

Petri Isohätä

LENTOTUKAN STABILOINTI BETONIIN

LENTOTUKAN STABILOINTI BETONIIN

Petri Isohätälä
Opinnäytetyö
8.4.2015
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, talonrakennuksen suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Petri Isohätälä
Opinnäytetyön nimi: Lentotuhkan stabilointi betoniin
Työn ohjaaja: Hannu Kääriäinen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2015
Sivumäärä: 33 + 1 liite

Energiantuotanto on ollut viime vuosina esillä hiilidioksidipäästöjen ja niistä johtuvan ilmastomuutoksen vuoksi. Uusiutuvien energialähteiden käyttämisen polttoprosessissa tiedetään pienentävän hiilijalanjälkeä. Toisaalta polttoprosessissa syntyvän tuhkan suuresta määrästä ja tuhkan käytöstä tai läjittämisestä ei ole juurikaan puhuttu.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, onko mahdollista stabiloida Pohjolan Voiman Laanilan voimalaitoksen lentotuhkaa, joka sisältää ajoittain lievästi kohonneita määriä haitta-aineita. Tavoitteena oli myös selvittää tuhkan laadun vaihtelun vaikutusta stabiloinnin onnistumiseen.

Lentotuhka stabiloitiin käyttämällä sitä betonin runkoaineena. Stabiloinnissa käytettiin sideaineena sementtiä ja teollisuuden sivutuotteina syntynyttä masuunikuonaa yhdessä ja erikseen. Lentotuhka stabiloitiin käyttämällä sitä betonin runkoaineena. Stabiloinnin onnistumisen mittarina käytettiin valmistettujen koe-kappaleiden puristuslujuuden kehittymistä 7, 14, 28 ja 91 vuorokauden iässä. Keväällä 2014 oli valmistettu eri tuhkaerästä näytesarja, joka toimii tämän opinnäytetyön pohjana. Näytesarjoista valittiin parhaiksi osoittautuneet näytteet, joita tässä opinnäytetyössä on tarkoitus toistaa eri tuhkaerästä. Aikaisemmin tehdyssä koe-erässä mitattiin puristuslujuuden kehittymistä 28 vuorokauden ikään asti. Aikaisempaan näytesarjaan poiketen tässä opinnäytetyössä mitattiin puristuslujuuden kehittymistä 91 vuorokauden ikään asti. Työ suoritettiin syksyn 2014 ja talven 2015 aikana Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion tiloissa ja välineillä.

Laanilan Voiman lentotuhkan laadun vaihtelun todettiin vaikuttavan merkittävästi betonin valmistuksessa tarvittavan veden määrään ja sitä kautta puristuslujuuden kehittymiseen. Opinnäytetyössä havaittiin myös, että kun käytettiin natriumhydroksidia ja natriumkloridia aktivaattoreina oikeina pitoisuuksina, loppulujuus kasvoi stabiloitavan lentotuhkan toimiessa runkoaineena.

Asiasanat: Lentotuhka, puristuslujuus, sideaine, vesipitoisuus

ABSTRACT

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

Author(s): Petri Isohätälä
Title of thesis: Stabilization of Fly Ash in Concrete
Supervisor(s): Hannu Kääriäinen
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2015
Pages: 33 + 1 appendices

Energy production has been a topic of interest during recent years due to the climate change risk involved in it. The use of renewable energy in combustion process are known to reduce the carbon footprint. On the other hand, a large number of ash resulting from the incineration process and the using or heaping of ash is not much talked about. This thesis explored the possibility of stabilizing fly ash produced by the power plant Pohjolan Voima Laanila, which contains periodically slightly elevated levels of contaminants.

The aim of the thesis is to find out if the quality of the ash will affect the stabilization of the success of the stabilization. The fly ash was stabilized by using it as an ingredient in concrete manufacturing and using blast furnace slag as an adhesive. The success of stabilization was measured as the compressive strength evolution of manufactured concrete specimens at the age of 7, 14, 28 and 91 days. During the spring of 2014, a fly ash sample series was manufactured and used as a basis for this thesis. The samples which proved to be the best suited for further investigation were re-done from different ash batches. Unlike the previous sample set, in which compressive strength measurements lasted until the age of 28 days, in this thesis the compressive strength progression was measured until the age of 91 days. The work was carried out during autumn 2014 and winter 2015 in the laboratory of building facilities and equipment of Oulu University of Applied Sciences.

The fly ash quality variation of Laanila Voima was found to affect significantly to the amount of water needed in concrete manufacturing and through this to the development of compressive strength. The effect of sodium chloride and sodium hydroxide as activators at the correct concentrations were found to increase the final strength while the stabilizing fly ash acted as an aggregate.

Keywords: Fly ash, compressive strength, adhesive, water content

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	6
2 BETONIN KOOSTUMUS	7
2.1 Betonin ominaisuudet	7
2.1.1 Runkoaine ja vesi	7
2.1.2 Sideaineet	8
2.1.3 Lisäaineet	10
2.2 Pozzolaaniset sideaineet	12
2.2.1 Lentotuhka	12
2.2.2 Masuunikuonajauhe	14
2.2.3 Silika	15
3 KOE-ERIEEN RAAKA-AINEET	16
4 SIDEAINESEOSTEN VALMISTUS	17
4.1 Tuoreen betonin menetelmät	17
4.1.1 Notkeuden määrittäminen massasta	17
4.1.2 Vesipitoisuus kuiva-aineesta	18
4.1.3 Tiivistys	19
4.2 Kovettuneen betonin menetelmät	19
4.2.1 Massatiheys	19
4.2.2 Puristuslujuus	20
5 KOEOHJELMA	21
6 KOE-ERIEEN TULOKSET JA TULKINNAT	22
6.1 Vesipitoisuus kuiva-aineesta	22
6.2 Massan notkeus	23
6.3 Massatiheys	24
6.4 Puristuslujuus	25
7 YHTEENVETO	32
LÄHTEET	33
Liite1. Työlomake	

1 JOHDANTO

Lentotuhkaa syntyy sivutuotteena voimalaitoksissa kivihiilen, turpeen ja puun polton yhteydessä. Lentotuhka, joka sisältää haitallisia määriä epäpuhtauksia, luokitellaan ongelmajätteeksi. Stabiloimalla epäpuhtauksia sisältävää lentotuhkaa uusiin tuotteisiin säästetään ongelmajätteen käsittelystä syntyvissä kustannuksissa. Mahdollisuus käyttää stabiloinnissa teollisuuden sivutuotteita lisää valmistettavan lopputuotteen ekologisuutta.

Stabiloitavana raaka-aineena työssä toimii Laanilan Voima Oy:n voimalaitoksen lentotuhka. Voimalaitoksen polttoprosessissa syntyy lentotuhkaa, joka sisältää ajoittain kohonneita haitta-ainepitoisuuksia. Työn tavoitteena on selvittää lentotuhkan laadunvaihtelun käyttäytymistä betonin valmistuksessa. Tulosten vertailukohtana käytetään eri tuhkaerästä aikaisemmin valmistetun koesarjan tuloksia. Koesarjojen puristuslujuuden kehitystä seurataan 7, 14, 28 ja uusilla koe-kappaleilla aikaisemmista koesarjoista poiketen myös 91 vuorokauden iässä. Koesarjat valmistetaan ja testataan OAMK:n betonilaboratoriossa.

Työ toteutettiin Rakentaminen avartaa Ekologisuutta –projektin osana. Hanke on CEE:n koordinoima EAKR-hanke, jonka on myöntänyt Pohjois-pohjanmaan ELY-keskus.

2 BETONIN KOOSTUMUS

Betonin valmistamisessa tärkeimmät aineosat ovat runkoaine, sideaine ja vesi. Luvussa 2 esitellään betonin ja sen valmistuksessa käytettävien sideaineiden ominaisuuksia.

2.1 Betonin ominaisuudet

Betoni on keinotekoisesti valmistettu kivi, jonka erityisen suuri puristuslujuus on tehnyt siitä suosittua rakennusmateriaalin monissa eri kohteissa. Betonin pääraaka-aineita ovat yleensä sementti, vesi ja kiviaines. Betonin ominaisuuksia voidaan muokata käyttämällä lisä- ja seosaineita esimerkiksi betonin työstettävyyden lisäämiseksi tai kovettuneen betonin lujuuden, tiiveyden ja säilyvyysominaisuuksien parantamiseksi. (1, s.31.)

2.1.1 Runkoaine ja vesi

Runkoaineen määrä betonissa vaihtelee 65 %:sta 80 %:iin riippuen halutusta koostumuksesta. Runkoaineena voidaan halutessa käyttää mitä tahansa riittävän lujaa ja tiivistä rakeista materiaalia, joka ei sisällä haitallisia määriä betonin ominaisuuksiin heikentäviä aineita, ei osallistu sementin reaktioihin eikä heikennä betonin säilyvyyttä. Yleensä runkoaineena käytetään kiviainesta, jonka tulee täyttää standardin SFS-EN 12620 määräykset ja olla CE-merkittyä. (1, s. 32.)

Betonin valmistamisessa käytettävän veden täytyy olla puhdasta. Se ei saa sisältää betonin lujuutta heikentäviä aineita, kuten humusta. Vesiverkosta otettu vesi sekä juomakuntoinen luonnonvesi kelpaavat yleensä aina betonin valmistukseen. (1, s. 62, 63.)

2.1.2 Sideaineet

Betonin sideaineen koostumus voi sisältää sementtistä ja muista sementin tavoin toimivista mineraalisista aineista, kuten silikasta, masuunikuonasta tai lentotuhkasta. Edellä mainittuja sideaineita voidaan käyttää betonin valmistuksessa yhdessä tai niitä voidaan lisätä erikseen betonin sekoittamisen yhteydessä. (1, s.139.)

Betonissa yleisimmin käytetty sideaine on sementti. Se valmistetaan pääosin kalkkikivestä saatavasta kalsiumkarbonaatista CaCO_3 . Muut tarvittavat raaka-aineet ovat piidioksidi SiO_2 (lyhenne S), rautaoksidi Fe_2O_3 (lyhenne F) ja alumiinioksidi Al_2O_3 (lyhenne A), joita saadaan useasti kalkkilouhoksen sivukivenä. Veden kanssa reagoidessaan sementti synnyttää hydrataatioreaktion, joka johtaa betonin sitoutumiseen ja kovettumiseen. Sementin kemiallisella koostumuksella voidaan vaikuttaa betonin työstettävyyteen ennen kovettumista. Kovettuneen betonin ominaisuuksissa sementin kemiallinen koostumus vaikuttaa lujuuteen, säilyvyyteen, lämmönkehitykseen, kemialliseen kestävyys. (1, s. 39.)

Betonin valmistuksessa käytettävän sementin tulee täyttää sementtistandardin SFS-EN 197-1 vaatimukset ja olla CE-merkittyä. Taulukossa 1 on esitetty sementtistandardin mukainen luokittelu viiteen päälajiin sementtien eri koostumusten perusteella. Päälajit on edelleen jaettu eri sementti lajeihin käytetyn seosaineen ja seosmäärän suhteen. (1, s. 41, 42.)

TAULUKKO 1. Sementtien vaatimuksen mukaiset koostumukset (2. s. 15)

Taulukko 1 Tavallisten sementtien perheen 27 tuotetta

Pääajit	27 tuotteen merkinnät (tavallisten sementtien lajit)		Koostumus (painoprosenteina ^{a)})										Sivuosaineet		
			Pääosa-aineet												
			Klinkkeri	Masuuni-kuona	Silika	Pozzolaani		Lentotuhka		Poltettu iluske	Kalkkikivi				
						luonnon	luonnon kalsinoitu	silikaattipitoinen	kalkkipitoinen		L	LL			
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Portlandsementti	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandmasuuni-kuonasementti	CEM I/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandsilikasementti	CEM I/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandpozzolaanisementti	CEM I/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandlentotuhkasementti	CEM I/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandpoltettu iluske-sementti	CEM I/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portlandkalkkikivisementti	CEM I/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM I/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM I/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM I/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portlandseos-sementti ^c	CEM I/A-M	80-88	←----- 12-20 ----->								-	-	0-5	
CEM I/B-M		65-79	←----- 21-35 ----->								-	-	0-5		
CEM III	Masuuni-kuonasementti	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Pozzolaaniseimentti ^c	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 ----->					-	-	0-5			
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-65 ----->					-	-	0-5			
CEM V	Seos-sementti ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 ----->			-	-	-	0-5			
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 ----->			-	-	-	0-5			

^a Taulukon arvoilla viitataan pää- ja sivuosainesten summaan.

^b Silikan määrä on rajoitettu 10 %:iin.

^c Portlandseossementissä CEM I/A-M ja CEM I/B-M, pozzolaaniseimentissä CEM IV/A ja CEM IV/B sekä seossementissä CEM V/A ja CEM V/B muut pääkomponentit kuin klinkkeri on ilmoitettava sementin merkinnässä (ks. esimerkki luvusta 8).

2.1.3 Lisäaineet

Lisäaineiden avulla voidaan vaikuttaa betonimassan ominaisuuksiin, betonin sitoutumiseen ja kovettumiseen sekä kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Lisäaineiden määrät ovat pieniä verrattuna muihin betonin komponentteihin. Lisäaineen vaikutustapa on fyysikaalinen tai kemiallinen, ja niillä pyritään parantamaan betonin teknisiä ominaisuuksia ja taloudellista kilpailukykyä. Pakkasenkestävän ja korkealujuusbetonin valmistus ilman lisäaineita on erittäin vaikeaa. On kuitenkin tärkeää muistaa, että lisäaineiden käyttö vaatii aina esikokeita ja huolellisuutta. (1. s. 63.)

Notkistavia lisäaineita voidaan käyttää betonin notkeuden lisäämiseksi tai vedentarpeen vähentämiseen. Tällöin betonin työstettävyyttä paranee tai lujuus nousee, kun vesisementtisuhte pienenee. Samalla myös betonin säilyvyys ja tiiveys paranevat. Veden määrää saadaan vähennettyä notkistavan lisäaineen avulla 5-30 % ilman, että betonin työstettävyyttä heikentyy. Notkistavat lisäaineet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka kiinnittyvät sementtirakeiden pinnalle ja aiheuttavat hylkimisvoimia näiden välille. Vesi pääsee paremmin tunkeutumaan erillään olevien rakeiden väliin ja näin ollen betonin työstettävyyttä paranee. Nykyiset notkistimet ovat pääasiassa polykarboksylaattipohjaisia kemiallisia aineita. (3.)

Notkistavat lisäaineet on jaettu ryhmiin veden tarpeen vähentämisen mukaan. Ensimmäisessä ryhmässä ovat notkistimet, joilla voidaan saavuttaa noin 5-15 %:n vedenvähennys, ja toisessa ryhmässä tehonotkistimet, joilla voidaan saavuttaa noin 12-30 %:n vedenvähennys ilman, että betonin työstettävyyttä heikenee. Yleensä notkistava lisäaineen annostus on 1-1,5 % sideaineen kokonaismäärästä. Samaa notkistavaa lisäainetta voidaan siis käyttää notkistimena, tehonotkistimena tai nesteyttimenä riippuen siitä, miten suuri osa aineen tehosta käytetään vedenvähennykseen ja miten suuri osa työstettävyyden parantamiseen. Notkistava lisäaine voidaan valita vaikutusajan mukaan riippuen esimerkiksi kuljetusmatkan pituudesta tai muotinkierrosta, vaikutusaika vaihtelee 15 minuutista useisiin tunteihin. (1, s. 65.)

Huokostavia lisäaineita käytetään betonin pakkasenkestävyyden parantamiseen. Betonin lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n sen sisältämä vesi alkaa jäätyä. Jäätyessään vesi laajenee noin 9 %. Jos betonin huokokset ovat täynnä vettä, laajeneminen aiheuttaa mikrohalkeilua, joka usein toistuessaan johtaa lopulta betonin rapautumiseen. Betonin normaali ilmapitoisuus on 1-2 %, huokostavan lisäaineen avulla betonin ilmapitoisuutta nostetaan 4-8 % betonin tilavuudesta. Huokoistava lisäaine muodostaa betoniin pieniä ilmakuplia, jotka leviävät betonimassan tasaisesti. Betoniin syntyy suojahuokoisia, joiden tehtävänä on vastaan ottaa betonissa olevan veden jäätymisestä syntynyttä painetta ja estää betonin rikkoutumisen. (4.)

Huokostavan lisäaineen tyypillinen annostus on vain 0,01-0,03 % sideaineen kokonaismäärästä. Huokokset vähentävät betonimassan osa-aineiden erottamista ja parantavat sen muokattavuutta, notkeutta ja koossapysyvyyttä. Toisaalta huokoistus notkistaa betonia ja heikentää kovettuneen betonin lujuutta. Vesi-ilma-sementti suhteen avulla on arvioitu, että 1 % ilmamäärän lisäys heikentää noin 3-5 % betonin lujuutta. Lisäksi huokostuksen onnistumista on vaikea varmistaa, koska tuoreen massan ilmapitoisuuden mittaaminen ei kerro, minkä kokoisia huokokset ovat ja miten ne ovat jakautuneet. (1, s. 67.) Taulukossa 2 on esitetty runkoaineskokojen mukaiset ilmamäärät betonille rasitusluokissa XF1 ja XF3. (5, s. 108.)

TAULUKKO 2. Sallitut ilmamäärät betonissa runkoaineskokojen mukaan

Rasitusluokka	Betonin sallittu ilmamäärä [%]		
	D = 8 mm	D = 12 mm	D ≥ 16mm
XF1	4,5...8,5	4,0...8,0	3,5...7,5
XF3	5,0...9,0	4,5...8,5	4,0...8,0

Hidastimien määrä sideaineen kokonaismäärästä on yleensä 1-3 %. Annosmäärään vaikuttavat mm. lämpötila, seosaineet, sementti ja haluttu hidastusaika. Kylmissä olosuhteissa ei hidastinta yleensä tarvita, koska alhainen lämpötila hidastaa sitoutumista merkittävästi. Hidastimien käyttö vaatii tarpeellisia ennakkokokeita. (1, s. 67.)

Kiihdyttimiä käytetään nopeuttamaan betonin sitoutumista, kovettumista ja varhaisuuden kehittymistä. Tämä mahdollistaa myös betonoinnin kylmällä säällä ja nopeamman muotinkierron. Kiihdyttimet ovat jaettu kolmeen eri luokkaan, jotka ovat kovettumista nopeuttavat, sitoutumista nopeuttavat ja ruiskubetonikiihdyttimet. Aikaisemmin käytettiin paljon kiihdyttimenä kalsiumkloridia (tisuola). Nykyisin sen käyttöä pyritään rajoittamaan, koska se lisää huomattavasti terästen korroosiota ja toimii pieninä annoksina jopa hidastimena. Kiihdyttimien käyttö on muutenkin vähentynyt, sillä nopean sementin, kuuman betonimassan tai alhaisen vesisementtisuhteen avulla on betonin sitoutuminen ja lujuudenkehitys saatu paremmin kiihdytettyä. (1, s. 68.)

2.2 Pozzolaaniset sideaineet

Pozzolaaniset sideaineet ovat materiaaleja, joita käytetään sementin osittaisena korvikkeena. Pozzolaanien käyttö vähentää betonirakentamiseen liittyviä hiilidioksidipäästöjä sekä lisää rakenteiden saavuttamaa loppulujuutta. (6, s. 1.)

2.2.1 Lentotuhka

Energiantuotannon polttoprosessin sivutuotteena syntyy tuhkaa. Tuhkan laatu riippuu käytetystä polttoaineesta, polttoprosessista sekä tuhkanerotustekniikasta. Tuhka on lähtökohtaisesti luokiteltu jätteeksi, ja sen hyödyntämistä sääntelevät jätelaissa (646/2011, voimassa 1.5.2012) ja ympäristönsuojelussa (86/2000 ja 647/2011, voimassa 1.5.2012) sekä niiden asetuksissa asetetut säädökset. (7, s. 8.)

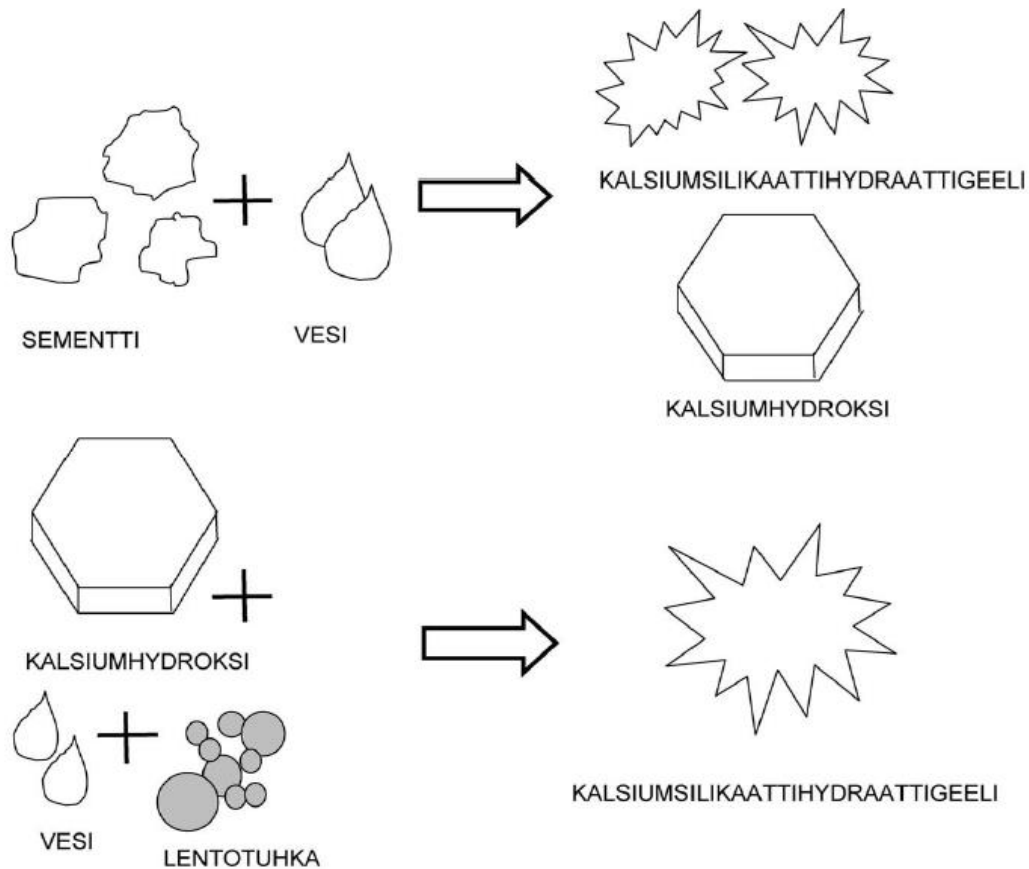
Palamattomat ainekset muodostavat polttoprosessissa tuhkan. Suomessa tuhka luokitellaan niiden keräyspaikan (pohja- ja lentotuhka) sekä polttoprosessin polttoainekoostumuksen mukaan kivihiilen polton-, seospolton- ja rinnakkaispolton tuhkiin (taulukko 3). (7, s. 8.)

TAULUKKO 3. Suomessa tuhkien luokitteluun käytetyt määritelmät

	Nimike	Määritelmä
Keräyspaikka	Pohjatuhka	Kattilan pohjalle kerääntyvä tai poistettavan leijupeti- materiaalin mukana poistuva tuhka- jajae
	Lentotuhka	Savukaasuista erotettava tuhka- jajae
Polttoaine- koostumus	Kivihiilen poltto	Kivihiilen polton lentotuhka
	Seospoltto	Tavanomaisten polttoaineiden seospoltto
	Rinnakkaispoltto	Jätteiden ja tavanomaisten polttoaineiden rinnakkaispoltto

Lentotuhka jaetaan A- ja B-luokkiin polttoprosessissa jäljelle jääneen hiilipitoisuuden eli hehkutushäviön mukaan. A-luokan hiilipitoisuus on $\leq 5\%$ ja B-luokan $\leq 10\%$. Tuhkan vedentarve kasvaa sen hiilipitoisuuden kasvaessa. Kun hiilipitoisuus on pieni, voidaan tuhkan käytöllä parantaa betonimassan koossapysyvyyttä ja työstettävyyttä. Lentotuhkan hehkutushäviö vaihtelee varsin paljon, eikä tasaista betonilaatua ole helppo saavuttaa lentotuhkaa käyttämällä. (1, s. 59.)

Lentotuhka voi toimia betonissa sideaineena tai runkoaineena (rakeisuus 1-150 μm). Lentotuhkan pozzolaaninen reaktio on hitaampi kuin sementin reaktio, ja reaktion syntymisen edellytyksenä on, että vettä ja kalsiumhydroksidia on riittävästi. Lentotuhkan aktiivisuus sementtiin verrattuna on betoninormien mukaan 0,40, kun lentotuhka/sementti $\leq 0,33$. Raja-arvon yli menevällä lentotuhka määrällä ei lasketa olevan aktiivisuutta. Lentotuhkan käyttö heikentää betonin varhaislujuutta, mutta kasvattaa myöhäislujuutta. Sementin korvaaminen tuhalla pienentää betonin hydratoitumislämpöä. Lämpötilan aleneminen hidastaa lentotuhkan reaktiota betonissa merkittävästi, sen käyttö talvibetonoinnissa ei ole suositeltavaa. Myös lentotuhkan sisältämä hiili tekee betonin huokoistamisen vaikeaksi. (1, s. 59,60.) Kuvassa 1 on esitetty lentotuhkan reaktio betonissa. (8, s. 7.)



KUVA 1. Lentotuhkan reaktio betonissa

2.2.2 Masuunikuonajauhe

Masuunikuonajauhe on hienoksi jauhettua granuloitua masuunikuonaa, jonka piilevä ominaisuus on hydraulisuus. Raakaraudasta saadaan valmistuksen yhteydessä granuloitua kuonaa. Syntyvä emäksinen sulate jäähdytetään nopeasti vesisuihkujen avulla, jolloin kuona muuttuu lasimaiseksi. Kuonan piilevät hydrauliset ominaisuudet heräävät sementin ja veden reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin vaikutuksesta, ja kuona kehittää lujuutta lähes yhtä paljon kuin sementtiklinkkeri. Masuunikuonan hydrauliseen aktiivisuuteen vaikuttavat kuonan emäksisyys ja lasimaisuusaste sekä kuonajauheen hienous. Kuonan lujuusreaktiot tuottavat vähemmän lämpöä, joten siitä on hyötyä massiivisten betonirakenteiden valussa. (9, s. 1.)

2.2.3 Silika

Silika on erittäin hienojakoinen pozzolaani, sen raekoko on alle $1\ \mu\text{m}$ ja kiintotiheys $2200\ \text{kg/m}^3$. Silikan käyttö betonissa lisää vedentarvetta, joten sen kanssa täytyy käyttää veden tarvetta vähentävää lisäainetta. Silika lisää huomattavasti betonin lujuutta, kemiallista kestävyyttä ja tiiveyttä. (1, s. 60.)

Betonin lujuuden kehittyminen alkaa veden lisäämisen ja sitoutumisen päättymisen jälkeen betonimassassa. Lujuuden kehitys jatkuu käytännössä niin kauan, kun hydratoitumiseen osallistuvaa vettä on käytettävissä. Käytetyillä sideaineilla on mahdollista vaikuttaa betonin lujuuden kehittymisen nopeuteen. Masuunikuonan ja lentotuhkan käyttö korvaamassa sementtiä vähentää betonin hydratoitumislämpöä merkittävästi, ja näin ollen pienentää varhaislujuutta. Betonin lujuudenkehitykseen vaikuttaa myös käytetty vesimäärä. Teoreettisesti täydelliseen hydratoitumiseen riittävä vesimäärä on 25 % sementin painosta. Tämän lisäksi vettä sitoutuu fysikaalisesti ns. geelihuokosiin noin 15 % sementin painosta, joten täydelliseen hydrataatioon tarvittava vesi määrä on 40-50 % sementin painosta. (1, s. 53,59,60.)

3 KOE-ERIEEN RAAKA-AINEET

Raaka-aineet, joita massojen valmistuksessa käytettiin, olivat lentotuhka, masuunikuona, Rapid-sementti, vesijohtovesi ja aktivaattorit natriumkloridi ja natriumhydroksidi.

Stabiloitavana lentotuhkana käytettiin Laanilan Voima Oy:n voimalaitoksen polttoprosessissa syntynyttä lentotuhkaa, joka sisältää kohonneita haitta-ainepitoisuuksia. Lentotuhka toimi runkoaineena ja sen osuus oli kaikissa sideaineseoksissa 50 %.

Käytetty masuunikuona oli Finnsementin toimittamaa KJ400-masuunikuonajauhetta.

Sideaineena käytetty sementti oli Rapid-sementti, jonka erityisominaisuutena on nopea lujuuden alkukehitys. Nopea alkulujuuden kehitys mahdollisti mahdollisimman aikaisen muottien purun. Rapid-sementti on CE-merkitty, mikä täyttää standardin SFS-EN 197-1: 2011 vaatimukset. (10.)

Sideaineseoksessa käytetty vesi otettiin Oulun vesijohtoverkosta.

Natriumhydroksidia käytettiin korvaamaan kalsiumhydroksidia, koska masuunikuonan ja lentotuhkan kalkkipitoisuus on huomattavasti pienempi kuin portlandsementin ja kuonajauhe ja lentotuhka eivät kovettuessaan muodosta vapaata kalsiumhydroksidia. Lentotuhka ja masuunikuonajauhe ovat pozzolaanisia sideaineita, jotka reagoivat kalsiumhydroksidin kanssa. (1, s. 99.)

Natriumkloridia käytettiin aktivaattorina, koska sen on todettu parantavan betonin työstettävyyttä. Toisaalta natriumkloridin käyttö betonin valmistuksessa ei ole suositeltavaa sen teräksille aiheuttaman korroosion vuoksi. (1, s. 68.)

4 SIDEAINESEOSTEN VALMISTUS

Jokaiselle valmistetulla sideaineseokselle tehtiin samat seoksen ominaisuuksista kertovat mittaukset. Puristuslujuuden määrittämiseksi sideaineseokset valettiin prismamuotteihin vakio-olosuhteissa tärypöytää näytteiden tiivistämisessä apuna käyttäen. Näytteiden ominaisuuksien kehittymistä seurattiin mittaamalla puristuslujuutta 7, 14, 28 ja 91 vuorokauden iässä. Ennen puristuslujuuden mitausta jokaisen näytteen massatiheys määritettiin.

4.1 Tuoreen betonin menetelmät

Betonimassan valmistamisen yhteydessä tehdään mittauksia, joiden perusteella voidaan arvioida massan työstettävyyttä.

4.1.1 Notkeuden määrittäminen massasta

Kaikkien valmistettujen massojen notkeus mitattiin iskupöydällä (kuva 2) standardin SFS-EN 1015-3 mukaan.



KUVA 2. Iskupöytä notkeuden mittaukseen

4.1.2 Vesipitoisuus kuiva-aineesta

Vesipitoisuus kuiva-aineesta määritettiin punnitsemalla astia ja astian kanssa noin 10 g:n näyte betonimassasta valmistuksen yhteydessä. Tämän jälkeen näytettä kuivattiin lämpökaapissa 105 C°:n lämpötilassa kahden vuorokauden ajan. Kuivaamisen jälkeen näyte punnittiin astian kanssa, ja saaduista punnitustuloksista saatiin laskennallinen vesipitoisuus kaavan 1 avulla.

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \times 100$$

KAAVA 1.

W vesipitoisuus (%)

m_1 astian ja kostean näytteen massa

m_2 astian ja kuivan näytteen massa

m_c astian massa

4.1.3 Tiivistys

Näytteet tiivistettiin prismamuotteihin valun yhteydessä tärypöydän avulla (kuva 3). Tärypöydän avulla pyrittiin poistamaan näytteistä ylimääräinen ilma, mutta välttämään liiallisen tärytyksen aiheuttama veden erottuminen.



KUVA 3. Tärypöytää käytettiin massan tiivistämisessä

4.2 Kovettuneen betonin menetelmät

4.2.1 Massatiheys

Näytekappaleiden massatiheys määritettiin punnitsemalla näyte kuivana sekä veteen upotettuna. Tämän jälkeen massatiheys laskettiin kaavan 2 avulla.

$$\rho = \frac{m_i}{(m_i - m_v)} * \rho_n$$

KAAVA 2

- m_i kappaleen massa ilmassa punnittuna (kg)
- m_v kappaleen massa vedessä punnittuna (kg)
- ρ_n nesteen tiheys (kg/m^3)
- ρ kappaleen tiheys (kg/m^3)

4.2.2 Puristuslujuus

Näytekappale taivutettiin murtoon, jolloin prisman katkeaminen tapahtui keskeltä kahteen osaan ennen puristuslujuuden mittaamista. Taivutus murtoon katkaistujen kappaleiden palat testattiin erikseen Dartec-yleisaineenkoetuslaitteella (kuva 4). Saaduista tuloksista laskettiin keskiarvo. Puristusvoiman ja kuormitus-pinta-alan avulla laskettiin käytetty puristuslujuus kaavan 3 avulla.

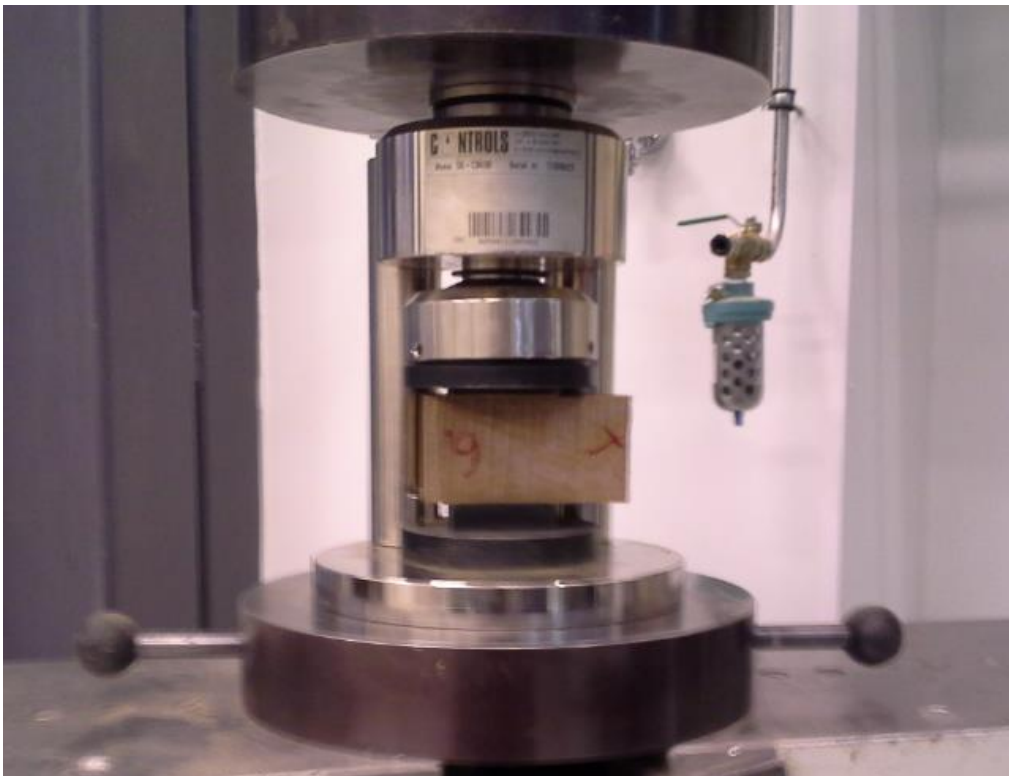
$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

KAAVA 3.

f_c puristuslujuus

F suurin kuorma murtohetkellä (N)

A_c kuormitettu pinta-ala (mm)



KUVA 4. Puristuslujuuden mittaaminen

5 KOEOHJELMA

Koekappaleita valmistettaessa alkutietona käytettiin keväällä 2014 tehtyjen kokeiden tuloksia. Tarkoituksena oli valmistaa eri tuhkaerästä aiemmissa kokeissa ominaisuuksiltaan hyväksi havaittuja sideaineseoksia. Stabiloitavan lentotuhkan (Le) määrä oli jokaisessa seoksessa 50 % kuiva-aineen määrästä. Masuunikuonan (Mak) ja sementin (Se) määrä vaihteli 50 %:n ja 0 %:n välillä. Taulukossa 4 on eriteltyinä jokaisen koe-erän koostumus. Runkoaine- ja sideainemäärät on ilmoitettu prosenttisyyskannalla kuiva-aineesta. Vesimäärä on ilmoitettu massaprosenttina kuiva-aineesta

Aktivaattorien määrä on ilmoitettu natriumhydroksiidin (NaOH) osalta konsentraationa (mol/l) vedessä ja natriumkloridin (NaCl) osalta massaprosenttina kuiva-aineesta (m_d %). Näyteseokset on esitelty.

TAULUKKO 4. Sideaineseosten koostumukset

Runkoaine-sideaineseos % osuus kuiva-aineesta.	Aktivaattori	Vesipitoisuus % osuus kuiva- aine määrästä.
1 Le-Mak (50-50)		40 %
2 Le-Mak (50-50)		30 %
3 Le-Mak (50-50)		25 %
4 Le-Mak (50-50)		22,25 %
5 Le-Se (50-50)		25 %
6 Le-Mak-Se 50-(70-30)		30 %
7 Le-Mak-Se 50-(70-30)		27,5 %
8 Le-Se (50-50)		27,5 %
9 Le-Mak (50-50)		27,5 %
10 Le-Mak (50-50)	NaOH 3mol/l	27,5 %
11 Le-Mak (50-50)	NaCl 1 %	27,5 %
12 Le-Mak (50-50)	NaCl 0.5 %	27,5 %
13 Le-Mak (50-50)	NaCl 2 %	27,5 %
14 Le-Mak (50-50)	NaOH 3mol/l + NaCl 1 %	27,5 %

6 KOE-ERIEN TULOKSET JA TULKINNAT

6.1 Vesipitoisuus kuiva-aineesta

Koe-erien vesipitoisuus kuiva-aineesta määritettiin lämpökaapissa näytteistä, jotka otettiin valmistetuista massoista valujen yhteydessä. Poikkeamat laskennallisen ja mitatun vesimäärän välillä olivat pieniä, ainoastaan natriumhydroksidia 3mol/l:ssa sisältämä näytteen laskennallinen arvo oli huomattavasti suurempi kuin mitattu.

Kovettumisreaktion edetessä betonin vesipitoisuus pieneni. Natriumhydroksidin reaktiota katalysoiva vaikutus näkyy mittaustuloksessa heti valmistuksen jälkeen (taulukko 5). Natriumhydroksidi toimii sementin sisältämän kalsiumhydroksidin tapaan betonimassassa kiihdyttämällä kemiallista reaktiota ja nopeuttamalla betonin kovettumista.

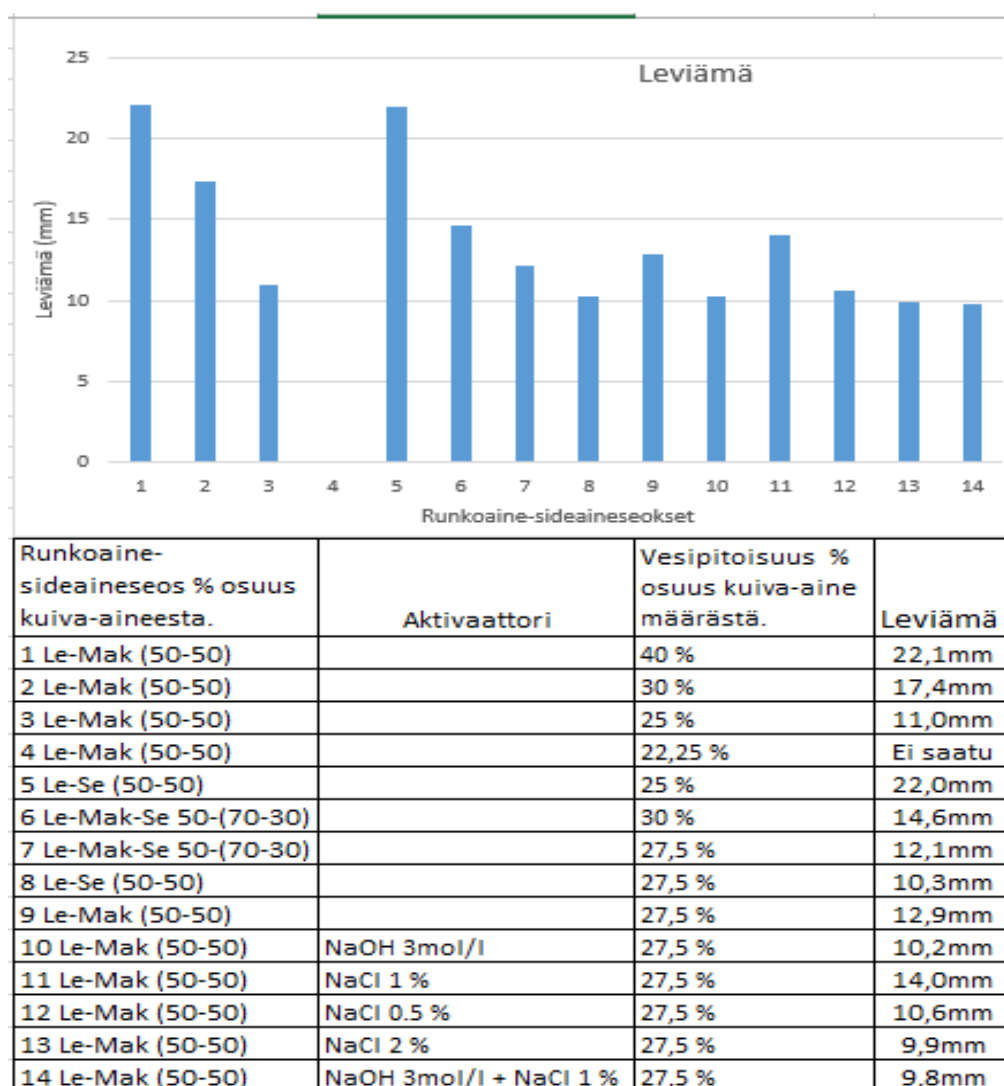
TAULUKKO 5. Laskettu ja mitattu vesipitoisuus koe-erissä

Runkoaine -sideaineseos (% osuudet)	Aktivaattori	Vesipitoisuus W (%) laskettu	Vesipitoisuus W (%) mitattu
1 Le-Mak (50-50)		40,0 %	40,3 %
2 Le-Mak (50-50)		30,0 %	Ei saatu
3 Le-Mak (50-50)		25,0 %	28,7 %
4 Le-Mak (50-50)		22,3 %	21,2 %
5 Le-Se (50-50)		25,0 %	20,9 %
6 Le-Mak-Se(50-(70-30))		30,0 %	28,4 %
7 Le-Mak-Se (50-(70-30))		27,5 %	27,1 %
8 Le-Se (50-50)		27,5 %	26,4 %
9 Le-Mak (50-50)		27,5 %	28,0 %
10 Le-Mak (50-50)	NaOH 3mol/l	27,5 %	17,5 %
11 Le-Mak (50-50)	NaCl 1 %	27,5 %	25,5 %
12 Le-Mak (50-50)	NaCl 0.5 %	27,5 %	27,4 %
13 Le-Mak (50-50)	NaCl 2 %	27,5 %	25,5 %
14 Le-Mak (50-50)	NaOH 3mol/l + NaCl 1 %	27,5 %	24,5 %

6.2 Massan notkeus

Massojen notkeutta seurattiin vakio-olosuhteissa tiivistetyn näytteen leviämäkokeen halkaisijan avulla (kuva 5). Notkeuden seurannan avulla pystyttiin seuraamaan massan työstettävyyttä. Liikaa vettä sisältävä näyte antoi suuren leviämäarvon, mutta myös liian kuiva näyte antoi myös suuren leviämäarvon, koska siinä ei ollut tarpeeksi vettä sitomaan massaa yhtenäiseksi.

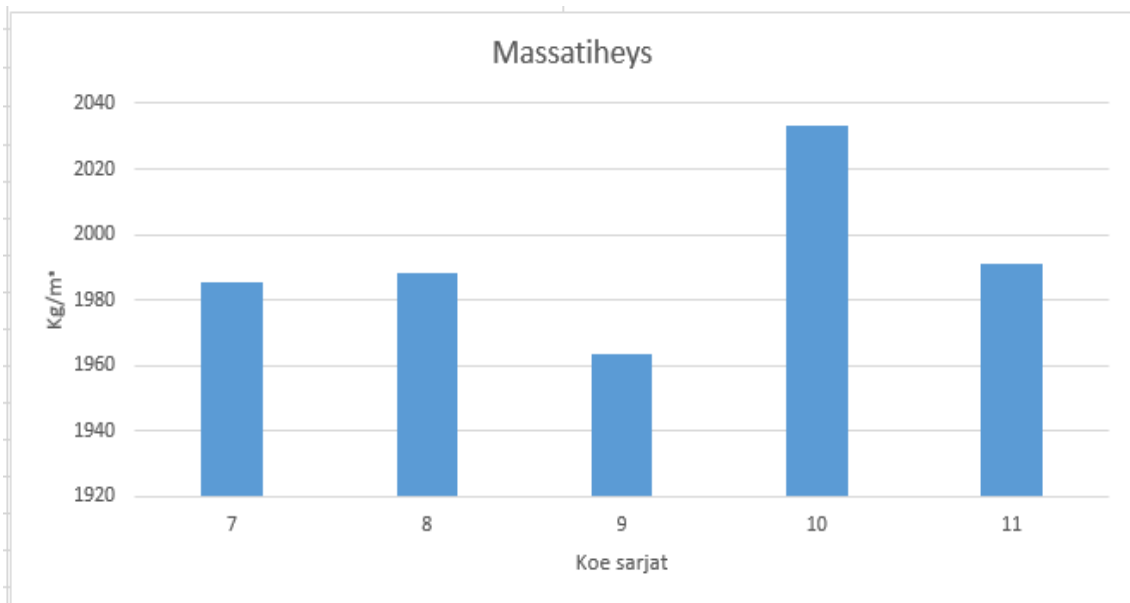
Natriumkloridin vaikutus lisäsi massan notkeutta 1 %:n seoksessa, mutta 0,5 %:n ja 2 %:n seoksilla ei vaikutusta ollut. Natriumhydroksidilla ei ollut vaikutusta leviämän suuruuteen. Natriumkloridin ja natriumhydroksidin yhteinen vaikutus ei vaikuttanut leviämän suuruuteen.



KUVA 5. Notkeusarvio leviämäkokeen avulla

6.3 Massatiheys

Massatiheys vaihteli näytteissä vesimäärän mukaan. Kuvassa 6 on vertailussa samalla vesipitoisuudella tehtyjä näytteitä. Natriumhydroksidia 3 mol/l sisältänyt näyte 10 osoittautui massatiheydeltään suurimmaksi, ja lentotuhkaa ja masuunikuonaa sisältänyt näyte pienimmäksi.



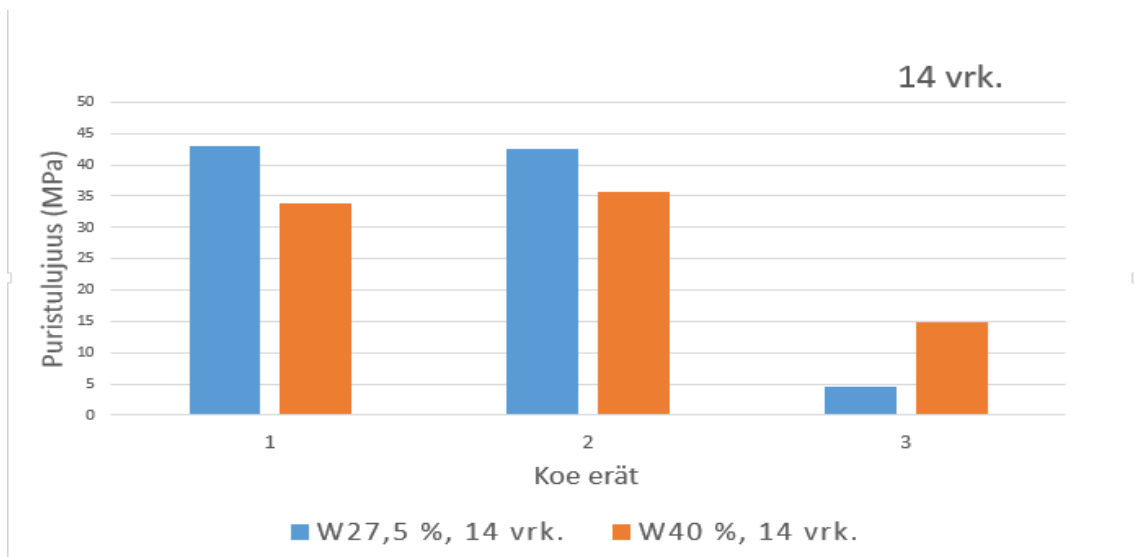
<u>Seosaineet ja vesimäärä (W %)</u>	<u>Massatiheys (Kg/m³)</u>
7. Le-(Mak-Se) 50-(70-30), (W 27,5 %)	1985,4
8. Le-Se (50-50), (W 27,5 %)	1988,4
9. Le-Mak (50-50), (W 27,5 %)	1963,5
10. Le-Mak (50-50)+NaOH 3mol/l, (W 27,5 %)	2033,1
11. Le-Mak (50-50)+NaCl 1 %, (W 27,5 %)	1991,0

KUVA 6. Massatiheys eri sideaineseosilla

6.4 Puristuslujuus

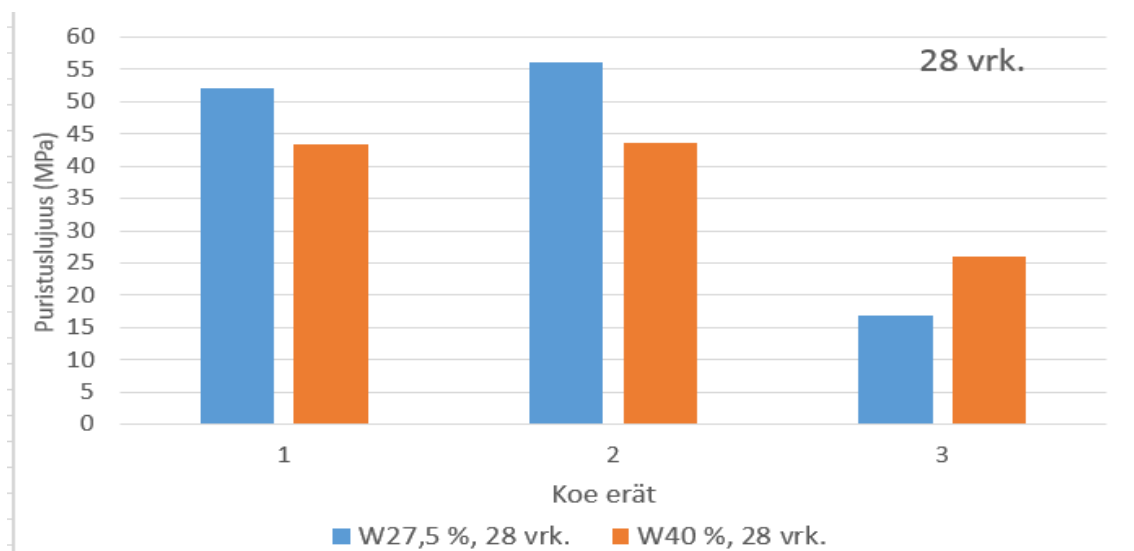
Puristuslujuuden kehittymistä seurattiin 7, 14, 28 ja 91 vuorokauden iässä. Jokaisesta valmistetusta sideaineseoksesta saatiin kolme näytettä. Työn tavoitteena oli verrata puristuslujuus tuloksia aikaisemmin tehtyihin tuloksiin. Koska aikaisemmin tehdyissä tuloksissa puristuslujuuden määritysikä oli 7, 14 ja 28 vuorokautta, nyt vertailuiksi valittiin 14 ja 28 vuorokautta. Jokaisesta prisma-muotista saatiin 3 näytettä ja koestusiäksi valittiin 14, 28 ja 91 vrk.

Puristuslujuuden kehityksen vertailussa aiemmin tehdyn 40 % vesipitoisuuden sideaineista ja nyt tehtyjen 27,5 %:n sideaineista välillä (kuva 7 ja 8) havaittiin vesipitoisuuden pienentämisen nostavan puristuslujuutta kahdessa näytesarjassa. Näytteissä, jotka sisälsivät lentotuhkaa, sementtiä ja masuunikuonaa, puristuslujuus kasvoi 14 vuorokauden iässä 27,2 %, kun vesipitoisuus pienentyi 40 %:sta 27,5 %:iin ja 28 vuorokauden iässä 19,8 % vesipitoisuuden pienetyessä. Näytteissä, jotka sisälsivät lentotuhkaa ja sementtiä, puristuslujuus kasvoi vesipitoisuuden pienentyessä 14 vuorokauden iässä 19 %:iin ja 28 vuorokauden iässä 28,4 %:iin. Näytteissä, jotka sisälsivät lentotuhkaa ja masuunikuonaa, vesipitoisuuden pieneneminen heikensi puristuslujuuden kehittymistä 14 vuorokauden iässä 69,6 % ja 28 vuorokauden iässä 35,4 %.



Erä	Seos	Suhde (%)	Vesi m. (%)	Lujuus 14 vrk. (MPa)
1	Le-(Mak-S)	50-(70-30)	27,5	43,0
			40	33,8
2	Le-S	(50:50)	27,5	42,5
			40	35,7
3	Le-Mak	(50:50)	27,5	4,5
			40	14,8

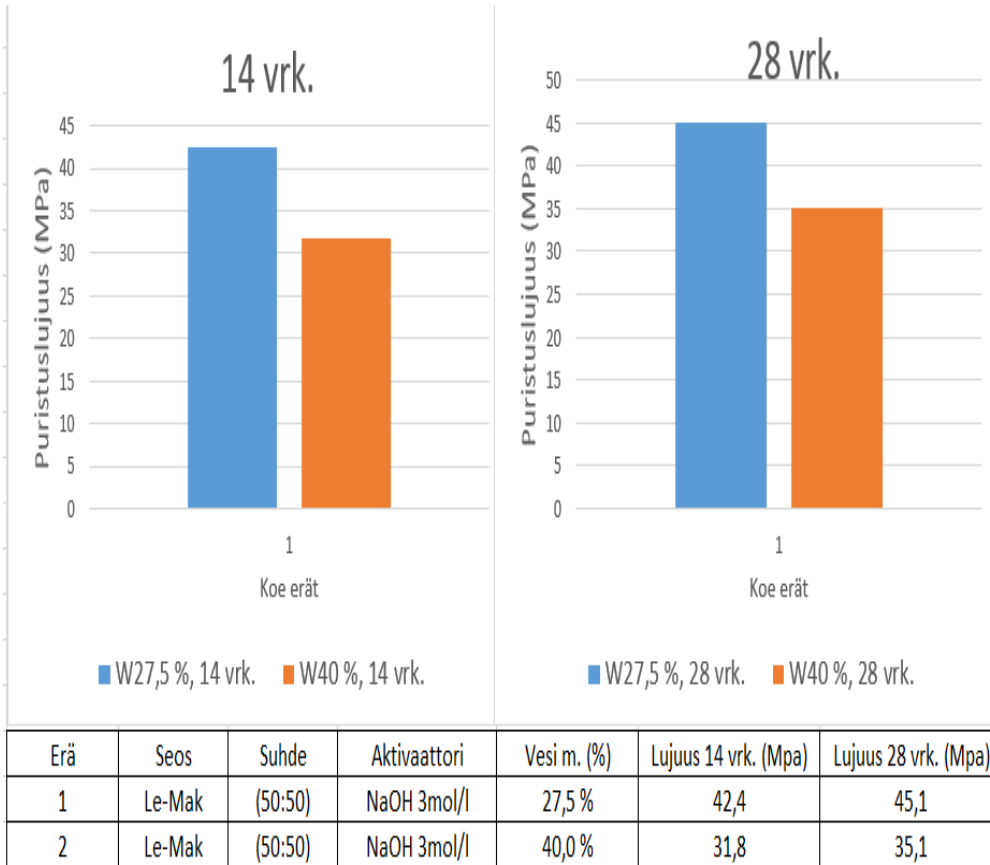
KUVA 7. Vertailu puristuslujuuden kehittymisestä 14 vrk:n ikään eri tuhkaerillä



Erä	Seos	Suhde (%)	Vesi m. (%)	Lujuus 28 vrk. (MPa)
1	Le-(Mak-S)	50-(70-30)	27,5	52,0
			40	43,4
2	Le-S	(50:50)	27,5	56,0
			40	43,6
3	Le-Mak	(50:50)	27,5	16,8
			40	26,0

KUVA 8. Vertailu puristuslujuuden kehittymisestä 28 vrk:n ikään eri tuhkaerillä

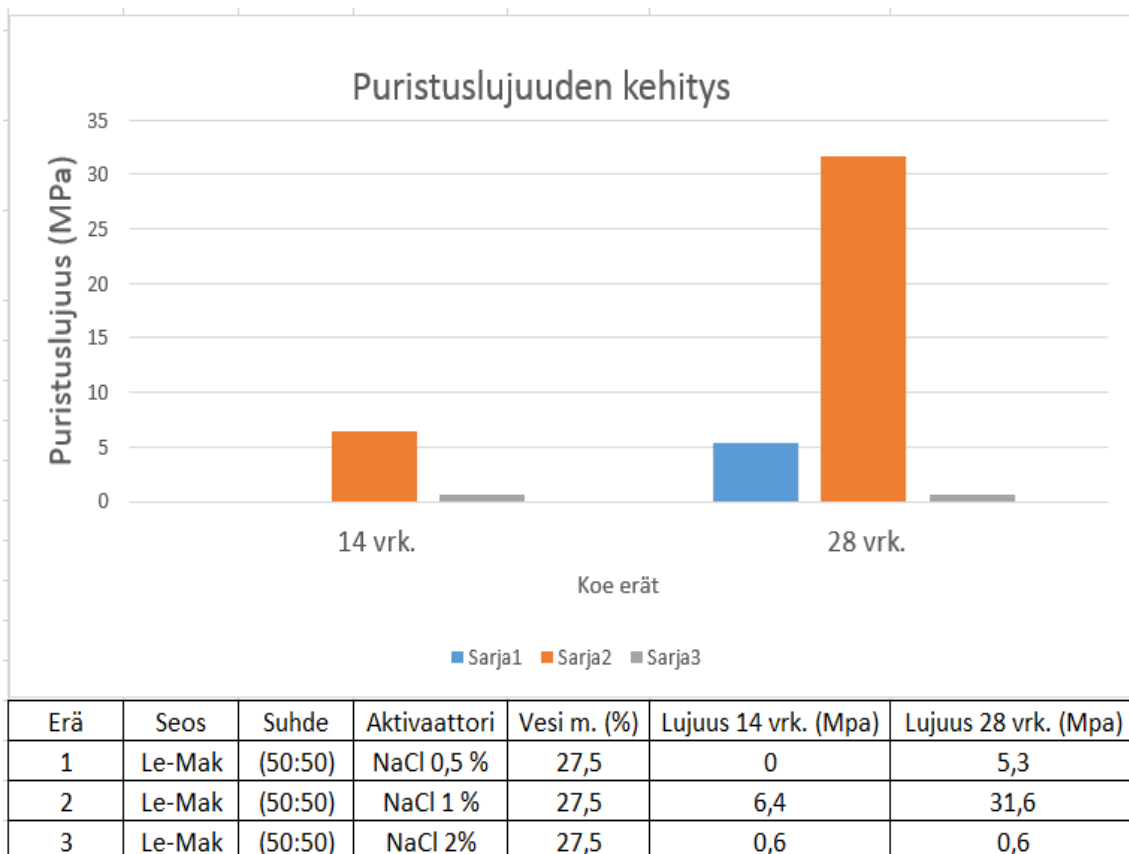
Natriumhydroksidin vaikutusta puristuslujuuden kehittymiseen verrattiin aiemmin tehtyyn koe-erään (kuva 9). Vesipitoisuuden pienentyessä 12,5 %:lla puristuslujuus kasvoi 14 vuorokauden iässä 33 % ja 28 vuorokauden iässä 28,5 %.



KUVA 9. Natriumhydroksidin vaikutus puristuslujuuteen eri tuhkaerillä

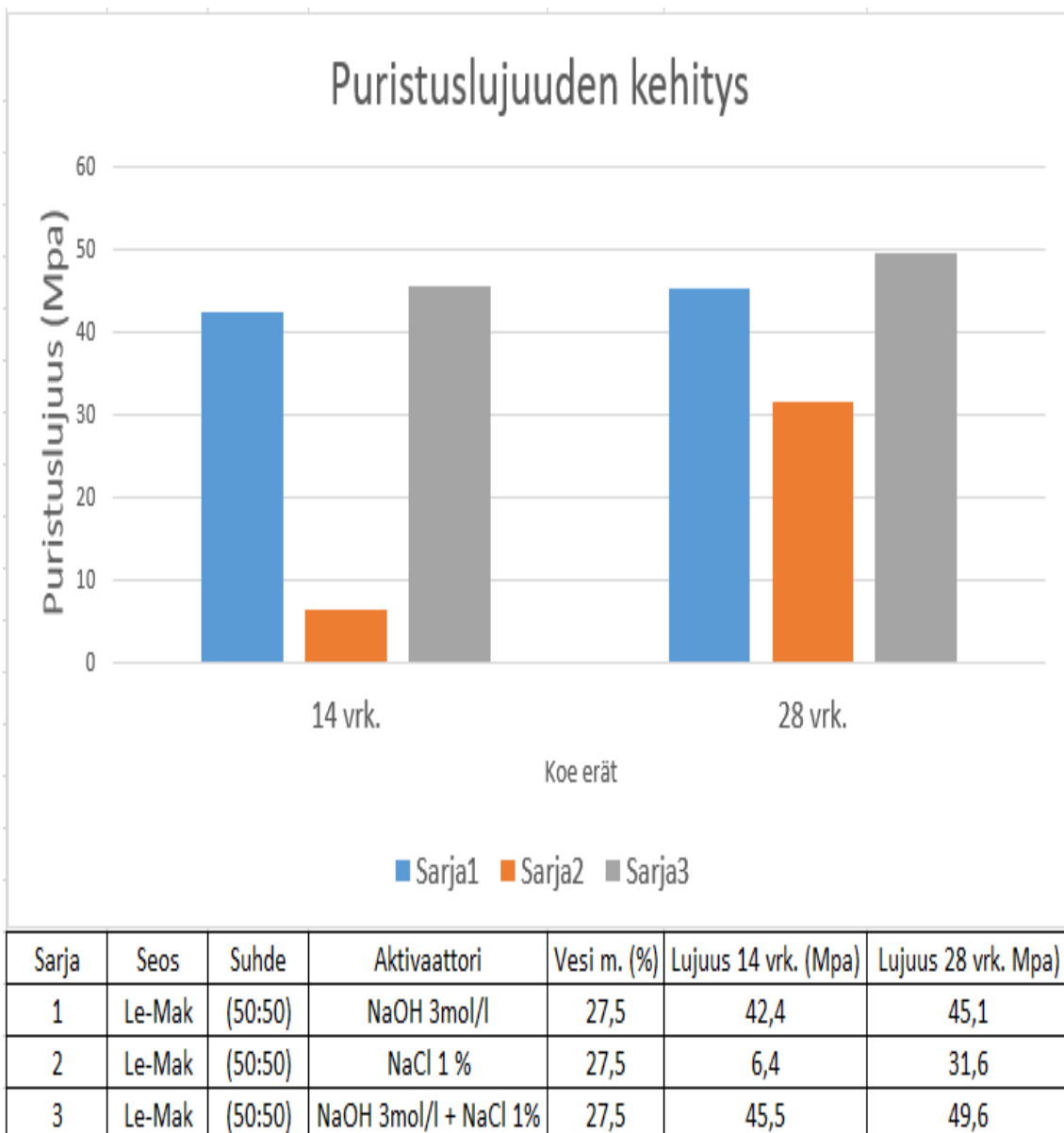
Natriumkloridin vaikutusta puristuslujuuden kehittymiseen vertailtiin tekemällä kolmella eri natriumkloridikonsentraatiolla lentotuhkan ja masuunikuonan sideaineseos. Vertailtavat konsentraatiot olivat 0,5 %, 1 % ja 2 %:n natriumkloridipitoisuudet.

Natriumkloridia sisältävien näytteiden muotista purkaminen oli hankalaa, koska näytekappaleet olivat tarttuneet tiukasti muotteihin kiinni. Muotinpurun yhteydessä koekappaleet lohkeilivat ja halkeilivat, tästä syystä puristuslujuus tuloksissa on tulkinnan varaa. Muotien purkuhuolista huolimatta 1 %:n natriumkloridikoncentraatio osoittautui selvästi muita paremmaksi (kuva 10). Kalsiumkloridin vaikutus pieninä pitoisuuksina on todettu toimivan jopa hidasteena betonin puristuslujuuden kehittymisessä. Sama vaikutus oli tulosten perusteella myös natriumkloridilla. Myös liian suuri natriumkloridipitoisuus heikentää tai jopa pysäyttää puristuslujuuden kehittymisen.



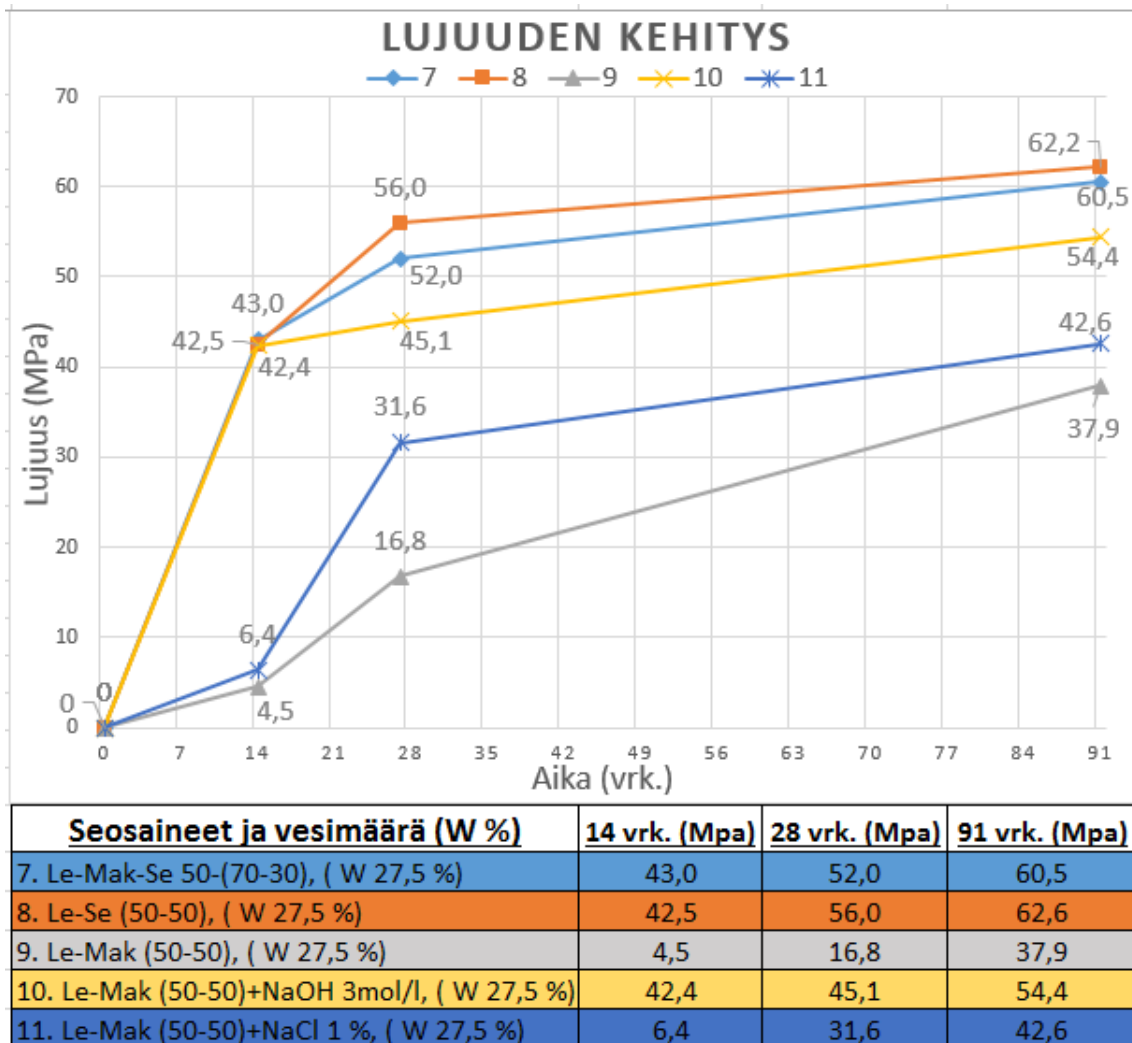
KUVA 10. Natriumkloridipitoisuuden vaikutus puristuslujuuden kehittymiseen 14 ja 28 vuorokauden iässä

Natriumhydroksidin ja natriumkloridin yhteisvaikutus aktivaattoreina puristuslujuuden kehittymiseen testattiin valitsemalla parhaan puristuslujuuden saavuttanut 1 %:n natriumkloridikonsentraatio ja 3 mol/l:n natriumhydroksidi. Aktivaattoreiden yhteisvaikutuksella puristuslujuuden kehitys kasvoi pelkkään natriumhydroksidiin nähden 14 vuorokauden iässä 7,3 % ja 28 vuorokauden iässä 10,0 % (kuva 11). Natriumkloridi paransi betonimaasan työstettävyyttä hieman verrattuna pelkkään natriumhydroksidin käyttöön, mistä johtui lievä parannus tuloksissa.



KUVA 11. Natriumhydroksidin ja natriumkloridin vaikutus yhdessä ja erikseen puristuslujuuteen 14 ja 28 vuorokauden iässä

Puristuslujuuden kehittymisen 91 vuorokauden aikana oli tämän opinnäytetyön suorittamisen yksi tarkoitus. Pozzolaanisten sideaineiden kovettumisaika on pitempi kuin 28 vuorokautta, mitä käytetään sementin loppulujuuden mittaamisessa. Kuvassa 12 on esitetty viiden eri opinnäytetyötä varten valmistetun sideaineseoksen puristuslujuuden kehittyminen 14, 28 ja 91 vuorokauden iässä.



KUVA 12. Puristuslujuuden kehittyminen 91:n vuorokauden ikään asti eri sideaineseoksilla

Neljäntoista vuorokauden iässä lähimmäksi loppulujuuttaan kehittyi lentotuhkaa, masuunikuonaa ja natriumhydroksidia 3mol/l:ssa sisältänyt näyte 78,0 % loppulujuudesta. Vähiten puristuslujuudesta oli kehittynyt lentotuhkaa, masuunikuonaa ja natriumkloridia sisältävään näytteeseen 15,0 % loppulujuudesta.

Puristuslujuuden kehittyminen 28 vuorokaudesta 91 vuorokauteen oli pienintä sementin toimiessa yksin sideaineena 10,0 % loppulujuudesta. Suurin puristuslujuuden kehitys on masuunikuonan toimiessa sideaineena 55,7 % loppulujuudesta. Masuunikuonan ja sementin toimiessa yhdessä sideaineena suhteessa (70–30) kehitys on 14,0 %. Natriumhydroksidia 3mol/l:ssa sisältäneen näytteen puristuslujuus kasvoi 17,1 %, ja natriumkloridia 1 % kuiva-aineesta sisältäneen näytteen 25,8 %:n loppulujuudesta.

7 YHTEENVETO

Laanilan Voiman voimalaitoksessa polttoprosessin yhteydessä syntyy lentotuhkan, joka sisältää ajoittain lievästi kohonneita määriä haitta-aineita. Opinnäytetyössä tutkittiin mahdollisuutta stabiloida syntynyt lentotuhka teollisuuden sivutuotteen masuunikuonajauheen avulla betoniin. Stabiloinnin onnistumista mitattiin betonin puristuslujuuden kehittymisen avulla. Mittaustulosten perusteena käytettiin aikaisemmin tehtyjä tuloksia, jotka toimivat vertailukohtina lentotuhkan laadun vaihtelulle. Aikaisemmista tuloksista poiketen tässä työssä mitattiin puristuslujuuden kehittymistä 91 vuorokauden ikään asti.

Työssä käytetty lentotuhkaerän veden tarve osoittautui 12,5 % pienemmäksi kuin aikaisemmin tehdyssä vertailuerässä. Veden tarpeen vähentymistä selittää lentotuhkan hehkutushäviön pienempi määrä. Hehkutushäviön vertaaminen edelliseen lentotuhka erään ei ollut mahdollista, koska siitä ei tehty mittausta. Veden tarpeen pienentyminen paransi betonin loppulujuutta lähes kaikilla tehdyillä sideaineseoksilla, ainoastaan lentotuhkan ja masuunikuonan seoksella loppulujuus pieneni. Natriumhydroksidin käyttäminen aktivaattorina aiheutti nopean puristuslujuuden kehittymisen ilman sementin vaikutusta. Vertailuerään nähden loppulujuus kasvoi 10 MPa, mikä selittyy vesipitoisuuden pienenemisellä. Natriumkloridin vaikutus jäi tulkinnanvaraiseksi muotipurkuongelmien vuoksi.

Tämän työ perusteella lisätutkimuksia kannattaisi jatkaa masuunikuonan, lentotuhkan ja natriumhydroksidin muodostamalla sideaineseoksella. Natriumhydroksidin ja veden määrän optimoinnilla voitaisiin saavuttaa parempi loppulujuus sementtiin nähden. Ongelmana on stabiloitavan lentotuhkan laadunvaihtelusta johtuva vedentarpeen vaihtelu.

Ekologisesta ja taloudellisesta näkökulmasta haitta-aineita sisältävän lentotuhkan stabilointi teollisuuden sivutuotteen avulla on mahdollista. Stabiloinnin onnistumisen tulisi lentotuhkan hehkutushäviötä tutkia otantamittauksilla. Tämän työn perusteella veden tarve vaihtelee aika paljon tuhkaerien kesken.

LÄHTEET

1. BY 201: Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y.
2. SFS-EN 197-1. 2012 Sementti. Osa 1:Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. 2004. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS r.y.
3. Notkistavat lisäaineet. 2009. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/lisaaineet/notkistimet>. Hakupäivä 23.1.2015.
4. Huokostavat lisäaineet. 2009. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/lisaaineet/huokostimet>. Hakupäivä 25.1.2015.
5. BY 50:Betininormit. 2004. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y.
6. Sementin korvike on ekokeksintö. Saatavissa: <http://www.savonsanomati.fi/uutiset/talous/sementin-korvike-on-ekokeksinto>. Hakupäivä 28.1.2015.
7. Tuhkarakentamisen käsikirja.2012. Ramboll Finland Oy. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf. Hakupäivä 9.2.2015.
8. BY 52: Lentotuhkan käyttö betonissa. 2008. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y.
9. Masuunikuonajauhe KJ 400. 2009. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/seosaineet-ja-silikajauheet/masuunikuonajauhe-kj400>. Hakupäivä 11.2.2015.
10. Rabidsementti. 2009. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/sementit/rapidsementti>. Hakupäivä 2.3.2015.

Koe erät	Suhde	W (%)	Aktiivaattori	Leviämä	Massatheyys7 vrk	Massatheyys 14vrk	Massatheyys 28vrk	Massatheyys 91vrk	Puristuslujuus 7vrk	Puristuslujuus 14vrk	Puristuslujuus 28vrk	Puristuslujuus 91vrk	Vesipitoisuus mitattu (%)
1 Le-Mak	(1:1)	40 %		22,1 mm			1926,5kg/m ³	1886,6kg/m ³			Ei lujuutta	23,6/22,7MPa	40,27 %
2 Le-Mak	(1:1)	30 %		17,4 mm			1987,2kg/m ³	1976,2kg/m ³			1,2/0,9MPa	15,5/22,2MPa	
3 Le-Mak	(1:1)	25 %		11 mm	1978,3kg/m ³		1971,6kg/m ³	1948,8kg/m ³	0,8MPa/0,8MPa		25,0/24,4MPa	35,9/36,9MPa	28,74 %
4 Le-Mak	(1:1)	22,25 %		Ei saatu									21,21 %
5 Le-Se	(1:1)	25 %		22,0mm		1985,4kg/m ³	1981,1kg/m ³	1937,9kg/m ³		14,0/21,4MPa	15,8/13,6MPa	12,5/15,0MPa	20,86 %
6 Le-Mak-Se	50-(70-30)	30 %		14,6mm		1959,3kg/m ³	1970,1kg/m ³	1955,1kg/m ³		36,8/39,0MPa	46,6/53,2MPa	60,6/51,6MPa	28,36 %
7 Le-Mak-Se	50-(70-30)	27,5 %		12,1mm		1981,3kg/m ³	1992,0kg/m ³	1982,9kg/m ³		42,4/43,6MPa	45,1/58,8MPa	62,9/58,0MPa	27,09 %
8 Le-Se	(1:1)	27,5 %		10,3mm		1983,4kg/m ³	1995,4kg/m ³	1986,3kg/m ³		45,6/39,3MPa	57,2/54,8MPa	60,3/64,0MPa	26,39 %
9 Le-Mak	(1:1)	27,5 %		12,9mm		1975,6kg/m ³	1952,2kg/m ³	1962,8kg/m ³		5,1/3,9MPa	18,2/15,3MPa	41,0/34,7MPa	27,98 %
10 Le-Mak	(1:1)	27,5 %	NaOH 3mol/l	10,2mm		2039,2kg/m ³	2030,0kg/m ³	2030,1kg/m ³		46,1/38,7MPa	46,7/43,4MPa	54,7/54,1MPa	17,53 %
11 Le-Mak	(1:1)	27,5 %	NaCl 1%	14,0mm		1989,0kg/m ³	1992,2kg/m ³	1991,7kg/m ³		9,1/3,6MPa	31,6MPa	42,6MPa	25,53 %
12 Le-Mak	(1:1)	27,5 %	NaCl 0,5%	10,6mm			1906,2kg/m ³			Ei lujuutta	7,2/3,4MPa		27,35 %
13 Le-Mak	(1:1)	27,5 %	NaCl 2 %	9,9mm		2044,9kg/m ³	2029,5kg/m ³			0,6/0,6MPa	0,7/0,5MPa		25,45 %
14 Le-Mak	(1:1)	27,5 %	NaOH 3mol/l/+ NaCl 1 %	9,8mm	2056,3kg/m ³	2034,5kg/m ³	2034,7kg/m ³		30,8/28,4MPa	44,2/46,6MPa	47,6/51,5MPa		24,53 %