



# SEMENTIN SEOSAINHEET JA NIIDEN VAIKUTUS SEMENTIN HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖIHIN

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Kaapo Pulkkinen

Ohjaaja ja tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

# Tiivistelmä

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Kaapo Pulkkinen

## **Sementin seosaineet ja niiden vaikutus sementin hiilidioksidipäästöihin**

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

39 sivua, 3 kuvaa ja 13 taulukkoa

Ohjaaja ja tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

Avainsanat: Sementti, Seosaine, SCM, Hiilidioksidipäästöt

Sementtiteollisuus on yksi maailman suurimmista yksittäisistä hiilidioksidipäästöjen lähteistä. Se vapauttaa noin 5% maailman ihmisperäisistä hiilidioksidipäästöistä. IEA:n ”Blue”-skenaario pyrkii rajoittamaan ilmaston lämpenemisen 2°C:seen laskemalla ihmisperäisiä hiilidioksidipäästöjä 50% Business As Usual (BAU)-skenaarioon verrattuna vuoteen 2050 mennessä. Sementtiteollisuudelle tämä tarkoittaa 34-45% matalampia päästöjä verrattuna BAU-skenaarioon vuoteen 2050 mennessä. IEA tunnistaa neljä pääasiallista vipuvartta sementtiteollisuuden päästöjen vähentämiseen. Yksi näistä on portland-klinkerin korvaaminen vaihtoehtoisilla seosaineilla. Seosaineina voidaan käyttää lukuisia teollisuuden ja maatalouden jäte- ja sivuvirtoja sekä monia luonnollisia mineraaleja. Tämä tutkimus tarkastelee erilaisia vaihtoehtoisia sementin seosaineita, niiden ominaisuuksia, saatavuutta ja niiden käytön vaikutusta sementin hiilidioksidipäästöihin. Työ myös tarkastelee Modified Empathetic Added Sustainability Index:in (M-EASI) käyttöä sopivimman sementtiseok-

sen valintaan. Päästöjen vähentämisen näkökulmasta lupaavimpia vaihtoehtoisia seosaineita ovat kaoliiniset savet ja kalkkikivi niiden hyvän saatavuuden, suuren mahdollisen korvaussuhteen ja matalan hyödyntämistäasteen johdosta.

## Abstract

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Engineering

Kaapo Pulkkinen

### **Cement mix components and their impact on carbon dioxide emissions of cement**

Bachelor's thesis

2022

39 pages, 3 figures and 13 tables

Instructor and examiner: Docent Kari Myöhänen

Keywords: Cement, Mix component, SCM, Carbon dioxide emissions

Cement industry is one of the largest single sources of carbon dioxide. It emits about 5% of the world's anthropogenic carbon dioxide. International Energy Agencies (IEA) "Blue" -scenario intends to limit global warming to 2°C by lowering total anthropogenic carbon dioxide emissions by 50% in comparison to the Business As Usual (BAU)-scenario before the year 2050. For cement industry this means 34-45% lower emissions versus the BAU-scenario by the year 2050. IEA identifies four main levers for lowering emissions from cement industry. One of these is substituting portland-clinker with supplementary cementitious materials (SCM). Numerous industrial and agricultural waste- and sidestreams in addition to many natural minerals can be used as alternative mix ingredients. This work reviews different alternative mix ingredients, their attributes, availability and the impact of their use on cement's carbon dioxide emissions. The work also reviews using Modified

Empathetic Added Sustainability Index (M-EASI) as a tool for choosing the most suitable cement mix. From the perspective of lowering emissions the most promising alternative mix ingredients are kaolinic clay and limestone because of their good availability, high possible substitution ratio and low degree of exploitation.

## Lyhenneluettelo

### Roomalaiset

<i>A</i>	Alue	$\text{m}^2$
<i>K</i>	Karbonoitumisnopeus	mm
<i>R</i>	Puristuslujuus	MPa
<i>x</i>	Klinkkerisuhde	$\text{kg kg}^{-1}$

### Alaindeksit

1	Vertailtava seos
<i>c</i>	Sementti
<i>k</i>	Karbonaatiokovetettu
<i>ref</i>	Referenssiseos
<i>v</i>	Vesikuivattu

### Lyhenteet

<i>BAT</i>	Best Available Technology
<i>BAU</i>	Business As Usual
<i>BYF</i>	Belite-Ye'elimate-Ferrite
<i>CA</i>	Calcium Aluminate
<i>CAC</i>	Calcium Aluminate Cement
<i>CC</i>	Carbon Capture
<i>CCS</i>	Carbon Capture and Storage
<i>CCU</i>	Carbon Capture and Utilization

<i>ETA</i>	European Technical Approval	
<i>FA</i>	Fly Ash	
<i>FD</i>	Fuel Derived	
<i>GBFS</i>	Granulated Blast Furnace Slag	
<i>GER</i>	Gross Energy Requirement	MJ kg <sup>-1</sup>
<i>GWP</i>	Global Warming Potential	kg <sup>-1</sup>
<i>IEA</i>	International Energy Agency	
<i>M – EASI</i>	Modified Empathetic Added Sustainability Index	
<i>NRMC</i>	Natural Resources Material Consumption	kg kg <sup>-1</sup>
<i>OECD</i>	The Organisation for Economic Co-operation and Development	
<i>OPC</i>	Ordinary Portland Cement	
<i>PD</i>	Process Derived	
<i>POFA</i>	Palm Oil Fuel Ash	
<i>RHA</i>	Rice Husk Ash	
<i>SCM</i>	Supplementary Cementitious Materials	
<i>SF</i>	Silica Fume	
<i>SSA</i>	Sewage Sludge Ash	
<i>WG</i>	Waste Glass	

## Sisällys

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>9</b>
1.1	Sementin valmistus . . . . .	9
1.2	Sementin hiilidioksidipäästöt . . . . .	9
1.3	Sementin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen . . . . .	10
1.3.1	Energiatehokkuus . . . . .	11
1.3.2	Vaihtoehtoiset polttoaineet . . . . .	12
1.3.3	Vaihtoehtoiset raaka-aineet . . . . .	14
1.3.4	Hiilen talteenotto . . . . .	14
1.3.5	Muut sementin hiilidioksiidipäästöihin vaikuttavat tekijät . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Vaihtoehtoiset sementtiseokset</b>	<b>17</b>
2.1	Ordinary Portland Cement . . . . .	17
2.2	OPC korkeilla pitoisuuksilla korvaavia sementtisiä materiaaleja . . . . .	18
2.2.1	Granuloitu masuunikuona . . . . .	18
2.2.2	Lentotuhka . . . . .	19
2.2.3	Jätevesiliete . . . . .	20
2.2.4	Palmuöljy polttoainetuhka . . . . .	20
2.2.5	Kalsinoitu savi . . . . .	21
2.2.6	Silika . . . . .	21
2.2.7	Riisin akanatuhka . . . . .	22
2.2.8	Jätelasi . . . . .	22
2.2.9	Kalkkikivi . . . . .	22
2.3	Beliittirikkaat sementit . . . . .	23
2.4	Kalsiumsulfoaluminaattisementti . . . . .	24
2.5	Kalsiumaluminaattisementti . . . . .	25
2.6	Magnesiumpohjaiset sementit . . . . .	26
2.7	Alkaliaktivoituvat materiaalit . . . . .	27



	8
<b>3 Modified Empathetic Added Sustainability Index</b>	<b>28</b>
<b>4 Esimerkkilaskut</b>	<b>30</b>
4.1 Esimerkki 1: Lentotuhka seosaineena rakenteelliseen betonielementtiin . . .	30
4.2 Esimerkki 2: Beliittirikas sementti karbonaatiokovetetuissa betonielementeissä	31
<b>5 Johtopäätökset</b>	<b>34</b>

# 1 Johdanto

Sementti on yksi yhteiskuntamme tärkeimmistä materiaaleista. Modernin infrastruktuurin ja asumisen ylläpitäminen ei olisi mahdollista ilman helposti saatavilla olevaa, kestävä, helppo- ja monikäyttöistä rakennusmateriaalia, kuten sementti ja betoni. Vuonna 2021 sementtiä tuotettiin maailmanlaajuisesti noin 4400 Mt eli se on suurella marginaalilla maailman käytetyin materiaali (Hatfield 2022). Vaikka sementin ominaishiilidioksidipäästöt ovat matalat suhteessa muihin materiaaleihin, on sen tuotanto massiivisuutensa johdosta yksi suurimmista yksittäisistä ihmisperäisten hiilidioksidipäästöjen lähteistä. Sementin tuotanto vapauttaa noin 7% maailman ihmisperäisestä hiilidioksidista, joten pienilläkin parannuksilla sementin ominaishiilidioksidipäästöissä voidaan saada aikaan suuria muutoksia teollisuudesta vapautuvissa kasvihuonekaasupäästöissä (Barcelo et al. 2014).

## 1.1 Sementin valmistus

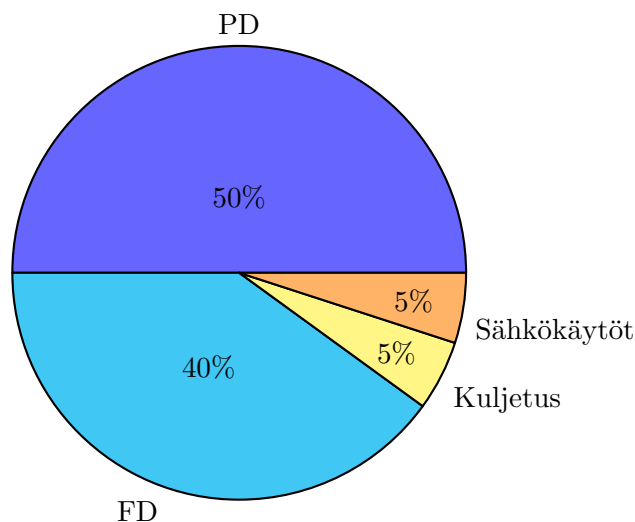
Ordinary Portland sementin (OPC) pääraaka-aineena käytetään kalkkikiveä. Se on raaka-aineena helposti ja paikallisesti saatavilla lähes kaikkialla maailmassa. Kalkkikivi kuljetetaan sementtitehtaalalle, missä siitä prosessoidaan klinkkerin raaka-ainetta jauhamalla ja sekoittamalla siihen muita raaka-aineita, kuten kipsiä, savea, hiekkaa, lentotuhkaa ja granulointua masuunikuonaa. Klinkkerin raaka-aine syötetään prosessista riippuen märkänä tai kuivana sementtihuoneeseen, jota saattaa edeltää monivaiheinen esilämmitin ja esikalsinoija. Huoneissa raaka-aineet lämmitetään 1450°C:n lämpötilaan. Tällöin huoneissa tapahtuu sinttautuminen, jonka lopputuloksena on klinkkeri nystyröitä. Nämä nystyrät jäädytetään ja hienonnetaan mahdollisten lisäaineiden kanssa. Tämä hienonnettu klinkkeri on sementtiä valmiina käytettäväksi betonin tai laastin valmistuksessa. (Taylor 1997; Scrivener, V. M. John ja Gartner 2018)

## 1.2 Sementin hiilidioksidipäästöt

Hiilidioksidia vapautuu sementin tuotantoprosessissa pääasiallisesti kahdesta lähteestä sementtihuoneen lämmittämiseksi poltettavasta polttoaineesta ja sementtihuoneissa tapahtuvasta kemiallisesta reaktiosta, jossa kalkkikivi vapauttaa hiilidioksidia.



Muita hiilidioksidipäästöjen lähteitä ovat raaka-aineiden sekä tuotteiden kuljetus sekä prosessin sähkökäytöt, kuten klinkkerin jauhamiseen käytettävät myllyt. Sementin hiilidioksidipäästöjen lähteet on eritelty kuvassa 1. (Summerbell, Barlow ja Cullen 2016)



Kuva 1: Sementin tuotannossa vapautuva hiilidioksidi päästölähteittäin. Prosessiperäiset päästöt PD (Process Derived) ja polttoaineperäiset päästöt FD (Fuel Derived) kattavat merkittävimmän osan päästöistä. (Summerbell, Barlow ja Cullen 2016)

### 1.3 Sementin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen

International Energy Agency (IEA) kokoaa Energy Technology Perspectives 2010-julkaisussaan päästötavoitteet eniten kasvihuonekaasuja vapauttaville sektoreille. Näiden joukossa on sementtiteollisuus, joka kohtaa omat sektorikohtaiset haasteensa päästöjen vähentämisessä. IEA:n ”Blue” -skenaario tähtää rajoittamaan mailmanlaajuisen lämpenemisen 2°C:-seen vähentämällä ihmisperäisiä hiilidioksidipäästöjä 50 prosentilla verrattuna ”Business as usual (BAU)” -skenaarioon vuoteen 2050 mennessä. Skenaariot ottavat huomioon mahdolliset kehitykset sementin kysynnässä ja jakavat skenaariot korkean kysynnän ja matalan kysynnän skenaarioon.

Taulukko 1: IEA:n ”Blue-skenaarion vaatimat päästötasot sementtiteollisuudelle (IEA 2010; IEA 2022)

Kysyntä [Mt]	Vuosi	BAU Päästöt [Mt]	Blue Päästöt [Mt]	Blue vs. BAU
4270	2021	2520		
3800 (high)	2030	2340	1790	-24%
4600 (high)	2050	2830	1550	-45%
3300 (low)	2030	2030	1630	-20%
3800 (low)	2050	2340	1550	-34%

Taulukosta 1 voidaan huomata, että korkean kysynnän vallitessa sementtiteollisuuden tulisi vähentää hiilidioksiidi päästöjään 45 prosentilla BAU-skenaarioon verrattuna. Tämä tulee vaatimaan suuria investointeja uusiin laitteistoihin ja prosesseihin sekä etenkin tutkimus ja kehitystyöhön. IEA tunnistaa neljä pääasiallista vipuvartta sementin tuotannossa vapautuvan hiilidioksidin vähentämiseksi, jotka esitellään lyhyesti seuraavissa kappaleissa. (IEA 2010)

### 1.3.1 Energiatehokkuus

Sementin valmistusprosessin energiatehokkuutta voidaan parantaa ottamalla käyttöön tehokkaampi prosessi. Yksi epätehokkaimmista prosesseista on märkä prosessi. Vaihtamalla kuivaan prosessiin voidaan saavuttaa yli 31% matalampi lämpöenergian tarve. Lisäksi käyttämällä monivaiheisia esilämmittimiä ja esikalsinoijia voidaan energiatehokkuus nostaa 58 prosenttiin. Energiatehokkuus on tässä laskettu suhteessa teoreettiseen energian kulutukseen klinkkeröitymisessä, joka on 1.75GJ/t (Taylor 1997). Erilaisten prosessien energiatehokkuudet on eritelty taulukossa 2.

Taulukko 2: Erilaisten sementin valmistus prosessien ominaislämpöenergiat ja energiatehokkuudet (Barcelo et al. 2014).

Prosessi	Lämpöenergia [GJ/t]	Energiatehokkuus [%]
Pystyuuni	5.0	35%
Märkä prosessi	5.9-6.7	26-30%
Kuiva prosessi		
Pitkä kuiva prosessi	4.6	38%
1-vaiheinen esilämmitin	4.2	42%
2-vaiheinen esilämmitin	3.8	46%
4-vaiheinen esilämmitin	3.3	53%
4-vaiheinen esilämmitin + esikalsinoija	3.1	56%
5-vaiheinen esilämmitin + esikalsinoija	3.0-3.1	58%

Kuiva prosessi viisivaiheisella esilämmittimellä ja esikalsinoijalla on sementtiprosessien ”Best available technology” (BAT) ja on jo käytössä suuressa osassa sementtitehtaita. Vanhempia prosesseja käytetään paljon vähävaraisilla ja kehittyvillä alueilla. IEA odottaa 95% sementin kysynnän kasvusta tulevan The Organization of Economic Co-operation and Development eli OECD-maiden ulkopuolelta. Siksi onkin tärkeää, että vanhoja sementtitehtaita modernisoidaan etenkin teollisesti edistyneiden maiden ulkopuolella ja että, kaikki uudet sementtitehtaat varustetaan BAT-prosesseilla. Energiatehokkuuden parantamisella voidaan saavuttaa 10 prosenttia ”Blue” -skenaarion asettamasta päästövähennystavoitteen. (IEA 2010)

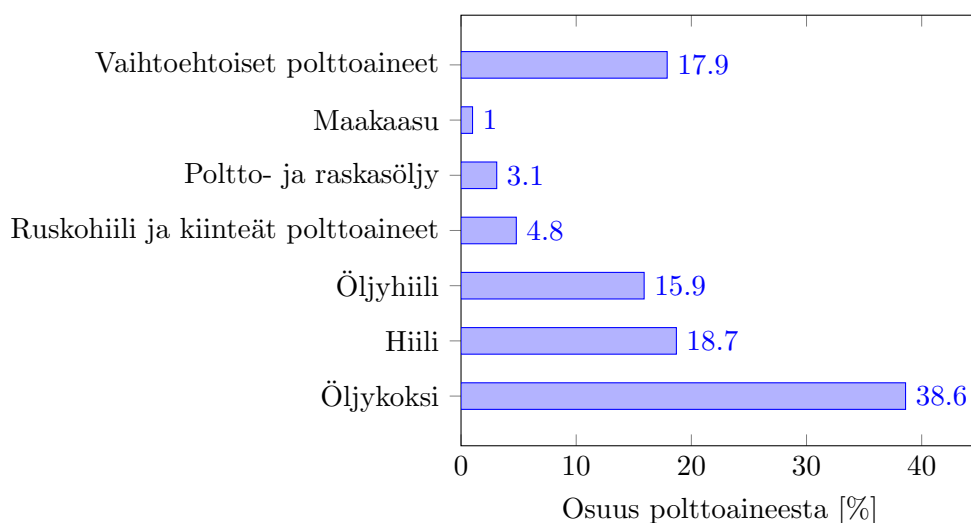
Taulukko 3: 25% maailman sementin tuotannosta jaoteltu prosessityypin mukaan.  
 \*Laitoksessa on käytössä monia eri prosessityyppejä. (Kajaste ja Hurme 2015)

Prosessi	Osuus[%]
Kuiva prosessi esilämmittimellä ja esikalsinoijalla	63.43
Kuiva prosessi esilämmittimellä	16.26
Sekatyypinen prosessi*	11.75
Pitkä kuiva prosessi	3.43
Märkä prosessi	3.19
Semi-märkä/Semi-kuiva prosessi	1.54

Taulukosta 3 voidaan huomata, että epätehokkaimpia prosessityyppejä on käytössä vain pienessä osassa sementtitehtaista. Näin ollen päästövähennyspotentiaali energiatehokkuutta parantamalla on suhteellisen pieni. Toisaalta Kajasteen käyttämä datasetti sisältää kattavan otoksen sementtiteollisuudesta lähinnä Euroopassa, Pohjois- ja Etelä-Amerikassa sekä Intiassa. Aasian, Afrikan, Venäjän ja Kiinan sementtiteollisuus ei ole yhtä hyvin edustettuna datasetissä, joten on mahdollista, että energiatehokkuuden parantamisella voitaisiin saada aikaan suurempia päästövähennyksiä näiden alueiden sementtituotannossa.

### 1.3.2 Vaihtoehtoiset polttoaineet

Polttoaineperäiset hiilidioksidipäästöt ovat toinen kahdesta pääasiallisesta hiilidioksiidipäästöjen lähteestä sementin valmistuksessa. Sementtiuunin lämmittämiseen käytetään vielä pääasiassa fossiilisia polttoaineita, mutta vaihtoehtoisia polttoaineita on käytetty jo pitkään perinteisten polttoaineiden rinnalla. Erilaiset jäte- ja sivuvirrat tuottavat sementtiuunin lämmittämiseen sopivia polttoaineita. Metsähake, maatalousjäte, eläinbiomassa, teollisuusjätteet, jäteöljyt, jätemuovit, viemäriete ja auton renkaat sopivat sementtiuunin polttoaineeksi. Sementtiteollisuuden Euroopassa käyttämät polttoaineet on eritelty kuvassa 2.



Kuva 2: Euroopan sementtiteollisuuden käyttämät polttoaineet. (Moya, Pardo ja Mercier 2010)

IEA olettaa ”Blue” -skenaariossaan mailmanlaajuisen vaihtoehtoisten polttoaineiden käytön nousevan vuoden 2010 5 prosentin tasosta 37 prosenttiin vuoteen 2050 mennessä. Vaihtoehtoisten polttoaineiden käytön odotetaan laskevan sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöjä 24% ”Blue” -skenaarion asettamasta päästövähennystavoitteesta. (IEA 2010)

Vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttämisessä on otettava huomioon erilaisten polttoaineiden saatavuus alueittain sekä niiden prosessoinnissa ja kuljetuksessa vapautuvat kasvihuonekaasupäästöt. Parhaassa tilanteessa sementtitehdas toimii myös lähialueen jätepolttamona, jolloin erillistä jätteenpolttoprosessia ei tarvita ja osa sementin valmistukseen tarvittavasta energiasta vapautetaan hiilineutraalista polttoaineesta. Vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöä rajaa myös niiden vaikutukset lopputuotteen ominaisuuksiin. Koska polttoaine ja savukaasut ovat kosketuksessa sementtiuunin sisällä, saattavat jotkin niiden ainesosista reagoida tai sekoittua keskenään. Renkaita polttoaineena käytettäessä klinkkerin sinkkioksidipitoisuus nousee, heikentäen lopputuloksena syntyvän sementin lujuutta (Schneider 2011). Toisaalta tätä vuorovaikutusta voidaan käyttää hyväksi sementtiseosta suunniteltaessa, sillä oksiditasapainoa voidaan muokata myös polttoainevalinnoilla. Lisäksi polttoaineiden ja klinkkerin sekoittuminen tarkoittaa sitä, että palamisesta syntyvä tuhka sekoittuu lopputuotteeseen, eikä sitä tarvitse käsitellä sivuvirtana. (Damtoft et al. 2008)

Vaihtoehtona polttoainelämmitteisille sementtiuuneille on suunniteltu sähkölämmitteisiä uuneja, mutta sovellukset ovat kokeellisia ja niissä saavutettu 1000°C:n lämpötila riittää kalsinointivaiheeseen, mutta ei sintrausvaiheeseen, jossa lämpötilan kuuluisi nousta 1450°C:seen. (Katajisto 2022)

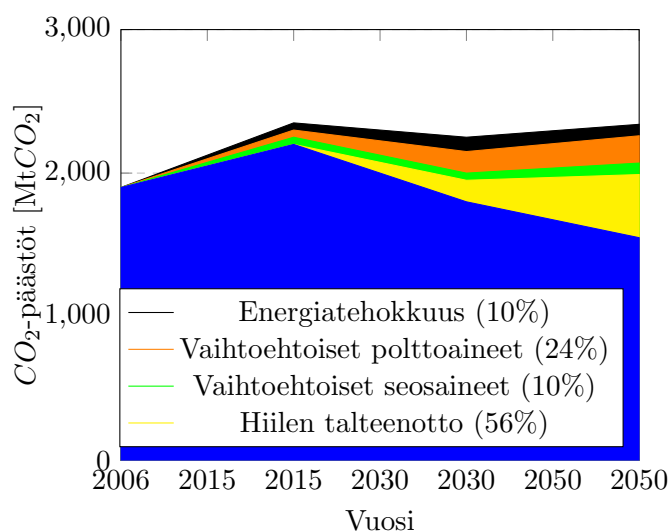
### 1.3.3 Vaihtoehtoiset raaka-aineet

Koska noin 50% sementin hiilidioksidipäästöistä vapautuu kalkkikivestä kalsinoinnin ja sintrauksen aikana, voidaan sementin hiilidioksidipäästöjä vähentää huomattavasti korvaamalla osa tai kaikki sementin raaka-aineesta vähemmän hiilidioksidintensiivisellä raaka-aineella. Tällaisia vaihtoehtoisia raaka-aineita ovat monet teollisuuden sivuvirrat ja luonnolliset mineraalit. IEA:n ”Blue” -skenaario olettaa vaihtoehtoisten raaka-aineiden mahdollistavan 10% sementtiteollisuuden päästövähennystavoitteesta. Vaihtoehtoisiin sementtiseoksiin tutustutaan tarkemmin kappaleessa 2.

### 1.3.4 Hiilen talteenotto

Carbon Capture (CC) eli hiilen talteenotto on potentiaalisesti suurin päästövähennyksiä mahdollistava teknologia sementtiteollisuudelle. Sementtiuunista vapautuvat polttoaine- ja raaka-aineperäiset savukaasut voidaan ottaa talteen, prosessoida ja varastoida monissa eri muodoissa. Carbon Capture and Storage (CCS) käyttää kalvoja (membrane), amiini puhdistusta (amine scrubbing), kalsiumkiertoa (calcium looping) ja biologisia reaktoreita hiilidioksidin talteenottamiseen. Varastoina käytettäisiin geologisia muodostumia, absorbantteja mineraaleja tai biomassaa. Carbon Capture and Utilization (CCU) lähestyy talteen otettua hiilidioksidia varastoinnin sijaan hyötykäytön näkökulmasta. Talteen otettua hiilidioksidia voitaisiin valmistaa Power-to-X-prosessien avulla polttoaineita, muoveja, kemikaaleja tai jopa ravinnoksi sopivia proteiineja. Hyötykäytön helpottamiseksi sementin tuotantoprosessissa voitaisiin hyödyntää Oxy-fuel-combustion teknologiaa, jossa paloilman sijasta käytetään puhdasta happea. Näin savukaasuihin ei sekoitu palamisilman tyyppiä ja niiden hiilidioksidipitoisuus kasvaa, joka puolestaan helpottaa savukaasujen prosessointia varastoitavaan tai hyötykäytettävään muotoon.

CC on kehittyvä teknologia, jonka sovellukset ovat kokeellisia eivätkä hankintahintojensa vuoksi ole toteuttamiskelpoisia suurimmassa osassa sementtitehtaita. Lisäksi Oxy-fuel-polttamisen käyttöönotto vaatii suuria muutoksia sementin valmistusprosessiin, joten ensimmäiset laajamittaiset CC-projektit sementtiteollisuudessa tulevat todennäköisesti käyttämään vain palamisen jälkeisiä talteenottojärjestelmiä. CC:n potentiaali päästöjen vähentämisessä on kuitenkin niin suuri, että IEA arvioi sen mahdollistavan 56 prosenttia ”Blue” -skenaarion sementtiteollisuudelle asettamasta päästövähennystavoitteesta. Vipuvarsien odotetut vaikutukset sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöihin on havainnollistettu kuvassa 2.4. (Schneider 2011; Farfán, Fasihi ja Breyer 2019)



Kuva 3: Sementtisektorin päästöt ja niiden vähentäminen jaoteltuna vipuvarsittain. Musta käyrä seuraa BAU-skenaariota. Sininen käyrä seuraa ”Blue” -skenaariota. Data ja alkuperäinen kuva lähteestä: (IEA 2010)

### 1.3.5 Muut sementin hiilidioksidipäästöihin vaikuttavat tekijät

Muiden sektorien toiminta vaikuttaa epäsuorasti sementin tuotannosta vapautuviin hiilidioksidipäästöihin. Rakennussektori on sementin suurin kuluttaja ja toimintamallit tällä sektorilla vaikuttavat sementin kysyntään ja käyttöön. Jos rakennussektorin suunnittelijat ottavat huomioon erilaiset ”vihreät” sementtivaihtoehdot rakennuksia suunnitellessaan, voidaan sementin käyttöä vähentää käyttämällä korkean lujuusluokan sementtejä. Sovelluksissa, joissa korkeaa lujuutta ei tarvita, kuten eristeet ja vain itseään kannattelevat betonielementit, voidaan käyttää matalamman lujuusluokan, vähemmän hiilidioksidintensiivisiä sementtiseoksia. Marey päätteli 2022 tutkimuksessaan vihreän betonin käyttökohteista Egyptin rakennussektorissa, että suunnittelemalla asuinrakennus materiaalihokkuuden ja ”vihreän” betonin näkökulmasta, voidaan betonin ja sitä kautta sementin sekä hienojen että karkeiden täyteaineiden kulutusta vähentää. Lisäksi ei-rakenteelliset betonielementit voidaan korvata vähäpäästöisemmällä vaihtoehdolla. Marey vähensi esimerkkirakennuksensa materiaaliperäisiä hiilidioksidipäästöjä 44,5% alkuperäisestä suunnitelmasta (Marey, Kozma ja Szabó 2022). Suunnittelijoiden lisäksi rakennustyömailla urakoitsijoiden on osattava käyttää erilaisia sementtiseoksia oikeaoppisesti ja tehokkaasti.

Kestävän rakentamisen tueksi tarvitaan standardeja, jotka ottavat huomioon erillaiset vaihtoehtoiset sementtiseokset. Standardoinnissa on painotettava enemmän suorituskykyä ja sen testaamista sementtiseoksen koostumuksen sijaan. Eurooppalainen EN 197 standardi perustuu laajamittaiseen suorituskykytestaamiseen, mutta luokittelee kuitenkin sementtien perheen tuotteet portland-klinkkeri-pitoisuuden ja muun koostumuksen



mukaan. EN 197-1 ja EN 206:2014 + A2:2021 sallivat muiden kuin OPC-pohjaisten klinkkerien käytön sementin valmistuksessa vain eurooppalaisen teknisen arvioinnin (ETA) kautta tai betonin käyttöpaikalla voimassa olevien sääntöjen mukaan (Suomen Standardisoimisliitto 2012; Suomen Standardisoimisliitto 2020). On mahdollista, että sementtiseos täyttää standardin suorituskykyvaatimukset, mutta ei koostumusvaatimuksia. Tällaisessa tilanteessa standardi hidastaa ”vihreiden” sementtiseosten käyttöönottoa.

## 2 Vaihtoehtoiset sementtiseokset

Ordinary Portland sementin vaihtoehdoksi on kehitetty erilaisia vaihtoehtoisia sementtejä. Jotkin näistä perustuvat portland-sementtiin ja korvaavat osan kalkkikivestä muilla raaka-aineilla, mutta käyttävät edelleen samaa tai lähes samaa prosessia sementin valmistamiseen. Myös täysin uusia prosesseja sementin ja sementtimäisten materiaalien valmistukseen tutkitaan ja kehitetään.

### 2.1 Ordinary Portland Cement

OPC koostuu tyypillisesti suurimmaksi osaksi aliitista ( $C_3S$ ) ja pienemmältä osin belii-tistä ( $C_2S$ ), trikalsium aluminaatista ( $C_3A$ ), tetrakalsium aluminoferritistä ( $C_4AF$ ) ja muista yhdisteistä kuten kipsistä ( $C\hat{S}$ ) (Cuesta, Ayuela ja Aranda 2021). OPC:n seassa käytetään lähes aina kipsiä sitoutumisajan säätelemiseksi. Oksidit lyhennetään sementistä kirjoittaessa tyypillisesti sementtikemistin notaatioksi, joka on selitetty taulukossa 4.

Taulukko 4: Sementin yleisimmät oksidit sementtikemistin notaatiossa (Taylor 1997)

CCN	Yhdiste	Nimi
$C$	$CaO$	Kalsiumoksidi tai Kalkkikivi
$S$	$SiO_2$	Piidioksidi tai Silika
$A$	$Al_2O_3$	Alumiinioksidi tai Alumina
$F$	$Fe_2O_3$	Rautaoksidi tai Ruoste
$T$	$TiO_2$	Titaanioksidi tai Titania
$M$	$MgO$	Magnesiumoksidi tai Periklaasi
$K$	$K_2O$	Kaliumoksidi
$N$	$Na_2O$	Natriumoksidi
$H$	$H_2O$	Vesi
$\hat{C}$	$CO_2$	Hiilidioksidi
$\hat{S}$	$SO_3$	Rikkitrioksidi
$P$	$P_4O_{10}$	Fosforipentoksidi

OPC:n korkea  $C_3N$ -pitoisuus antaa sille erinomaisen varhais- ja hyvän standardipuristuslujuuden, joka tekee siitä hyvän raaka-aineen korkealujuus- ja erikoislujuusbetoneille. Toisaalta OPC soveltuu myös kevyt- ja harvabetonin sekä vaahdotetun betonin että muurauslaastin raaka-aineeksi. Kalsiumsilikaatit ( $C_xS$ ) muodostavat veden kanssa sekoituessaan kalsiumsilikaattihydraatti (C - S - H) -faasin, joka on vahvasti alkaalinen. Tämä suojaa betonin sisälle valettavia raudoituksia korroosiolta. OPC:llä on myös hyvä jäätymsulami-kestävyys ja tilavuuden pysyvyys sekä hyvä kosteus-, sulfaatti-, kloori- tai muun kemikaaliyhökökän kesto. OPC on siis sovellettavissa massivielementteihin, päällysteisiin ja pinnoitukseen, raudoitettuihin rakenteellisiin elementteihin, valuma-altaisiin monille eri

kemikaaleille ja jätteille, muuraamiseen, eristämiseen sekä joidenkin jätteiden kotelointiin. Monet seos- ja lisäaineet parantavat OPC:n ominaisuuksia ja sen soveltuvuutta eri olosuhteisiin ja käyttökohteisiin. Tyypillisen portland-sementin koostumus on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Tyypillisen OPC:n koostumus (Cuesta, Ayuela ja Aranda 2021)

Yhdiste	m%
$C_2S$	65
$C_2S$	10
$C_3A$	15
$C_4AF$	5
$CSH_2$	5

OPC toimii pohjana suurimmalle osalle vaihtoehtoisista sementtiseoksista. Kalkkikiven saatavuus ympäri maailmaa ja OPC:n tuotantoprosessiin soveltuvien sementtitehtaiden runsaus tekevät OPC:stä kannattavimman lähtöpisteen myös muille sementtiseoksille. OPC:n heikoksi puoleksi voidaan lukea korkeiden ominaishiilidioksidipäästöjen lisäksi myös korkea hydraatiolämpö. Kun OPC:ä käytetään elementteihin, joilla on suuri tilavuuspinta-ala-suhde, aliitin vapauttama nesteytymislämpö saattaa aiheuttaa halkeilua ja jännitteitä betonissa.

## 2.2 OPC korkeilla pitoisuuksilla korvaavia sementtisiä materiaaleja

Suunnittelemalla sementtiseos suurilla pitoisuuksilla korvaavia sementtisiä materiaaleja (SCM) voidaan sementin hiilidioksidijalanjälkeä pienentää ja ominaisuuksia parantaa. Monet SCM:t ovat muiden teollisuus sektorien sivuvirtoja, jätevirtoja tai luonnollisia materiaaleja. Useimmat vaihtoehtoisista seosaineista ovat pozzolaanisia, masuunikuonaa lukuunottamatta, eli ne eivät kovetu hydraulisesti veteen sekoitettuna, vaan ne reagoivat hienoksi jauhattuna veteen liunneen kalsiumhydroksidin ( $Ca(OH)_2$ ) kanssa. Suurin osa seosaineista toimii siis vain hydraulisesti kovettuvan seosaineen läsnäollessa. Yleisimpien seosaineiden koostumukset on eritelty taulukossa 7.

### 2.2.1 Granuloitu masuunikuona

Granuloitu masuunikuona (GBFS) muodostuu, kun masuuniuunissa noin 1350-1550°C:n lämpötilassa syntyvä masuunikuona jäädytetään nopeasti alle 800°C:seen ruiskuttamalla sulaa masuunikuonaa korkeapaineisilla vesisuihkuilla. Lopputuloksena on märkä, lasinen ja hiekkamainen materiaali. (Taylor 1997)

Granuloitu masuunikuona sisältää suuria pitoisuuksia hyvin reaktiivisia oksideja. Tämä tekee siitä ideaalin seosaineen sementtiin, mutta myös mahdollisesti pääraaka-aineen, koska GBFS kovettuu hydraulisesti myös ilman OPC-klinkkeriä. Masuunikuonasementit saattavat koostua jopa 85 prosenttisesti masuunikuonasta kuten supersulfatoituissa sementeissä. Nämä sementit vastustavat hyvin kosteutta, mutta ovat OPC:ä vähemmän alkaalisia ja alttiimpia karbonoitumiselle (Sanjuán et al. 2018). Korkean GBFS-pitoisuuden omaavat sementit eivät näistä syistä suojaa raudoituksia yhtä hyvin kuin OPC (Gartner 2004). Pienemmissä pitoisuuksissa granuloitu masuunikuona heikentää sementin työstettävyyttä ja varhaislujuutta hieman, mutta parantaa kompressiolujuutta myöhemmin käyttöikänsä aikana (Deb, Nath ja Sarker 2014). (Taylor 1997)

Granuloitu masuunikuona voidaan mieltää lähes hiilineutraalina raaka-aineena, koska se on rautamalmin prosessoinnista syntyvä sivuvirta. Jonkin verran energiaa kuluu kuitenkin masuunikuonan granulointiin ja jauhamiseen. Masuunikuonan saatavuus on hyvä alueilla, joilla prosessoidaan rautamalmia. Noin 90% masuunikuonasta hyödynnetään sementin tuotannossa seosaineena (Scrivener, V. M. John ja Gartner 2018).

### 2.2.2 Lentotuhka

Lentotuhka (FA) on hienojakoinen palamisjäämä, joka erotellaan savukaasusta ennen sen vapauttamista ilmakehään. Lentotuhka on tulipesän pohjalle vajoavaa pohjatuhkaa huomattavasti hienojakoisempaa. Tämä on osatekijä lentotuhkan reaktiivisuudessa. Lentotuhkat lajitellaan eurooppalaisen standardin EN 197-1 mukaan silikaattipitoisiin ja kalkkipitoisiin lentotuhkiin. Eurooppalaisten standardien mukaisen lentotuhkan koostumus on eritelty taulukossa 6.

Taulukko 6: Tyypillisen kalkkipitoisen ja silikaattipitoisen lentotuhkan oksidikoostumus. C:n ja S:n osuudet on luettu eurooppalaisesta standardista EN 197-1 (Suomen Standardisoimisliitto 2012) ja A:n ja F:n osuudet on arvioitu Taylorin esimerkkikoostumuksen perusteella (Taylor 1997). \*vaaditaan vain, jos C-pitoisuus on alle 15 m%

Yhdiste	m% (Silikaatti)	m% (Kalkki)
<i>C</i>	≤ 10	≥ 10
<i>A</i>	25	25
<i>S</i>	≥ 25	* ≥ 25
<i>F</i>	10	10

Lentotuhkan soveltuvuuteen sementin seosaineena vaikuttaa myös sen hiilipitoisuus. Polttoaineen palaessa lentotuhkaan jää pieniä pitoisuuksia palamatonta hiiltä, joka saattaa heikentää lisäaineiden, erityisesti huokostinaineiden toimintaa sekä värjätä betonin tummaksi (Taylor 1997). Tämän vuoksi lentotuhka luokitellaan myös hehikutushäviön mu-

kaan. Hehkutushäviö määritellään eurooppalaisen standardin EN 196-2 mukaan ja kuvaa materiaalista haihtuvan veden ja muiden haihtuvien aineiden massaa (Suomen Standardisoimisliitto 2013).

Seosaineena lentotuhka pienentää sementin veden tarvetta, mutta hidastaa lujuuden kehittymistä kaikissa kovettumisen vaiheissa yli 30 m% korvaussuhteilla. Lentotuhkalla on myös OPC-klinkkeriä matalampi hydraatiolämpö. Tämä tekee lentotuhkasta hyvän seosaineen massiivisiin betonielementteihin kuten patoihin. Pienemmät korvaussuhteet saavuttavat vastaavan tai paremman lujuuden suhteessa portland-sementtiin varsinkin 28 päivän kovettumisen jälkeen. (Al-Mansour et al. 2019)

Sementin seosaineeksi sopivaa lentotuhkaa syntyy lähinnä hiiltä poltettaessa. Tästä syystä sen saatavuus on täysin riippuvainen hiilivoiman käytöstä. Lentotuhkaa ei tarvitse juurikaan prosessoida ennen seosaineena käyttöä, joten se voidaan mieltää todellisesti hiili-neutraaliksi seosaineeksi.

### 2.2.3 Jätevesiliete

Jätevesilietetuhka (SSA) syntyy jäteveden käsittelyssä. Suuri osa lietteestä kulkeutuu käsittelyn jälkeen vesistöihin ja kaatopaikoille. Sitä on sovellettu myös lannoitteena. Jätevesiliete sisältää kuitenkin usein haitallisia pitoisuuksia raskasmetalleja ja muita ympäristölle haitallisia aineita, joten lannoittamisella tai kaatopaikkaan sijoittamisella on aina saastuttamisriski. Sementtiteollisuus voi hyödyntää jätevesilietettä polttoaineena tai tuhkattuna sementin seosaineena. Jätevesilietetuhkalla voidaan korvata sementtiseoksessa korkeintaan 10 m% OPC-klinkkeristä, koska lietetuhka sisältää runsain määrin klorideja ja alkaleja. Korvaamalla OPC-klinkkeriä SSA:lla voidaan energian kulutusta vähentää noin prosentilla per prosentti SSA:aa sementtiseoksessa. (Pavlík et al. 2016)

### 2.2.4 Palmuöljy polttoainetuhka

Palmuöljy polttoainetuhka (POFA) syntyy, kun palmuöljyn hukkaosia poltetaan energian tuottamiseksi palmuöljytehtaalla. Tuloksena on silikaattirikas suhteellisen hienojakoinen tuhka, jolla on jauhattuna hyvät pozzolaaniset ominaisuudet. (Abdullah, Mirasa ja Asrah 2015)

POFA voi korvata 20 m% sementin OPC-klinkkeristä säilyttäen saman tai kehittäen paremman lujuuden kuin portland-sementti (Sata, Jaturapitakkul ja Kiattikomol 2004). Erittäin hienoksi jauhettu POFA voi myös parantaa betonin työstettävyyttä (Johari et al. 2012).

#### 2.2.5 Kalsinoitu savi

Savet ovat yksi runsaimmista materiaaleista maailmassa ja on helposti saatavilla joka puolella maailmaa. Kun kaoliininen savi kalsinoidaan noin 600-800°C:n lämpötilassa, syntyy metakaoliinia, jonka pozzolaaniset ominaisuudet ovat erinomaiset. Metakaoliinin lisääminen sementtiin parantaa sen puristuslujuutta noin 15 m% korvaussuhteeseen asti (Courard et al. 2003). Kalkkikiven kanssa sementtiin lisättynä voidaan metakaoliinilla saavuttaa jopa 45 m% korvaussuhde, jossa metakaoliini korvaa 30 m% ja kalkkikivi 15 m% OPC-klinkkeristä, menettämättä lujuutta missään vaiheessa elinkaarta. Näin suuri korvaussuhde ja seoksen taipumus kuluttaa kalsiumhydraattia kuitenkin laskee sementin alkaalisuutta, mikä saattaa altistaa mahdollisen raudoituksen korroosiolle. (Antoni et al. 2012)

Savet ovat luonnossa esiintyvä helposti saatavilla oleva raaka-aine, mutta sen kalsinointi vaatii lämpöenergiaa. Lisäksi kaivostoiminnalla on aina ei-haluttuja ympäristövaikutuksia, joten kierrätetyn saven ja muiden kaivosten sivuvirtojen käyttö tulisi optimoida ennen neitseellisen saven louhimista.

#### 2.2.6 Silika

Silika eli piituhka (SF) muodostuu sivutuotteena pii- ja rautasilikaattilejeerinkien valmistuksessa, kun sähköuunissa korkean puhtausasteen kvartsia poistetaan hiilen avulla. Kemialliselta koostumukseltaan silika on yli 85 m% reaktiivista piidioksidia (S) ja alle 1 m% kalsiumoksidia (C). Silika on erittäin hienojakoinen pöly, joka suuren pinta-alansa ansiosta parantaa sementin hydraatiota ja estää veden tihkumista betonin pinnalle (Z. Zhang, B. Zhang ja Yan 2016). Betonin puristuslujuus kasvaa silikaa lisäämällä aina 30 m% korvaussuhteeseen asti (Choi, Yeon ja Yun 2016). Silika kuitenkin heikentää betonin työstettävyyttä ja kasvattaa veden tarvetta betonia valmistaessa. (Suomen Standardisoi-misliitto 2012; Holland 2005)

### 2.2.7 Riisin akanatuhka

Riisin akanatuhka (RHA) valmistetaan riisin viljelyssä syntyvistä riisin akanoista hallitulla polttamisella 500-700°C:n lämpötilassa. Ennen seosaineena käyttämistä se on myös jauhattava hienojakoiseksi. RHA koostuu pääasiassa reaktiivisesta piidioksidista (S). Alle 25 m% pitoisuuksissa RHA heikentää sementin työstettävyyttä hieman, mutta kasvattaa puristuslujuutta huomattavasti. (Habeeb ja Mahmud 2010; Al-Mansour et al. 2019)

Riisin akanat ovat riisin viljelyssä syntyvä jätevirta, jolle ei ole merkittävää teollista käyttöä. Akanoita voidaan käyttää sykloniuunin polttoaineena riisin kuivaamisessa. Näin käytettäisiin hyväksi akanoiden sisältämä kemiallinen energia ja tuotettaisiin suuria määriä sementin seosainetta. (Henry ja Lynam 2020)

### 2.2.8 Jätelasi

Jätelasilla (WG) on pozzolaanisia ominaisuuksia erittäin hienoksi jauhettuna. Jopa 20 m% korvaussuhde voidaan saavuttaa ilman merkittäviä häviöitä sementin lujuudessa. Jätelasi on jätevirtana käytännössä hiilineutraalia. Ainut tarvittava prosessointi ennen seosaineena käyttöä on jauhaminen. Jätelasin kierrättäminen takaisin lasituotteiksi on lähes häviötöntä. Euroopassa noin 74% jätelasista kierrätetään (FEVE - The European Container Glass Federation. 2021). Vastaava luku on Yhdysvalloissa vain 31.3% (EPA 2018). Sementtiteollisuus siis kilpailee jätelasin saatavuudesta kierrätystalouden kanssa. Tämän kilpailun määrä ja laatu ovat kuitenkin riippuvaisia maanosasta. Jätelasia voidaan myös käyttää vesilasin ( $Na_2SiO_3$ ) valmistamiseen. Vesilasi on yleinen sementeissä käytetty alkaalinen aktivaattori, jolla sementtien kovettumista voidaan nopeuttaa. (Ortega et al. 2018; Santana-Carrillo, Burciaga-Díaz ja Escalante-García 2021)

### 2.2.9 Kalkkikivi

Kalkkikivi ei itsessään ole reaktiivinen aine, mutta sekoitettuna portland-sementtiin se reagoi sementissä olevien aluminaattien kanssa osallistuen hydraatioprosessiin. Noin 5 m% korvaussuhteella kaiken kalkkikiven voidaan olettaa reagoivan aluminaattien kanssa. Eurooppalainen standardi EN 197-1 kuitenkin sallii jopa 35 m% korvaussuhteen (Suomen Standardisoimisliitto 2012). Tällöin kalkkikivi toimii sekä reaktiivisena seosaineena että inerttinä täyteaineena. 5-10 m% korvaussuhteet ovat yleisiä eivätkä yleensä vaikuta sementin lujuuteen merkittävästi. Kalkkikiven lisääminen sementtiin kuitenkin huonontaa sen sulfaattihyökkäyksen kestoa. Kalkkikiveä ei tarvitse sintrata ennen käyttöä, joten sen

energiatarve ja ympäristövaikutukset syntyvät vain kaivostoiminnasta ja jauhamisesta. Sementtitehtaat voivat hyödyntää osan raaka-ainevirrastaan vaihtoehtoisena seosaineena. Tähän ei tarvita juuri mitään muutoksia prosessissa tai logistiikassa. Tämä tekee kalkkikivistä erittäin hyvän ja ympäristöystävällisen vaihtoehtoisen seosaineen. (Matschei, Lothenbach ja Glasser 2007)

Taulukko 7: Esimerkkejä seosaineiden oksidikoostumuksesta ja hehkutushäviöstä. GBFS ja FA Taylorin esimerkkikoostumuksista (Taylor 1997). OPC ja Kaoliini Antonin oksidikoostumuksista (Antoni et al. 2012). SSA Pingin raaka-lietteen koostumuksesta (Ping et al. 2020). POFA Joharin Ultrafine-POFA:n koostumuksesta (Johari et al. 2012). WG Ortegan lasijauheen koostumuksesta (Ortega et al. 2018). RHA Habeebin riisin akanatuhkan koostumus (Habeeb ja Mahmud 2010)

Yhdiste [ m%]	OPC	GBFS	FA	SSA	POFA	Kaoliini	WG	RHA
<i>C</i>	64.18	42.24	2.4	3.22	8.19	0.02	18.18	0.89
<i>S</i>	21.01	33.48	48.7	6.09	65.01	50.62	64.32	90.11
<i>A</i>	4.63	13.29	27.9	5.74	5.72	46.91	2.9	1.19
<i>F</i>	2.6	1.24	9.5	6.09	4.41	0.38	0	0.85
<i>T</i>	0.14	0.55	0.9	0	0.25	1.29	0	0
<i>M</i>	1.82	5.99	1.6	0.98	4.58	0.09	0	0.9
<i>K</i>	0.94	0.7	4.2	0	6.48	0.18	1.56	3.84
<i>N</i>	0.2	0.39	1.5	0	0.07	0.28	13.03	0
$\hat{S}$	2.78	0.04	1.2	0	0.33	0.08	0	0
<i>P</i>	0	0.13	0.2	6.02	4.69	0	0	0.86
Hehkutushäviö	1.26	0.42	0-9	65.26	2.53	0	0	4.05

### 2.3 Beliittirikkaat sementit

Beliittirikkaat sementit valmistetaan käyttäen pääasiassa samoja raaka-aineita ja prosessia kuin OPC, mutta lämpötila sementtiuunissa nousee korkeimmillaan vain noin 1200-1350°C:seen, jolloin klinkkeri muodostuu suuremmalla pitoisuudella beliittiä ( $C_2S$ ) ja pienemmällä pitoisuudella aliittia ( $C_3S$ ). Tyypillisen beliittirikkaan sementin koostumus on eritelty taulukossa 8. Beliittirikkaat sementit ovat tyypillisesti OPC:ä heikompiä varhaislujuudessa, mutta kehittävät paremman lujuuden myöhemmin elinkaarensa aikana. Beliitti vapauttaa veteen sekoittuessaan vähemmän lämpöenergiaa kuin aliitti, jolloin halkeilun riski on pienempi. Nämä ominaisuudet tekevät beliittirikkaasta sementistä erinomaisen materiaalin pitkäaikaisiin ja massiivisiin elementteihin kuten patoihin. Lisäksi beliittirikkaan sementin myöhäisempi lujuuskehitys on edullista käyttöään näkökulmasta. (Cuesta, Ayuela ja Aranda 2021)



Taulukko 8: Tyypillisen beliittirikkaan sementin koostumus (Cuesta, Ayuela ja Aranda 2021)

Yhdiste	m%
$C_3S$	30
$C_2S$	45
$C_4AF$	23
Muut	2

Beliittirikkaiden sementtien matala varhaislujuus johtuu beliitin suhteellisen matalasta reaktiivisuudesta. Tästä johtuen beliittirikkaat sementit eivät yleisesti sovellu käyttökohteisiin, joissa nopea kovettuminen ja korkea varhaislujuus ovat keskeisiä ominaisuuksia kuten kantavat rakenteet. Klinkkerit, jotka sisältävät suuren määrän beliittiä, saattavat vaatia suuremman määrän energiaa jauhamisvaiheessa suhteessa aliittirikkaaseen klinkkeriin. Klinkkerin jäähdytysalueen tulee myös olla jäähdytysteholtaan hieman tehokkaampi beliittirikkaalle klinkkerille verrattuna aliittirikkaaseen klinkkeriin. Klinkkerin jauhaminen erittäin hienoksi ja nopea jäähdyttäminen ovat molemmat keinoja lisätä beliitin reaktiivisuutta. Myös lämpötilalla, jossa sementti sekoitetaan veteen, on suuri vaikutus beliittirikkaan sementin varhaislujuuteen. (Cuesta, Ayuela ja Aranda 2021)

Beliitin aliittia alhaisempi sintrauslämpötila mahdollistaa säästöjä polttoainekuluissa ja mahdollisesti laitteistoinvestoinneissa ja ylläpidossa pienemmän lämpörasituksen johdosta. Myös raaka-aineperäiset päästöt ovat OPC:ä pienemmät riippuen beliitin korvaamisesta aliitin määrästä, sillä beliittiin sisältyy vain kaksi kalsiumoksidia ( $CaO$ ) kolmen sijaan. Kokonaisuudessaan tyypillisen beliittirikkaan sementin voidaan odottaa pienentävän hiilidioksidipäästöjä noin 10% verrattuna OPC:iin ottaen huomioon matalamman sintrauslämpötilan, korkeamman jäähdytys- ja jauhamisenergian sekä matalammat raaka-aineperäiset päästöt. (ibid.)

Beliittirikkaiden sementtien matalaa reaktiivisuutta voidaan kompensoida nopeuttamalla C - S - H faasin muodostumista lisäämällä sementtiin nucleaatiota nopeuttavaa kalsiumsilikaatti-hydraatti-geeliä (E. John, Matschei ja Stephan 2018). Myös alkaaliaktiivointi  $NaO_2$ -aktivaattoreilla on toimiva tapa kehittää beliittirikkaan sementin varhaislujuutta (Ashraf 2018).

## 2.4 Kalsiumsulfoaluminaattisementti

Lisäämällä sementtiseoksen sekaan sementtiuuniin aluminarikasta seosainetta, kuten kaoliniitti tai bauksiitti sekä kalsium sulfaatti pitoista seosainetta tai polttamalla rikkipitoista polttoainetta voidaan sementtiseoksen ye'elimiitti ( $C_4A_3\hat{S}$ ) pitoisuutta nostaa. Ye'yelimiitin valmistamisessa vapautuu suhteellisen vähän hiilidioksidia matalan CaO-pitoisuuden

johdosta ja sen ominaisuudet hydraatioissa parantavat sementin varhaislujuutta. (Gartner ja Hirao 2015)

Beliittirikkaan sementin koostumusta voidaan muokata siten, että  $C_4AF$ -pitoisuus nousee hieman ja  $C_4A_3\hat{S}$ -pitoisuus nousee noin 10 prosenttiin tai korkeammalle. Beliitti-ye'elimiittiferriitti (BYF) sementin varhaislujuus on ye'elimiitin nopean nesteytymisen ansiosta beliittirikasta sementtiä parempi. BYF sementti myös kehittää OPC:ä paremman puristuslujuuden noin 100 päivän jälkeen korkean beliittipitoisuutensa ansiosta (Popescu, Muntean ja Sharp 2003). Erittäin korkean ye'elimiittipitoisuuden omaavat kiinalaiset Third Cement Series (TCS) -sementit tarjoavat erinomaisen varhaislujuuden, itsejännittyvän kovettumisen. Näin ollen ne sopivat hyvin käytettäväksi esivaletuissa ja esijännitetyissä betonielementeissä (Gartner 2004). (Cuesta, Ayuela ja Aranda 2021; Gartner ja Hirao 2015)

BYF-sementti hyödyntää sekä beliittirikkaiden sementtien että kalsiumsulfoaluminaattisementtien matalampia raaka-aineperäisiä hiilidioksidipäästöjä. BYF-sementin seosaineena voidaan käyttää suurempia määriä kipsiä kuin OPC:ssä, koska toisin kuin  $C_3A$ ,  $C_4A_3\hat{S}$ :n hydraatioreaktiot eivät hidastu merkittävästi kipsipitoisuuden noustessa. Kipsiä ei tarvitse sintrata sementtiunissa, vaan se voidaan jauhaa valmiin klinkkerin sekaan. Tämä pienentää BYF-sementin polttoaineperäisiä hiilidioksidipäästöjä yhdessä matalamman sintrauslämpötilan kanssa. BYF-sementti hyödyntää raaka-aineenaan helposti saatavilla olevaa kaoliinitta, muita savimineraaleja, kipsiä sekä lentotuhkaa, joten sen valmistaminen on suhteellisen edullista. (Gartner ja Hirao 2015)

## 2.5 Kalsiumaluminaattisementti

Kalsiumaluminaatti (CA) -sementti valmistetaan yleisesti kalkkikiven lisäksi aluminarikkaista, silikaattiköyhistä materiaaleista kuten bauksiitista. Tyypillisen kalsiumaluminaattisementin koostumus on eritelty taulukossa 9. Valmistusprosessissa käytetään sulatusuuneja, joiden lämpötila nostetaan 1450-1600°C:en lämpötilaan. Tässä lämpötilassa kalkkikivi ja bauksiitti sulavat yhteen. Lopputuloksena on yhtenäinen klinkkerivalu, joka jauheetaan hienoksi. CA-sementin lujuus kehittyy  $C_3S$ :n sijaan monokalsiumaluminaatin ansiosta. Tämän tyyppiset sementit omaavat tyypillisesti korkean varhaislujuuden myös kylmissä kovettumisolosuhteissa sekä hyvän sulfaatti- ja kemikaalihyökkäys kestävyuden. Kalsiumaluminaattipohjaiset sementit soveltuvat myös tulelle ja korkeille lämpötiloille altistuviin käyttökohteisiin, sillä hydraulisen kovettumisen lisäksi CA-sementit muodostavat korkeissa lämpötiloissa keraamisen sidoksen, joka on yhtä luja kuin alkuperäinen hydraulinen sidos.

Taulukko 9: Tyypillisen kalsiumaluminaattisementin oksidikoostumus (Habeeb ja Mahmud 2010)

Yhdiste	m%
<i>C</i>	37.49
<i>S</i>	5.25
<i>A</i>	38.22
<i>F</i>	13.87
<i>M</i>	0.97
<i>K</i>	0.07
<i>N</i>	0.31
<i>P</i>	0.09

CA-sementtin raaka-aineperäiset hiilidioksidipäästöt ovat aliittirikkaita sementtejä alhaisemmat matalamman CaO-pitoisuuden johdosta. Korkeamman lämpötilan vaativa ja huomion energiategokkuuden omaava valmistusprosessi kuitenkin lisää sementin polttoaineperäisiä päästöjä. (Gartner 2004)

Bauksiitti on raaka-aineena helposti saatavilla ympäri maailmaa suurissa määrin, mutta sementtiteollisuus kilpailee siitä alumiiniteollisuuden kanssa, joka käyttää bauksiitin maailman tuotannosta noin 70% (U. S. Geological Survey 2020). Tästä syystä CA-sementtiä käytetään lähinnä erikoisementtinä tulenkestävyyttä tai kemikaalikestävyyttä vaativissa sovelluksissa. Myös muiden seosaineiden käyttö CA-sementissä on mahdollista noin 5-10% pitoisuuksina. Riisin akanatuhkaa on käytetty CA-sementissä kokeellisesti, jolloin 5 prosentin korvaussuhteella on saavutettu perus CA-sementtiin verrattavat tai paremmat mekaaniset ominaisuudet 90 päivän kovettumisen jälkeen sekä 18.75% matalammat hiilidioksidipäästöt. (Abolhasani, Samali ja Aslani 2022). (Taylor 1997; Mehta ja Monteiro 2001)

## 2.6 Magnesiumpohjaiset sementit

Magnesiumpohjaiset sementit koostuvat kalsiumoksidin (CaO) sijaan pääasiallisesti magnesiumoksidista (MgO). Magnesiumpohjaiset sementit kovettuvat hydraulisesti portland-sementin tapaan, mutta käyttävät raaka-aineenaan magnesiumkarbonaatti ( $MgCO_3$ )-rikkaita mineraaleja kuten magnesiitti. Nämä mineraalit käsitellään kalsinoimalla, jolloin ne vapauttavat hiilidioksidia.



Tällä prosessilla valmistetut magnesiumpohjaiset sementit eivät ole vähäpäästöisempiä kuin vastaavat portland-sementit. Magnesiumpohjaisia sementtejä käytetäänkin vain lähin-

nä teollisuudessa tulenkestävänä vaihtoehtona portland-sementille. Päästötehokkaampi tapa valmistaa magnesiumpohjaista sementtiä olisi käyttää raaka-aineena luonnollisia magnesiumsilikaattimineraaleja kuten oliviini ( $Mg_2SiO_4$ ) ja serpentiini ( $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ). Nämä mineraalit olisi prosessoitava magnesiitiksi ( $MgCO_3$ ) sitomalla niihin hiilidioksidia ja edelleen kalsinoida magnesiumoksidiksi vapauttamalla sidottu hiilidioksidi. Näin magnesiumoksidin valmistaminen olisi raaka-aineperäisten päästöjen näkökulmasta hiilineutraalia. Prosessia tämän saavuttamiseen on ehdottanut Novacem patenttihakemuksessaan magnesiumkarbonaatin valmistukselle (Vlasopoulos ja Cheeseman 2013). Nduagu tarkastelee 2012 tutkimuksessaan kahta hiilen talteenottoa prosessia, joissa luonnollisia magnesiumsilikaatteja karbonoidaan magnesiitiksi paineistetussa hiilidioksidi-ilmakehässä (Nduagu, Bergerson ja Zevenhoven 2012). Prosessien on osoitettu sitovan tonni hiilidioksidia per 517 kg ja 683 kg prosessissa vapautettua hiilidioksidia. Tällaisen hiilen talteenottojärjestelmän tuottamaa magnesiittia raaka-aineena käyttävä sementti voisi olla todellisesti hiilineutraalia. Lisää tutkimusta ja teollisia kokeiluja kuitenkin tarvitaan ennen kuin tällaisen prosessin toimivuus ja kannattavuus voidaan selvittää. (Gartner ja Hirao 2015)

Magnesiumpohjaista nesquehoniittia ( $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ ) voidaan valmistaa osana hiilen talteenottoa prosessia. Savukaasut johdetaan alkaalisen (NaOH) liuoksen läpi. Hiilidioksidia liukenee tähän liuokseen, jonka jälkeen se sekoitetaan  $Mg^{2+}$ -ionilähteeseen kuten desalinaatiossa syntyvään hylkyveteen. Tällöin liuoksesta saostuu nesquehoniittia, joka sitoo noin 32 m% hiilidioksidia. Nesquehoniinilla on sementtimäisiä ominaisuuksia, mutta niiden laajuus on vielä tuntematon. (Morrison et al. 2016)

## 2.7 Alkaliaktivoituvat materiaalit

Alkaliaktivoinnilla voidaan nopeuttaa monien sementtiseosten kovettumista. Myös muuten inerttien aineiden reagoiminen voidaan mahdollistaa alkaliaktivaattoreilla kuten natriumhydroksidi ( $NaOH$ ), kaliumhydroksidi ( $KOH$ ) ja vesilasi ( $Na_2SiO_3$ ). Alkaliaktivoituvien materiaalien osajoukko nimeltään geopolymeerit koostuu kalsiumköyhästä materiaaleista, jotka alkaliaktivaattorin läsnäollessa reagoivat ja kovettuvat. Yleisimpiä raaka-aineita geopolymeereille ovat lentotuhka, granuloitu masuunikuona ja metakaoliini. Geopolymeerit kovettuvat yleensä nopeasti ja voivat kehittää portland-sementtiä vastaavan lujuuden. Niiden potentiaaliset hiilidioksidipäästö vähennykset riippuvat täysin käytettyjen materiaalien ja aktivaattorien valmistuksessa vapautuneesta hiilidioksidista, mutta geopolymeerien hiilidioksidipäästöjen voidaan olettaa olevan noin 9% matalammat kuin vastaavan portland-sementin (Turner ja Collins 2013). Geopolymeerit soveltuvat hyvin myös 3D-tulostamiseen niiden nopean ja kontrolloidun kovettumisen sekä hyvän työstettävyyden puolesta (Zhong ja M. Zhang 2022). (Frederickx, Nguyen ja Phung 2022)

### 3 Modified Empathetic Added Sustainability Index

Sementin hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi on tarjolla lukuisia seosaineita ja teknologioita. Useimmat eivät ole helposti vertailtavissa keskenään. Pelkästään alhaiset ominaishiilidioksidipäästöt eivät tee seosaineesta portland-sementtiä kestävämpää ratkaisua. Huomioon on otettava myös raaka-aineiden paikallinen saatavuus, prosessiin tehtävät muutokset, sementin käyttöikä ja sen suorituskyvyn vaikutus mahdollisiin käyttökohteisiin ja sementin kulutukseen. Tässä työssä pyritään havainnollistamaan Coffettin 2022 tutkimuksessaan ehdottaman Modified Empathetic Added Sustainability Index:in (M-EASI) käyttöä sementtiseosten ympäristöllisen kestävyuden kvantifoimiseen (Coffetti et al. 2022).

$$M - EASI = \frac{3e \cdot \prod_1^n Performance \cdot \prod_1^n Durability}{e^{GER} + e^{GWP} + e^{NRMC}} \quad (3)$$

M-EASI-yhtälössä *Performance* on sementin käyttökohteesta riippuvainen termi, joka on yleensä 28 päivän kompressiolujuus, vetolujuus, taivutuslujuus, kimmomoduuli ja/tai hydraatiolämpö normalisoituna referenssisementtiin. M-EASI ottaa siis huomioon käyttökohteen näkökulmasta tärkeät ominaisuudet. *Durability* on sementin käyttökohteessa vallitsevien ympäristörasitusten mukaan määräytyvä termi. Ilmalle altistuvalla sementillä tämä on karbonoitumisnopeus normalisoituna referenssisementtiin. Indeksi siis ottaa huomioon tärkeimmän ominaisuuden kyseessä olevan rasituksen vastustamisessa. *GER* on brutto energia tarve (Gross Energy Requirement) eli sementin valmistamiseen tarvittava energia normalisoituna referenssisementtiin. *GWP* on ilmaston lämpenemispotentiaali (Global Warming Potential) eli sementin valmistamisessa vapautuneiden kasvihuonekaasujen määrä normalisoituna referenssisementtiin. *NRMC* on luonnollisten resurssimateriaalien kulutus (Natural Resource Material Consumption) eli sementin valmistuksessa kulutetut luonnonvarat kuten vesi ja mineraalit normalisoituna referenssisementtiin. Osoittajaan on lisätty Eulerin luku  $e$  ja nimittäjän termit on nostettu sen potenssiin, jotta negatiivisen hiilijalanjäljen omaavat materiaalit voidaan ottaa huomioon yhtälössä. (Coffetti et al. 2022; Coppola et al. 2019)

M-EASI on hyvä työkalu vertailla erilaisia sementtivalintoja tietyssä paikassa ja tietyssä käyttökohteessa, mutta tulokset eivät ole vertailtavissa yleisellä tasolla. Jokaisessa laskelmassa on mukana monia paikallisia ja käyttökohteita kohtaisia tekijöitä kuten käytössä oleva prosessi, paikalliset luonnonvarat ja kuljetusmuodot sekä sementiltä vaadittavat ominaisuudet. Jotkin tai kaikki näistä voivat muuttua, jos sementin käyttökohte tai valmistuspaikka muuttuvat. M-EASI ei siis sovellu sementtiseosten yleiseen vertailuun vaan on työkalu oikean sementtiseoksen valintaan, kun käyttökohte ja valmistuspaikka ovat tiedossa. Lisäksi epävarmuutta syntyy nimittäjän termejä kehittäessä, koska koko sementin

tuotantoprosessista ja logistiikkaketjusta ei välttämättä ole tarkkaa tietoa. GER, GWP ja NRMC ovat tässä työssä arvioita, joiden tarkentaminen vaatii kattavan elinkaarianalyysin kustakin sementtiseoksesta tai materiaalista. Työn laajuuden rajaamiseksi laskelmissa ei oteta huomioon kuljetuksesta syntyviä päästöjä ja sementin valmistus prosessin oletetaan käyttävän parasta saatavilla olevaa teknologiaa. Tarkoituksena ei ole siis analysoida tietyn sementtitehtaan tai rakennustyömaan seosvaihtoehtoja vaan esitellä M-EASI:n käyttöä ja soveltamista.

## 4 Esimerkkilaskut

Tässä kappaleessa käydään läpi M-EASI:n soveltaminen esimerkkiseoksiin. Materiaalien ympäristövaikutusten arviointiin käytettävät arvot on otettu suoraan lähteistä tai päätelty muista arvoista ja eritelty taulukkoon 10.

Taulukko 10: Materiaalien ympäristövaikutuksia kuvaavat termit. Rivit 1-6 ovat lähteistä (Coffetti et al. 2022; Coppola et al. 2019) ja data alunperin Ecoinvent 3.0 Database:sta. Beliittirikkaan klinkkerin (BRC) GWP on arvioitu pienempien raaka-aineperäisten päästöjen perusteella (Cuesta, Ayuela ja Aranda 2021). CEM II/B-V:n arvot on arvioitu seoksen koostumuksen perusteella (Younsi et al. 2011).

Materiaali	GER [MJ/kg]	GWP [ $kgCO_2/kg$ ]	NRMC [kg/kg]
OPC	5.5	0.98	1.3
CAC	2.7	0.74	1.1
GBFS	0.31	0.017	0
Lentotuhka	0.1	0.0053	0
Vesi	0.2	0	1
Luonnollinen täyteaine	0.12	0.002	1.05
BRC	5.5	0.882	1.3
CEM II/B-V	3.822	0.677	0.939

### 4.1 Esimerkki 1: Lentotuhka seosaineena rakenteelliseen betonielementtiin

Sovelletaan M-EASI:ä Yonsin 2011 tutkimuksesta löytyviin sementtiseoksiin (Younsi et al. 2011). Oletetaan sementin käyttökohteeksi ilmalle altistuva rakenteellinen betonielementti, jolloin tärkeimmät huomioitavat ominaisuudet ovat puristuslujuus 28 päivän kovettumisen jälkeen  $R_{c,28pv}$  ja karbonoitumisnopeus  $K_c$  (Coppola et al. 2019).

$$M - EASI = \frac{3e \cdot R_{c,28pv} \cdot K_c}{e^{GER} + e^{GWP} + e^{NRMC}} \quad (4)$$

Kun termeille lasketaan arvot ja sijoitetaan ne yhtälöön, saadaan taulukossa 11 esitetyt tulokset.

Taulukko 11: Vertailu OPC-seoksen (Ref1), sekoitetun CEM II/B-V-klinkeriseoksen (Ref2) ja kahden lentotuhkaseoksen (FA30 ja FA50) välillä. \*klinkerin koostumus on 69 m% OPC-klinkerä, 22 m% Lentotuhkaa, 4 m% Kalkkikiveä (Younsi et al. 2011)

Seos	Ref1	Ref2	FA30	FA50
OPC-klinkerä [kg/m <sup>3</sup> ]	301		241	190
*CEM II/B-V-klinkerä [kg/m <sup>3</sup> ]		321		
Lentotuhka [kg/m <sup>3</sup> ]			100	190
Vesi [kg/m <sup>3</sup> ]	182	175	182	155
Luonnollinen täyteaine [kg/m <sup>3</sup> ]	1941	1941	1872	1878
NRMC [kg/m <sup>3</sup> ]	2611.4	2514.5	2460.9	2373.9
GER [MJ/m <sup>3</sup> ]	1924.8	1494.7	1596.5	1320.4
GWP [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	298.9	221.3	240.5	191
R <sub>c</sub> 28-pv [MPa]	35.8	31.6	33	31.4
K <sub>c</sub> [mm]	6	7.7	7.3	7.2
M-EASI	1	0.75	0.87	0.94

Indeksin mukaan Ref1-sementti on kaikinpuolin paras vaihtoehto rakenteelliseen betonielementtiin suuremmista ympäristövaikutuksistaan huolimatta. Tämä voi johtua siitä, että vaihtoehtoisen sementin pienemmän puristuslujuuden takia saman rakenteen valmistamiseen tarvitaan suurempi määrä vaihtoehtoista sementtiä portland-sementin sijaan. Materiaalitarpeen määrää ei kuitenkaan tiedetä tarkasti, koska kyseessä on epätarkka esimerkkutilanne. Näin ollen ei voida olla varmoja korvaavatko vaihtoehtoisten sementtien pienemmät ominaisympäristövaikutukset suuremmasta materiaalimäärästä aiheutuvat ympäristövaikutukset. Performance-termiä olisi siis hyvä kehittää sovelluksesta riippuen empiirisillä korjauskertoimilla. Näin Performance-termi ottaisi huomioon puristuslujuuden todellisen vaikutuksen tarvittavaan materiaalimäärään.

#### 4.2 Esimerkki 2: Beliittirikas sementti karbonaatiokovettetuissa betonielementeissä

Sovelletaan M-EASI:ä Siddiquen 2020 tutkimuksessa esiintyviin sementtiseoksiin erilaisilla vesi-sementti-suhteilla. Tutkimuksessa sementistä valmistettiin laastia, mutta sen tarkoitus on tutkia vesi-sementti-suhteen vaikutusta sementin karbonaatiokovettumiseen. Karbonaatiokovettamista käytetään esivalettujen betonielementtien kovettamisessa. Tästä syystä oletamme sementin käyttökohdeksi esivaletun betonielementin, joka altistuu ilmalle. Tärkeimmät huomioitavat ominaisuudet tälle käyttökohdeelle ovat varhaislujuus  $R_{c,7pv}$  ja karbonaationopeus  $K_c$  (Coppola et al. 2019). (Siddique, Naqi ja Jang 2020)

$$M - EASI = \frac{3e \cdot R_{c,7pv} \cdot K_c}{e^{GER} + e^{GWP} + e^{NRMC}} \quad (5)$$



Taulukko 12: Vertailu OPC-seoksen ja kahden BRC-seoksen välillä sekä vedessä kovetettuina (V) että karbonaatio kovetettuina (K) kun käyttökohde on esivaletut betonielementit (Siddique, Naqi ja Jang 2020). \*ottaa huomioon puristuslujuuden 28 päivän jälkeen \*\*ottaa huomioon karbonaatiokovettamisen vaikutuksen puristuslujuuteen 28 päivän jälkeen

Seos	OPC0.5(V)	OPC0.5(K)	BRC0.5(V)	BRC0.5(K)	BRC0.7(V)	BRC0.7(K)
OPC-klinkkeri [kg/m <sup>3</sup> ]	360	360				
BRC-klinkkeri [kg/m <sup>3</sup> ]			360	360	360	360
Vesi [kg/m <sup>3</sup> ]	180	180	180	180	252	252
NRMC [kg/m <sup>3</sup> ]	648	648	648	648	720	720
GER [MJ/m <sup>3</sup> ]	2016	2016	2016	2016	2030.4	2030.4
GWP [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	352.8	352.8	317.5	317.5	317.5	317.5
R <sub>c</sub> 7-pv [MPa]	41	63	15	57	6	40
K <sub>CO<sub>2</sub></sub> normalisoitu	1	1	0.55	0.55	0.47	0.47
M-EASI	1	1.54	0.21	0.78	0.07	0.46
R <sub>c</sub> 28-pv [MPa]	60	85	45	95	20	47
*M-EASI	1	2.18	0.28	2.27	0.04	0.76
R <sub>c</sub> (C)/R <sub>c</sub> (V)		0.43		1.14		1.64
**M-EASI		1		2.77		1.33

Taulukossa 12 nähdään indeksille haastava tilanne. Esivaletuille betonielementeille tärkein huomioon otettava ominaisuus on varhaislujuus. Indeksi näyttäisi karbonaatiokovetetun OPC0.5-seoksen olevan paras valinta sen korkean varhaislujuuden puolesta. Lähteenä käytetty tutkimus kuitenkin tulee toiseen tulokseen. Siddiquen mukaan korkean vesi/sementti-suhteen omaavat beliittirikkaat sementit soveltuvat paremmin karbonaatio kovetettaviin betonielementteihin. Indeksiä käytettäessä on oltava tarkkana käytössä olevan prosessin suhteen. Karbonaatio kovettamisessa betoni altistetaan paineistetulle hiilidioksidi-ilmakehille ja kovettuminen tapahtuu betonin reagoitessa hiilidioksidin kanssa, toisin sanoen karbonoituu. Tässä tapauksessa Durability termi, joka koostuu betonin karbonoitumisnopeudesta, kuvaa ominaisuutta, joka ei ole minimoitava haitta vaan maksimoitava kovettumista nopeuttava ominaisuus. Lisäksi beliittirikkaat sementit saavuttavat tutkimuksen mukaan huomattavasti portland-sementtiä suurempia lujuuksia 28 päivän kovettumisen jälkeen. Indeksien sopivuutta tähän tilanteeseen voidaan näin ollen parantaa jättämällä Durability termi huomioimatta ja lisäämällä 28 päivän puristuslujuus Performance termiin. (Siddique, Naqi ja Jang 2020)

$$Performance = \frac{R_{c,7pv,1}}{R_{c,7pv,ref}} \cdot \frac{R_{c,28pv,1}}{R_{c,28pv,ref}} \quad (6)$$

Tässä  $R_{c,7pv,1}$  on vertailtavan sementtiseoksen puristuslujuus 7 päivän jälkeen,  $R_{c,7pv,ref}$  on referenssisementtiseoksen puristuslujuus 7 päivän jälkeen,  $R_{c,28pv,1}$  on vertailtavan sementtiseoksen puristuslujuus 28 päivän jälkeen ja  $R_{c,28pv,ref}$  on referenssisementtiseoksen puristuslujuus 28 päivän jälkeen. Säädetty M-EASI:n arvot ovat luettavissa taulukosta 12. Indeksi ei kuitenkaan säädön jälkeenkään ota huomioon koko kuvaa karbonaatio kovettavista betonielementeistä. Tutkimuksen mukaan suuremman vesi-sementti-suhteen

omaavat seokset kehittävät suuremman puristuslujuuden suhteessa vastaavaan vesikove-  
tettuun seokseen kuin matalamman vesi-sementti-suhteen omaavat seokset. Kosteammilla  
seoksilla on myös muita karbonaatiokovettamista edistäviä ominaisuuksia, joita M-EASI  
ei ota huomioon kuten erot mikrorakenteessa ja huokoisuudessa. M-EASI:ä voidaan ke-  
hittää ottamaan huomioon sementtiseoksen sopivuus karbonaatiokovettamiseen lisäämällä  
Performance-termiin kerroin kuvaamaan karbonaatiokovettamisen vaikutusta sementti-  
seoksen puristuslujuuden kehitykseen.

$$Performance = \frac{R_{c,7pv,1,k}}{R_{c,7pv,ref,k}} \cdot \frac{R_{c,28pv,1,k}}{R_{c,28pv,ref,k}} \cdot \frac{\frac{R_{c,28pv,1,k}}{R_{c,28pv,1,v}}}{\frac{R_{c,28pv,ref,k}}{R_{v,28pv,ref,v}}} \quad (7)$$

Termeihin lisätään alaindeksit osoittamaan vesikovettamista (v) ja karbonaatiokovetta-  
mista (k). Uudessa termissä vertaillaan seoksen 28 päivän puristuslujuutta karbonaatio-  
kovettamisen jälkeen ja vastavaa puristuslujuutta vesikovettamisen jälkeen. Sama suhde  
lasketaan myös referenssiseokselle. Näitä kahta suhdetta vertaamalla saadaan korjausker-  
roin, joka ottaa huomioon karbonaatiokovettamisen vaikutuksen sementtiseoksien puris-  
tuslujuuteen 28 päivän jälkeen. Tulokset on viimeisessä M-EASI:n arvossa normalisoitu  
karbonaatiokovetettuun OPC-seokseen.

## 5 Johtopäätökset

Palataan IEA:n sementtiteollisuudelle asettamiin päästötavoitteisiin. Vertaillaan sementtiseosten päästöttehokkuutta ”Blue” -skenaarion vaatimaan päästötehokkuuteen.

Taulukko 13: Maailmanlaajuisen sementtiteollisuuden päästöttehokkuus ”Blue” -skenaariossa (IEA 2010; IEA 2022)

Vuosi	Kysyntä [Mt]	Päästöt [Mt]	Päästöt' [tCO <sub>2</sub> /t]	Klinkkeri suhde
2021	4270	2520	0.59	0.72
2030	3800	1790	0.471	0.74
2050	4600	1550	0.337	0.71

Taulukosta 13 voidaan huomata, että ”Blue” -skenaarion klinkkerisuhde on jo lähes saavutettu, mutta sementin ominaispäästöjä on pienennettävä vielä noin 43%, josta 10 prosenttia on tarkoitus saavuttaa käyttämällä vaihtoehtoisia seosaineita. Olettaen seosaineiden hiilidioksidipäästöjen pysyvän vakiona, voimme tehdä karkean arvion vuonna 2050 tarvittavasta klinkkerisuhteesta  $x$ , jos halutaan saavuttaa ”Blue” -skenaarion ominaispäästöt.

$$\begin{aligned}
 x_{\text{klinkkeri},2050} &= x_{\text{klinkkeri},2021} \cdot \frac{Päästöt'_{2021} - 0.1(Päästöt'_{2021} - Päästöt'_{2050})}{Päästöt'_{2021}} \\
 &= 0.72 \cdot \frac{0.59 - 0.1(0.59 - 0.337)}{0.59} = 0.68
 \end{aligned} \tag{8}$$

Tämä laskelma olettaa, että seosaineiden ominaishiilidioksidipäästöt eivät muutu vaan niiden määrää suhteessa klinkkeriin kasvatetaan. Tämä tarkoittaisi noin 236 Mt suurempaa kysyntää vaihtoehtoisille seosaineille vuonna 2050 kuin vuonna 2021. Suuri osa yleisimmistä vaihtoehtoisista seosaineista kuten granuloitu masuunikuona ja lentotuhka on jo hyötykäytössä ja niiden tarjonta on sidottu terästeollisuuteen ja hiilivoimaan. Puuttuva seosainemäärä on siis löydettävä jostain muualta. Erilaiset jätetuhkat voisivat olla hyvä lähde vähäpäästöisille seosaineille, mutta niiden määrä ei todennäköisesti riitä kattamaan tarvittavaa määrää. Lupaavimpia lähteitä seosaineille ovat kalkkikivi ja kaoliiniset savet. Näiden materiaalien saatavuus on kysyntään nähden lähes ääretön ja niiden hiilidioksidipäästöt ovat hyvin pienet portland-klinkeriin verrattuna. Näillä seosaineilla on myös todettu olevan synergistisiä ominaisuuksia, jotka mahdollistavat suurempia korvaussuhteita (Antoni et al. 2012). Beliittirikkaat ja BYF-sementit tarjoavat maltillisia päästövähennyksiä tarvitsematta juurikaan prosessimuutoksia tai suuria määriä vaihtoehtoisia seosaineita.

Kokonaan portland-klinkkerin korvaavat sementtitekniologiat tarjoavat erilaisia pohjia vähäpäästöisille tai jopa hiilinegatiivisille sementeille, mutta niiden teollinen ja taloudellinen kannattavuus on vielä kyseenalaista. Jotkin näistä seoksista vaativat täysin portland-sementistä poikkeavan prosessin. Useat seokset kilpailevat portland-sementin kanssa samoista raaka-aineista. Lisää tutkimusta tarvitaan selvittämään erilaisten prosessien ja raaka-aineiden kelpoisuutta.

Päästötehokkuuden näkökulmasta on tärkeää käyttää sementtiä tehokkaasti, sillä oikean sementin valinta saattaa tuottaa merkittäviä vähennyksiä materiaalitarpeessa. Alan tutkimuksen olisi siis hyvä kehittää M-EASI:n kaltaisia työkaluja sopivan sementtiseoksen valintaan ja kerätä suorituskyky- ja ympäristövaikutusdataa monista erilaisista sementtiseoksista monissa erilaisissa käyttökohteissa. Lisäksi standardoinnissa tulisi siirtyä maailmanlaajuisesti kohti suorituskykypohjaista säätelyä, jotta koko mahdollinen sementtiseoksien spektrumi olisi käytössä sementtiseosta valitessa.

## Lähteet

- Abdullah, Eddy, Abdul Karim Mirasa ja Hidayati Asrah (2015). “Review on the Effect of Palm Oil Fuel Ash (POFA) on Concrete”. *Journal of Industrial Engineering Research* 1, s. 1–4.
- Abolhasani, Amirmohamad, Bijan Samali ja Fatemeh Sari Aslani (2022). “Rice Husk Ash Incorporation in Calcium Aluminate Cement Concrete: Life Cycle Assessment, Hydration and Strength Development”. *Sustainability* 14. 1012.
- Antoni, Mathieu et al. (2012). “Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone”. *Cement and Concrete Research* 42, s. 1579–1589.
- Ashraf, Warda (2018). “Microstructure of chemically activated gamma-dicalcium silicate paste”. *Construction and Building Materials* 185, s. 617–627.
- Barcelo, Laurent et al. (2014). “Cement and carbon emissions”. *Materials and Structures* 47, s. 1055–1065.
- Choi, Pangil, Jung Heum Yeon ja Kyong-Ku Yun (2016). “Air-void structure, strength, and permeability of wet-mix shotcrete before and after shotcreting operation: The influences of silica fume and air-entraining agent”. *Cement and Concrete Composites* 70, s. 69–77.
- Coffetti, Denny et al. (2022). “Pathways towards sustainable concrete”. *Cement and Concrete Research* 154. 106718.
- Coppola, Luigi et al. (2019). “An Empathetic Added Sustainability Index (EASI) for cementitious based construction materials”. *Journal of Cleaner Production* 220, s. 475–482.
- Courard, Luc et al. (2003). “Durability of mortars modified with metakaolin”. *Cement and Concrete Research* 33, s. 1473–1479.
- Cuesta, Ana, Andrés Ayuela ja Miguel A. G. Aranda (2021). “Belite cements and their activation”. *Cement and Concrete Research* 140. 106319.
- Damtoft, Jesper Sand et al. (2008). “Sustainable Development and Climate Change Initiatives”. *Cement and Concrete Research* 38, s. 115–127.
- Deb, Partha Sarathi, Pradip Nath ja Prabir Kumar Sarker (2014). “The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature”. *Materials & Design* 62, s. 32–39.
- EPA (2018). *Glass: Material-Specific Data*. URL: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/glass-material-specific-data> (viitattu 01.03.2023).
- Farfán, Javier, Mahdi Fasihi ja Christian Breyer (2019). “Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X”. *Journal of Cleaner Production* 217, s. 821–835.

- FEVE - The European Container Glass Federation. (2021). "EU Glass Packaging Closed Loop Recycling Steady at 74 Percent." URL: [https://feve.org/glass\\_recycling\\_stats\\_2019/](https://feve.org/glass_recycling_stats_2019/) (viitattu 01.03.2023).
- Frederickx, Lander, Thi Nhan Nguyen ja Quoc Tri Phung (2022). "Strength and Microstructure Characteristics of Metakaolin-Based Geopolymer Mortars with High Water-to-Binder Ratios". *Sustainability* 14. 3141.
- Gartner, Ellis (2004). "Industrially interesting approaches to "low-CO2" cements". *Cement and Concrete Research* 34, s. 1489–1498.
- Gartner, Ellis ja Hiroshi Hirao (2015). "A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete". *Cement and Concrete Research* 78, s. 126–142.
- Habeeb, Ghassan ja Hilmi Mahmud (2010). "Study on Properties of Rice Husk Ash and Its Use as Cement Replacement Material". *Materials Research-ibero-american Journal of Materials* 13, s. 185–190.
- Hatfield, A. (2022). "Cement Statistics and information". URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information> (viitattu 01.03.2023).
- Henry, Cameron ja Joan G. Lynam (2020). "Embodied energy of rice husk ash for sustainable cement production". *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 2. 100004.
- Holland, T. C. (2005). *Silica Fume User's Manual*. Tekninen raportti FHWA-IF-05-016. Silica Fume Association. URL: <https://silicafume.org/pdf/silicafume-users-manual.pdf> (viitattu 01.03.2023).
- IEA (2010). "Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios & Strategies to 2050", s. 181–185, 498–502.
- (2022). "Cement". URL: <https://www.iea.org/reports/cement> (viitattu 01.03.2023).
- Johari, Megat Azmi Megat et al. (2012). "Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash". *Construction and Building Materials* 30, s. 281–288.
- John, Elisabeth, Thomas Matschei ja Dietmar Stephan (2018). "Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – A review". *Cement and Concrete Research* 113, s. 74–85.
- Kajaste, Raili ja Markku Hurme (2015). "Cement Industry Greenhouse Gas Emissions – Management Options and Abatement Cost". *Journal of Cleaner Production* 112, s. 4041–4052.
- Katajisto, Oona (2022). "Cement precalcination with electricity and carbon dioxide sequestration". Betonitutkimusseminaari. URL: <https://www.decarbonate.fi/wp-content/uploads/2022/05/2022-05-17-Betonitutkimusseminaari.pdf> (viitattu 01.03.2023).
- Al-Mansour et al. (2019). "Green Concrete: By-Products Utilization and Advanced Approaches". *Sustainability* 11. 5145.

- Marey, Heba, Gábor Kozma ja György Szabó (2022). “Effects of Using Green Concrete Materials on the CO<sub>2</sub> Emissions of the Residential Building Sector in Egypt”. *Sustainability* 14. 3592.
- Matschei, Thomas, Barbara Lothenbach ja Fredrik Paul Glasser (2007). “The Role of Calcium Carbonate in Cement Hydration”. *Cement and Concrete Research* 37, s. 551–558.
- Mehta, Povindar Kumar ja Paulo J. M. Monteiro (2001). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 2. painos.
- Morrison, Jennie et al. (2016). “Magnesium-based cements for CO<sub>2</sub> capture and utilisation”. *Cement and Concrete Research* 85, s. 183–191.
- Moya, J. A., N. Pardo ja A. Mercier (2010). *Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions: Prospective Scenarios for the Cement Industry*. Tekninen raportti JRC59826. Publications Office of the European Union. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC59826> (viitattu 01.03.2023).
- Nduagu, Experience, Joule Bergerson ja Ron Zevenhoven (2012). “Life cycle assessment of CO<sub>2</sub> sequestration in magnesium silicate rock – A comparative study”. *Energy Conversion and Management* 55, s. 116–126.
- Ortega, José Marcos et al. (2018). “Influence of Waste Glass Powder Addition on the Pore Structure and Service Properties of Cement Mortars”. *Sustainability* 10. 842.
- Pavlík, Zbyšek et al. (2016). “Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements”. *Journal of Cleaner Production* 112, s. 409–419.
- Ping, Li et al. (2020). “Feasibility and Carbon Footprint Analysis of Lime-Dried Sludge for Cement Production”. *Sustainability* 12. 2500.
- Popescu, C. D., Marcela Muntean ja John Howard Sharp (2003). “Industrial trial production of low energy belite cement”. *Cement & Concrete Composites* 25, s. 689–693.
- Sanjuán, Miguel Ángel et al. (2018). “Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars carbonation”. *Cement and Concrete Composites* 90, s. 257–265.
- Santana-Carrillo, José Luis, Oswaldo Burciaga-Díaz ja José Iván Escalante-García (2021). “Blended limestone-Portland cement binders enhanced by waste glass based and commercial sodium silicate - Effect on properties and CO<sub>2</sub> emissions”. *Cement and Concrete Composites* 126. 104364.
- Sata, Vanchai, Chai Jaturapitakkul ja Kraiwood Kiattikomol (2004). “Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-Strength Concrete”. *Journal of Materials in Civil Engineering* 16, s. 623–628.
- Schneider, M. (2011). “Sustainable cement production-present and future”. *Cement and Concrete Research* 41, s. 642–650.
- Scrivener, Karen L., Vanderley Moacyr John ja Ellis Gartner (2018). “Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry”. *Cement and Concrete Research* 114, s. 2–26.

- Siddique, Salman, Ali Naqi ja Jeong Gook Jang (2020). “Influence of water to cement ratio on CO<sub>2</sub> uptake capacity of belite-rich cement upon exposure to carbonation curing”. *Cement & Concrete Composites* 111. 103616.
- Summerbell, Daniel, Claire Barlow ja Jonathan Cullen (2016). “Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: A cement industry case study”. *Journal of Cleaner Production* 135, s. 1327–1339.
- Suomen Standardisoimisliitto (2012). “EN 197-1: SEMENTTI. OSA 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus”.
- (2013). “EN 196-2 Methods of testing cement. Part 2: Chemical analysis of cement”.
- (2020). “EN 206:2014 + A2:2021: Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus”.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry*. 2. painos. T. Telford.
- Turner, Louis ja Francis Gerard Collins (2013). “Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete”. *Construction and Building Materials* 43, s. 125–130.
- U. S. Geological Survey (2020). “Bauxite and Alumina 2020 Annual Publication”. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-bauxite-alumina.pdf> (viitattu 01.03.2023).
- Vlasopoulos, N. ja C. R. Cheeseman (2013). “Production of magnesium carbonate”. US 8496751 B2. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/27/93/22/6590e7990165a4/US8496751.pdf> (viitattu 01.03.2023).
- Younsi, Akli et al. (2011). “Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content”. *Cement & Concrete Composites* 33, s. 993–1000.
- Zhang, Zengqi, Bo Zhang ja Peiyu Yan (2016). “Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete”. *Construction and Building Materials* 105, s. 82–93.
- Zhong, Hui ja Mingzhong Zhang (2022). “3D printing geopolymers: A review”. *Cement and Concrete Composites* 128. 104455.