

Aino Varkoi

SEMENTTIÄ KORVAAVIEN SIDEAINEIDEN VAIKUTUKSET BETONIN OMINAISUUKSIIN

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Jukka Lahdensivu
Kesäkuu 2021

TIIVISTELMÄ

Aino Varkoi: Sementtiä korvaavien sideaineiden vaikutukset betonin ominaisuuksiin
Effects of cement substitutes on concrete properties
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2021

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali. Sen yhden pääraaka-aineen, sementin, valmistus on maailmanlaajuisesti yksi suurimmista hiilidioksidipäästöjen aiheuttajista. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, voisiko betonin valmistuksessa sementtiä korvata osittain pienempipäästöisillä sideainevaihtoehdoilla, jolloin hiilidioksidipäästöjä saataisiin vähennettyä. Jokainen korvaava sideaine vaikuttaa jollain tavalla betonin ominaisuuksiin, joten tässä työssä selvitetään näitä vaikutuksia ja arvioidaan niiden perusteella eri sideaineiden soveltuvuutta käytettäväksi osittain sementin tilalla betonissa. Tutkittavina sideaineina olivat masuunikuona, lentotuhka ja silika. Sideaineiden vaikutusta tutkittiin betonin ominaisuuksista lujuudenkehitykseen, säilyvyyteen ja työstettävyyteen.

Työ suoritettiin kirjallisuustutkimuksena. Työn alun teoriaosuudessa niin sementtiin, sideainevaihtoehtoihin kuin betonin ominaisuuksiin liittyen materiaalina olivat lähinnä tietokirjallisuus aiheesta. Tietokirjoista etsittiin yleistietoa sementistä sekä tutkittaviksi valituista sideaineista, niiden ominaisuuksista, valmistuksesta ja käyttömahdollisuuksista. Lisäksi etsittiin tietoa siitä, mitä tarkoitetaan betonin lujuudenkehityksellä, työstettävyydellä ja säilyvyydellä ja mitkä asiat näihin ominaisuuksiin vaikuttavat. Lähteinä oli myös esimerkiksi rakennusalan toimijoiden ja verkkosivustojen julkaisuja. Tutkimuskysymykseen vastattaessa eli selvitetäessä korvaavien sideaineiden vaikutuksia betonin ominaisuuksiin lähdemateriaalina olivat pääosin tutkimusjulkaisut, tieteelliset artikkelit ja tietokirjat.

Työssä havaittiin, että korvaavien sideaineiden käytöllä on sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia betonin ominaisuuksiin. Kaikkien kolmen sideaineen vaikutukset lujuudenkehitykseen ja säilyvyyteen olivat pääosin positiivisia. Sideaineiden käyttö paransi betonin lujuudenkehitystä ja esimerkiksi läpäisevyys pieneni kaikilla sideaineilla, millä oli vaikutusta betonin säilyvyyden paranemiseen usealla tapaa. Yksittäisinä eroina olivat esimerkiksi varhaisiän lujuudet ja pakkaskesävyys. Työstettävyyden kohdalla erot eri sideaineiden välillä olivat suurempia. Masuunikuonan ja lentotuhkan käyttö paransi työstettävyyttä. Silikan yhteydessä tarvittava työstettävyyttä täytyi taas varmistaa notkistavilla lisäaineilla.

Tutkimuksen mukaan betonin ominaisuuksiin vaikuttaa kuitenkin myös käytetyn sideaineen lisäksi monet muut tekijät, kuten sideaineen ja sementin suhde, sideaineen ja veden suhde sekä kovettumistyyppi, joten nämä tekijät on myös syytä huomioida. Työ osoittaa myös, että sideaineiden käytön soveltuvuutta arvioitaessa on tärkeää huomioida betonirakenteen käyttötarkoitus. Vaikka esimerkiksi masuunikuonan käytöllä on betonin säilyvyyden kannalta myös negatiivisia vaikutuksia, voi se joihinkin rakenteisiin olla parempi vaihtoehto kuin portlandsementistä valmistettu betoni.

Avainsanat: sementti, betoni, masuunikuona, lentotuhka, silika

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SEMENTTI.....	3
2.1 Sementin valmistus	3
2.2 Sementin hiilidioksidipäästöt	3
2.3 Sementin seostaminen.....	5
3. SEMENTTIÄ KORVAAVAT SIDEAINEET	7
3.1 Masuunikuona.....	7
3.2 Lentotuhka	9
3.3 Silika	9
3.4 Muut sideaineet.....	11
4. BETONIN OMINAISUUDET	13
4.1 Lujuudenkehitys	13
4.2 Säilyvyys.....	15
4.3 Työstettävyys	17
5. SIDEAINEIDEN VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN	18
5.1 Sideaineiden vaikutus lujuudenkehitykseen	18
5.2 Sideaineiden vaikutus säilyvyyteen	22
5.3 Sideaineiden vaikutus työstettyyteen.....	24
6. PÄÄTELMÄT	25
LÄHTEET	27

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Betonirakenteen raaka-aineiden osuus rakenteen massasta ja CO₂-päästöistä s. 4

Kuva 2. Sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöt vuosina 1999–2019 s. 4

Kuva 3. Masuunikuonan ja lentotuhkan käytön vaikutus betonin GWP-arvoon s. 8

Kuva 4. Masuunikuonan ja silikan käytön vaikutus betonin GWP-arvoon s. 10

Kuva 5. Eri sementeistä valmistettujen betonien lujuudenkehitys kypsyysiän funktiona s. 14

Kuva 6. Betonirakenteen säilyvyyteen vaikuttavat tekijät s. 16

Kuva 7. Masuunikuonan lisäämisen vaikutus puristuslujuuden kehitykseen s. 19

Kuva 8. Lujuuden kehitys lentotuhkamäärän funktiona s. 20

Taulukko 1. Suomessa sallittujen sementtien koostumukset s. 6

Taulukko 2. Silikaa sisältävien betonien lujuuden kehitys s. 22

LYHENTEET JA MERKINNÄT

mrd.	miljardi; 1 000 000 000
m ³	kuutiometri; tilavuuden perusyksikkö
Gt	gigatonni; 10 ⁹
%	prosentti
CO ₂	hiilidioksidi
kg/t	kilogrammaa per tonni; kilogrammaa tuhatta kiloa kohti
CE-merkintä	ranskaksi <i>Conformité Européenne</i> ; CE-merkintä on merkintä, jolla tuotteen valmistaja tai valtuutettu edustaja vakuuttaa, että tuote täyttää tuotetta koskevien EU:n direktiivien ja asetusten olennaiset vaatimukset
t	tonni; 1000 kg
µm	mikrometri; 10 ⁻⁶
K30	betonin lujuusluokka; käytetään myös merkintää C25/30
K45	betonin lujuusluokka; käytetään myös merkintää C35/45
SiO ₂	piidioksidi
SiO	piimonoksidi
SF	silica fume; silikahöyry
GGBFS	ground-granulated blast-furnace slag; masuunikuona
MPa	megapascal; 10 ⁶ Pa; 1 MPa= 1 N/mm ²
t ₂₀	kypsyysikä
t	kovettumisaika betonin kypsyysikä laskentakaavassa
T	betonin lämpötila kovettumisaikana
°C	celsiusaste

1. JOHDANTO

Ympäristöystävällisyydestä ja ekologisuudesta on alettu viime vuosina keskustella entistä enemmän. Myös rakentamisessa kestävä kehityksen periaatteet nousevat koko ajan tärkeämmiksi arvoiksi ja esimerkiksi rakentamisen ja rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeen on alettu kiinnittämään enemmän huomiota.

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, jota valmistetaan vuosittain noin 13 mrd. m³. Sen pääraaka-aineita ovat sementti, vesi sekä kiviaines. (Haara 2018, s. 13, 24) Betonin hiilijalanjäljen kannalta huomionarvoista on, että betonin yhden pääraaka-aineen, sementin, valmistus on maailmanlaajuisesti yksi merkittävimpiä hiilidioksidipäästöjen aiheuttajia. Vuonna 2016 sementin valmistusprosessista syntyvät hiilidioksidipäästöt olivat noin 1,45 Gt. Vuosien 1928 ja 2016 välillä hiilidioksidipäästöjä syntyi tutkimuksen mukaan yhteensä 39,3 ± 2,4 Gt, joista peräti 66 %:a on vuoden 1990 jälkeiseltä ajalta. Vuonna 2015 sementin valmistusprosessista syntyneet päästöt olivat 30 %:a vuoden 2016 päästömäärää pienemmät. Päästöjen määrän suureen nousuun vaikuttaa tutkimuksen mukaan sementin käytön lisääntyminen viime vuosikymmeninä valtavasti. (Robbie 2018)

Koska betonia käytetään ja tullaan tulevaisuudessakin käyttämään rakentamisessa paljon, on tarpeellista tutkia, voisiko sementtiä korvata osittain pienempipäästöisillä sideainevaihtoehdoilla. Jokainen sementtiä korvaava aine vaikuttaa kuitenkin jollakin tavalla betonin ominaisuuksiin ja betonia valmistettaessa täytyy aina tarkastella kokonaisuutta, eikä pyrkiä ainoastaan mahdollisimman pieniin hiilidioksidipäästöihin. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, miten sementtiä korvaavat sideaineet vaikuttavat betonin ominaisuuksiin ja se toteutetaan kirjallisuustutkimuksena.

Tutkittaviksi sementtiä korvaaviksi sideaineiksi on tässä opinnäytetyössä valittu pienissä määrin korvaavina sideaineina jo käytetyt masuunikuona ja lentotuhka, joita on teollisuuden sivutuotteina helposti ja runsaasti saatavilla sekä silika (Haara 2018, s. 13; Neville 2011). Näiden ohella käydään myös lyhyesti läpi muutama muu sideainevaihtoehto, kuten geopolymeerit. Betonin tutkittaviksi ominaisuuksiksi on valittu lujuudenkehitys, säilyvyys ja työstettävyys, koska nämä kolme ovat tärkeimpiä tietoja suunnittelijoille, työmaalle tai elementtitehtaalle, kun mietitään betonin sopivuutta tiettyyn käyttötarkoitukseen.

Aihetta on tärkeää tutkia, koska aihe on ajankohtainen ja sementin merkittävien CO₂-päästöjen takia ratkaisun löytyminen tähän tutkimusongelmaan on kiireellistä ja sillä on yhteiskunnallisesti suuri merkitys.

Luvussa 2 käsitellään sementtiä, sen valmistusta ja hiilidioksidipäästöjä sekä sementin seostamista. Luvussa 3 käydään läpi tutkittavat sementtiä korvaavat sideaineet: masuunikuona, lentotuhka, silika ja muut sideaineet. Luvussa 4 käydään läpi betonin tutkittavat ominaisuudet: lujuudenkehitys, säilyvyys ja työstettävyys. Luvussa 5 käsitellään, miten eri sideaineet vaikuttavat kuhunkin betonin ominaisuuteen ja luvussa 6 esitetään yhteenveto, jonka jälkeen opinnäytetyön lopussa on esitetty lähteet.

2. SEMENTTI

Betonin pääraaka-aineita ovat sementti, vesi sekä kiviaines. Betonimassaan voidaan sekoittaa myös seosaineita, lisäaineita, väriaineita ja kuituja, joilla voidaan saada betonille haluttuja ominaisuuksia. (Haara 2018, s. 24, 65–66) Seuraavaksi käsitellään sementtiä vähän tarkemmin.

2.1 Sementin valmistus

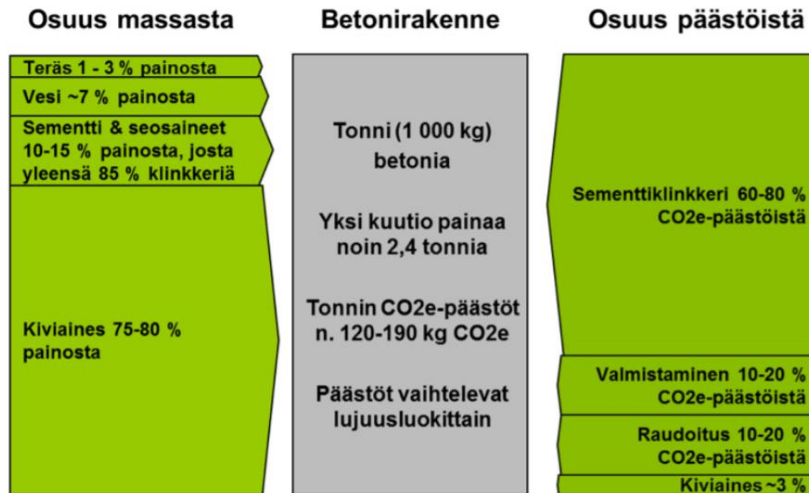
Sementti on hienoksi jauhettu epäorgaaninen materiaali, joka reagoi veden kanssa sekä veden alla että ilmassa. Reaktiotuotteena syntyvä, luja ja kestävä sementtikivi liittyy yhteen betonin muut raaka-aineet eli toimii sideaineena. Sementin tärkeimmän ainesosan, portlandklinkkerin, pääraaka-aine on kalkkikivi, joka on yksi maailman yleisimmistä kivilajeista. Klinkkerin lisäksi sementeissä käytetään seosaineita ja kipsiä. Klinkkerin ja seosaineiden jauhatushienouden ja seosainemäärän säätötoimilla valmistetaan samasta klinkkeripohjasta erilaisia sementtilaatuja. Sementin valmistusprosessin vaiheita ovat louhinta, murskaus, raakajauhatus, kalsinointi esilämmitysjärjestelmässä, sementtiklinkkerin poltto, jauhatus ja varastointi. (Haara 2018, s. 13, 24–25, 27)

Yleisimmin käytettyä sementtiä kutsutaan portlandsementiksi (Neville 2011). Portlandsementti sisältää sementtiklinkkeriä ja enintään 5 % seosaineita laskettuna klinkkerin ja seosaineiden yhteismäärästä. Portlandsementistä käytetään tunnusta CEM I. (Haara 2018, s. 29)

2.2 Sementin hiilidioksidipäästöt

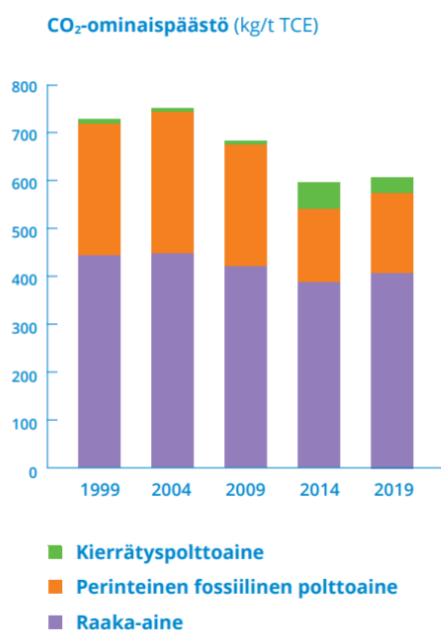
Sementin valmistus on yksi maailman suurimmista ihmisten toiminnasta johtuvista hiilidioksidipäästöjen lähteistä. Sitä suurempia päästöjä aiheuttavat vain fossiiliset polttoaineet ja maankäytön muutokset. (Robbie 2018) Betonin ja sementin suuret päästöt johtuvat valtavista käyttömääristä. Betonin käytöllä on kuitenkin myös positiivisia ympäristövaikutuksia, joilla se tasapainottaa aiheuttamaansa ympäristökuormaa. Betonin muut pääraaka-aineet aiheuttavat hyvin pienen ympäristökuorman ja lisäksi betonilla on suuri hiilikädenjälki. (Betoni a; Haara 2018, s. 146) Betonirakenteet ovat pitkäikäisiä, helposti kierrätettäviä ja vähän huoltoa vaativia. Lämmitys- ja jäähdytyskulut pysyvät myös matalina rakenteiden tiivyyden ja massiivisuuden ansiosta. Betonirakenteet mahdollistavat myös päästöttömän energian tuottamisen tuuli-, vesi- ja ydinvoimaloissa. (Betoni a; Mattila 2019, s. 14)

Betonin koostumuksesta suurin osuus on kiviainesta. Sementin ja veden määrät ovat betonimassassa samaa suuruusluokkaa. Hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin kiviainek-
sella paljon sementin hiilidioksidipäästöjä pienemmät. Tätä on havainnollistettu kuvassa
1.



Kuva 1. Betonirakenteen raaka-aineiden osuus rakenteen massasta ja CO₂-päästöistä (Pasanen et al. 2012, s. 10).

Kuvasta 1 voi nähdä, vaikka kiviaineksen osuus massasta on lähes 80 %: a, ei sen hiilidioksidipäästöt yllä lähellekään sementtiklinkkerin aiheuttamia päästöjä. Sementin hiilidioksidipäästöjä on tutkittu paljon ja esimerkiksi kuvassa 2 esitetään tilastotietoa sementin päästömäärien kehityksestä viimeisen 20 vuoden ajalta.



Kuva 2. Sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöt vuosina 1999–2019 (Finnsementti 2020, s. 10).

Kuvasta 2 nähdään, että hiilidioksidipäästöt ovat viimeisen 20 vuoden aikana pienentyneet noin 100 kg/t. Päästömäärien lasku on ollut suurinta viimeisen 10 vuoden aikana. Suurin muutos on kuitenkin ollut fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen ja siirtyminen kierrätyspolttoaineisiin, sillä kuvasta on havaittavissa, että raaka-aineesta johdettavat päästöt ovat pysyneet koko 20 vuoden ajan suuruudeltaan lähes samanlaisina. Jo työn johdannossa tuotiin esille Robbien (2018) tutkimustuloksia sementin hiilidioksidipäästöistä. Näiden kahden lähteen tuloksissa voi huomata pientä eroavaisuutta aiheesta. On hyvä kuitenkin huomata, että Finnsementin (2020) ympäristöraportissa kyseessä ovat sementin päästöjen kehitys Suomessa ja Robbien (2018) tutkimus käsittelee päästöjä maailmanlaajuisesti.

Robbien (2018) mukaan seossementtien käyttö on lisääntynyt viimeisen 30 vuoden aikana paljon, mikä auttaa päästöjen hallinnassa, mutta samanaikaisesti sementin käyttö on myös lisääntynyt. Hän myös toteaa, että maailmanlaajuisesti tarkasteltuna päästömäärissä on epätarkkuuksia. Datan saatavuudessa ja laadussa on vielä ongelmia, mikä on johtanut siihen, että on jouduttu tekemään oletuksia.

Finnsementin ympäristöraportin (2020, s. 13) mukaan Suomen hiilidioksidipäästöistä 1,6 %: a aiheutuu sementin valmistamisesta. Maailmanlaajuisessa tarkastelussa vastaava lukema on 5 %: a. Sementin valmistuksessa päästöjä syntyy kahdessa vaiheessa: kalkkikiven poltossa ja kalsinoitumisreaktiossa. Yksi tapa päästöjen vähentämiseen on sementin seostamisen lisääminen. Seosaineiden käyttämisellä pystytään vähentämään klinkkerimäärää, mikä pienentää kalsinoinnissa syntyviä päästöjä ja siten kokonaispäästömäärää. (Finnsementti 2020, s. 8, 13, 22) Seosaineita voidaan lisätä useassa eri sementin valmistusprosessin vaiheessa (Mindess & Aitcin 2011, s. 6).

2.3 Sementin seostaminen

Kalkkikiveä ei voi kokonaan korvata muilla sideaineilla, koska kalkkikiven kalsinointi on sementtiklinkkerin valmistuksessa välttämätön kemiallinen reaktio (Finnsementti 2020, s. 10). Lisäksi seosaineiden käytölle on monia rajoitteita.

Betonissa käytettävien sementtien tulee olla CE- merkittyjä ja sementtistandardin SFS-EN 197-1 vaatimusten mukaisia (Haara 2018, s. 29). Haaran (2018, s. 29) mukaan standardi ryhmittelee sementit niiden koostumuksen perusteella viiteen päälajiin:

- CEM I Portlandsementti
- CEM II Portlandseossementti
- CEM III Masuunikuonasementti

- CEM IV Pozzolaanisementti
- CEM V Seosementti.

Päälajit jaetaan edelleen käytetyn seosaineen ja seosainemäärien mukaan sementtilajeihin (Haara 2018, s. 29). Sementtilajien sallittuja seosainekoostumuksia on taulukossa 1.

Sementtilaji	Koostumusvaatimukset [%]					
	klinkkeri	kuona	silika	lentotuhka	kalkkikivi	muut
CEM I	95...100	–	–	–	–	0...5
CEM II/A-S	80...94	6...20	–	–	–	0...5
CEM II/B-S	65...79	21...35	–	–	–	0...5
CEM II /A-D	90...94	–	6...10	–	–	0...5
CEM II/A-V	80...94	–	–	6...20	–	0...5
CEM II/B-V	65...79	–	–	21...35	–	0...5
CEM II/A-LL	80...94	–	–	–	6...20	0...5
CEM II/A-M	80...88	12...20				0...5
CEM II/B-M	65...79	21...35				0...5
CEM III/A	35...64	36...65	–	–	–	0...5
CEM III/B	20...34	66...80	–	–	–	0...5

Taulukko 1. Suomessa sallittujen sementtien koostumukset (Haara 2018, s. 30).

Taulukosta 1 nähdään, että jokaisen seosaineen määrä on määritetty tarkkaan, jotta se on standardin SFS-EN 197-1 mukainen. Sallittuun seosainemäärään vaikuttaa myös esimerkiksi betonin rasitusluokka (Haara 2018, s. 58).

3. SEMENTTIÄ KORVAAVAT SIDEAINEET

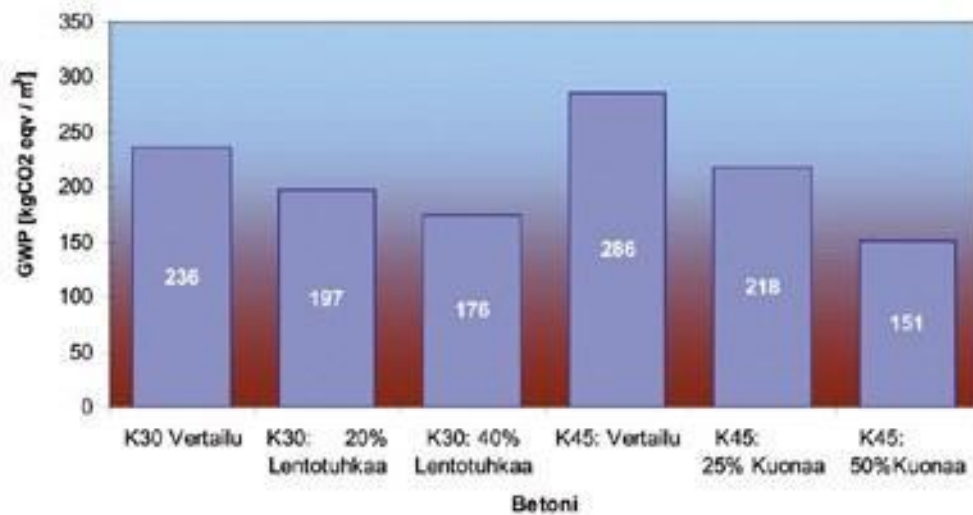
Sementtiä korvaavina sideaineina käytetään seosaineita. Ne ovat usein teollisuuden sivutuotteita, joista muuten tulisi jätettä (Haara 2018, s. 13). Jättemateriaalien seostaminen sementtiin ja käyttäminen sideaineena auttaa samalla osaltaan ratkaisemaan teollisuuden sivutuotteena syntyvän jätteen hävittämisongelmaa (Chandra 1997). Betonin valmistuksessa käytetään vuosittain noin 350 000 t masuunikuonaa ja lentotuhkaa. Lentotuhkan osuus on noin 1/3 ja masuunikuonan noin 2/3. (Saarinen 2018) Tutkimukseen on valittu näiden kahden yleisen seosaineen lisäksi silika. Lisäksi muutama muu sideainevaihtoehto, kuten geopolymeerit, käsitellään luvussa 3.4.

3.1 Masuunikuona

Masuunikuona on sivutuote, joka syntyy raakauraudan valmistuksessa masuunissa. Masuunikuona on hyvin homogeeninen ja hienoksi jauhettu seos kalkkikiveä ja kalsiumkarbonaattia sekä savea tai liuskekiveä. Se syntyy magmaattisessa tilassa raudan masuunissa. Sula kuona jäähdytetään nopeasti veden avulla, jolloin siitä syntyy hieno, rakeinen, lähes kiteetön ja lasimainen muoto, jota kutsutaan rakeiseksi kuonaksi. Rakeisella kuonalla on piileviä hydraulisia ominaisuuksia. Kun rakeisen kuonan jauhaa hienoksi, se on erinomaisien hydraulisten ominaisuuksiensa ansiosta toimiva sideainevaihtoehto käytettäväksi portlandsementin kanssa. Ennen ja jälkeen jauhamisen jäljelle jäänyttä rautaa poistetaan magneettien avulla. Masuunikuona on raekooltaan sementinsuuruista, mutta se jauhetaan tavallisesti hienommaksi kuin portlandsementti. (Özbay et al. 2016, Haara 2018, s. 57) Masuunikuonan hydrauliset ominaisuudet heräävät sementin ja veden reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin avulla, jolloin kuona kehittää lujuutta (Haara 2018, s. 57). Masuunikuonalla ei ole yhtä suurta koostumuksen vaihtelua kuin lentotuhkalla (Neville 2011).

Masuunikuonan käytöstä aiheutuvia hyötyjä ovat muun muassa energian kulutuksen, kasvihuonekaasupäästöjen ja koskemattomien raaka-aineiden käytön vähentyminen. Samalla sen käyttäminen betonissa sideaineena hyödyntää raudan valmistusprosessissa syntyneen sivutuotteen eikä jää teollisuusjätettä. (Özbay et al. 2016) Masuunikuonaa syntyy raudan valmistuksen yhteydessä satoja tuhansia tonneja vuodessa (Betoni b). Masuunikuona pienentää betonin ympäristökuormaa lentotuhkaa tehokkaammin (Betoni c 2005). 50 %: n masuunikuonan käyttö vähentää hiilidioksidipäästöjä noin 40 %: a ja 30 %: n lentotuhkan käyttö noin 20 %: a (Betoni b).

Materiaalien aiheuttamia ympäristöpäästöjä voidaan kuvata esimerkiksi GWP-arvon avulla. Kirjainyhdistelmä GWP tulee sanoista global warming potential. Mitä pienempi materiaalin GWP-arvo on, sitä pienemmät ympäristöpäästöt se aiheuttaa. (Habibi et al. 2021) Kuvasta 3 on nähtävissä, miten betonin GWP-arvo muuttuu, kun portlandsementtiä on osittain korvattu masuunikuonalla tai lentotuhkalla.



Kuva 3. Masuunikuonan ja lentotuhkan käytön vaikutus betonin GWP-arvoon (Betoni b).

Lentotuhkan tapauksessa betonin lujuusluokkana on K30 ja masuunikuonaa käytettäessä K45. Vertailubetoneissa on käytetty pelkästään portlandsementtiä. Vertailubetonien GWP-arvojen lisäksi kuvassa 3 on nähtävissä GWP-arvo betoneille, joissa portlandsementistä on korvattu 20 %: a ja 40 %: a lentotuhkalla sekä 25 %: a ja 50 %: a masuunikuonalla. Voidaan huomata, että sekä lentotuhkan että masuunikuonan käyttö pienentää selkeästi betonin GWP-arvoa eli pienentää betonin aiheuttamia ympäristöpäästöjä. Masuunikuonan käyttö pienentää GWP-arvoa lentotuhkaa enemmän.

Finnsementin (2019) tuote-esitteen mukaan masuunikuonaa käytetään massiivisten rakenteiden valmistuksessa ja sulfaatinkestävyyttä vaativissa betonirakenteissa. Massiivirakenteisiin kuona sopii hyvin, koska se alentaa ja tasaannuttaa betonin lämmönkehitystä. Kuonajauheen käyttö on perusteltua myös silloin, kun betonilta toivotaan korkeaa loppulujuutta ilman, että varhaislujuudelle on asetettu vaatimuksia. Kuonajauhe sopii käytettäväksi myös lämpökäsiteltäviin betoneihin, sillä kuonajauhetta sisältävän betonin lujuuskato on tavanomaista betonia pienempi.

3.2 Lentotuhka

Lentotuhka on lämpövoimalaitoksessa jauhetun kivihiilen palamisessa syntyvä sivutuote. Lentotuhkaa voi käyttää betonissa sekä sideaineena että kiviaineksena. Voimalaitoksen pölynkeräysjärjestelmä poistaa sen kivihiilen polttamisessa syntyneistä pakokaasuista ennen kaasujen päästämistä ilmakehään. Lentotuhka on poistamisvaiheessa rakenteeltaan hienoa, pääosin pallomaisia hiukkasia. Lentotuhkan hiukkasten koko riippuu pölynkeräysjärjestelmästä, mutta yleensä se on portlandsementtiä hienompaa. Lentotuhkan hiukkasista noin puolet on raekooltaan 10 μm , mutta muuten raekokoostumus ei ole homogeenistä (Neville 2011). Sen kemiallinen koostumus määrittyy kivihiilessä olleen palamattoman aineksen tyyppin ja määrän mukaan. Tärkeimpiä lentotuhkan sisältämiä kemikaaleja ovat piioksidi, alumiinioksidi sekä kaliumin ja raudan oksidit. (Siddique 2008, s. 177)

Lentotuhkan hienouden, pozzolaanisuuden ja ajoittaisen itsesementoitumisen vuoksi sitä on käytetty paljon sementissä ja betonissa. Voimalaitoksissa syntyvä lentotuhka on luonnostaan vaihteleva materiaali, johon vaikuttavat esimerkiksi kivihiilen tyyppi ja mineraloginen koostumus, uunin tyyppi sekä tapa, jolla lentotuhka kerätään ja varastoidaan. Kaikki palamisessa syntyvä tuhka ei ole lentotuhkaa, eikä eri voimalaitoksissa syntyvä lentotuhka yhtä pozzolaanista, joten usein kahdesta eri voimalaitoksesta peräisin olevaa lentotuhkaa ei voi käyttää seoksena betonin valmistuksessa. Lentotuhkan ominaisuudet voivat myös vaihdella, vaikka ne olisivat samasta voimalaitoksesta. Tämä epätasaisuus on vakava haitta lentotuhkan käytölle. (Siddique 2008, s. 177) Lentotuhkan pozzolaanisuudella tarkoitetaan sitä, että se reagoi sementin hydrataatiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattigeeliä. Betoninormien mukaan suurin sallittu lentotuhkalisäys betoniin on 45 % portlandsementtimäärästä ja pakkasrasitetuissa sekä eräissä kloridirasitetuissa rakenteissa vain 30 %: a. (Haara 2018, s. 56)

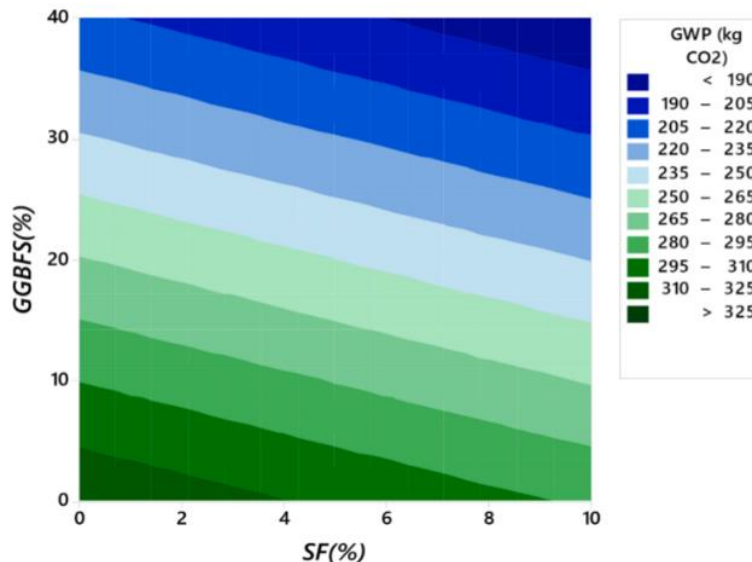
3.3 Silika

Silikahöyry eli piioksidihöyry on teollisuuden sivutuote, jota syntyy pääasiassa piiraudan valmistuksessa. Sitä syntyy, kun uunissa pelkistetään piirautaa tai piimetallia. SiO_2 -pitoisuus silikahöyryssä riippuu siitä, millaista tuotetta uunissa valmistetaan. Myös muut ominaisuudet riippuvat valmistetun tuotteen tyyppistä ja valmistusprosessista. Silikahöyryissä on yleensä yli 90 % SiO_2 : ta, mutta sen sisältö ja amorfisuuden aste vaihtelee tuotantomenetelmän mukaan. Väriltään silika on vaalean tai tumman harmaata epäpuhtauksien,

kuten hiilen ja rautaoksidien, takia; puhtaana se olisi väritön. Masuunikuonan ja lentotuhkan tapaan silikan koostumus voi vaihdella eri lähteistä tai jopa samasta lähteestä tulleen materiaalin sisällä. Koostumuksen tyypillinen vaihtelu on pienempää kuin lentotuhkalla ja samaa luokkaa masuunikuonan kanssa. (Chandra 1997, s. 554, 556, 558)

Silikahöyryä on kolmessa muodossa: jauheena, tiivistettynä ja lietteenä. Lisäksi silikaa valmistetaan keinotekoisesti. Silikahöyry on erittäin hieno amorfinen materiaali ja erittäin aktiivinen pozzolaani, joka on kuitenkin masuunikuonaan ja lentotuhkaan verrattuna vielä melko uusi ja vähemmän käytetty sideainevaihtoehto betoniin. (Chandra 1997, s. 554, 556) Raekooltaan silika on alle 1 μm (Haara 2018, s. 57).

Silika pienentää masuunikuonan ja lentotuhkan tapaan betonin GWP-arvoa eli vähentää betonin ympäristöpäästöjä (Habibi et al. 2021). Tämä on nähtävissä kuvasta 4.



Kuva 4. Masuunikuonan ja silikan käytön vaikutus betonin GWP-arvoon (Habibi et al. 2021).

Kuvassa 4 on vaaka-akselilla kuvattu silikan (SF) prosenttiosuus ja pystyakselilla masuunikuonan (GGBFS) prosenttiosuus. Kuvasta nähdään, että betonin GWP-arvo on suurimmallaan tummanvihreällä alueella eli seosaineiden määrän ollessa noin 0–4 %: a. Masuunikuonan ja silikan korvataessa suuremman prosenttiosuuden portlandsementistä GWP-arvo alkaa pienentyä selvästi. Esimerkiksi masuunikuonan osuuden ollessa 40 %: a ja silikan 10 %: a betonin GWP-arvoa on saatu pienennettyä yli 1/3 pelkästään portlandsementistä valmistettuun betoniin verrattuna.

3.4 Muut sideaineet

Geopolymeerit koostuvat emäksellä aktivoitua teollisuuden jätteestä tai sivutuotteesta. Geopolymeereistä käytetään nimitystä alkaliaktivoitu materiaali. Käytetyt jätteaineet sisältävät runsaasti piitä ja alumiinia, jotka tullaan sementtimäisiksi reagoivat emäksisen aktivaattorin kanssa. Emäksinä toimivat yleensä yhdistelmä hydroksidia (natrium- tai kaliumhydroksidi) ja lasista silikaattia (natrium- tai kaliumsilikaatti). Hyvän saatavuuden ja matalimpien kustannusten vuoksi yleensä käytetään natriumhydroksidia ja natriumsilikaattia. (Turner et al. 2013; Oulun yliopisto 2016) Lisäksi valmistusprosessissa käytetään hiekkaa ja vettä (Illikainen 2020). Geopolymeerien valmistuksessa voidaan käyttää teollisuuden sivuvirtana esimerkiksi lentotuhkaa tai eristevillajätettä (Turner et al. 2013; Oulun yliopisto 2016). Professori Mirja Illikainen Oulun yliopistosta uskoo, että materiaali voisi olla markkinoilla 5–10 vuodessa. Geopolymeeri kestää erittäin korkeita lämpötiloja, joten se sopisi esimerkiksi takkojen ja uunien osiksi. Toisaalta huokoisempi geopolymeerivaihtoehto voisi toimia eristeenä. Aineen koostumusta pystyy muokkaamaan valmistusolosuhteita muuttamalla. Geopolymeereista pystyttäisiin myös esimerkiksi valamaan meluvällejä. Geopolymeerin ympäristökuorma on peräti 80 %: a betonin valmistuksen aiheuttamaa kuormaa pienempi. Geopolymeerien käyttö noudattaa kiertotalouden periaatteita. Kiertotaloudella tarkoitetaan talouden muotoa, jossa saadaan lisäarvoa siitä, että materiaali kiertää mahdollisimman pitkään. Siihen sisältyy niin uusiutuvien luonnonvarojen kestävä käyttö kuin uusiutumattomien luonnonvarojen tehokas uudelleen käyttö ja kierrätys sekä jätteiden määrän minimointi. (Oulun yliopisto 2016)

Illikaisen mukaan geopolymeerien ominaisuudet vaihtelevat, koska sivuvirtojen ominaisuudet vaihtelevat. Hänen mielestään tulevaisuudessa materiaalivalinta pitäisi tehdä sen mukaan, mikä on riittävä ominaisuus kuhunkin käyttötarkoitukseen. Kaikissa käyttökohdeissa ei esimerkiksi ole tarvetta korkealle puristuslujuudelle. Geopolymeereillä lujuusominaisuudet on kuitenkin mahdollista saada hyvin suuriksi. Masuunikuonasta kehitetty geopolymeerilaasti on puristuslujuudeltaan jopa 107 MPa, kun tavallinen korkealujuusbetoni kestää 55 MPa. (Härkönen 2020, s. 84) Lappeenrannan yliopiston professori Antti Häkkinen on tutkimusryhmineen kehitellyt betonin lujuusominaisuuksia vastaavaa geopolymeeria (Lappeenrannan yliopisto 2020).

Geopolymeereille on saatu aikaan monia hyviä ominaisuuksia. On kehitetty sekä lujia, kevyitä että rankoille olosuhteille vastustuskykyisiä geopolymeerejä. Usein kuitenkin sopivaa geopolymeerireseptiä hahmoteltaessa täytyy tehdä kompromisseja esimerkiksi lujuuden, työstettävyyden, huokoisuuden, taloudellisuuden ja ympäristöystävällisyyden välillä eikä kaikkia hyödyllisiä ominaisuuksia saa samassa geopolymeerissa. (Keko)

Myös monien muiden aineiden ominaisuuksia toimia sideaineina on tutkittu. Esimerkkejä ovat esimerkiksi riisikuorien tuhka ja biomassatuhka (Chandra 1997, s. 184; Tosti et al. 2021) Sementtiteollisuudessa arvellaan, että tulevaisuudessa lentotuhkan saatavuus rajoittuu ja kuonan käyttö vähenee, kun esimerkiksi hiilivoimaloita poistetaan käytöstä. Tämän takia sementtiteollisuus tutkii uusien seosaineiden, kuten kalsinoitujen savien, käyttöä sementin seostamisvaiheessa. (Cembureau 2020, s. 23)

4. BETONIN OMINAISUUDET

Betonin käytön suosio perustuu sen moniin hyviin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, jäykyyteen, muokattavuuteen, turvallisuuteen, kosteuden keston, pitkäikäisyyteen ja edullisuuteen (Haara 2018, s. 13). Tässä työssä tarkasteltaviksi ominaisuuksiksi on valittu betonin lujuudenkehitys, säilyvyys ja työstettävyys. Lujuudenkehitys ja säilyvyys ovat kovettuneen betonin tärkeimmät ominaisuudet ja työstettävyys tuoreen betonin tärkeimpiä ominaisuuksia. Betonin ominaisuuksia on tärkeää seurata kovettumisen eri vaiheissa, jotta lopputuloksesta tulee onnistunut. Betoniin saadaan halutut ominaisuudet suhteittamalla eli määrittelemällä betonin eri ainesosien määrät. (Haara 2018, s. 69, 84) Suhteituksen lopputulos on kompromissi lujuuden ja työstettävyyden suhteen (Haavisto 2019a).

4.1 Lujuudenkehitys

Lujuudenkehityksen arviointiin on olemassa tietokonesovelluksia, joilla lujuudenkehitystä voi arvioida etukäteen tai laskea tietyllä hetkellä rakenteen lämpötilamittausten avulla. Sadgroven kaavalla tai eurokoodeissa esitetyllä arviointimenetelmällä lujuuden voi laskea myös käsin. Betonin lujuus voidaan testata myös porausnäytteistä tai olosuhdekappaleista. (Haara 2018, s. 92)

Sadgroven menetelmässä betonin kypsyyssikä t_{20} lasketaan kaavalla

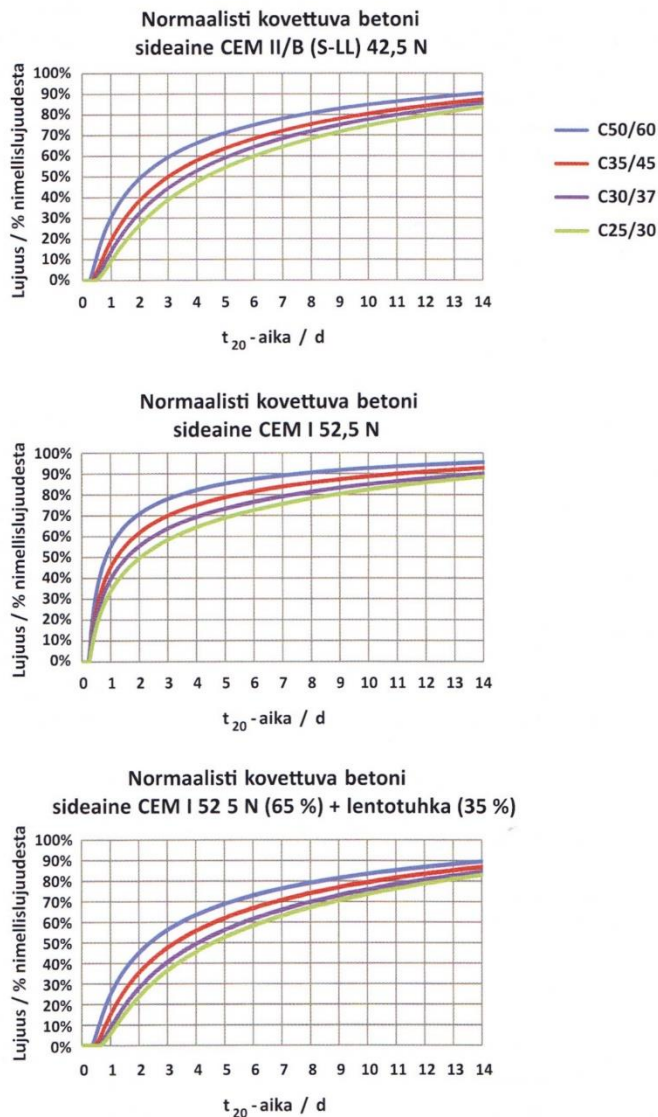
$$t_{20} = \left(\frac{T + 16^{\circ}\text{C}}{36^{\circ}\text{C}} \right)^2 * t \quad (1)$$

missä T on betonin lämpötila aikana t [$^{\circ}\text{C}$]

ja t on kovettumisaika [d].

Mikäli T ei ole koko kovettumisaajan vakio, kypsyyssikä lasketaan summana ajanjaksoista, jolloin lämpötila on ollut likimain vakio. Kun kypsyyssikä on selvillä, lujuus saadaan määritettyä käyrästä. (Haara 2018, s. 92; Haavisto 2019b)

Kuvan 5 avulla pystytään selvittämään betonin lujuus prosentteina sen nimellislujuu-
desta, kun kypsyysikä ja lujuusluokka on tiedossa. Kuvassa kolmen eri sementeistä val-
mistettujen betonien lujuudenkehitys.



Kuva 5. Eri sementeistä valmistettujen betonien lujuudenkehitys kypsyysikä funktiona (Haara 2018, s. 93).

Kuvasta 5 voi huomata, että kaikilla kuvan normaalisti kovettuvilla sementeillä lujuudenkehitys on 20 °C :n lämpötilassa suurinta muutaman ensimmäisen päivän aikana, jonka jälkeen se alkaa tasaantua. Esimerkiksi normaalisti kovettuvalla betonilla, jonka sideaine on CEM I 52,5 N betonin lujuus on saavuttanut kolmessa päivässä betonin lujuusluokasta riippuen 60–80 % lujuuden sen nimellislujuudesta. (Haara 2018, s. 93) Kuvasta näkee selvästi, että lujuudenkehitys on nopeinta keskimmäisenä olevalla betonilla, jossa on käytetty ainoastaan portlandsementtiä. Kahdessa muussa on käytetty seosaineita,

kuten masuunikuonaa ja lentotuhkaa. Niiden sisältämän betonin lujuudenkehitys on hitaampaa aluksi, mutta saavuttaa 14 päivään mennessä jo lähes saman lujuuden.

Betonin puristuslujuus on kovettuneen betonin tärkein ominaisuus, sillä betonin on tärkeää kestää suuria puristusrasituksia. Puristuslujuuden avulla pystytään tyypillisesti määrittämään myös muut betonin keskeisimmät ominaisuudet, kuten vetolujuus, kimmo kerroin ja säilyvyys. Betonin lujuusluokat määräytyvät puristuslujuuden avulla ja muut suunnitteluun tarvittavat mekaaniset ominaisuudet määräytyvät betonin lujuusluokan mukaan. Puristuslujuus arvostellaan yleensä 28 päivän ikäisenä eurokoodin mukaisesti joko lieriökokeen tai kuutiökokeen avulla ja rakenteiden mitoitus perustuu tähän lujuuteen sekä muihin mekaanisiin ominaisuuksiin tässä iässä määritettynä. (Haara 2018, s. 84, 85)

Betonin vetolujuus on noin 1/10 puristuslujuudesta ja se pienenee suhteellisesti puristuslujuuden kasvaessa. Vetolujuuden arvo on tärkeä tietää, kun arvioidaan halkeiluriskejä ja siitä aiheutuvia mahdollisia haittoja sekä kun suunnitellaan raudoittamattomia betonirakenteita. (Haara 2018, s. 89)

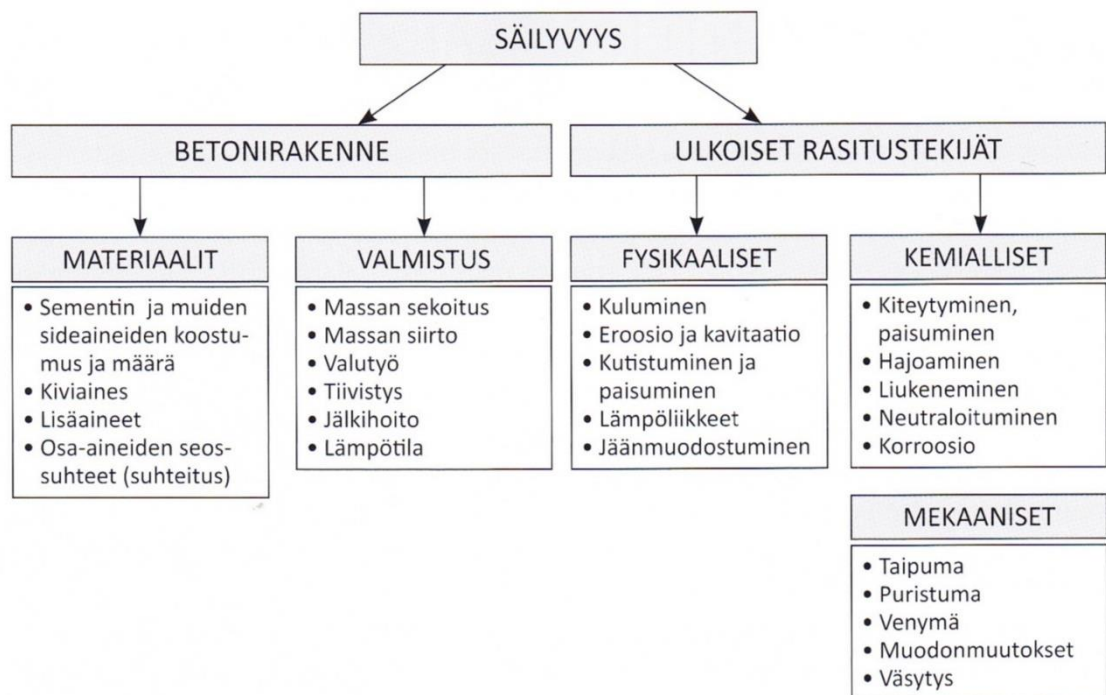
Betonin lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat sementtilaatu, sementtimäärä, kiviainesten ominaisuudet ja vesi-sementtisuhde. Vesi-sementtisuhde on betonimassan sisältämän vesimäärän ja sementin painon suhde ja se on kääntäen verrannollinen suuren betonin lujuuteen ja tiivyyteen. Veden lisääminen betoniin parantaa työstettävyyttä, mutta lisää huokoisuutta ja siten lujuus alenee. Alhainen vesi-sementtisuhde varmistaa hyvän laadun, lujuuden, vedenpitävyyden ja pakkasenkestävyyden. (Finnsementti; Haara 2018, s. 69)

Halkeilu on yksi betonille tyypillinen ominaisuus. Se alentaa betonin lujuutta sekä vaikuttaa haitallisesti säilyvyyteen, sillä halkeamista betonirakenteeseen pääsee haitallisia aineita, jotka voivat aiheuttaa esimerkiksi raudoitteiden korroosiota. (Haavisto 2019b)

4.2 Säilyvyys

Betonin säilyvydellä tarkoitetaan betonirakenteen kykyä säilyttää toiminnalliset ominaisuutensa siihen kohdistuvista ulkoisista rasituksista huolimatta koko suunnitellun käyttöikänsä ajan. Suunnittelukäyttöikä tarkoittaa sitä ajanjaksoa, jonka ajan betonirakenteiden ominaisuuksien pitäisi valitulla todennäköisyydellä pysyä rakenteelta vaadittavalla tasolla. Edellytyksenä on, että rakennetta pidetään asianmukaisesti kunnossa ja esimerkiksi huolletaan. Tällöin suunnittelukäyttöikä käytännössä on ikä, jonka rakenteen suunnitellaan kestävän ilman korjaamista. Säilyvyyden arvioinnissa käytetään hyväksi puristuslujuutta, sillä ne ovat verrannollisia. (Haara 2018, s. 99)

Säilyvyyteen vaikuttaa niin itse betonirakenne kuin ulkoiset tekijät. Betonirakenteessa vaikuttavia tekijöitä ovat käytettyyn materiaaliin liittyvät tekijät, kuten sementin ja muiden sideaineiden määrä, kiviaines ja osa-aineiden seossuhteet eli suhteitus. Myös betonirakenteen valmistusvaiheella, kuten massan sekoituksella, valutyöllä, tiivistyksellä ja jälkihoidolla on vaikutusta betonin säilyvyyteen. Ulkoiset rasitustekijät, jotka vaikuttavat betonin säilyvyyteen voidaan jakaa fysikaalisiin, mekaanisiin ja kemiallisiin rasitustekijöihin. Fysikaalisia rasitustekijöitä ovat muun muassa kuluminen, kutistuminen ja lämpöliikkeet, mekaanisia taas muun muassa taipuma, puristuma ja muodonmuutokset ja kemiallisia kiteytyminen, liukeneminen ja korroosio. (Haara 2018, s. 100) Kuvaan 6 on koottu betonin säilyvyyteen vaikuttavia tekijöitä.



Kuva 6. Betonirakenteen säilyvyyteen vaikuttavat tekijät (Haara 2018, s. 100).

Kuvasta huomataan, että vaikka sementin koostumuksella ja määrällä eli siten käytetyllä korvaavalla sideaineella on vaikutusta betonin säilyvyyteen, vaikuttaa säilyvyyteen myös useat muut tekijät.

Säilyvyyden kannalta on tärkeää, että betoni on tiivistä, sillä betonin tiiveys hankaloittaa haitallisten aineiden tunkeutumista betoniin. Huokoisuuden lisääminen parantaa pakkaskestävyyttä, mutta huonontaa muuten lujuutta ja säilyvyyttä. Suomessa tärkeimpiä betonin säilyvyyteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat pakkasenkestävyys ja pakkas-suolaraituksen kestävyys. (Haara 2018, s. 69) Säilyvyyden arvioinnissa on lisäksi tärkeää huomioida myös muun muassa betonin kemiallinen rapautuminen, raudotteiden korroosio,

betonipinnan kuluminen ja halkeilu, vedenpitävyys sekä korkean lämpötilan vaikutus rakenteeseen. (Haara 2018, s. 100; Haavisto 2019b) Hyvä vedenpitävyys vaatii matalan vesi-sementtisuhteen ja betonilta hyvän tiivistyvyyden (Haavisto 2019b).

4.3 Työstettävyys

Betonin työstettävyys on tuoreen betonin eli jähmettymättömän ja kovettumattoman betonin ominaisuus. Vaikka oleellisinta on, että kovettunut betoni on käyttötarkoituksensa mukaista ja esimerkiksi kestää sille tulevat rasitukset, on betonin ominaisuuksia tärkeää mitata ja arvioida jo heti valamisen jälkeen. Tämä on tärkeää, sillä jokaisen valmiin materiaalin ominaisuuksiin vaikuttaa sen ominaisuudet aiemmassa vaiheessa ja mitä prosesseja materiaalille on aiemmissa vaiheissa tehty, joten betonin ominaisuudet ja sille tehdyt toimenpiteet sen kovettumisprosessin aikana vaikuttavat siihen tuleeko betonista lopulta sopivaa haluttuun käyttötarkoitukseen. Työstettävyyden kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat koossapysyvyys, tiivistyvyys ja notkeus. (Haara 2018, s. 69, 70)

Betonin koossapysyvyydellä tarkoitetaan betonin kykyä säilyttää ainesosien keskinäiset suhteet betonia siirreltäessä, käsiteltäessä sekä betonoinnin aikana. Tiivistyvyys on betonin kyky täyttää sille varattu tila ilman, että tilaan syntyy onkaloita tai haitallisia huokosia. Tiivistyneessä betonissa myös pinta on tasoittunut. Notkeudella tarkoitetaan betonin muodonmuutoskykyä ulkoisten voimien vaikutuksesta. Notkeus helpottaa betonin käsittelyä. (Haavisto 2019a)

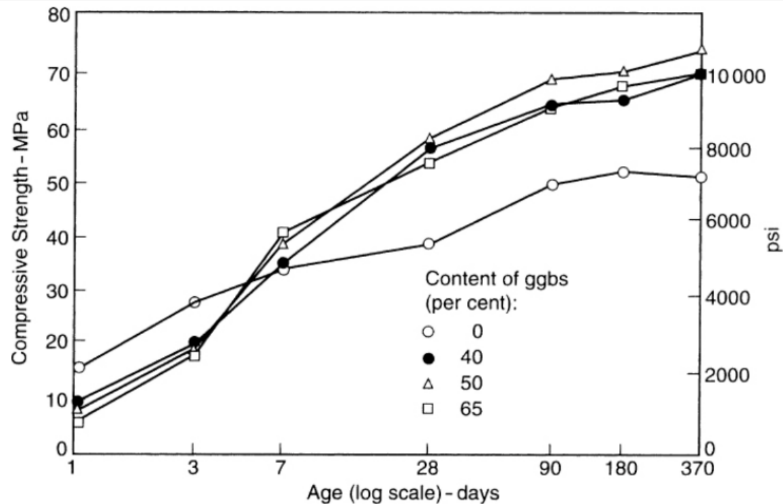
Betonin työstettävyys vaikuttaa työn sujuvuuteen, joka vaikuttaa kustannuksiin ja työn lopputuloksen onnistumiseen (Haara 2018, s. 69).

5. SIDEAINEIDEN VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN

Sementillä on merkittävä vaikutus sekä tuoreen että kovettuneen betonin ominaisuuksiin (Haara 2018, s. 24). Täten myös jokaisella sementtiä korvaavalla sideaineella on vaikutusta näihin ominaisuuksiin, sillä ne vaikuttavat sementin ominaisuuksiin muuttaessaan sementin koostumusta perinteisestä portlandsementistä. Nevillen (2011) mukaan ympäristötujen sijaan vahvimmin korvaavien sideaineiden käyttöä puoltavat niiden konkreettiset edut betonin ominaisuuksia tarkasteltaessa. Näitä sideaineita käyttämällä voidaan saada betonille erityisiä käyttötarkoitukseen sopivia ominaisuuksia. Tässä opinnäytetyössä on päätetty keskittyä selvittämään, miten kukin opinnäytetyöhön käsiteltäväksi valittu korvaava sideaine vaikuttaa betonin lujuudenkehitykseen, säilyvyyteen ja työstettävyyteen.

5.1 Sideaineiden vaikutus lujuudenkehitykseen

Masuunikuonaa käytettäessä lujuudenkehitys riippuu paljon muun muassa siitä, missä suhteessa masuunikuonaa ja sementtiä käytetään, mikä on sideaineen ja veden suhde, sementtimateriaalien kokonaispitoisuudesta, testausajasta ja kovettumistyyppistä (Özbay et al. 2016). Masuunikuona on hienompaa kuin portlandsementti, mikä johtaa parempaan lujuudenkehitykseen. Lujuudenkehitys on kuitenkin aluksi hitaampi, koska masuunikuonan aktivoitumisen pitää ensin tapahtua. (Neville 2011) Lujuudenkehitys hidastuu sitä enemmän, mitä suurempi on masuunikuonapitoisuus (Haara 2018, s. 93). Masuunikuonan aktivointia voi nopeuttaa käyttämällä hienoa portlandsementtiä. Monissa rakenteissa varhainen vahvuus ei kuitenkaan ole tärkeä. (Neville 2011) Kuvasta 7 on nähtävissä masuunikuonan lisäämisen vaikutus betonin puristuslujuuden kehitykseen.



Kuva 7. Masuunikuonan lisäämisen vaikutus puristuslujuuden kehitykseen (Neville 2011).

Kuvasta 7 voi nähdä, kuinka jokaisella masuunikuonaa sisältävällä betonilla alussa lujuus kehittyy portlandsementistä valmistettua betonia hitaammin ja varhaisiän lujuudet ovat pienempiä, mutta jo 7 päivän kohdalla nämä betonit ovat ohittaneet lujuudessa portlandsementtibetonin. Myöhäisiän lujuudet taas ovat selkeästi suurempia kuin portlandsementtibetonilla.

Özbay et al. (2016) mukaan ilmakovetetulla betonilla masuunikuonapitoisuus korreloi käänteisesti puristuslujuuden suuruuteen. Sen sijaan sekä 50 % että 60 % prosentin masuunikuona-portlandsementtisuhteella on positiivinen vaikutus puristuslujuuteen, kun testausaikana on 90 päivää ja kovettumistyyppinä vesikovettuminen. Kyseisen tutkimuksen mukaan optimaalinen masuunikuonan prosenttiosuus puristuslujuuden kannalta on noin 55 %. Samansuuntaisen havainnon voi tehdä kuvasta 7.

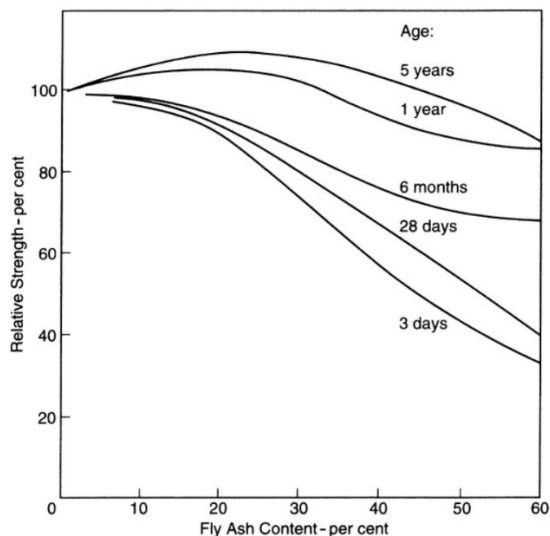
Verrattuna portlandsementistä valmistettuun betoniin masuunikuonabetonin lujuudenkehitys hidastuu alhaisissa ja nopeutuu korkeissa lämpötiloissa voimakkaammin (Hara 2018, s. 57). Korkea lämpötila lujuudenkehityksen alkuvaiheessa ei aiheuta yhtä selkeitä haitallisia vaikutuksia pitkäaikaiselle lujuudelle ja läpäisevyydelle masuunikuonaa käytettäessä. Alle 10 ° C: een lämpötiloissa lujuudenkehitys on heikkoa ja masuunikuonan käyttöä ei suositella. Yleensä parempi lujuudenkehitys saavutetaan hienommilla ja emäksiä sisältävillä sementeillä. Masuunikuonan avulla saavutetaan tiheämpi sementtitanan mikrorakenne, mikä parantaa pitkäaikaislujuutta ja kestävyyttä. (Neville 2011) Masuunikuonabetoni vaatii pidemmän jälkihoidon (Finnsementti 2019).

Lentotuhkaa sisältävän betonin puristuslujuuteen vaikuttavat lentotuhkan pozzolaaninen reaktiivisuus, seoksen rikkaus, kiviaineksen luokitus ja luonne, seoksen vesipitoisuus ja kovettumisolosuhteet (Oner et al. 2005). Lentotuhkan sideainetoiminnan perustana on

pozzolaaninen reaktio, joka on sementin hydrataatioreaktioita hitaampi. Tämän vuoksi lentotuhkabetonissa sitoutuminen ja lujittuminen hidastuvat, mikä tarkoittaa alhaisempia varhaisiän lujuuksia. Toisaalta myöhäsiän lujuudet ovat suurempia verrattuna portlandsementistä valmistettuun betoniin. Hitaampi reaktio johtuu hydrotaatiolämmön alenemisestä lentotuhkaa käytettäessä. (Haara 2018, s. 56) Koska lentotuhka reagoi betonissa hitaasti, pitkäaikainen märkäkovetus on välttämätöntä (Neville 2011). Optimaalinen lentotuhkan osuus lentotuhka-sementtisuhteessa on noin 40 %: a, sillä suuremmilla määrillä puristuslujuudet alkavat pienentyä (Oner et al. 2005).

Kovettumisen hidastuminen voi olla edullista betonoitaessa kuumalla säällä, mutta muuten voidaan tarvita kiihdytintä (Neville 2011). Lujuudenkehityksen hidastumisen takia lentotuhkaa ei suositella käytettäväksi talvibetonoinnissa ja lattiavaluissa (Haara 2018, s. 56). Matalissa lämpötiloissa hidas kovettuminen voi aiheuttaa esimerkiksi rakkuloiden muodostumista tai halkeilua (Neville 2011). Lentotuhkan sisältämä hiili myös vaikeuttaa betonin huokostamista ja saattaa muuttaa lisäaineiden toimintaa, joten ennakkokokeet lisäaineiden kanssa ovat tarpeellisia (Haara 2018, s. 56). Lentotuhkan reaktio betonissa nopeutuu lämpötilan vaikutuksesta. Tämän vuoksi massiivisissa rakenteissa ja pienissä betonielementeissä lujuuden kehittyminen saattaa olla erilaista ja se on tärkeää huomioida. (Neville 2011)

Vesi-sementtisuhteen ollessa 0,5 ja 0,8 välillä lentotuhkabetonilla ei havaittu lujuudenkasvua enää 3–5 vuoden iässä, vaikka portlandsementistä valmistettu betoni jatkaa oikein varastoituna lujuudenkasvuun pitkällä aikavälillä (Neville 2011). Kuvasta 8 on nähtävissä, että lujuudenkehitys tapahtuu pääosin ensimmäisen vuoden aikana, eikä 1 ja 5 ikävuoden välissä ole tapahtunut suurta muutosta.



Kuva 8. Lujuuden kehitys lentotuhkamäärän funktiona (Neville 2011).

Kuvasta 8 voi myös nähdä, että liiallinen lentotuhkan pitoisuus ei ole hyödyllinen lujuudenkehityksen kannalta. Rajapitoisuus on todennäköisesti noin 30 painoprosenttia sementtimateriaalista (Neville 2011). Tämä on hieman pienempi, mutta samaa suuruusluokkaa Oner et al. (2005) esittämän tuloksen kanssa.

Määrälliset ennusteet lentotuhkan lujuudesta eivät ole mahdollisia. Lentotuhkalle onkin tärkeää tehdä kokeita käyttäen sen kanssa varsinaisessa rakenteessakin käytettävää sementtiä. Tiivistyminen ei välttämättä onnistu lentotuhkabetonissa yhtä hyvin, kun käytetään karkearakeista kiviainesta. Tämä voisi olla yksi syy, miksi lentotuhkan vaikutus betonin lujuuteen on rajallinen. (Neville 2011)

Silika lisää betonin lujuutta huomattavasti ja sitä käytetään esimerkiksi korkean suorituskyvyn betoneissa (Neville 2011; Haara 2018, s. 58). Erona esimerkiksi masuunikuonan ja lentotuhkan käyttöön verrattuna on, että silikan käytöllä saadaan betonille korkea varhaisen iän lujuus. Korkean lujuuden kehittymisen taustalla on sementtihiukkasia noin 100 kertaa pienempien silikahiukkasten kyky asettua hyvin lähelle betonin kiviaineshiukkasia ja tehdä siten betonista hyvin tiivistynyttä. Perinteisen portlandsementin hiukkasilla tätä kykyä ei ole ja tämä alue onkin tunnettu heikkona kohtana betonissa. Silika myös vähentää veden erottumista tällä alueella, joten vettä ei jää karkearakeisten kiviainepartikkelien alle. Tämän ansiosta kyseisen kohdan huokoisuus pienenee, jolloin se on vahvempi lujuudeltaan ja läpäisevyydeltään. Jos silikaa on alle 5 %: a sementin kokonaismassasta, silikamäärä ei riitä peittämään kaikkia kiviaineshiukkasia ja samanlaista lujuuden kasvua ei saavuteta. Silikamäärän prosenttiosuuden kasvattaminen hyvin isoksi ei ole myöskään kannattavaa, koska ylimääräinen silikahöyry ei pysty asettumaan kiviaineksen pinnalle. (Neville 2011)

Lujuuden kehitys kuitenkin loppuu paljon aikaisemmin kuin betonilla, jossa on käytetty portlandsementtiä. Tämä on esitetty taulukossa 2.

Age	Compressive strength (MPa) of mixes with a silica fume content of (per cent):			
	0	10	15	20
1 day	26	25	28	27
7 days	45	60	63	65
28 days	56	71	75	74
56 days	64	74	76	73
91 days	63	78	73	74
182 days	73	73	71	78
1 year	79	77	70	80
2 years	86	82	71	82
3 years	88	90	85	88
5 years	86	80	67	70

Taulukko 2. Silikaa sisältävien betonien lujuuden kehitys (Neville 2011).

Taulukosta 2 on nähtävissä, että silikaa sisältämät betonit saavuttavat selvästi korkeamman varhaisiän lujuuden verrattuna kuvan vertailussa mukana olevaan portlandsementistä valmistettuun betoniin. Portlandsementistä valmistetun betonin lujuudenkehitys on kuvattu sarakkeessa, jossa silikan prosenttiosuus on nolla. Kuvasta näkee myös, että silikan lujuudenkehitys loppuu selvästi portlandsementistä valmistettua betonia aikaisemmin. Pitkä vesikovetus on tärkeää etenkin silikan suuren lujuuden kehittymisen kannalta 3 ja 28 päivän välillä (Neville 2011).

5.2 Sideaineiden vaikutus säilyvyyteen

Masuunikuona tiivistää betonia ja hidastaa näin vieraiden aineiden tunkeutumista betonin sisään (Neville 2011). Masuunikuonan käyttö betonissa parantaa betonin sulfaatinkestävyyttä ja mikäli käytetystä sideainemäärästä yli 70 %: a on masuunikuonaa, sideaineyhdistelmää voidaan pitää sulfaatinkestävänä. Betonin pakkas-suolakestävyys sen sijaan heikkenee. (Haara 2018, s. 57) Masuunikuonan käyttö pienentää vedenläpäisevyyttä ja kloridien tunkeutumista betoniin. Myös alkali-piiksidireaktion hallinta on parempaa. Pakkaskestävyys on yhtä hyvä kuin vain portlandsementistä valmistetulla betonilla, mikäli masuunikuonan prosentuaalinen osuus on sopiva. (Neville 2011) Masuunikuonan määrän ollessa 70 %: a masuunikuona-sementtisuhteesta pakkaskestävyys oli heikompaa kuin alhaisemmillä masuunikuonan prosentuaalisilla osuuksilla ja rapautumista tapahtui. Tällaistaikin betonia on kuitenkin mahdollista käyttää esimerkiksi sisätilojen betonirakenteissa, joissa säilyvyysvaatimuksia pakkaskestävyyden suhteen ei ole. (Betoni c 2005) Pitkäaikainen vesikovetus on kuitenkin tärkeää, jotta tämä pakkaskestävyys saavutetaan. Varhaisessa iässä karbonatisoitumisen syvyys on suurempi, mitä ainoastaan portlandsementtiä käyttämällä. Myöhemmin karbonatisoituminen ei kui-

tenkaan enää lisäännny masuunikuonabetonin matalan läpäisevyyden takia, mikäli betonin kovettuminen on tehty hyvin. Raudoitteiden korroosion vaaraa ei siten pitäisi olla, ellei käytettävä masuunikuonapitoisuus ole hyvin korkea. (Neville 2011)

Seurauksena lentotuhkan hitaasta reaktiosta betonissa läpäisevyys on aluksi suurempi lentotuhkabetonilla kuin betonilla, missä on käytetty ainoastaan portlandsementtiä. Ajan myötä lentotuhkabetonin läpäisevyydestä tulee kuitenkin hyvin pieni. Tämä kuitenkin edellyttää, että lentotuhkabetoni kovettuu pitkään, sillä liian lyhyt jälkihoitoaika on lentotuhkabetonin säilyvyyden kannalta jopa kriittisempi kuin lujuuden kehittymisen kannalta. Koska lentotuhkaa sisältävän kovettuneen betonin läpäisevyys on vähentynyt, kloridin pääsy tällaiseen betoniin vähenee. (Neville 2011)

Lentotuhkan sisältämä hiili vaikeuttaa betonin huokostamista ja voi muuttaa myös muiden betonin lisäaineiden toimintaa, joten ennakkokokeita lisäaineiden kanssa on syytä tehdä halutun lopputuloksen varmistamiseksi. Huokoistumisen vähenemisen takia hiilituhkan käyttö saattaa aiheuttaa ongelmia pakkasenkestävyyteen. (Haara 2018, s. 56) Nevillen (2011) mukaan luokan F lentotuhkaa käytettäessä sulfaatinkestävyys sekä jäätymisen ja sulamisen kesto paranee oikealla sideaineiden suhteella. Luokan F lentotuhkalla tarkoitetaan lentotuhkaluokituksen yleisintä luokkaa, johon kuuluva lentotuhka on piipitoista ja peräisin bitumihielestä. Joissain maissa lentotuhkaa ei saa käyttää esijännitetyissä betoneissa, koska sen sisältämä hiili voi vaikuttaa esijännitysteräksen rasisuskorroosioon. Lentotuhkaa sisältävän betonin kulumiskestävyys on samalla tasolla tai jopa parempi kuin portlandsementtiä käytettäessä. Lentotuhkan käyttö vähentää mahdollisesti alkali- ja piidioksidireaktiota, mutta sillä ei ole myönteistä vaikutusta alkali-karbonaattireaktioon nähden. (Neville 2011)

Suurin merkitys silikalla on betonin ominaisuuksista sen läpäisevyyteen. Vähentyneen läpäisevyyden seurauksena betonilla on suurempi vastustuskyky klorideille. Korkeamman lämpötilan haitalliset vaikutukset huokosrakenteeseen ovat pienempiä silikapitoisella betonilla ja silikapitoinen betoni on kulutuskestävämpää. Huonosti toteutettu jälkihoito altistaa karbonatisoitumiselle. Silikapitoisen betonin emäksisyys on riittävä suojaamaan raudoitteiden korroosiolta. Sulfaattikestävyys on hyvä ja betonilla on myös hyvä magnesium-, natrium- ja kalsiumkloridin vastustuskyky. Silika on myös erityisen tehokas kontrolloimaan alkali-silikareaktiota. Silikaa sisältävän betonin pakkasenkestävyydestä on ristiriitaista tutkimustietoa ja yleistyksien tekemiseksi tarvittaisiin tarkkaa tietoa eri mitausjärjestelyistä, sillä esimerkiksi käytetyllä betonilla ja betonin käsittelyllä ennen jäädyttämistä on vaikutusta tuloksiin. (Neville 2011)

5.3 Sideaineiden vaikutus työstettävyyteen

Masuunikuonan käyttö betonissa parantaa tuoreen betonin työstettävyyttä ja tekee sekoituksesta liikkuvamman, mutta yhtenäisen. Tuoreen betonin notkeus siis paranee. Tämä on seurausta sementtisten hiukkasten paremmasta leviämisestä ja masuunikuonahiukkasten pintaominaisuuksista. Hiukkaset ovat sileitä ja imevät vähän vettä sekoittamisen aikana. Masuunikuonaa sisältävän betonin työstettävyys on kuitenkin herkempi vesipitoisuuden vaihteluille. (Neville 2011; Haara 2018, s. 57) Testitulokset osoittavat, että mitä suurempi on masuunikuonan osuus betonissa suhteessa portlandsementtiin, sitä parempi on työstettävyys eli työstettävyys paranee lineaarisesti masuunikuonan määrän kanssa (Özby et al. 2016).

Lentotuhka parantaa betonin työstettävyyttä ja koossapysyvyyttä (Haara 2018, s. 56). Vedentarve laskee noin 5–15 %: a verrattuna ainoastaan portlandsementistä valmistettuun betoniin. Vedentarpeen vähenemisen syynä on lentotuhkan hiukkasten pallomainen muoto. Polttoprosessissa käytetyn lämpötilan laskeminen siinä syntyvien, haitallisten tyyppien päästöjen eli NO_x-päästöjen vähentämiseksi kuitenkin heikentää tällaisen hiukkasrakenteen syntymistä, joten polttoprosessiin pitäisi tehdä muutoksia, jotta päästöjen vähentäminen ei heikennä samalla lentotuhkan ominaisuuksia. Hiukkasten muodolla on myös betonin työstettävyyttä parantava vaikutus ja esimerkiksi viimeistelytyöiden teko onnistuu lentotuhkabetonilla hyvin. Toisaalta työstettävyys voi heikentyä, jos lentotuhkan hiilipitoisuus on korkea. Lentotuhkan jauhaminen hienojakoisuuden lisäämiseksi ei ole välttämättä kannattavaa, sillä se voi johtaa pallomaisten hiukkasten tuhoutumiseen, jolloin vedentarve taas lisääntyy hiukkasten epäsäännöllisen kulmamuodon vuoksi. (Neville 2011) Työstettävyys- ja koossapysyvyyssominaisuuksien ollessa parempia lentotuhkaa käytettäessä voidaan vähentää fillerin eli hienon kiviaineksen määrää (Haara 2018, s. 56).

Silika parantaa betonin koossapysyvyyttä. Korkealujuusbetoneissa, joissa sementti- ja hienoaimesmäärät ovat jo alun perin korkeat, silikan käyttö tekee massasta kittimäistä heikentäen betonin työstettävyyttä. (Haara 2018, s. 58) Silikan käyttö myös lisää vedentarvetta. Jotta samanaikaisesti vesi-sementtisuhte pystytään pitämään matalana ja mahdollistetaan tarvittava työstettävyys, käytetään silikan yhteydessä usein notkistavia lisäaineita. Matalan vesi-sementtisuhteen ylläpitäminen taas mahdollistaa korkean lujuuden. Seos on voimakkaasti yhtenäinen ja sopii käytettäväksi esimerkiksi pumppaamiseen. (Neville 2011)

6. PÄÄTELMÄT

Ympäristöetujen lisäksi korvaavat sideaineet antavat betonille monia muita hyviä ominaisuuksia. Kaikki kolme tarkemmin käsiteltyä korvaavaa sideainetta pystyivät kokonaisvaltaisesti parantamaan betonin ominaisuuksia. Tämä oli erona esimerkiksi geopolymeereihin, joiden tutkimus- ja kehitystyö on vielä alkuvaiheessa verrattuna masuunikuonaan, lentotuhkaan ja silikaan. Geopolymeereillä joudutaan vielä tekemään kompromisseja eri ominaisuuksien välillä. Tämä ei kuitenkaan välttämättä ole ongelma. Muidenkin korvaavien sideaineiden käytön kohdalla niin kuin tietysti myös rakentamisessa ylipääntään on tärkeää valita käyttötarkoitukseen ominaisuuksiltaan riittävä materiaali. Tämä toimintamalli tukee kiertotalouden periaatteita ja vähentää ympäristökuormaa. Betonirakenteita käytetään monissa eri kohteissa, eikä kaikissa kohteissa vaadita betonilta samoja ominaisuuksia. Esimerkiksi puutteet pakkasenkestävyydessä eivät haittaa, jos rakenteelle ei ole pakkasenkestävyysvaatimuksia ja materiaali sopii ominaisuuksiltaan muuten hyvin käytettäväksi rakenteessa. Esimerkkinä sideaineiden käytöstä hyvin niiden ominaisuuksille sopivassa rakenteessa on silikan käyttö korkealujuusbetonissa. Vaikka silikalla on myös heikkouksia verrattuna sementtiin, sen erityisen hyviä ominaisuuksia pystytään hyödyntämään.

Työssä saatiin selville, että pääosin työssä tutkittujen korvaavien sideaineiden vaikutukset betonin ominaisuuksiin olivat samansuuntaisia ja eroja oli lähinnä yksittäisissä lujuudenkehitykseen, säilyvyyteen tai työstettävyyteen vaikuttavissa ominaisuuksissa. Kaikkien kolmen sideaineen vaikutukset lujuudenkehitykseen ja säilyvyyteen olivat pääosin positiivisia. Lujuudet kasvoivat sideaineiden käytöllä ja esimerkiksi läpäisevyys pieneni kaikilla sideaineilla. Yksittäisinä eroina olivat esimerkiksi varhaisiän lujuudet ja pakkasenkestävyys. Työstettävyyden kohdalla erot eri sideaineiden välillä olivat suurempia. Masuunikuonan ja lentotuhkan käyttö paransi työstettävyyttä. Silikan yhteydessä tarvittava työstettävyys täytyy taas varmistaa notkistavilla lisäaineilla.

Tutkimuksessa huomattiin myös, että betonin ominaisuuksiin vaikuttavat käytetyn sideaineen lisäksi monet muut tekijät, kuten sideaineen ja sementin suhde, sideaineen ja veden suhde sekä kovettumistyyppi, joten nämä tekijät on myös syytä huomioida.

Tärkeimpänä johtopäätöksenä voidaan pitää sitä, että hyviä korvaavia sideaineita löytyy. Sideaineiden käytön soveltuvuutta arvioitaessa on tärkeää huomioida betonirakenteen

käyttötarkoitus. Vaikka esimerkiksi masuunikuonan käytöllä on betonin säilyvyyden kannalta myös negatiivisia vaikutuksia, voi se joihinkin rakenteisiin olla parempi vaihtoehto kuin portlandsementistä valmistettu betoni.

LÄHTEET

Betoni a. Betoni ja ympäristö. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-ymparisto/>

Betoni b. Sementti ja kasviuonekaasupäästöt. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>

Betoni c (2005). Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit. Betoni-lehti 1/2005. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/11/Ymp%C3%A4rist%C3%B6yst%C3%A4v%C3%A4lliset-ja-hyvin-s%C3%A4ilyv%C3%A4t-betonit1.pdf>

Cembureau (2020). Cementing the European Green Deal. The European Cement Association. 36 p. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): http://www.cembureau.eu/media/kuxd32qi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf

Chandra, S. (1997). Waste materials used in concrete manufacturing. Westwood, N.J., U.S.A: Noyes Publications. 673 p.

Finnsementti. Kun teet betonia, tee se oikein. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): http://www.finnsementti.fi/files/pdf/tietoa_betonista/kun_tee_betonia.pdf

Finnsementti (2019). Masuunikuonajauhe KJ400. Saatavissa (viitattu 14.6.2021): https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe_KJ400.pdf

Finnsementti (2020). Ympäristöraportti 2020. 29 s. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti_ymparistoraportti_2020.pdf

Haara, T. (2018). Betoniteknikan oppikirja 2018. Helsinki: BY-Koulutus Oy. 568 s.

Haavisto, J. (2019a). RAK-32201, Luentomoniste Luentodiat 3: Tuoreen betonin ominaisuudet. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere

Haavisto, J. (2019b). RAK-32201, Luentomoniste Luentodiat 5: Kovettuneen betonin ominaisuudet. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere

Habibi, A., Ramezani pour, A.M. & Mahdikhani, M. (2021). RSM-based optimized mix design of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials based on waste generation and global warming potential. *Resources, Conservation and Recycling*, **167**, pp. 105420. Saatavissa (viitattu 31.7.2021): <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105420>

Härkönen, T. (2020). Uudet materiaalit käyttöön hiilipihissä rakentamisessa. Betoni-lehti 1/2020. s. 82–87. Saatavissa (viitattu 14.6.2021): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/03/Betoni-1-2020-KOKO-lehti-1.pdf>

Illikainen, M. (2020). Uudet materiaalit käyttöön hiilipihissä rakentamisessa. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/02/Uudet-materiaalit-k%C3%A4ytt%C3%B6n-hiilipihissä-rakentamisessa-Mirja-Illikainen-professori-Oulun-yliopisto.pdf>

Keko. Tietoa geopolymeereistä. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.6.2021): <http://www.keko-geopolymeerit.fi/geopolymeerit.html>

Lappeenrannan yliopisto (2020). Uutta rakennusmateriaalia teollisuuden sivuaine virroista – geopolymeerikomposiitteja testataan Lappeenrannassa junaradan varrella. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.6.2021): https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/uutta-rakennusmateriaalia-teollisuuden-sivuainevirroista-%E2%80%93geopolymeerikomposiitteja-testataan-lappeenrannassa-junaradan-varrella

- Mattila, V. V. (2019). Kädenjälki jalanjäljen rinnalle. Sementti-lehti 1/2019. s. 13–15. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti_1_19.pdf
- Mindess, S. & Aitcin, P.C. (2011). Sustainability of Concrete. Taylor & Francis Group. 328 p.
- Neville, A.M. (2011). Properties of concrete. 5 edn. Harlow, England; Pearson. 846 p.
- Oner, A., Akyuz, S. & Yildiz, R. (2005). An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete. Cement and Concrete Research, 35(6), pp. 1165–1171. Saatavissa (viitattu 12.6.2021): <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.031>
- Oulun Yliopisto (2016). Geopolymeerit muuttavat maailmaa. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): <https://www oulu.fi/yliopisto/node/41024>
- Pasanen, P., Bruce, T. & Sipari, A. (2012). Ympäristöystävällisen kivitalon suunnittelu ja toteutus. Bionova Oy. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/06/Ymp%C3%A4rist%C3%B6yst%C3%A4v%C3%A4llisen-kivitalonsuunnittelu-ja-toteutus.pdf>
- Robbie, M.A. (2018). Global CO2 emissions from cement production. Earth system science data, 10(1), pp. 195–217. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- Saarinen, S. (2018). Kiertotalous toimii betonirakentamisessa. Betoni-lehti 3/2018. s. 94–95. Saatavissa (viitattu 13.6.2021): https://betoni.com/wp-content/uploads/2018/10/BET1803_94-95.pdf
- Siddique, R. (2008). Waste Materials and By-Products in Concrete. 1 edn. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tosti, L., van Zomeren, A., Pels, J.R. & Comans, R.N.J. (2021). Evaluating Biomass Ash Properties as Influenced by Feedstock and Thermal Conversion Technology towards Cement Clincker Production with a Lower Carbon Footprint. Waste and Biomass Valorization 12, pp. 4703–4719. Saatavissa (viitattu 14.6.2021): <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01339-0>
- Turner, L.K. & Collins, F.G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. Construction & building materials, 43, pp. 125–130. Saatavissa (viitattu 12.6.2021): <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- Özbay, E., Erdemir, M. & Durmus, H.İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. Construction & building materials, 105, pp. 423–434. Saatavissa (viitattu 12.6.2021): <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>