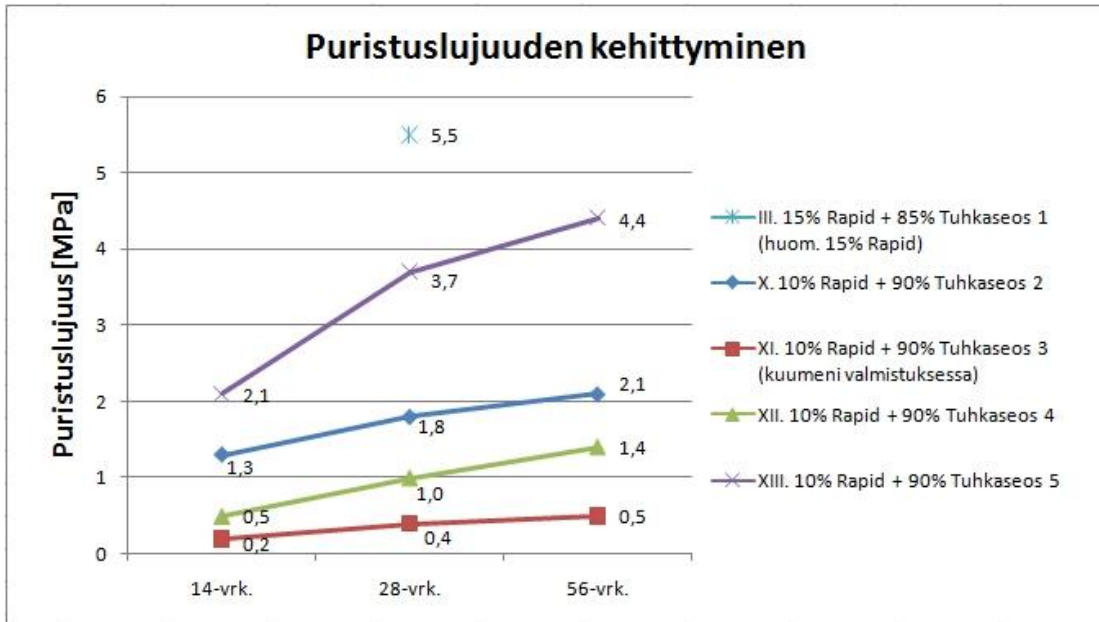
Kuvassa 6 saadaan selvät erot tuhkaseoksien lujuuden kehittymiselle. Tuhkaseokset 1 (massa IV) ja 5 (IX) keräävät lujuutta selvästi enemmän kuin muut seokset. Tuhkaseos 1:n (IV) puristuslujuus 5,3 MPa (28 vrk.) ylittää asetetut puristuslujuusvaatimukset selvästi. Seokset 2 lujuudella (VI) 1,3 MPa ja 4 (VIII) lujuudella 0,5 MPa kerryttävät hitaasti lujuutta, mutta jäävät vertailussa keskiksi. Poikkeuksen muihin seoksiin tekee seos 3 (VII) puristuslujuudella 0,1 MPa, joka ei kerrytä lujuutta lähes ollenkaan mahdollisesti lämpenemisreaktion vaikutuksesta. Seos 5 (IX) arvolla 2,2 MPa selvästi kerryttää ajan myötä lujuutta, ja sille olisi syytä tehdä lisätestejä myöhemmälle iälle. Lujuudet vaihtelivat 28 vuorokauden iässä välillä 0,1 - 5,3 MPa.



KUVA 6. Puristuslujuuden kehittyminen 95 %:n tuhkasidosaineosuudella

Toisessa osassa testattavana olivat 90 %:n tuhkaosuuden sisältävät massat. Poikkeuksena esitestien tuhkaseoksella 1 tehty massa III, joka sisältää 15 % Rapidsementtiä ja saa muihin verrattuna testeissä 28 vuorokauden iässä suurimman puristuslujuusarvon 5,5 MPa todennäköisesti sementin isomman osan vuoksi. Toisena tiukemman raja-arvon ylitti seos 5 (XIII) arvolla 3,7 Mpa.

Pienemmän raja-arvon ylittivät seokset 2 (X) lujuudella 1,8 MPa ja 4 (XII) lujuudella 1,0 MPa. Seos 3 (XI) on aiemman osion tapaan ainoa, joka ei ylitä 0,5 MPa:n arvoa 28 vuorokauden iässä ja saa alhaisia puristuslujuuksia iästä riippumatta. Massa kuumeni valmistuksen aikana veden lisäämisen jälkeen. Viiden minuutin jälkeen massan lämpötila oli 42,0 °C ja 10 minuutin päästä 37,2 °C. Poikkeavat puristuslujuustulokset massalle voivat johtua lämpenemisreaktiosta, joita käsiteltiin aiemmin tässä kappaleessa. Kuvassa 7 on kuvattu puristuslujuuden kehittyminen toisen osion massoilla.



KUVA 7. Puristuslujuuden kehittyminen 90 %:n tuhkasidosaineosuudella

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin Stora Enson paperi- ja sellutehtaiden prosesseissa syntyvien lentotuhkien höytykäyttöä siltä kannalta, miten ne sopivat lujuusominaisuuksien puolesta korvaamaan sideainetta kaivostäytöissä. Tavoitteena oli selvittää eri lentotuhkaseoksien laadunvaihtelun vaikutus puristuslujuuteen ja käyttää mahdollisimman pientä sementin osuutta massoissa.

Työssä testatuista sementin ja lentotuhkan seoksista ei moni ylittänyt kaivostäytöille asetettua puristuslujuusvaatimusta 2,8 - 3,3 MPa. Testatuilla massoilla tuhkaseos 1 (sisälsi 5 % Rapidsementtiä) ja tuhkaseos 5 (sisälsi 10 % Rapidsementtiä) täyttivät edellä mainitun lujuuden. Loput testatut massat eivät ylittäneet rajaa, mutta pienillä vesimäärän muutoksilla ja sementin lisäyksellä loputkin massoista todennäköisesti saataisiin yltämään asetettuihin arvoihin.

Aihe vaatii vielä lisätutkimuksia, mutta selvästi tietyillä lentotuhkaseoksilla on mahdollisuus korvata suuri osa sideaineen osuudesta vähäisiä puristuslujuuksia tarvitsevilla kohteissa, kuten kaivostäytöissä. Rajoitteita asettavat normit, jotka määrittelevät lentotuhkan suurimman sallitun lisäyksen sementtiin. Ongelmia saattaa aiheuttaa myös lentotuhkan pH-arvo 10 - 11, joka voi aiheuttaa betonissa raudoituksen kemiallisen suojan häviämistä ja korroosiota teräksien kanssa.

Taloudellisesta näkökulmasta tarkisteltuna lentotuhkan käyttö osaksi sementin korvikkeena on selvästi mahdollista, mutta lentotuhkalaadut vaihtelevat paljon lujuuden kehityksen osalta. Laboratoriossa testatut massat pitäisi viedä kenttätesteihin, jotta saataisiin todelliset ominaisuudet ja lujuudet selville oikeissa käyttökohteissa.

LÄHTEET

1. Voimalaitostuhkien loppusijoittaminen. YVA-selostus. 2007. Pöyry Environment Oy. Saatavissa:
<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BF01717BF-8BCC-4C15-B4AA-73BDC5D10D78%7D/94160>. Hakupäivä 10.1.2014.
2. Metsäteollisuuden lentotuhkien käyttö tie-, katu-, ja kenttärakenteissa. 2005. Finncao Oy. Saatavissa: <http://www.finncao.fi/pdf/mitoitusohje14032005.pdf>. Hakupäivä 20.1.2014.
3. Lentotuhkaohje. 2008. Rudus Oy. Saatavissa:
www.rudus.fi/Download/27881/Lentotuhka-ohje.pdf. Hakupäivä 17.2.2014.
4. Yleistietoa lentotuhkasta. Finn Ash-Power Oy Ltd. Saatavissa:
<http://www.ashpower.fi/tietoa.html>. Hakupäivä 10.3.2014.
5. BY 52 Lentotuhkan käyttö betonissa 2008. 2008. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
6. BY 52 Lentotuhkan käyttö betonissa 2007. 2007. Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa: http://www.betoniyhdistys.fi/index.php?__EVIA_WYSIWYG_FILE=634&name=file. Hakupäivä 9.2.2014.
7. Käyttö betonin valmistuksessa. Finn Ash-Power Oy Ltd. Saatavissa:
<http://www.ashpower.fi/kohteet.html>. Hakupäivä 10.3.2014.
8. BY 50 Betoninormit 2012. 2013. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
9. Kittilän kaivoksen laajennus, YVA-ohjelma. 2010. Pöyry Finland Oy. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BDDDD8737C-7326-4842-909B-6416CD5622D4%7D/77341>. Hakupäivä 3.2.2014.
10. Kaivostäyttö Pyhäsalmen kaivoksella. 2012. Pyhäsalmi Mine Oy. Saatavissa: <http://www.kainuunetu.fi/UserFiles/d763e312-4069-4815-82bd-f6886b1871ca/Web/Kivi%20ja%20kaivos/Min-Novation/>

Kaivost%C3%A4ytt%C3%B6%20Pyh%C3%A4salmen%20kaivoksella_
Timo%20Pekkala%20271112.pdf. Hakupäivä 5.2.2014.

11. Kuula, Harri 2004. Pyhäsalmen kaivoksen kovettuva täyttö. Helsinki: Tekninen korkeakoulu, Kalliotekniikka.

12. Rapidsementti. 2014. Finnsementti Oy. Saatavissa:
http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/rapidsementti_1_21032014_161129.pdf. Hakupäivä 1.4.2014.

13. SFS-EN 1015-3 2007. Muurauslaastien testimenetelmiä. Osa 3: Tuoreen laastin notkeuden määrittäminen iskupöydällä. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

14. Suomalainen sementti-opas. 2012. Finnsementti Oy. Saatavissa:
<http://www.finnsementti.fi/files/pdf/Sementti-opas.pdf>. Hakupäivä 1.4.2014.

Massan valmistus						
Massat	Sideaineet [kg]		Kiviaines [kg]		Vesi [kg]	
	Rapid	Tuhkaseos	0-2	0-8		
I.	0,10	0,10	0,59	0,25	0,12	
II.	0,10	0,30	1,18	0,50	0,24	
III.	0,06	0,34	1,18	0,50	0,24	
IV.	0,02	0,38	1,18	0,50	0,24	
V.	-	0,40	1,18	0,50	0,24	
VI.	0,04	0,76	2,36	1,00	0,48	
VII.	0,04	0,76	2,36	1,00	0,48	
VIII.	0,04	0,76	2,36	1,00	0,48	
IX.	0,04	0,76	2,36	1,00	0,48	
X.	0,08	0,72	2,36	1,00	0,48	
XI.	0,08	0,72	2,36	1,00	0,48	
XII.	0,08	0,72	2,36	1,00	0,48	
XIII.	0,08	0,72	2,36	1,00	0,48	
Notkeus ja tiheys						
Massat	Notkeus [mm]			Tiheys [kg/m ³]	Huom.	Pvm
	1	2	ka			
I.	101	102	102	2220	-	30.9.13
II.	102	101	102	2220	-	30.9.13
III.	101	101	101	2200	-	30.9.13
IV.	111	111	111	2230	-	13.11.13
V.	110	109	110	2210	-	13.11.13
VI.	188	187	188	2350	Imi vettä	17.12.13
VII.	213	212	213	2310	Kuumeni	17.12.13
VIII.	113	112	113	2330	-	8.1.14
IX.	104	105	105	2280	-	8.1.14
X.	146	145	146	2290	-	15.1.14
XI.	206	209	208	2330	Kuumeni	15.1.14
XII.	130	131	131	2290	-	22.1.14
XIII.	102	103	103	2170	-	22.1.14
Massat						
I.	50 % Rapid + 50 % Tuhkaseos 1					
II.	25 % Rapid + 75 % Tuhkaseos 1					
III.	15 % Rapid + 85 % Tuhkaseos 1					
IV.	5 % Rapid + 95 % Tuhkaseos 1					
V.	0 % Rapid + 100 % Tuhkaseos 1					
VI.	5 % Rapid + 95 % Tuhkaseos 2					
VII.	5 % Rapid + 95 % Tuhkaseos 3					
VIII.	5 % Rapid + 95 % Tuhkaseos 4					
IX.	5 % Rapid + 95 % Tuhkaseos 5					
X.	10 % Rapid + 90 % Tuhkaseos 2					
XI.	10 % Rapid + 90 % Tuhkaseos 3					
XII.	10 % Rapid + 90 % Tuhkaseos 4					
XIII.	10 % Rapid + 90 % Tuhkaseos 5					