

Opinnäytetyö (AMK)

Kemiantekniikka

2025

Juuso Hukkila

Sivuvirtojen karakterisointi sideaineisiin ja runkoaineisiin



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Kemiantekniikka

2025 | 50 sivua

Juuso Hukkila

Sivuvirtojen karakterisointi sideaineisiin ja runkoaineisiin

Saint-Gobain Finland Oy valmistaa ja kehittää Weber-laasteja.

Laasteissa käytettävä sementti synnyttää merkittäviä hiilidioksidipäästöjä, joiden vähentämiseksi etsitään vaihtoehtoisia sideaineita. Mahdollisia vaihtoehtoisia sideaineita syntyy muilla teollisuuden aloilla, kuten metalli- ja energiateollisuudessa.

Laasteissa runkoaineena käytettävä hiekka ei ole uusiutuva luonnonvara, ja sen rajallisuus on toinen alan tulevaisuuden ongelmista. Hiekan ja muiden runkoaineiden korvaamiseksi pyritään käyttämään inerttejä sivuvirtoja.

Tämän työn tavoitteena oli luoda koesarja sivuvirtojen testaamiseen. Testit toteutettiin Weberin Paraisilla sijaitsevan tuotekehitysyksikön laitteistoilla.

Koesarjan perusteella aineet onnistuttiin jaottelemaan kovettumisreaktiotyyppin mukaan hydraulisiksi, pozzolaanisiksi tai, mikäli kyseessä oli reagoimaton aine, inerteiksi materiaaleiksi. Reagoivat aineet määriteltiin sideaineiksi ja inertit runkoaineiksi.

Lisäksi saatiin ohjeistus näytekokoihin sekä menetelmä sideaineen reaktiokinetiikan arviointiin, erityisesti kalsiumhydroksidin muodostumisen osalta.

Asiasanat:

sivuvirta, sementti, hydrataatio, pozzolaani

Turun AMK:n opinnäytetyö | Juuso Hukkila

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Chemical Engineering

2025 | pages

Juuso Hukkila

Characterization of side streams for binders and fillers

Saint-Gobain Finland Oy manufactures and develops Weber mortars. The cement used in mortars generates significant carbon dioxide emissions. Alternative binders are being sought to reduce CO₂ emissions. Possible alternatives are created as waste in industries such as the metal and energy industry.

The sand aggregate in mortar is not a renewable natural resource, which is a second problem facing the industry. The aim is to use inert side streams from various industries to replace sand. In the test series, substances found to be inert are tested as potential aggregates.

The purpose of this thesis was to develop a series of experiments for testing side streams with the equipment of SG Finland's Weber R&D unit in Parainen.

Based on the tests, the materials were categorized according to their reactivity type into hydraulic, pozzolanic, or if the material has no reactivity, inert materials. The reactive materials were categorized as binders and inert materials as aggregates.

Furthermore, guidelines for sample sizes were obtained, along with a method for assessing the reaction kinetics of the binder, particularly regarding the formation of calcium hydroxide.

Keywords:

sidestream, cement, hydration, pozzolana

Sisällys

1 Johdanto	9
2 Teoria ja tausta	11
2.1 Sementtikemian merkintäjärjestelmä	11
2.2 Sementti	12
2.3 Vaihtoehtoiset sideaineet	14
2.4 Laasteissa käytettävät runkoaineet	15
2.5 Hydrataation reaktiot	15
2.6 Pozzolaaniset reaktiot	17
3 Sivuvirroista kerätyt näytteet	19
4 Raejakauma ja näytteenkäsittely	20
4.1 Näytteen jauhaminen ja seulonta	21
5 Fysikaalisten ominaisuuksien mittaus	22
5.1 Partikkelikoko ja raejakauma Camsizerilla	23
5.2 Ominaisihteys pyknometrillä	25
5.3 Ominaispinta-ala Blaine-laitteella	26
5.4 Kosteusprosentti termovaa'alla	27
6 Kemiallisten ominaisuuksien mittaus	29
6.1 pH-mittaus	29
6.2 Kloridipitoisuus kloridianalysaattorilla	30
7 Reaktiivisuus ja lujuusominaisuuksien mittaus	31
7.1 Kovettumisen seuranta ultraäänimittaimella	32
7.2 Puristus -ja taivutuslujuus puristimella	35
7.3 Hehkutushäviö korkealämpöuunilla	40
8 Mittausepävarmuus	46
9 Tulosten yhteenveto	47

10 Johtopäätökset ja jatkoideoita	49
11 Lähdeluettelo	51

Kuvat

Kuva 1 Sementin valmistusprosessi	12
Kuva 2 Näytteet	19
Kuva 3 Näytteenkäsittelyn toimintakaavio.....	21
Kuva 4 Kuulamyly Retch PM 100.....	21
Kuva 5 Testimenetelmien toimintakaavio.....	22
Kuva 6 Retch Camsizer XT dynaaminen kuva-analysilaitteisto.....	24
Kuva 7 Pyknometrin mittausvaiheet.....	25
Kuva 8 Termovaaka.....	28
Kuva 9 IP-8 ultraäänimittalaitteiston muotit, lähettimet sekä vastaanottimet.....	32
Kuva 10 Hydraulisuusmittausten ultraäänikuvaaja.....	33
Kuva 11 Pozzolaanisuusmittausten ultraäänikuvaaja	34
Kuva 12 Form+Test lujuuspuristin	35
Kuva 13 Hydrataation taivutuslujuustuloksia.....	36
Kuva 14 Pozzolaanisuusustestien taivutuslujuuksia	37
Kuva 15 Hydrataatiotestien puristuslujuuksia	38
Kuva 16 Pozzolaanisuusustestien puristuslujuuksia.....	39
Kuva 17 Korkealämpöuuni.....	40
Kuva 18 Hydraulisuusustestien termograviatuloksia.....	41
Kuva 19 Pozzolaanisuusustestien termograviatuloksia	42
Kuva 20 Hydraulisuusustestien termograviatuloksia.....	43
Kuva 21 Pozzolaanisuusustestien termogravimetrituloksia	44
Kuva 22 Reaktiivisuusustestien toimintakaavio	47

Taulukot

Taulukko 2 Sementin yhdisteiden nimeäminen (Nawy, 2008 s. 5)	13
Taulukko 3 Sementin ja veden reaktiotuotteiden nimeäminen (Nawy, 2008 s. 5)	13
Taulukko 4 Sementin yhdisteiden nimeäminen (Nawy, 2008 s. 5)	16
Taulukko 5 Sivuvirtojen alkuperä	19
Taulukko 6 Raejakauman 10 %, 50 % ja 90 %:n läpäisevyyksien seulankoot	21
Taulukko 7 Raejakaumamittaukset.	24
Taulukko 8 Näytteiden ominaistiheydet	26
Taulukko 9 Näytteiden ominaispinta-alat	27
Taulukko 10 Näytteiden kosteusprosentit.	28
Taulukko 11 pH-tulokset	29
Taulukko 12 Kloridipitoisuuksien rajat	30
Taulukko 13 Näytteiden kloridipitoisuudet	30

Sanasto

Betoni	Betoni koostuu sementistä, karkeasta ja hienosta kiviaineesta sekä yleensä myös raudoituksesta. Kiviaines sitoutuu lujaksi, kantavaksi materiaaliksi veden ja sementin sitomisreaktiossa, jota kutsutaan hydrataatioksi.
Hydrataatio	Veden ja sementin reagoivien faasien reaktioiden sarja. Sementtihiukkasessa olevat yhdisteet muodostavat sitovia reaktiotuotteita veden kanssa. Tätä kemiallisten reaktioiden aiheuttamaa fysikaalista muutosta kutsutaan kovettumiseksi. Hydrataatiossa sementtihiukkasten pinnoilla käynnistyvät kemialliset reaktiot, jolloin muodostuu sementtigeeliksi (C-S-H -geeli) kutsuttava massa, joka sitoo hydratoituneet sementtihiukkaset kiinni toisiinsa ja betonin kiviainekseen. Sementin mineraalien ominaisuudet ja määrät vaikuttavat hydrataation nopeuteen ja lujuuskehitykseen. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2022)
Laasti	Laasti koostuu sideaineesta sekä erityyppisistä runkoaineista, kuten kalkkivijauheesta ja hiekoista käyttötarkoituksen mukaan. Laasteja käytetään tasoittamaan pintoja ja kiinnittämään esimerkiksi laattoja. Sideaineena voidaan käyttää useita eri materiaaliyhdistelmiä, mutta yleisimpiä ovat sementin ja kipsin sekoitukset.
Pozzolaani	Pozzolaaniset materiaalit sitoutuvat ja kovettuvat vain veden ja liukoisen kalsiumhydroksidin läsnäollessa. Kalsiumhydroksidia muodostuu portlandsementin hydratoitumisen aikana. Reaktiossa syntyy reaktiotuotteita, jotka ovat kemialliselta koostumukseltaan ja lujuusominaisuuksiltaan samanlaisia kuin hydraulisilla materiaaleilla, kuten sementillä. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2022)

Runkoaine	Yleisnimi inerteille aineosille kuten hiekka, kivimurske tai kalkkikivi. Hienojakoisista runkoaineista käytetään myös nimitystä filleri.
Sementti	Sementti on jauhemainen hydraulinen sideaine, joka reagoi veden kanssa ja kovettuu lujaksi ja kestäväksi lopputuotteeksi. Sementtiä käytetään pääasiassa betoneissa ja laasteissa, joissa se sitoo runkoaineet toisiinsa.
Sementtiklinkkeri	Sementin valmistuksessa syntyvä välituote, josta jauhamalla saadaan sementtiä
Sideaine	Materiaali, joka veden kanssa reagoidessaan sitoo runkoaineita kiinni toisiinsa. Laasti ja betonituotteissa yleisin sideaine on sementti. Muita sideaineita ovat erilaiset kipsin ja erilaatuisten sementtien sekoitukset.

1 Johdanto

Sementtiä käytetään sideaineena laastin ja betonin valmistuksessa. Sementin valmistusprosessi aiheuttaa merkittävän osan maailman hiilidioksidipäästöistä.

Eri teollisuuden aloilta syntyy sivuvirtoina suuri määrä kemialliselta koostumukseltaan sideaineeksi sopivaa materiaalia, joka tällä hetkellä saattaa olla läjitettynä tai mennä maanrakennuksen täyttöaineeksi. Sementti ja vaihtoehtoiset sideaineet tuottavat samoja liimaavia reaktiotuotteita, mutta usein eri suhteessa.

Veden ja sideaineen reaktiot sitovat hiilidioksidia ilmasta, jolloin päästökuorma pienenee. Hiilidioksidin sitominen ei kuitenkaan määrältään vastaa sementin valmistusprosessissa vapautuneen CO₂:n määrää. Sivuvirtojen käyttö vähentää sementin tarvetta, jolloin hiilidioksidin päästötarve pienenee. Sivuvirtojen käyttö vähentää myös jätteen määrää, sillä teollisuudessa syntynyt jäte muuttuu raaka-aineeksi.

Työssä luotiin testisarja, jolla määritetään sivuvirran ominaisuuksia, joiden perusteella näyte jaoteltiin joko sideaineeksi, runkoaineeksi, molemmiksi tai hylättiin laasteihin käyttökelvottomana.

Testisarjan tarkoituksena oli käyttää yrityksen nykyistä laitteistoa sivuvirran karakterisoimiseen. Työn ohessa kartoitettiin mahdollisia laitehankintoja tarkempia analyyseja varten.

Sideaineet määritellään kahden yleisimmän reaktiotyyppin, hydrataatio- ja pozzolaanisen reaktion pohjalta. Työssä hydrauliseksi määritellään aine, joka reagoi veden kanssa muodostaen sitovia reaktiotuotteita. Pozzolaaniseksi määritellään aine, joka tarvitsee veden lisäksi kalsiumhydroksidia muodostaakseen sitovia reaktiotuotteita. Inertiksi materiaali määritellään, jos aine ei reagoi eikä liukene veteen sekoitettuna. Neljäntenä luokkana voidaan pitää ainetta, joka osoittaa sekä hydraulisia että pozzolaanisia ominaisuuksia.

Sideaineen reaktiivisuuteen sekä runkoaineen käytettävyyteen vaikuttaa aineen fysikaaliset ominaisuudet, joita mitattiin tässä työssä usealla eri menetelmällä. Reaktiivisuuteen vaikuttavia merkittäviä fysikaalisia ominaisuuksia ovat mm. raekoko, kosteus, ominaispinta-ala ja tiheys. Runkoaineissa merkittävänä tekijöinä ovat mm. raekoko, tiheys ja muoto.

Työ toimii toteuttamiskelpoisuus selvityksenä sivuvirtojen käsittelyyn tarkoitetulle testisarjalle. Testit tehtiin laastituotteille optimaalisissa laboratorio-olosuhteissa 23 °C:ssa ja rH 50 kosteudessa. Mikäli reaktiot eivät synny näissä olosuhteissa, eivät ne ennusta hyvää soveltuvuutta laastiin.

Työssä tehtiin fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien mittaukset kahdelletoista eri sivuvirroista saadulle näytteelle. Aikataulusyistä näistä valittiin kolme näytettä ja referenssinä toiminut sementti reaktiivisuustesteihin.

2 Teoria ja tausta

Tässä osiossa käsitellään sementin, vaihtoehtoisten sideaineiden ja runkoaineen perusominaisuudet ja nimetään reaktiotyypit, jonka jälkeen selitetään reaktiotyyppien perusominaisuudet.

2.1 Sementtikemian merkintäjärjestelmä

Sementti koostuu useista kemiallisista yhdisteistä ja sen koostumus vaihtelee. Siksi sementtiä käsittelevällä kemian alalla on kehitetty lyhennejärjestelmä kuvaamaan yleisimpiä yhdisteitä ja reaktioita. Sementtikemian notaatiossa aineet esitetään pääkomponenttien mukaan lyhenteinä. Taulukossa 1 on esimerkki lyhenteistä, joita tässä työssä käytetään. Myöhemmin reaktiivisuutta käsittelevässä osiossa käytetään lyhenteitä sementin reaktiivisista faaseista sekä reaktiotuotteista.

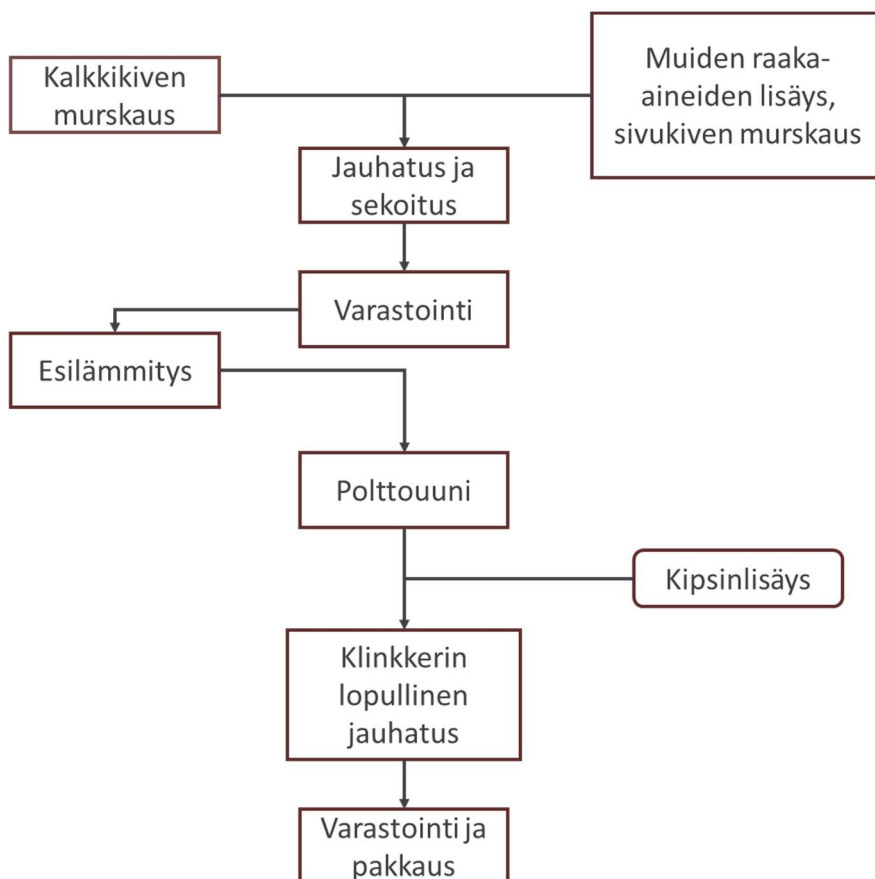
Taulukko 1 Sementtikemiassa käytettävien yhdisteiden nimiä (Nawy, 2008 s. 5)

Oksidi	Sementtikemian notaatio	Yleisnimi	Tyypillinen massaprosentti tavallisessa sementissä
CaO	C	Kalkki	63
SiO ₂	S	Piidioksidi	22
Al ₂ O ₃	A	Alumiinioksidi	6
Fe ₂ O ₃	F	Rauta(III)oksidi	2,5
MgO	M	Magnesiumoksidi	2,5
K ₂ O	K	Kaliumoksidi	0,6
Na ₂ O	N	Natriumoksidi	0,4
SO ₃	S	Rikkiatrioksidi	2,02
CO ₂	C	Hiilidioksidi	—
H ₂ O	H	Vesi	—

2.2 Sementti

Sementin pääraaka-aine on kalkkikivestä saatava kalsiumkarbonaatti (CaCO_3), johon lisätään sivukivestä saatavaa piidioksidia (SiO_2), rautaoksidia (Fe_2O_3) ja alumiinioksidia (Al_2O_3). Kuvassa 1 esitellään sementin valmistusprosessi.

Sementin valmistuksessa seos jauhetaan hienoksi raakajauhatusmyllyssä, minkä jälkeen se poltetaan noin 100 metriä pitkässä kiertouunissa nostaan lämpötilaa yli $1400\text{ }^\circ\text{C}$:seen. Jauheseoksesta muodostuu sementtiklinkkeriä, joka uunin jälkeen jäähdetään nopeasti noin $200\text{ }^\circ\text{C}$:seen. Polttoprosessissa syntyy noin 700 kg hiilidioksidia klinkkeritonniä kohden. (Betoni-Lehti, 2025)



Kuva 1 Sementin valmistusprosessi

Karkeaan klinkkeriin lisätään kipsiä, joka säätelee tulevan sementin sitomisaikaa. Klinkkeri, kipsi ja mahdolliset seosaineet, kalkkikivi tai vaihtoehtoiset sideaineet, jauhetaan kuulamylyssä hienoksi jauheeksi.

Seosaineilla ja jauhatushienoudella vaikutetaan sementin ominaisuuksiin, joita vaihdellaan tarpeen mukaan (Finnsementti, 2024).

Valmiin sementin tärkeimmät kemialliset yhdisteet ovat aliitti, beliitti, trikalsiumaluminaatti ja tetrakalsium alumiiniferriitti. Yhdisteet vaihtelevat koostumukseltaan ja niistä käytetään sementtikemiassa lyhenteitä reaktioyhtälöiden selventämiseksi. Yhdisteiden lyhenteet ovat esitettyinä taulukoissa 2 ja 3.

Taulukko 1 Sementin yhdisteiden nimeäminen (Nawy, 2008 s. 5)

Sementtifaasin kemiallinen kaava	Sementtikemian notaatio	Kutsumanimi
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	Aliitti
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	Beliitti
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Trikalsiumaluminaatti
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{F}_2\text{O}_3$	C_4AF	Tetrakalsium alumiiniferriitti, Ferriitti

Taulukko 2 Sementin ja veden reaktiotuotteiden nimeäminen (Nawy, 2008 s. 5)

Reaktiotuotteen kemiallinen kaava	Sementtikemian notaatio	Kutsumanimi
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CH	Kalsiumhydroksidi
$\text{C}_3\text{S}_3\text{H}_{32}$	CSH	Kalsiumsilikaattihydraatti, CSH
$\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$	AFt	Ettringiitti
$\text{C}_6(\text{A},\text{F})\text{S}_3\text{H}_{32}$	AFm	Monosulfaatti

Veden ja sementin keskinäisiä reaktioita kutsutaan hydrataatioksi, jossa vesi ja sementtifaasit reagoivat keskenään synnyttäen sitovia reaktiotuotteita.

- Aliitti (C_3S) muodostaa kalsiumsilikaattihydraattia ja kalsiumhydroksidia (CSH+CH).
- Beliitti (C_2S) muodostaa myös kalsiumsilikaattihydraattia ja kalsiumhydroksidia (CSH+CH), mutta huomattavasti hitaammin.
- Trikalsiumaluminaatti (C_3A) muodostaa ettringiittiä (AFt)

- Ferriitti (C₄AF) muodostaa monosulfaattia ja kalsiumhydroksidia (AFm+CH) (Penn State College of Engineering, 1999) (SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2012 s. 9)

Sementin ja veden hydrataatioreaktiosta kerrotaan tarkemmin kohdassa 2.5.

2.3 Vaihtoehtoiset sideaineet

Sivuvirtoina saatavat vaihtoehtoiset sideaineet syntyvät samankaltaisista raaka-aineista kuin sementti, mutta uunissa polttamisen sijasta lämpökäsittely tapahtuu teollisuudessa tai luonnossa. Metalliteollisuudessa sulan raudan puhdistuksessa käytettävä kalkkikivi ja lisäaineet kuumenevat samoihin lämpötiloihin kuin sementtiuunissa, jolloin syntyy sementinkaltaisia yhdisteitä.

Luonnossa syntyy sideaineiksi sopivia aineita tulivuorenpurkauksissa, jossa kalkki ja piipitoista kiviainesta sulaa vuoren sisällä, kunnes se purkauksessa päätyy ilmaan ja lopulta maahan.

Lentotuhka, reaktiiviset kuonat tai vulkaaninen kivi ovat aineita, jotka kovettuvat sementin tavoin ja joilla voidaan korvata osa tai kaikki sementistä betonissa tai laastissa. Reaktiivisessa sivuvirrassa ei välttämättä ole kaikkia sementin yhdisteitä, jolloin se ei itsessään riitä sideaineeksi, mutta yhdessä muiden aineiden kanssa siitä voidaan valmistaa toimiva sideainepaketti.

Suurin osa tutkimuksesta on tehty betonissa käytettävistä vaihtoehtoisista sideaineista, jolloin lujuustarve on yleensä laasteja suurempi. Tällöin vain osa tavallisesta sementistä voidaan korvata vaihtoehtoisella reagoivalla materiaalilla.

Korvattavan sementin määrään vaikuttavat vaihtoehtoisen sideaineen aiheuttamat lujuudenkehitys ja työstettävyyssominaisuuksien muutokset sekä korvaavan aineen kemiallinen koostumus.

Esimerkki kemiallisen koostumuksen aiheuttamista riskeistä on korkea sulfaatti- tai kloridipitoisuus. Nämä voivat aiheuttaa betonissa raudoituksen

heikkenemistä tai betonin paisumista ajan mittaan. Laasteissa ei välttämättä tarvita yhtä suuria lujuuksia eikä raudoituksia yleensä käytetä. Tämä mahdollistaa suuremman vaihtoehtoisen sideaineen korvausprosentin laasteissa betoniin verrattuna.

Vaihtoehtoisia sideaineita on monentyyppisiä ja niissä löytyy sekä hydraulisia, että pozzolaanisia aineita, vaikka pozzolaaniset aineet ovat yleisemmin käytettyjä. Pozzolaanisesta reaktiosta kerrotaan tarkemmin kohdassa 2.6.

2.4 Laasteissa käytettävät runkoaineet

Laastin tai betonin lujuus luodaan sideaineen ja runkoaineen yhdistelmällä. Runkoaine on liukenematonta ja reagoimatonta ainesta, joka on kestävä eikä hajoa helposti puristuksissa. Erityyppisillä runkoaineilla on eri tehtävät.

Suuret partikkelit luovat laastin lujuuden yhdessä niitä paikallaan pitävän sideaineen kanssa. Hienot partikkelit kasvattavat koko matriisin tiheyttä, jolloin sideaineen määrä voidaan optimoida. Runkoaineilla säädellään myös tuotteen työstettävyyssominaisuuksia. Runkoainevalinnoilla tuotetaan eri laastien ominaisuudet. Esimerkiksi seinille laitettavat rappauslaastit sisältävät suurempia kivipartikkeleita visuaalisista syistä, kun taas lattialle asennettavat lattialaastit vaativat kestävä, tiheän laastin, joilla saadaan lattioiden pinnat tasaiseksi ennen päällystämistä parketilla tai muovimatolla. Näin ollen lattialaastilla tulee olla tasaisempi raejakauma kuin rappauslaasteilla.

Laastin runkoaineet eivät saa sisältää reagoivaa materiaalia, joka saattaa aiheuttaa pitkällä aikavälillä halkeilua ja laastin heikkenemistä tai esimerkiksi värimuutoksia.

2.5 Hydrataation reaktiot

Sementin eri yhdisteet muodostavat veden kanssa hydrataatioreaktiossa osittain samoja reaktiotuotteita. Tärkein lujuutta tuova reaktiotuote on CSH-geeli, jota syntyy sekä aliitin että belitiin hydrataatiossa. Kummankin reaktion

ohessa syntyy myös kalsiumhydroksidia, CH, johon lisäämällä pozzolaanista materiaalia saadaan aikaan lisää CSH-geeliä pozzolaanisessa reaktiossa. Seuraavaksi käsitellään sideaineiden tärkeimpien kemiallisten yhdisteiden reaktioita hydrataatiossa ja pozzolaanisessa-reaktiossa.

Taulukko 3 Sementin yhdisteiden nimeäminen (Nawy, 2008 s. 5)

Sementtifaasin kemiallinen kaava	Sementtikemian notaatio	Kutsumanimi
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	Aliitti
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	Beliitti
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Trikalsiumaluminaatti
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{F}_2\text{O}_3$	C_4AF	Tetrakalsium alumiiniferriitti, ferriitti
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CH	Kalsiumhydroksidi

Aliitin, C_3S , hydrataatio

Sementin suurin ja tärkein faasi on aliitti. Kun aliitti tulee veden kanssa kosketuksiin, alkaa muodostua kalsiumhydroksidia sekä CSH-geeliä, jonka reaktiota kuvataan sementtikemian notaatiolla kaavassa 1.



CSH:n kaava on epästoikiometrinen, eli sen yhdisteiden suhde toisiinsa on vaihteleva. CSH on tärkein lujuttakehittävä reaktiotuote. CSH-reaktio hidastuu edetessään, sillä saatavilla oleva vesi vähenee kilpailevien reaktioiden edetessä.

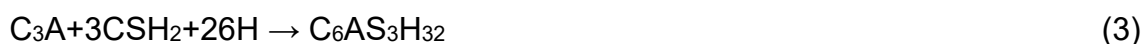
Beliitin, C_2S , hydrataatio

Beliitti reagoi hitaasti veden kanssa muodostaen lisää CSH-geeliä ja kalsiumhydroksidia, CH. Beliitti muodostaa CSH:ta noin 20 kertaa hitaammin kuin aliitti. Epästoikiometristä reaktioita kuvataan sementtikemian notaatiolla kaavassa 2.



Trikalsiumaluminaatin, C_3A , hydrataatio

Portland-sementtiin lisätään jauhatusvaiheessa pieni määrä (noin 5 %) kipsiä säätelemään sementin reaktioita. Trikalsiumalumiinaatti, C_3A , reagoi sementissä olevan kipsin kanssa ja muodostaa ettringiittiä, joka peittää C_3A partikkelien pinnan ja näin estää veden pääsyn partikkeliin. Näin C_3A reaktio veden kanssa hidastuu. Kun ettringiitti on kuluttanut kaiken kipsin, yhdistyy se C_3A :n kanssa muodostaen pysyvän monosulfoalumiinaattifaasin. Tätä kuvataan sementtikemian notaatiolla kaavoissa 3 ja 4



Ilman kipsiä C_3A reagoisi erittäin nopeasti veden kanssa muodostaen rakenteeltaan monosulfoalumiinaatin kaltaisia epästabiileja kristallifaaseja, jotka myöhemmin muuttuvat hydrogarnet faasiksi. Tämä aiheuttaa sementin välittömän kovettumisen, mikä on epätoivottavaa. C_3A säädellään sementin asettumista, mutta se ei vaikuta suurissa määrin tuotteen loppulujuuteen (Nawy, 2008 s. 6).

Ferriitin, C_4AF , hydraatio

Tetrakalsium alumiiniferriitti, C_4AF , reagoi veden ja kipsin kanssa samalla tavalla kuin C_3A , mutta sen reaktionopeus on pienempi, joten se ei yleensä aiheuta välitöntä asettumista. Tätä kuvataan sementtikemian notaatiolla kaavassa 5.



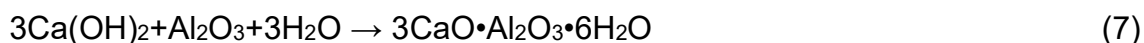
C_4AF edesauttaa muiden faasien kehittymistä sementtiklinkkerin valmistuksessa, mutta sillä ei ole merkittävää roolia veden kanssa tapahtuvissa reaktioissa. (Day;ym., 2014 s. 11)

2.6 Pozzolaaniset reaktiot

Pozzolaaninen reaktio tapahtuu veden, piidioksidin (SiO_2) ja alumiinioksidin (Al_2O_3) sekä kalsiumhydroksidin ($Ca(OH)_2$) kanssa, jolloin muodostuu CSH:ta ja

kalsiumaluminaattihydraatti CAH:ta. Tällä on positiivista vaikutusta sideaineeseen, sillä se vähentää haitallista kalsiumhydroksidia sekä lisää lujuutta kehittävää CSH:ta. Pozzolaanisessa reaktiossa syntyy samaa CSH reaktiotuotetta kuin hydrataatiossa, mutta huomattavasti hitaammin.

Pozzolaanista reaktiota kuvataan tavallisella kemian reaktiolla kaavoissa 6 ja 7.



Pozzolaanisen reaktiota voidaan seurata mittaamalla syntyneen kalsiumhydroksidin määrää tuotteessa esimerkiksi termogravimetrisellä analyysilaitteistolla (TGA). Tämän opinnäytetyön kohdassa 7.3 tehtiin yksinkertaistettu termogravimetrinen analyysi termovaakaa ja korkealämpöuunia käyttäen. Kalsiumhydroksidi hajoaa noin 550 °C:ssa, jolloin tässä lämpötilassa mitattu painonhäviö kuvastaa kalsiumhydroksidin määrää. Analyysissa mitataan sementtihydraatiossa syntyvän kalsiumhydroksidin määrää eri raaka-ainesuhteuksilla (Effect of treated and untreated rice husk ash, palm oil fuel ash, and microstructure characteristics of blended concrete - A comprehensive review, 2023 s. 3).

3 Sivuvirroista kerätyt näytteet

Työssä testattiin kahtatoista sivuvirtaa eri teollisuuden aloilta. Referenssinä toimii Schwenk CEM I 52,5 N Portland sementti. Salassapitovelvollisuuden takia näytteiden tarkempia tietoja ei voida opinnäytetyössä paljastaa.

Fysikaalisten ja kemiallisten testien jälkeen valittiin kolme sivuvirtaa reaktiivisuustestejä varten. Ultraäänimittaimessa oli käytettävissä neljä mittapäätä ja yksi pozzolaanisuustesti kesti viikon.



Kuva 2 Näytteet

Taulukko 4 Sivuvirtojen alkuperä

Sivuvirran alkuperä	Näytteentunnus
Metalliteollisuus	A, G, H, I, J, K, L
Energiateollisuus	B
Rakennusteollisuus	C, D, F
Lasiteollisuus	E
Referenssi	Schwenk CEM I 52,5 N

4 Raejakauma ja näytteenkäsittely

Jauhemaiset materiaalit koostuvat partikkeleista, joiden koko ja muoto vaihtelevat. Raejakauma kertoo aineen eri partikkelikokojen suhteen koko näytteessä. Kun laastiin halutaan vaihtaa raaka-ainetta, tulee tietää uuden aineen raejakauma, jotta se voidaan suhteuttaa tuotteeseen.

Laasteissa ja betoneissa käytettävät eri kokoiset runkoaineet suhteutetaan niin, että tuotteen tavoitellut ominaisuudet saavutetaan mahdollisimman pienellä sideainemäärällä. Hienot partikkelit täyttävät isojen partikkelien jättämät välit mikä kasvattaa tuotteen tiheyttä ja näin lujuutta.

Jos tuotteessa käytettäisiin vain yhden kokoisia suuria tai keskisuuria partikkeleita, täytyisivät partikkelien jättämät välit sideaineella, mikä voi altistaa suuremmille fysikaalisille muutoksille kuten kutistumiselle tai sideaineen ylikulutukselle. Lujuuden tulisi perustua runkoaineiden lujuuteen, jota sideaine pitää paikallaan.

Reaktiivisten aineiden partikkelikoko tulee tietää, koska mitä hienompi partikkeli on, sitä nopeammin aine liukenee ja reagoi veden kanssa. Tämä johtuu siitä, että mitä pienempi partikkeli on, sitä suurempi osuus siitä on suoraan kosketuksissa veden kanssa. Suuren partikkelin sisällä oleva, ei veden kanssa kosketuksissa oleva massa, on suhteessa suurempi kuin pienen partikkelin tapauksessa. Tämä korostuu reaktioissa, joissa on rajallinen määrä vettä käytettävissä kuten sideaineen tapauksessa yleensä on.

Hieno partikkelijakauma tarkoittaa suurta reagoivaa pinta-alaa, sillä samoilla massoilla hienoja ja karkeita partikkeleita on eri pinta-alat, koska suurempi osa massasta jää isomman partikkelin sisään kuin pienen. Näin ollen samassa massassa on suurempi kappalemäärä pieniä partikkeleita kuin vastaavassa massassa suuria partikkeleita.

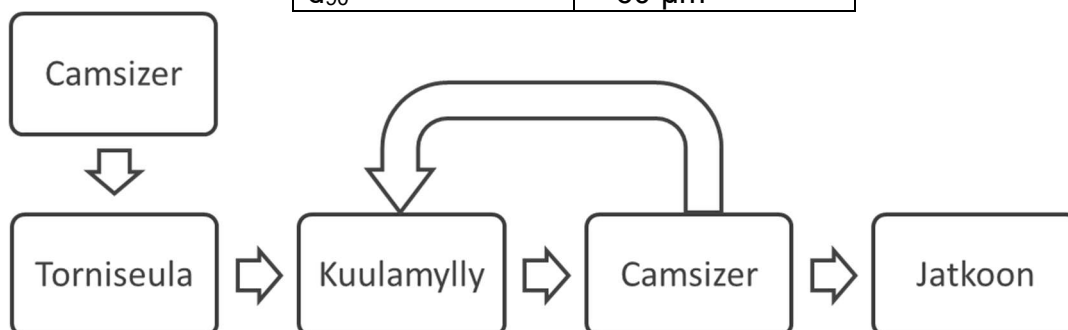
4.1 Näytteen jauhaminen ja seulonta

Sideaineen partikkelikoolla on suuri vaikutus sen reaktiivisuuteen, minkä takia näytteet täytyi jauhaa samaan partikkelikokoon kuin referenssisementti.

Raejakauman läpäisyprosenttien arvot asetettiin taulukon 5 mukaisesti.

Taulukko 5 Raejakauman 10 %, 50 % ja 90 %:n läpäisevyyksien seulankoot

d ₁₀	< 10 µm
d ₅₀	< 20 µm
d ₉₀	< 60 µm



Kuva 3 Näytteenkäsittelyn toimintakaavio

Jauhamisen helppouteen vaikuttaa näytteen koko, kovuus, kosteus ja määrä. Näytteen määrä pidettiin pienenä, koska muutoin se liimaantui kammion seiniin ja pohjaan pinnoitteeksi.

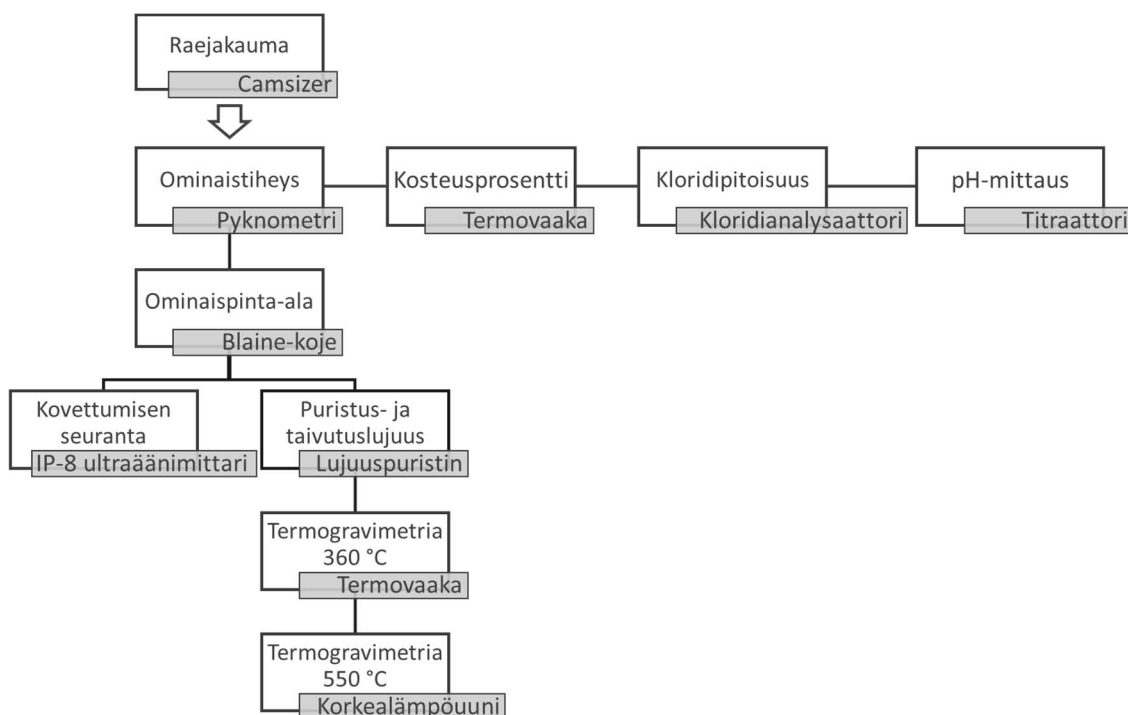


Kuva 4 Kuulamyly Retch PM 100

Jauhamista nopeutettiin seulomalla näyte ensin 125 µm:n seulan läpi Fritsch analysette 4 pro torniseulalla. Näytteet jauhettiin tarvittaessa kuvan 4 Retch PM100 kuulamylyllä käyttäen 200 kpl 15 mm rautakuulia ja 500 ml:n jauhatustastia.

5 Fysikaalisten ominaisuuksien mittaus

Esikäsitteilyn jälkeen näytteet mitattiin kuvassa 5 esiintyvän testisarjan mukaan. Ensin tehtiin fysikaaliset ja kemialliset testit, jotka koostuivat, ominaistiheyden, kosteusprosentin, kloridipitoisuuden, pH:n sekä ominaispinta-alan mittaamisesta. Tämän jälkeen jokaisesta näytteestä valmistettiin testituotteet, joiden kovettumis- ja lujuuskehitysominaisuudet mitattiin. Lopuksi mitattiin reaktiotuotteiden määrää termogravimetrisesti.



Kuva 5 Testimenetelmien toimintakaavio

5.1 Partikkelikoko ja raejakauma Camsizerilla

Kun halutaan tarkkaa tietoa koko näytteen raejakaumasta, käytetään menetelmiä kuten laser difraktiometri, röntgen diffraktometri tai dynaaminen kuva-analyysi. Tämän projektin näytteet mitattiin Camsizer XT Dynaamisella kuva-analyysilaitteistolla. Laitteisto koostuu kahdesta toisiinsa nähden kulmassa olevasta kamerasta sekä niiden välistä kulkevasta näytevirrasta. Näyte tiputetaan kameroiden välistä, jolloin ilmanvastus hajottaa näytteen samalla kun kamerat ottavat jatkuvaa kuvaa läpi kulkevasta näytevirrasta. Laitteisto laskee jokaisen partikkelin koon kahden kameran kuvan perusteella.

Kun kyseessä on helposti aglomeroituva aine, käytetään näytteensyöttömenetelmää X-jet. Tässä näyte puhalletaan paineilmalla kameroiden välistä ja kamerat laskevat hajonneen aglomeraatin partikkelien koot. Tulokset voidaan jaotella jopa kolmeensataan jakeeseen tarpeen mukaan. Laitte laskee myös automaattisesti d_{10} -, d_{50} - sekä d_{90} -arvot.

Camsizerilla mitatun raejakauman suhteutusta varten täytyy tietää aineen ominaistiheys, sillä laitteisto mittaa tilavuutta eikä massaa ja annostus tapahtuu massan perusteella. Kuvassa 6 on partikkelikokoa mittaava Camsizer-laitteisto ja taulukossa 7 on raejakaumamittausten tulokset.

Laitetta käytetään myös runkoaineiden muodon määrittämiseen. Runkoaineiden hiukkasten pyöreys tai kulmikkuus vaikuttaa tuotteen leviävyyteen, työstettävyyteen ja lujuuteen.

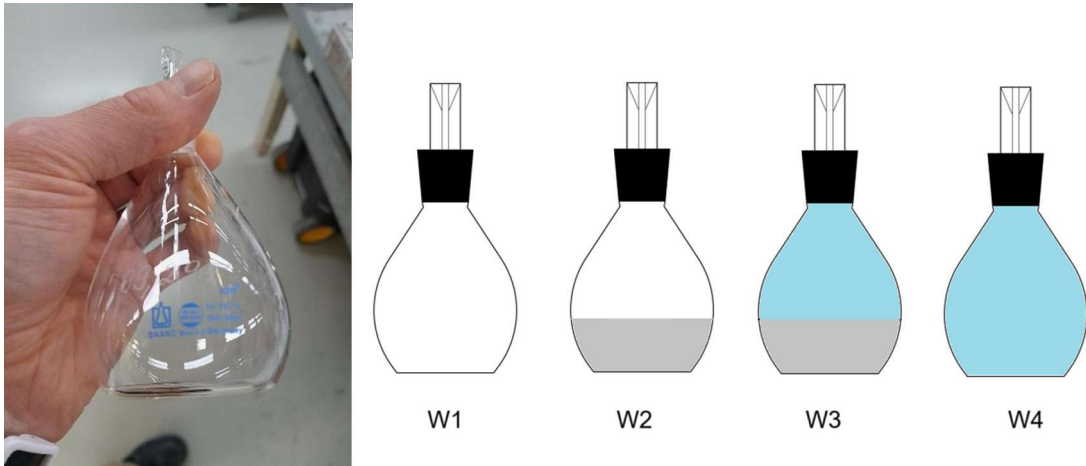


Kuva 6 Retch Camsizer XT dynaaminen kuva-analysilaitteisto

Taulukko 6 Raejakaumamittaukset. Raejakaumatulosten perusteella C,D, F ja J näytteet tulisi jauhaa ennen reaktiivisuusanalyysiä.

Camsizer PSD	d10 (µm)	d50 (µm)	d90 (µm)
A	6,99	15,57	41,36
B	7,66	17,65	43,73
C	21,19	272	696,37
D	12,23	192,1	435,03
E	6,8	16,54	51,71
F	21,11	126,48	582,48
G	6,96	18,83	51,94
H	6,85	16,66	51,79
I	6,77	15,55	58,7
J	7,84	21,72	81,64
K	6,49	12,36	29,81
SCHWENK 52,5 R	6,79	14,93	31,81
Tavoiterajat	<10	<20	<60

5.2 Ominaisstiheys pyknometrillä



Kuva 7 Pyknometrin mittaussivaiheet

Ominaisstiheys mitataan pyknometrillä kaavan 8 mukaan. Kuvassa 7 on mittauksessa käytetyn pyknometrin eri täyttövaiheet. Työssä käytettiin 50 ml:n sertifioitua lasipyknometriä. Pyknometrin nesteenä käytettiin etanolia, jotta sementti ei liukene nesteeseen kesken mittauksen. Käytetyn etanolin tiheys on $0,79 \text{ kg/dm}^3$.

$$\frac{W2 - W1}{(W2 - W1) - (W3 - W4)} * 0,79 \#(8)$$

Jossa

W1 = Tyhjän pyknometrin massa

W2 = Pyknometrin ja näytteen massa

W3 = Pyknometrin, näytteen ja etanolin massa

W4 = Pyknometrin ja etanolin massa

Camsizer mittaa raejakaumaa tilavuuden perusteella. Kun aineen tiheys lisätään tilavuuteen, saadaan tilavuuspaino ja voidaan sovittaa uusia raaka-

aineita helposti tuotteen raejakaumaan. Taulukkoon 8 on koottuna suoritettujen ominaisuustiheysmittausten tulokset.

Vaihtoehtoiset side- ja runkoaineet ovat myös fysikaalisilta ominaisuuksiltaan erilaisia verrattuna käytössä oleviin aineisiin. Niiden tiheys voi olla eri luokkaa, jolloin suhteutuksessa käytettävä massaprosentti tulee huomioida. Mikäli tuotteen suhteutuksessa käytetään suoraan samaa massaprosenttia, kun referenssihiekkä on esimerkiksi $2,7 \text{ t/m}^3$ ja korvaava betonimurske on $2,3 \text{ t/m}^3$, tulee betonimurskepartikkeleita noin 17 % enemmän kuin mitä aiemmassa tuotteessa on ollut. Tämä vaikuttaa tuotteen ominaisuuksiin merkittävästi, ja mikäli tätä ei ole huomioitu voi näyte vaikuttaa tuotteeseen sopimattomalta ja aiheuttaa turhan hylkäyksen

Taulukko 7 Näytteiden ominaistiheydet

Ominastiheys pyknometrillä (g/cm³)	
A	2,68
B	2,54
C	2,27
D	2,67
E	2,18
F	2,44
G	2,52
H	3,30
I	2,87
J	2,86
K	2,75
SCHWENK 52,5 R	3,06

5.3 Ominaispinta-ala Blaine-laitteella

Näytteen hienoutta mitataan Blaine-laitteella. Menetelmässä tarkka määrä ilmaa ohjataan putkessa olevan näytepatsaan läpi ja mitataan aikaa, joka kuluu siihen, että koko ilmamäärä on kulkenut näytteen läpi. Standardiolosuhteissa näytteen ominaispinta-ala on suhteellinen ajan neliön kanssa. Näytepatsaassa olevien huokosten määrä ja koko riippuu näytteen raejakaumasta. Menetelmä toimii toistettavana testinä samalla laitteella. Kalibrointi suoritetaan

standardijauheilla, joilla on tarkkaan määritellyt hienoudet ja ominaispinta-ala. (SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2019 s. 6) Taulukkoon 9 on koottuna näytteiden ominaispinta-alat.

Taulukko 8 Näytteiden ominaispinta-alat

	Tulos (cm ² /g.)	Keskihajonta	Mittausaika (s)	Huokoisuus- arvo	Tiheys (g/cm ³)
A	2995	0,09	83	0,5	2,68
B	5381	0,08	93,7	0,595	2,54
C	928	0	20,5	0,378	2,27
D	1838	0,15	87,4	0,4	2,67
E	3086	0,07	58,4	0,5	2,18
F	824	0	21,4	0,366	2,44
G	9262	0,21	696	0,501	2,52
H	-	-	-	-	-
I	1655	0,22	18,3	0,547	2,87
J	1068	0	11,9	0,501	2,86
K	1665	0,22	16	0,553	2,75
SCHWENK 52,5 R	4609	0,09	206,1	0,522	3,06

5.4 Kosteusprosentti termovaa'alla

Termovaa'alla mitattiin näytteiden kosteus kahdessa lämpötilassa. 10 g näytettä levitettiin termovaa'alle ja mittaus käynnistettiin kääntämällä kuvassa 8:n oikealla näkyvän, alemman lämpötila-asetuksen lamppu sen päälle. Mittaus päättyi, kun näytteen painonhäviämä alitti 8 mg/20 s. Tämän jälkeen näytteen päälle siirrettiin korkeamman lämpötilan lamppu ja mittaus suoritettiin uudelleen.

Näytteen pintakosteus poistuu 105 °C:n lämpötilassa. Näytteen kiderakenteeseen kiinnittynyt vesi poistetaan 360 °C:ssa. Korkea kosteusprosentti laskee aineen reaktiivisuutta. Taulukkoon 10 on koottuna näytteiden kosteusprosentit.



Kuva 8 Termovaaka

Taulukko 9 Näytteiden kosteusprosentit. Näytteen G kohdalla käytettävissä oleva näytteen määrä oli liian pieni mittauksen suorittamiseen.

Kosteusprosentti termovaa'alla	näyte m T1 (g)	105 °C kosteus %	Näyte m T2 (g)	360 °C kosteus %
A	10,346	0,15	10,348	1,2
B	10,264	0,33	10,243	0,66
C	10,176	3,73	9,827	1,94
D	10,004	0,27	9,997	0,53
E	10,021	0,31	9,99	0,81
F	10,185	0,13	10,179	0,36
G	-	-	-	-
H	10,092	0,7	10,053	1,63
I	10,05	0,15	10,039	0,43
J	10,287	0,09	10,262	0,31
K	10,082	0,13	10,078	0,27
SCHWENK 52,5 R	10,121	0,32	10,099	0,96

6 Kemiallisten ominaisuuksien mittaus

6.1 pH-mittaus

Sementti on hyvin emäksinen materiaali, joten korkea pH voi viitata reaktiivisuuteen. Mikäli aineen pH on matala eli hapan, ei sitä voida käyttää yleensä sideaineena tai runkoaineena.

Sementtituotteen kovettumisen jälkeen ajan mittaan hapan aine liuottaa sementtireaktiotuotteita ja näin heikentää laastia tai betonia. Betonissa käytettävä rauditus heikkenee, jos sementin pH on liian matala, jolloin koko rakenteen kantavuus kärsii. (Eurofins, luettu 2025) (Eurofins, 2023)

pH mitattiin standardin ohjeistuksen mukaan, jossa 5 grammaa näytettä mitataan 50 ml:ssa ionivaihdetua vettä. Taulukkoon 11 on koottuna mittausten tulokset.

Tässä työssä käytettiin Mettler Toledon 50 titraattoria ja DGi-anturia.

Taulukko 10 pH-tulokset

pH-titraattorilla	Näyte (g)	vesi (ml)	loppu pH
A	5	50	12,2
B	5	50	12,9
C	5	50	8,6
D	5	50	5,16
E	5	50	10,6
F	5	50	7,4
G	5	50	11,9
H	5	50	12,7
I	5	50	12,15
J	5	50	11,6
K	5	50	12,2
SCHWENK 52,5 R	5	50	12,7

6.2 Kloridipitoisuus kloridianalysaattorilla

Taulukko 11 Kloridipitoisuuksien rajat

Betonin käyttökohde	Kloridiluokka	Suurin sallittu kloridipitoisuus [paino-%] sideaineen määrästä
Raudoittamaton betonirakenne	CL 1,0	1
Raudoitettu betonirakenne tai muita metalliosia sisältävä betonirakenne	CL 0,2	0,2
Jännitetty betonirakenne	CL 0,2	0,2



Näytteen kloridipitoisuus tulee ottaa huomioon tuotteita suhteuttaessa, sillä kloridi aiheuttaa halkeilua ajan mittaan ja betoneissa käytettävän raudoituksen syöpymistä. Mikäli näytteen kloridipitoisuus on korkea, asettaa se rajan materiaalin käytettävään määrään. Pelkän sementin kloridipitoisuusraja on 0,1% standardin SFS 197-1 mukaisesti. Tuotteen muista ainesosista kertyvä kloridi ei saa ylittää tuotteelle käyttökohteen mukaan määrättyä arvoa. Taulukossa 12 on esimerkki betonille asetettavista arvoista käyttökohteen mukaan.

Näytteiden kloridipitoisuudet ovat taulukossa 13. Mittaus suoritettiin M926 kloridianalysaattorilla, joka perustuu hopeaionien kulometriseen titraukseen. (Sherwood Scientific, 2025). (Suomen Betoniyhdistys ry)

Taulukko 12 Näytteiden kloridipitoisuudet

Näyte	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	SCHWENK 52,5 R
Cl %	0,006	0,182	0,002	0,003	0,002	0,003	0,004	0,005	0,005	0,011	0,021	0,066

7 Reaktiivisuus ja lujuusominaisuuksien mittaus

Hydraulisuuden ja pozzolaanisuuden tutkimista varten tehtiin testisarjat molemmille ominaisuuksille. Hydraulisuustesteissä mitattiin pelkän sideaineen ja veden vuorovaikutusta. Pozzolaanisuustesteissä korvattiin osa referenssisementistä näytteellä, jotta sementin tuottama kalsiumhydroksidi reagoisi näytteen kanssa. Molemmissa sarjoissa mitattiin puristus- ja taivutuslujuudet, seurattiin kovettumista ultraäänimittauksella ja tutkittiin reaktiotuotteita termogravimetrinen menetelmien avulla.

Molemmissa testisarjoissa valmistetut prismat säilytettiin veteen upotettuna 23 °C:ssa standardin SFS-EN 196-1:2016 mukaisesti.

Hydraulinen testisarja:

Näytteet valmistettiin sekoittamalla 50 % näytettä, 50 % alle 0,3 mm hiekkaa. Vesisuhteena käytettiin 0,5 sideaine-vesi-suhdetta eli 25 % vettä. Sekoituksen massat olivat siten 500 g näytettä, 500 g hiekkaa ja 250 g vettä.

Pozzolana testisarja:

Pozzolaanisuustesteissä tehtiin sarja, jossa sementtiin lisättiin 15 % näytettä. Käytetty referenssi sisälsi 85 % sementtiä ja 15 % H80 kalkkikivijauhetta. Vesisuhteena käytettiin 0,5 sideaine-vesi-suhdetta. Sekoituksen massat olivat siten 425 g referenssisementtiä, 75 g näytettä, 500 g hiekkaa ja 250 g vettä.

Testeissä saavutettuja puristus- ja taivutuslujuuksia verrattiin referenssien tuloksiin. Mikäli hydraulisuussarjan näyte saavutti lujuutta, pääteltiin sillä olevan hydraulisia ominaisuuksia.

Jos pozzolaanitestisarjassa näytteen puristus- tai taivutuslujuus nousi verrattuna referenssiin, voitiin päätellä, että näytteessä oli pozzolaanisia ominaisuuksia.

Opinnäytetyössä esitellään vain kolmen näytteen ja referenssin puristuslujuusmittaukset, sillä kaikkien näytteiden mittaamiselle ei riittänyt aikaa. Loput mittaukset suoritetaan loppuun työn päätyttyä.

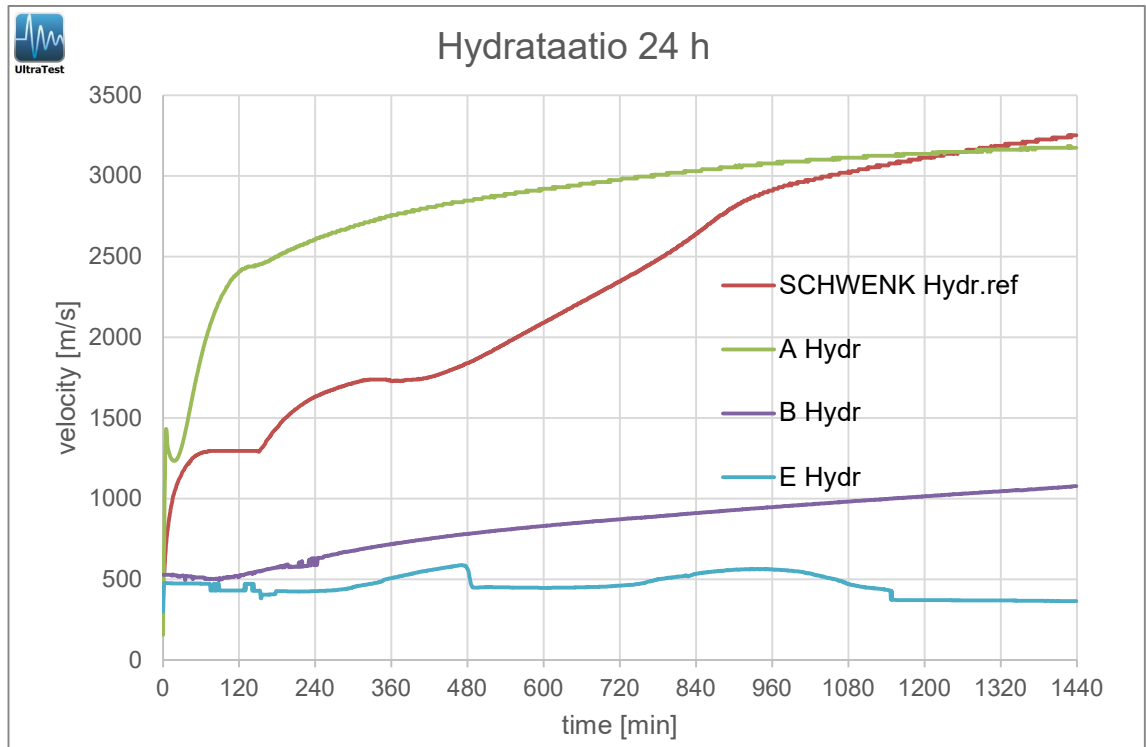
7.1 Kovettumisen seuranta ultraäänimittaimella

Ultraäänimittauslaitteisto Ultratest IP-8 mittaa laastin kovettumista lähettämällä ultraäänipulssin laastin läpi tasaisin väliajoin. Äänennopeus kasvaa laastin kovettuessa. Mittapisteistä muodostetaan kuvaaja. Mitä suurempi äänennopeus on, sitä suurempi on tuotteen lujuus. Tämä ei käy toteen joka tuotteen kohdalla, mutta voidaan pitää suuntaa antavana eri raaka-ainesekoituksia testattaessa.

Joidenkin raaka-aineiden fysikaaliset ominaisuudet, kuten tiheys tai hauraus, saattavat vaikuttaa loppulujuuteen

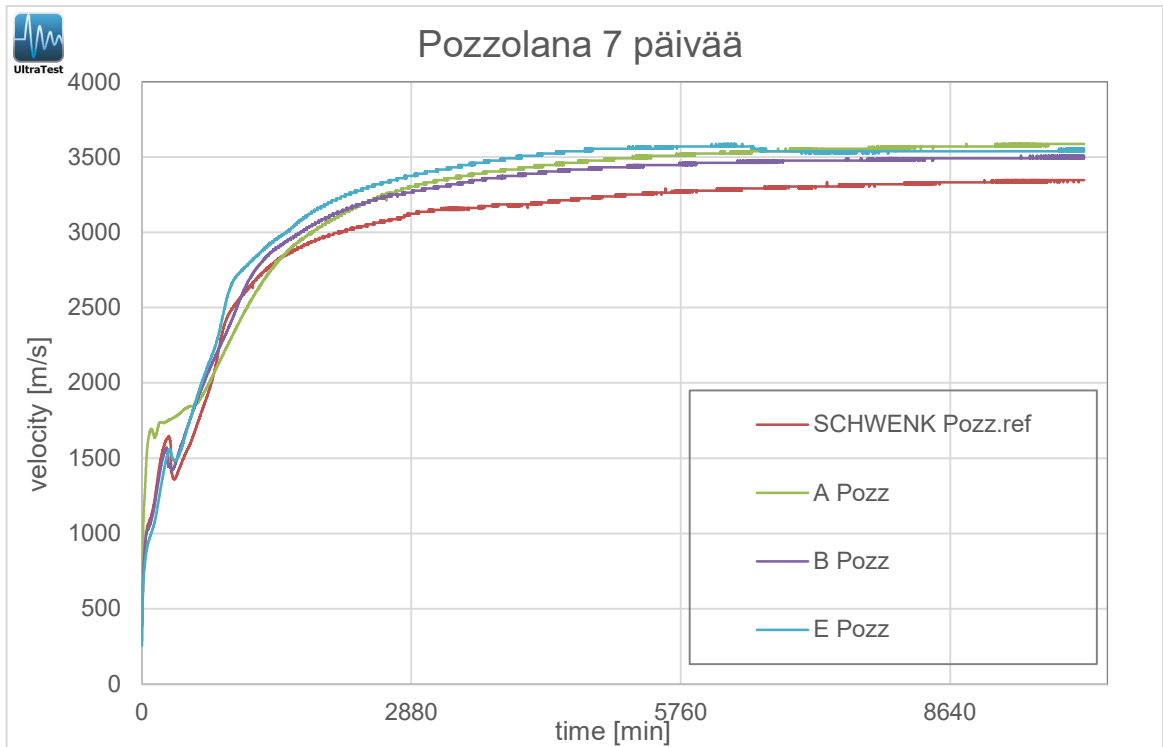


Kuva 9 IP-8 ultraäänimittalaitteiston muotit, lähettimet sekä vastaanottimet



Kuva 10 Hydraulisuusmittausten ultraäänikuvaaja

Hydrataatiotesteissä kovettumista seurattiin 24 tuntia. Kuvaajista selviää, että näyte A reagoi nopeasti jo ensimmäisen tunnin aikana ja saavuttaa merkittävää lujuutta jo muutamassa tunnissa. Referenssi Schwenk reagoi maltillisesti saavuttaen saman äänennopeuden A:n kanssa noin 1200 minuutin kohdalla. Näyte B:ssä näkyy loiva nousu, mutta perustaan laitteella aiemmin mitattuihin tuotteisiin, merkittävää lujuutta ei esiinny ennen 1800 m/s nopeutta. Täten B kyllä reagoi, mutta lujuutta ei juurikaan synny. E näytteen kohdalla nähdään pieniä ylöspäin meneviä notkahduksia, mutta käyrä laskee alkukohtaa alemmaksi. Näin ollen näytteessä E ei vaikuta olevan hydraulista reaktiivisuutta ensimmäisen 24 tunnin aikana.



Kuva 11 Pozzolaanisuuksmittausten ultraäänikuvaaja

Pozzolaanisuuksmittausten kovettumista seurattiin 7 päivän ajan, koska lujuus kehittyy hitaasti pozzolaanireaktiossa. Vaikuttaa siltä, että jokainen näyte nosti äänennopeutta tuotteessa. Näyte A reagoi kiivaimmin alussa, kun muut seurasivat referenssin käyrää. Referenssissä vaikuttaisi olevan heikoimmat lujuudet, sillä äänennopeus on siinä matalin 7 päivän jälkeen. Näin ollen tämän testi viittaa jokaisessa näytteessä olevan jonkinasteista pozzolaanista reaktiivisuutta.

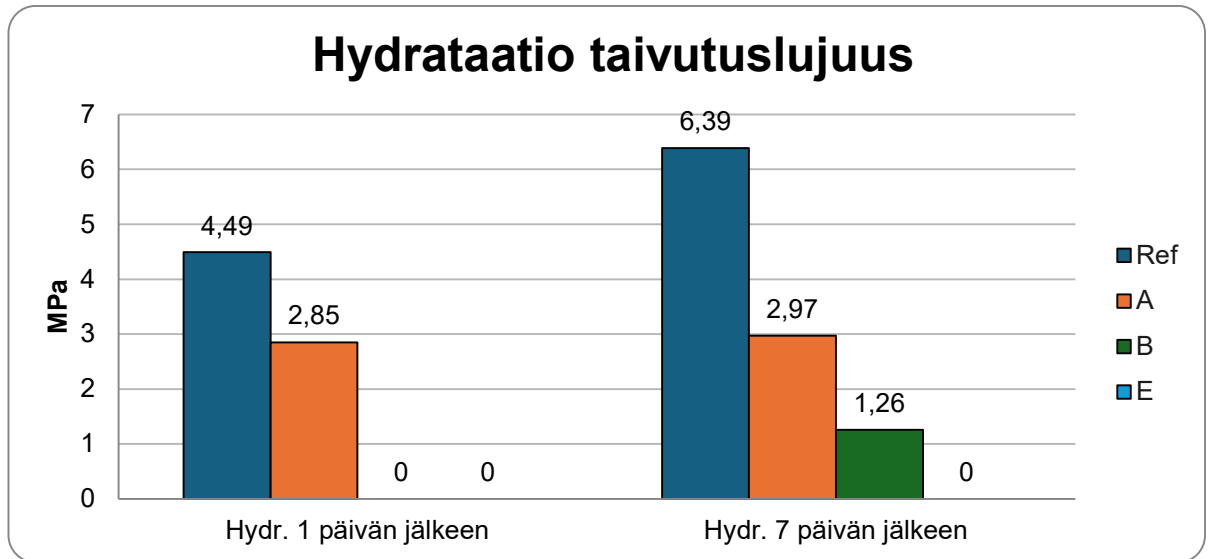
7.2 Puristus -ja taivutuslujuus puristimella



Kuva 12 Form+Test lujuuspuristin

Lujuustestejä varten pozzolana -ja hydraulisuussarjojen näytteistä valettiin 40×40×160 mm prismoja. Käytettävissä olevien näytemäärien takia hydraulisuusnäytteistä valettiin kaksi prismaa näytettä kohden ja pozzolana-sarjan näytteistä valettiin yksi prisma näytettä kohden. Samasta sekoituksesta täytettiin myös ultraäänimittauksen muotti. Prismojen annettiin kovettua laboratorio-olosuhteissa 24 tuntia, jonka jälkeen muotit purettiin ja asetettiin omiin astioihinsa 23 °C asteiseen veteen. Hydraulisuustesteissä ensimmäiset lujuudet mitattiin heti muotin purun jälkeen, ennen veteen upotusta. Molemmista sarjoista mitattiin seitsemän päivän lujuudet, jolloin prismat olivat olleet veden alla 6 vuorokautta.

Näytteen prismasta mitattiin taivutuslujuus, jonka jälkeen katkenneista prisman paloista mitattiin puristuslujuudet. Työssä käytössä on standardin SFS-EN 196-1:2016:en mukainen Form+Test-merkkinen puristin.



Kuva 13 Hydrataation taivutuslujuustuloksia

Taivutuslujuus kuvastaa sementin joustonsietokykyä, mikä estää kuivuessa tapahtuvien kutistuma- ja laajenemismuutosten luomia halkeamia.

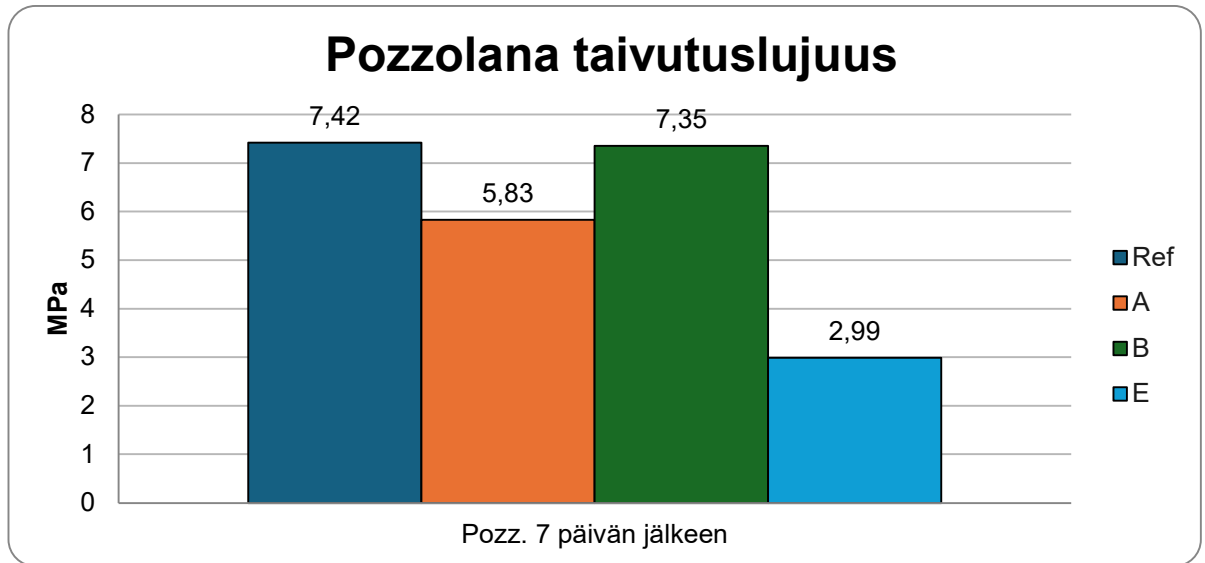
Taivutuslujuusvaatimukset ilmoitetaan yleensä käyttökohdeperusteisesti.

Referenssinä toimineen Schwenk 1 portlandsementin taivutuslujuus ensimmäisen päivän jälkeen oli 4,49 MPa. Vuorokauden jälkeen prisma upotettiin veteen ja mitattiin seitsemäntenä päivänä, jolloin se nousi 6,39 MPa:iin. Valmistaja ei anna taivutuslujuudelle tavoitearvoa.

Näytteen A taivutuslujuus oli matalampi kuin referenssin molempina päivinä. Kuvassa 13 huomioitavaa on, että ensimmäisen päivän jälkeen taivutuslujuus kasvoi vain vähän verrattuna seitsemäntenä päivään.

Näyte B ei saavuttanut lujuutta lainkaan ensimmäisen päivän aikana. Seitsemäntenä päivänä prisma oli saavuttanut matalan 1,25 MPa:n taivutuslujuuden.

Näyte E ei saavuttanut lainkaan lujuutta hydraulisuustesteissä.



Kuva 14 Pozzolaanisuustestien taivutuslujuuksia

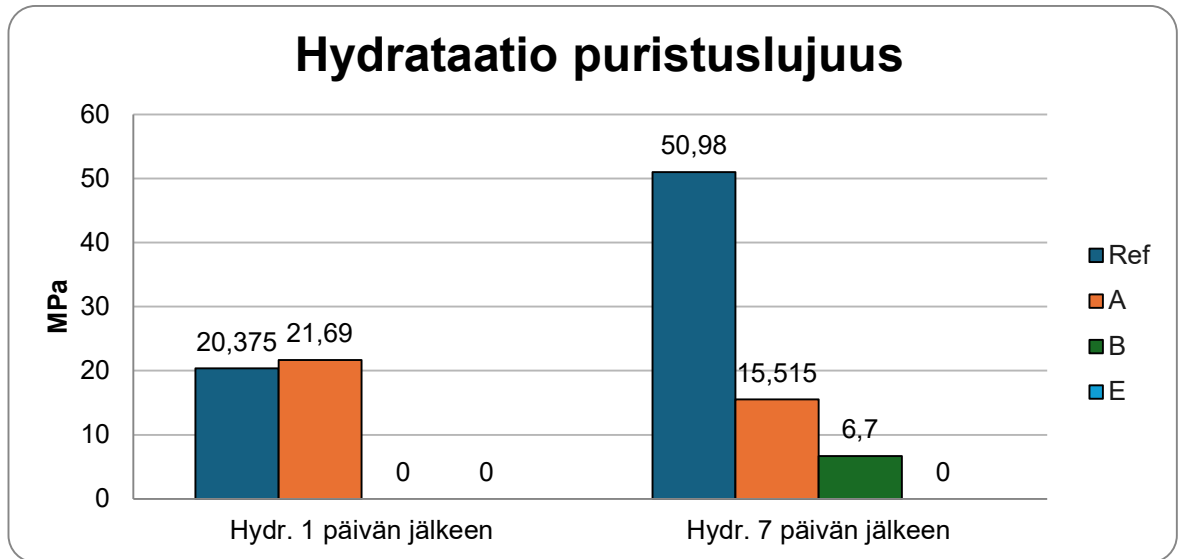
Pozzolaanisuustestien taivutuslujuudet mitattiin vain seitsemän päivän jälkeen, sillä näytemäärä esti kaksien prismojen valamisen.

Referenssin taivutuslujuus seitsemän päivän jälkeen oli merkittävästi suurempi kuvan 14 pozzaalisuusteissä kuin kuvan 13 hydraulisuusteissä. Ero saattaa johtua lisätyn kalkkikivijauheen aiheuttamasta tiiviimmästä runkoainematriisista tai annostelun ja mittauksen mittausepävarmuudesta.

Näytteen A taivutuslujuus oli heikompi kuin referenssin. Näyte A oli myös hydraulisuusteissä taivutuslujuuksiltaan heikompi kuin referenssi.

Näyte B:llä oli miltei yhtä suuri taivutuslujuus kuin referenssillä.

Näytteen E taivutuslujuus oli heikoin.

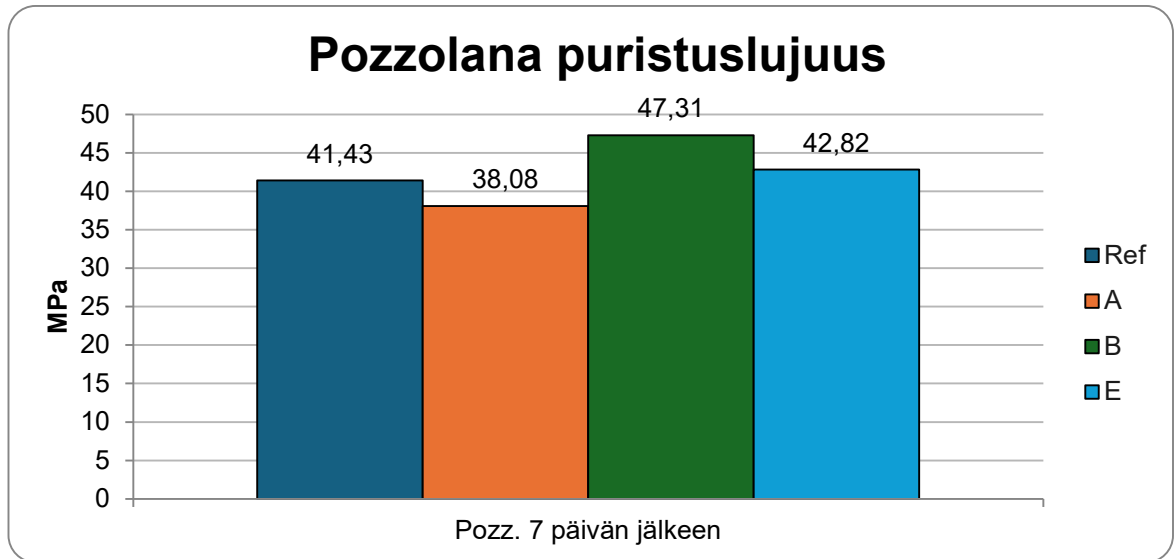


Kuva 15 Hydrataatiotestien puristuslujuuksia

Hydrataatiotestien puristuslujuuksia mitattaessa referenssin yhden päivän ja seitsemän päivän puristuslujuudet olivat valmistajan lupaamien arvojen mukaisia. Valmistaja lupaa yhden päivän puristuslujuudeksi 20 MPa ja 7 vrk:n lujuudeksi 50 MPa. (SCHWENK Suomi Oy, 2022)

Näytteen A puristuslujuus yhden vuorokauden jälkeen oli 21,69 MPa, mikä oli korkeampi kuin referenssillä, mutta seitsemän päivän jälkeen puristuslujuus oli laskenut vain 15,515 MPa:iin. Tämä viittaa siihen, että näytteen A prismat heikkenivät vesisäilytyksessä. Heikkeneminen voi johtua veden kanssa tapahtuvista paisumisreaktioista tai veden aiheuttamista reaktiotuotteiden tai liukenemisestä.

Kuvasta 15 näkyy, ettei näyte B saavuttanut lujuutta ensimmäisen päivän aikana, mutta seitsemännen päivän kohdalla puristuslujuus oli kasvanut 6,7 MPa:iin. Näyte E ei saavuttanut lujuutta lainkaan hydraulisuustesteissä.



Kuva 16 Pozzolaanisuustestien puristuslujuuksia

Pozzolaanisuustestien puristuslujuudet mitattiin vain 7 päivän kohdalla, koska näytemäärä mahdollisti vain yhden prisman valamisen. Kuvassa 16 näkyy, että näytteet B ja E ovat saaneet korkeammat arvot kuin referenssi.

Referenssin puristuslujuus putosi miltei 10 MPa verrattuna kuvan 15 hydraulisuustestien referenssiin. Tästä voidaan päätellä, että sementin korvaaminen kalkkikivellä pudottaa puristuslujuutta.

Näytteen A puristuslujuus jäi referenssiä matalammaksi, mutta tähän on huomioitava kuvan 15 hydraulisuusesteissä havaittu säilytyksessä tapahtunut puristuslujuuden häviö. Vesisäilytys saattaa vaikuttaa näytteen A pozzolaanisuustestien tuloksiin negatiivisesti.

Näyte B kasvatti huomattavasti puristuslujuutta referenssiin verrattuna. Tämä viittaa pozzolaaniseen reaktioon. Näytteen E kohdalla puristuslujuus kasvoi referenssiin verrattuna hieman, mikä myös viittaa pozzolaaniseen reaktioon.

7.3 Hehkutushäviö korkealämpöuunilla

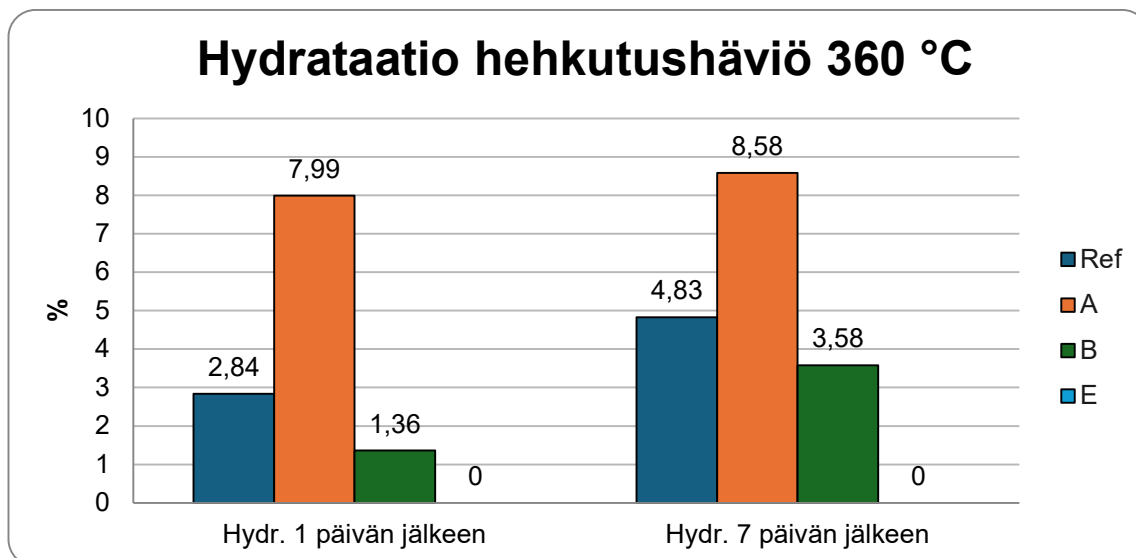
Testisarjaa jatkettiin analysoimalla eri yhdisteiden hajoamislämpötiloja. Näytteet otettiin puristuslujuustesteissä puseruneista koeprismoista, jotka välittömästi murskattiin vasaralla ja upotettiin etanoliin. Etanoli pysäyttää sementin reaktiot ja näin näyte ehdittiin jauhaa morttelissa hienommaksi ennen hehkutushäviötestejä. Pozzolaanisuustestien yhden päivän näytteet valettiin erikseen 50 ml:n muoviasiaan ja annettiin kovettua 24 h laboratorioolosuhteissa, sillä näytemäärä ei olisi riittänyt prismojen valuun.

Näytteistä poistettiin kosteus 105 °C lämpötilassa. Lämpö nostettiin 360 °C:seen, jolloin ensimmäiset reaktiotuotteet, ettringiitti ja CSH, hajoavat. Lopuksi näytteet nostettiin kuvassa 17 näkyvään, 550 °C:een korkealämpöuuniin, jolloin reaktiotuotteena syntynyt kalsiumhydroksidi hajoaa (Transition and decomposition temperatures of cement phases - a collection of thermal analysis data, 2015).

Näitä tuloksia vertaamalla voitiin päätellä, missä reaktioissa syntyy eniten ettringiittiä tai CSH:ta ja kalsiumhydroksidia. Kukin näistä kuvaa sideaineen reaktiivisuutta.



Kuva 17 Korkealämpöuuni



Kuva 18 Hydraulisuustestien termograviatuloksia

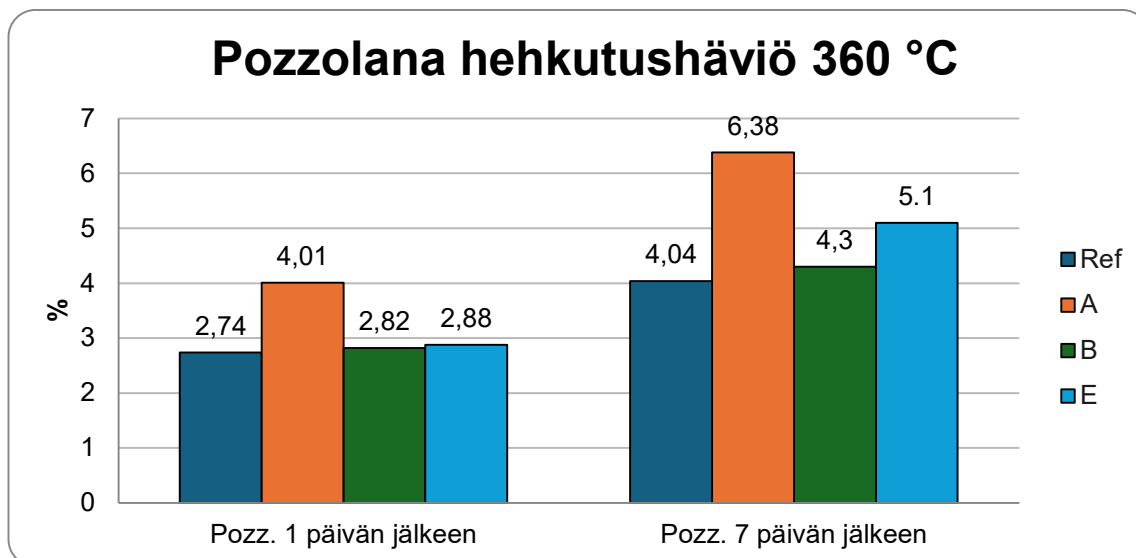
Alkulujuutta kehittävä reaktiotuote ettringiitti ja tärkein lujuutta kehittävä reaktiotuote CSH, hajoavat 360 °C:ssa. Tästä johtuen hydraulisuusprismojen 360 °C hehcutushäviöstä on havaittavissa reaktiotuotteiden mahdollinen kehittyminen.

Kuvan 18 tuloksia tarkasteltaessa huomattiin, että referenssissä häviö jatkui ensimmäisen päivän jälkeen niin, että seitsemänten päivään mennessä häviö oli kasvanut 2,84 %:sta 4.83 %:iin. Tämä viittaa reaktion etenevän merkittävästi ensimmäisen päivän jälkeen.

Näyte A reagoi merkittävästi muita nopeammin 1 päivän aikana, jonka jälkeen painonpudotus oli muita näytteitä hitaampaa. Painonpudotus kasvoi vain 0,59 % yhden päivän jälkeen.

Näytteen B hehcutushäviö oli matala ensimmäisen päivän jälkeen, mutta se miltei kolminkertaistuu seitsemänten päivään mennessä, mikä viittaa siihen, että reaktio jatkuu. Hehcutushäviö oli kuitenkin referenssiin verrattuna pieni, joten reaktiivisuuden voidaan olettaa olevan myös matala.

Näyte E ei reagoinut lainkaan veden kanssa kahteen ensimmäiseen päivään ja prismat murenivat hiekaksi purettaessa. Näin ollen näytteessä E ei vaikuta olevan hydraulista reaktiivisuutta.



Kuva 19 Pozzolaanisuustestien termograviatuloksia

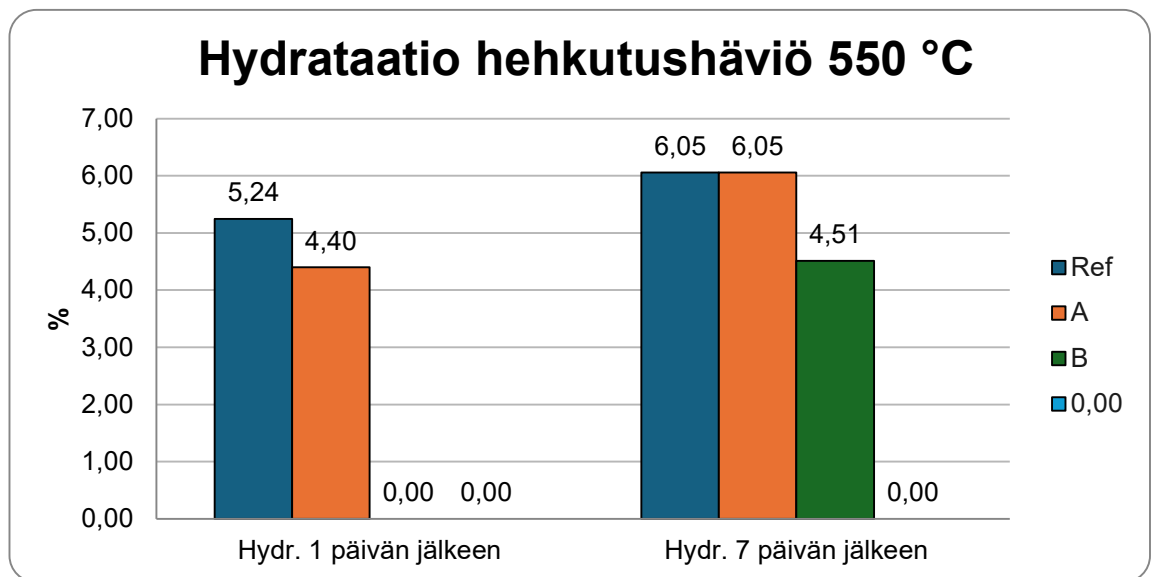
Pozzolanaprismojen hehkutushäviössä seurattiin, mikä näytteistä nostaa reaktiotuotteiden määrää verrattuna referenssiin. Pozzolaanisen reaktion ansiosta sementin tuottama CH reagoi pozzolaanin kanssa tuottaen lisää CSH:ta ja siten lujutta. Referenssi koostuu sementistä, johon oli lisätty 15 % inerttiä kalkkikivijauhetta. Näytteet koostuvat sementistä, johon oli lisätty 15 % näytettä.

Pozzolaanisuussarjan referenssin hehkutushäviö oli suhteessa pienempi kuin hydraulisuussarjan 100 % sementtiä sisältävän näytteen häviö. Inertti kalkkikivijauhe oli laskenut reaktion suuruutta odotetusti. Hehkutushäviö kasvoi seitsemänten päivään mennessä myös odotetusti.

Näytteessä A hehkutushäviö kasvoi suhteessa referenssiin molempina mittauspäivinä, viitaten sen tuovan lujutta. Hydraulisuustesteissä havaittiin näytteen A:n sisältävän hydraulisia ominaisuuksia, joten vielä ei voitu päätellä oli näytteessä myös pozzolaanisia ominaisuuksia.

Näytteen B hehkutushäviö oli hieman referenssiä suurempi, mikä viittaa sen kasvattavan lujusreaktioita. Tässäkin tapauksessa aiemmassa testissä havaittiin hydraulisia ominaisuuksia, joten pozzolaanisuutta ei voitu vielä varmistaa eikä sulkea pois.

Näyte E kasvatti hehikutushäviötä molempina päivinä referenssiin verrattuna. Tämä näkyy varsinkin seitsemännen päivän kohdalla kuvassa 19. Tämä viittaa näytteessä olevan pozzolaanisia ominaisuuksia, sillä aiemmassa hydraulisuustesteissä ei havaittu lainkaan reaktiota.



Kuva 20 Hydraulisuustestien termograviatuloja

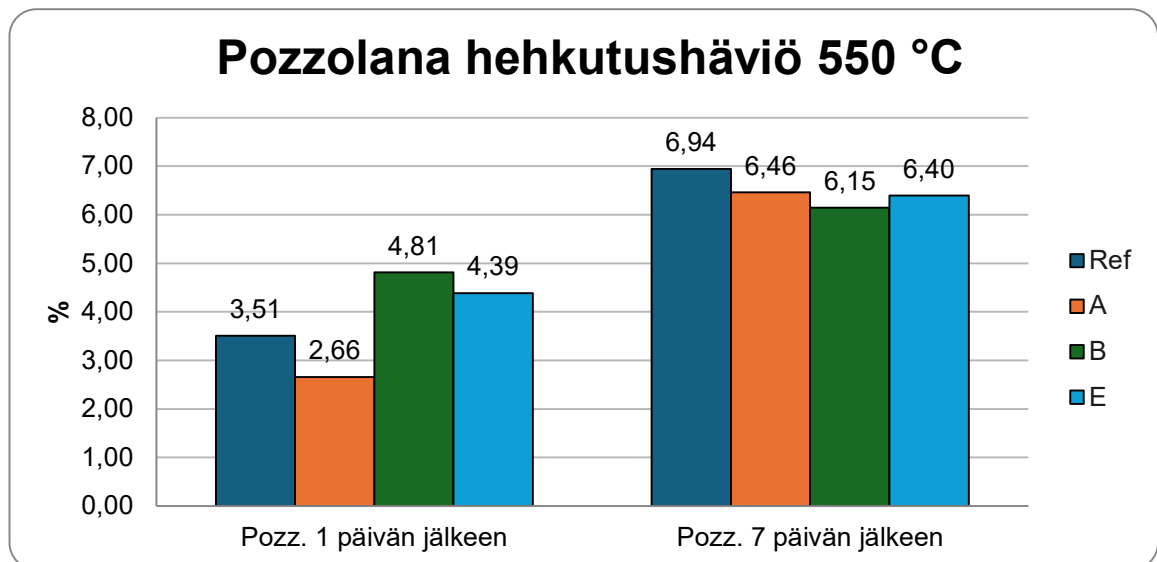
360 °C:een hehikutushäviönäytteet siirrettiin korkealämpöuuniin 550 °C:seen. Tässä lämpötilassa kalsiumhydroksidi hajoaa ja muuttuu kalsiumoksidiksi ja vedeksi. Kalsiumhydroksidia syntyy aliitin ja belitit hydrataatioreaktioissa, joten hehikutushäviö 550 °C:ssa kuvaa sideaineen reaktiivisuutta. Itsessään kalsiumhydroksidi ei tuo lujuutta ja voi olla suurissa määrin haitallista kuivuneessa sementissä. Pozzolaaniset reaktiot tapahtuvat, kun sementin kovettuessa syntynyt kalsiumhydroksidi reagoi pozzolan silikaattien kanssa muodostaen lisää lujuutta tuovaa CSH-geeliä. Näin ollen, jos sideaine tuottaa kalsiumhydroksidia, voidaan siihen lisätä pozzolaanista materiaalia tuomaan lisää lujuutta, tai mahdollisesti vähentämään sideaineen kulutusta.

Hydraulisuustestien tuloksena referenssin hehkutushäviö oli 5,24 % ensimmäisen päivän jälkeen ja se nousi 6,05 %:n seitsemänten päivään mennessä.

Näytteen A hehkutushäviö oli ensimmäisen päivän jälkeen matalampana kuin referenssin häviö, mutta nousi samalle tasolle referenssin kanssa seitsemänten päivään mennessä.

Näyte B:ssä ei havaittu reaktiota ensimmäisen päivän aikana, mutta seitsemänten päivää mennessä reaktiotuotteita oli syntynyt, mikä viittaa näytteen omaavan hidasta hydraulista reaktiivisuutta.

Näyte E ei reagoinut lainkaan veden kanssa.



Kuva 21 Pozzolaanisuustestien termogravimetrituloksia

Pozzolaanitestien 550 °C hehkutushäviö antavat kuvan kalsiumhydroksidin kulutuksesta pozzolaanireaktiossa. Pozzolaanit reagoivat sideaineen hydrataatiossa syntyneen kalsiumhydroksidin kanssa ja näin ollen vähentävät kalsiumhydroksidin määrää tuotteessa. Työssä oletetaan kalsiumhydroksidi määrän pienenevän, jos näytteessä on pozzolaanisia ominaisuuksia. Tulkinnassa tulee ottaa huomioon, että seitsemän päivän kovettumisaika on

lyhyt pozzolaanisten reaktioiden mittaamiseen, sillä normaalisti tuloksia käsitellään 28 päivän tai pidemmän ajan jälkeen.

Referenssi asettaa vertailuarvon ensimmäiselle ja seitsemännelle päivälle. Kuvasta 21 huomataan, että ensimmäisen päivän jälkeen referenssin hehkutushäviö oli 3,51 % ja seitsemännen päivän jälkeen 6,94 %. Tulokset ovat hieman korkeammat kuin hydrataatiotesteissä. Tämä voi johtua lisätystä kalkkikivijauheesta, suuremmasta sementin ja veden suhteesta tai muusta mittausepävarmuustekijästä.

Näytteen A hehkutushäviö oli molempina mittauspäivinä matalampi kuin referenssin häviö. Tämä viittaa näytteen kuluttavan kalsiumhydroksidia ja siten omaavan pozzolaanisia ominaisuuksia. Aiemmissä testeissä havaittu nopea reaktiivisuus saattaa olla vaikuttavana tekijänä jo ensimmäisenä päivänä tapahtuneeseen hehkutushäviön pienenemiseen.

Näyte B kasvatti hehkutushäviötä ensimmäisenä päivänä verrattuna referenssiin, mutta seitsemänten päivään mennessä se oli jo laskenut referenssin häviötä matalammalle tasolle. Tämä viittaa sen kuluttavan kalsiumhydroksidia ja näin ollen pozzolaanisuuteen.

Näyte E käyttäytyi samalla tavalla kuin B ja kasvatti hehkutushäviötä ensimmäisenä päivänä, mutta kulutti sitä jo seitsemänten päivään mennessä. Tulos viittaa pozzolaanisuuteen.

8 Mittausepävarmuus

Testeihin liittyy useita epävarmuustekijöitä, jotka voivat vaikuttaa tulosten tarkkuuteen. Näitä ovat mm. raaka-aineiden kemiallisen koostumuksen vaihtelu, näytekoko, rinnakkaisnäytteiden määrä sekä testilaitteiden kalibroinnin tarkkuus.

Opinnäytetyössä kolmen, koko testisarjan läpikäymän näytteen testien tulokset ovat johdonmukaisia. Vaikka testisarjan tulokset ovat näin pienellä otannalla vain suuntaa antavia, voidaan tähän mennessä saatuja tuloksia pitää luotettavina toteuttamiskelpoisuusselvityksen kannalta.

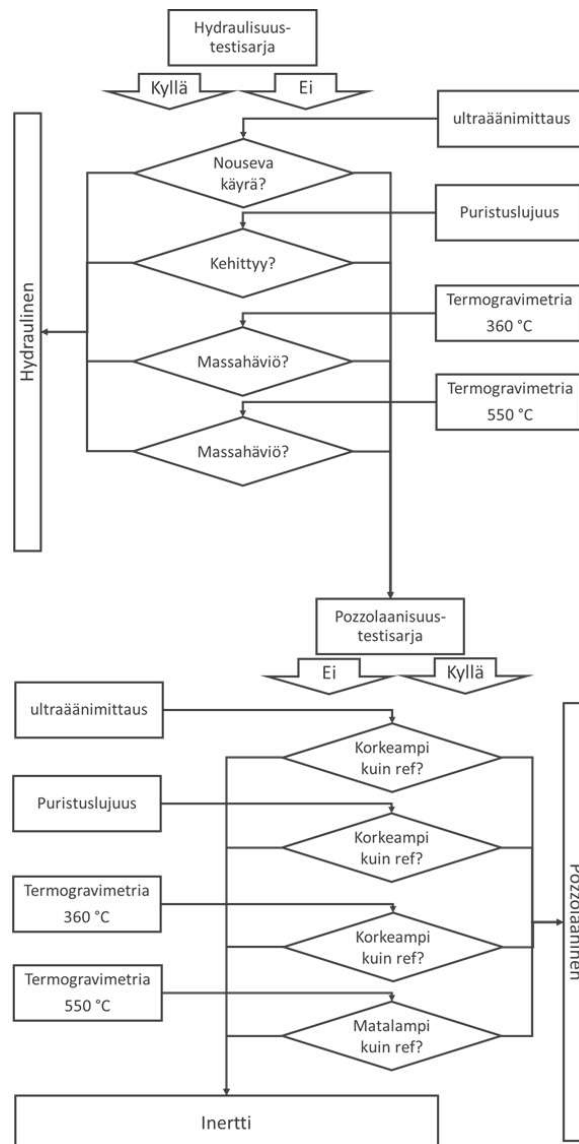
Tulevaisuudessa, kun testisarjan läpi on kulkenut suurempi määrä näytteitä, mittausepävarmuuden arviointi on helpompaa. Tässä alustavassa vaiheessa on tärkeää pitää huolta kalibroinneista ja seurata rinnakkaisnäytteiden määrää, laitteistojen mittaustarkkuutta, mittaolosuhteita sekä näytekokoa. Nämä tekijät vaikuttavat merkittävästi tulosten luotettavuuteen.

Jos menetelmän merkitys ja käyttö lisääntyvät, sen validointi tulisi toteuttaa standardisoiduilla reagensseilla. Lisäksi henkilöstön koulutus yhtenäisiin toimintatapoihin pienentäisi tulosten mittausepävarmuutta.

9 Tulosten yhteenveto

Työssä luotiin testipolku, jossa määritellään tuntemattoman näytteen fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Näiden mittausten jälkeen näytteet testattiin reaktiivisuuden selvittämiseksi kahdella eri testisarjalla, hydraulisella ja pozzolaanisella.

Kuvassa 22 näkyvän testipolun perusteella näyte määriteltiin reaktiivisuuden mukaan hydrauliseksi, pozzolaaniseksi tai kumpaakin ominaisuutta ilmentäväksi materiaaliksi. Jos materiaali ei ilmentänyt kumpaakaan, määriteltiin se inertiksi.



Kuva 22 Reaktiivisuustestien toimintakaavio

Testien lopputuloksina voidaan sanoa, että näyte A on vahvasti hydraulinen sekä lievästi pozzolaaninen aine, jota tulee jatkokehittää vaihtoehtoisena sideaineena.

Näyte B on testien perusteella lievästi hydraulinen ja vahvasti pozzolaaninen aine, jota tulee jatkokehittää vaihtoehtoisena sideaineena.

Näyte E oli testeissä vahvasti pozzolaaninen, mutta ei lainkaan hydraulinen aine. Tästä syystä sitä tulee jatkokehittää sekä vaihtoehtoisena sideaineena että runkoaineena.

10 Johtopäätökset ja jatkoideoita

Testien kuluessa ja tulosten perusteella koottiin seuraavat kehitysehdotukset.

Näytteiden, referenssien ja rinnakkaisnäytteiden määrää lisäämällä saadaan tarkentuvaa tietoa eri aineiden ominaisuuksista.

Kun työ tehdään kokonaisilla prismasarjoilla, tulee näytettä olla minimissään noin 3 kiloa.

Lujuustesteissä tulisi valaa kahdet prismasarjat. Toiset tulisi säilyttää vedessä ja toiset kuivana.

Termogravimetrisissä analyyseissä saadaan karkea arvio hydrataation synnyttämästä kalsiumhydroksidin määrästä, mikä tarjoaa lähtökohdan haluttujen reaktioiden stoikiometriseen tarkasteluun. Tarkastelu täydentää nykyisiä fysikaalisia testituloksia, kuten puristuslujuuden ja sitomisajan mittauksia, ja tuo niiden rinnalle numeerisen kemiallisen parametrin, joka syventää materiaalin koostumuksen ja käyttäytymisen ymmärtämistä. Tämä on merkittävää, koska kalsiumhydroksidi on lujuuttakehittävän kalsiumsilikaattihydraatin sivutuote ja se toimii reaktanttina pozzolaanisissa reaktioissa.

Kun lasketaan kalsiumhydroksidin määrää kadonneen massan perusteella, tulee ottaa huomioon, että kadonneen massan arvo antaa maksimi arvon kalsiumhydroksidista. Täten kalsiumhydroksidia voi näytteessä olla vähemmän ja massakato voi johtua myös muista hajoavista yhdisteistä, mutta määrä ei voi olla massakatoa suurempi.

Testit suoritettiin vain 23 °C:ssa, mutta osa testeistä tulisi suorittaa myös eri lämpötiloissa ja eri vesimäärillä, jotta reaktiivisuudesta saataisiin laajempi kuva. Tähän tämä työ antaa hyvät lähtökohdat, jolloin jo nyt kaikkia testejä ei tarvitsisi suorittaa uudelleen vaan esimerkiksi ultraääniseuranta ja lujuustestit antavat jo huomattavan laajan kuvan materiaalin käyttäytymisestä.

Työn tuloksena saatuja eri tyyppisiin luokiteltuja materiaaleja voidaan lähettää tarkempiin alkuaine- ja yhdistetutkimuksiin, joiden perusteella voidaan varmistua aineen soveltuvuudesta. Samalla aineita voidaan alkaa heti suhteuttaa koetuotteisiin tyyppinsä mukaan sopivan korvausprosentin löytämiseksi.

Mikäli testisarjaa halutaan kehittää analyyttisemmäksi, voitaisiin siihen lisätä raaka-aineiden alkuaineanalyysilaitteisto kuten röntgendiffraktio (XRD) tai röntgenfluoresenssianalyysi (XRF), jossa selviää aineen koostumus, laatu ja määrä.

Termogravimetriset testit voitaisiin suorittaa termogravimetrisellä analyysilaitteistolla (TGA). TGA:lla voidaan analysoida nopeasti ja erittäin tarkasti eri lämpötiloissa ja vesimäärillä testattavia näytteitä. Tuloksena saadaan eri reaktioiden massahäviöiden kuvaajat reaaliajassa, sillä TGA-mittaa painonmuutosta, kun lämpötilaa pidetään vakiona tai kun lämpötilaa nostetaan. Tällä voidaan havaita ja määrittää reaktioyhdisteet erittäin tarkasti.

11 Lähdeluettelo

Betoni-Lehti. 2025. Betoni.com. [Online] 2025. [Viitattu: 11. 4 2025.]

<https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>.

Day, Ken W;Aldred, James ja Hudson, Barry. 2014. *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification* . Fourth edition. s.11 : CRC Press, 2014.

Effect of treated and untreated rice husk ash, palm oil fuel ash, and microstructure characteristics of blended concrete - A comprehensive review.

Ying, Lin;Johnson, Alengaram ja Zainah, Ibrahim. 2023. 2023, Journal of Building Engineering , Osa/vuosik. 78.

Eurofins. 2023. Betoni ja happamuus. [Online] 2023. [Viitattu: 11. 4 2025.]

<https://www.eurofins.fi/expertservices/palvelut/testaus-ja-tarkastus/rakennusmateriaalien-testaus/betoni/betoni-ja-happamuus-ph/>.

Finnsementti. 2024. Finnsementti.fi. [Online] 2024. [Viitattu: 11. 4 2025.]

<https://finnsementti.fi/sementti/valmistus/>.

Nawy, Edward G. 2008. *Concrete Construction Engineering Handbook*. s. 6 : CRC Press, 2008.

Penn State College of Engineering. 1999. *Hydration of Portland Cement*. s.l. :

Penn State College of Engineering, 1999.

SCHWENK Suomi Oy . 2022. *Schwenk CEM I 52,5 N Technical datasheet*.

s.l. : SCHWENK Suomi Oy , 2022.

Sherwood Scientific. 2025. M926 Chloride Analyser. [Online] 2025. [Viitattu:

11. 4 2025.] <https://www.sherwood-scientific.com/products/m926-chloride-analyser/>.

Suomen Betoniyhdistys ry . 2022. <https://www.betonitieto.fi>. [Online] 2022.

[Viitattu: 18. 4 2025.] <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/pozzolaani.html>.

Suomen Betoniyhdistys ry. kloridien tunkeutuminen betoniin. [Online] [Viitattu: 11. 4 2025.] <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/betonin-sailyvyys/kloridien-tunkeutuminen-betoniin.html>.

—, **2022.** www.betonitieto.fi. [Online] 2022. [Viitattu: 18. 4 2025.] <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/hydrataatio.html>.

SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS. 2012. SEMENTTI. OSA 1: TAVALLISTEN SEMENTTIEN KOOSTUMUS,. Sivü 9 : SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2012.

—, **2019.** *SFS EN 196-6 Methods of tesing cement. Part 6: determination of fineness.* s.l. : SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2019.

Transition and decomposition temperatures of cement phases - a collection of thermal analysis data. **Nicholas C Collier. 2015.** s.l. : Immobilisation Science Laboratory, Department of Materials Science and Engineering, The university of Sheffield, 2015.