



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Eveliina Elg

# Betoni materiaalina kestävässä kehityksessä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

20.01.2020

Tekijä Otsikko	Eveliina Elg Betoni materiaalina kestävässä kehityksessä
Sivumäärä Aika	61 sivua 20.1.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	Materiaali- ja pinnoitetekniikka
Ohjaajat	Yliopettaja Kai Laitinen Osastopäällikkö Jenni Pellinen
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Ramboll Finland Oy:lle betonirakenteet ja asuntorakentaminen –yksikköön osana yksikön kehitystyötä. Viime aikoina mediassa on ollut paljon puhetta kestävästä kehityksestä sekä rakentamisen ja rakennusmateriaalien hiilidioksidipäästöistä. Rakennusmateriaaleista etenkin betoni ja sen sisältämä sementti ovat nousseet niin kutsutuiksi ilmastopahiksiksi. Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää perusteita kestävästä kehityksestä, betonista materiaalina sekä betonin kestävään kehitykseen liittyvistä muutoksista ja tutkimuksista. Opinnäytetyön lopussa pohdittiin rakennesuunnittelun osuutta betonin kestävään kehitykseen.</p> <p>Opinnäytetyössä hyödynnettiin olemassa olevaa tutkimustietoa sekä keskusteltiin asiantuntijoiden kanssa aiheesta. Betoni materiaalina kestävässä kehityksessä oli aiheeltaan erittäin laaja, joten työn pääpaino oli tutkimuksissa ja määräyksissä, jotka vaikuttavat Suomessa ja talonrakentamisessa. Asiantuntijoina opinnäytetyössä toimivat Finnsementin, Oulun yliopiston, ympäristöministeriön sekä Rambollin edustajat.</p> <p>Työ alkoi syventymällä kestävä kehityksen keskeisiin osa-alueisiin ja historiaan sekä betonin koostumukseen, ominaisuuksiin, valmistusprosessiin sekä historiaan. Keskustelut asiantuntijoiden kanssa sekä osallistuminen Teknologian tutkimuskeskus VTT:n järjestämään Suomen betoni hiilineutraaliksi 2035 -seminaariin olivat oleellinen osa opinnäytetyön toteutusta.</p> <p>Työn tuloksena syntyi kirjallinen selvitystyö, jossa on koottu yhteen aiheeseen liittyvät määräykset, tutkimukset ja tutkimustulokset.</p>	
Avainsanat	Betoni, kestävä kehitys, vähähiilinen rakentaminen, hiilidioksidipäästöt

Author Title	Eveliina Elg Sustainable development of concrete
Number of Pages Date	61 pages 20 January 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Bio- and Chemical Engineering
Professional Major	Materials and Surface Engineering
Instructors	Kai Laitinen, Principal Lecturer Jenni Pellinen, Department Manager
<p>This thesis project was conducted for the Concrete Structures and Residential Structural Engineering Design unit of Ramboll Finland Oy, being part of the unit's development tasks. Recently there have been several discussions in media about sustainable development and carbon dioxide emissions of construction and building materials. Especially the production of concrete and cement is known to emit carbon dioxide. The aim of this thesis project was to study the basics of sustainable development, concrete as a material, as well as changes and research of the sustainable development of concrete. The role of structural design in the sustainable development of concrete was also considered at the end of the thesis.</p> <p>The thesis project utilized existing research information, and the topic was also discussed with experts. Sustainable development of concrete is a very broad topic; therefore, the focus of this project was on research and regulations that affect Finland and building construction. Representatives of Finnsement, the University of Oulu, the Ministry of the Environment and Ramboll were used as experts.</p> <p>The thesis project started by studying the main topics and history of sustainable development, as well as the composition, properties, manufacturing process and history of concrete. Discussions with experts and participation in the Finnish Concrete to Carbon Neutral 2035 seminar organized by VTT Technical Research Center of Finland were an essential part of the implementation of this project.</p> <p>As a result of this thesis project, a written study was compiled, bringing together relevant regulations, studies and research results.</p>	
Keywords	concrete, sustainable development, low carbon construction, carbon dioxide emissions

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Mitä on kestävä kehitys?	2
3	Betonirakentamisen historia	5
3.1	Maailmalla	5
3.2	Suomessa	7
4	Betoni materiaalina	11
4.1	Sementti	11
4.1.1	Sementin valmistusprosessi	12
4.1.2	Sementin ominaisuudet	13
4.2	Kiviaines	15
4.3	Vesi	17
4.4	Seos- ja lisäaineet	17
4.5	Betonin valmistusprosessi	19
4.6	Betonin edut	19
4.7	Betonin heikkoudet	21
4.8	Käyttökohteet	21
5	Vähähiilinen rakentaminen	22
6	Betonin hiilidioksidipäästöt ja hiilijalanjälki	26
7	Sementinvalmistajan vastaus hiilidioksihaasteeseen	28
8	Hiilineutraalimmat vaihtoehdot perinteiselle betonille	30
8.1	Sementin seostaminen	30
8.2	Vihreä betoni	31
8.3	Geopolymeeribetoni	31
8.4	Hiilidioksidikövetetty betoni	35
8.5	Päästökompensoitu hiilineutraali betoni	37
8.6	Puurakentaminen	38



9	Betonin kiertotalous	41
9.1	Betonimurskeen käyttö uusiobetonin valmistuksessa	43
9.2	Betonielementtien uusio- ja uudelleenkäyttö	43
10	Kestävän kehityksen vaikutus rakennesuunnitteluun	49
11	Yhteenveto	52
	Lähteet	55

## 1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö tehdään Ramboll Finland Oy:n tilauksesta betonirakenteet ja asuntorakentaminen -yksikölle osana yksikön kehitystyötä. Mediassa puhutaan paljon kestävästä kehityksestä sekä rakentamisen ja erityisesti rakennusmateriaalien vaikutuksesta kestäväan kehitykseen. Tässä opinnäytetyössä keskitytään betonin kestäväan kehitykseen, sillä betoni on tunnettu suurista hiilidioksidipäästöistä. Kestävä kehitys on noussut viime aikoina erittäin ajankohtaiseksi aiheeksi.

Työn tavoitteena on selvittää perusteita kestävästä kehityksestä, betonista materiaalina sekä betonin kestäväan kehitykseen liittyvistä muutoksista ja tutkimuksista. Työ toteutetaan kirjallisena selvitystyönä ja siinä hyödynnetään jo olemassa olevaa tutkimustietoa. Työssä hyödynnetään myös eri yritysten asiantuntijoiden apua.

Kestävä kehitys on aiheeltaan erittäin laaja, joten työn pääpaino on tutkimuksissa ja määräyksissä, jotka vaikuttavat Suomessa ja talonrakentamisessa. Työssä keskitytään lisäksi keinoihin, joilla voidaan vähentää betonin hiilidioksidipäästöjä. Suomessa raaka-aineiden lähtökohdat ja eettisyys ovat pitkälti kunnossa, joten niihin ei tässä opinnäytetyössä keskitytä.

## 2 Mitä on kestävä kehitys?

Kestävä kehitys on yhteiskunnallista muutosta, joka tapahtuu maailmanlaajuisesti, alueellisesti ja paikallisesti. Päämääränä on turvata nykyisille sekä tuleville sukupolville hyvät olosuhteet elämiseen.

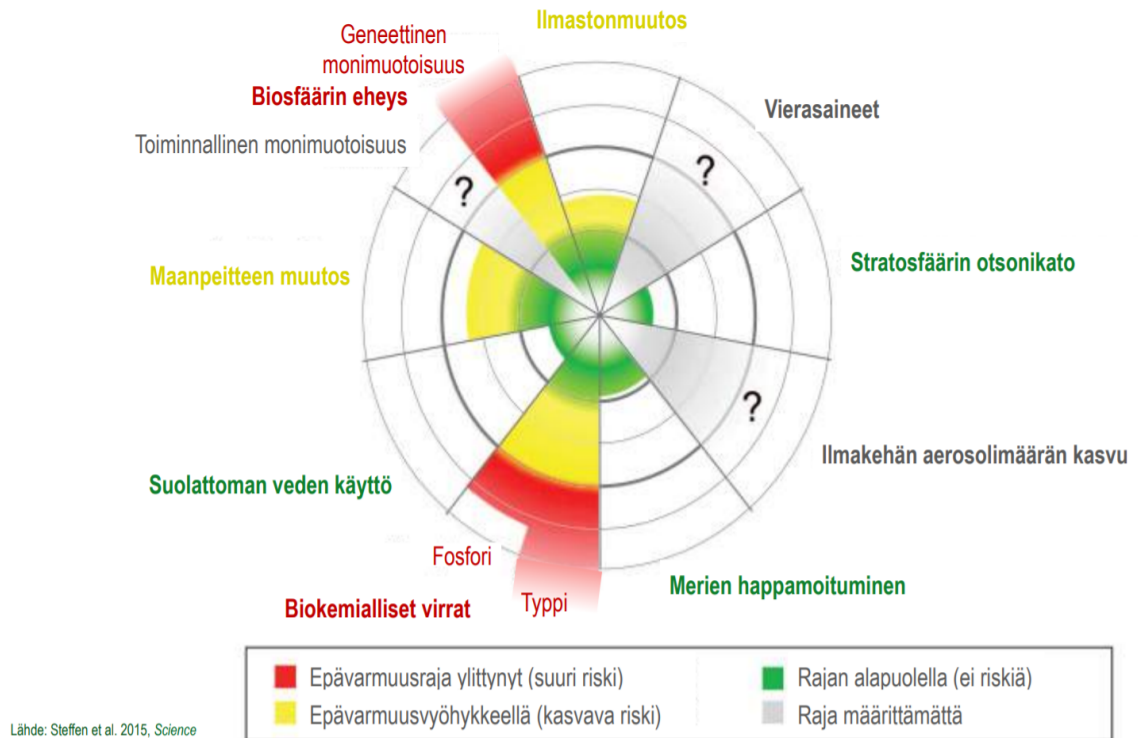
YK:n Brundtlandin komissiossa 1987 käsiteltiin ensimmäisen kerran kestävästä kehityksestä. Komission raportissa määriteltiin, ettei kestävä kehitys ole vain ympäristöllinen asia. Kestävän kehityksen tavoitteena on taata tuleville sukupolville oikeus omaan kehitykseen. Kuitenkin termi ”kestävä kehitys” saatettiin yleisön tietoisuuteen vasta vuonna 1992 Rio de Janeiron suuressa ympäristö- ja kehityskokouksessa. Silloin laadittiin myös Agenda 21 toimintasuunnitelma maapallon suojelemiseksi. Vuonna 2002 Johannesburgissa oli ensimmäinen Rion seurantakokous, josta lähti ajatus, että kestävä kehitys edistämiseen on osallistuttava myös muut toimijat valtioiden lisäksi. [1; 2.]

Nykyiset kestävä kehityksen tavoitteet on laadittu YK:n kestävä kehityksen toimintasuunnitelmassa New Yorkissa vuonna 2015. Tämä toimintasuunnitelma kantaa nimeä Agenda 2030 ja siinä tähdätään kestävään kehitykseen. Siinä huomioidaan ympäristö, talous ja tasa-arvo sekä äärimmäisen köyhyyden poistaminen. Vuonna 2015 luotiin myös kestävä kehityksen tavoitteista ikoniseinämä, joka on esitetty kuvassa 1. [1.]



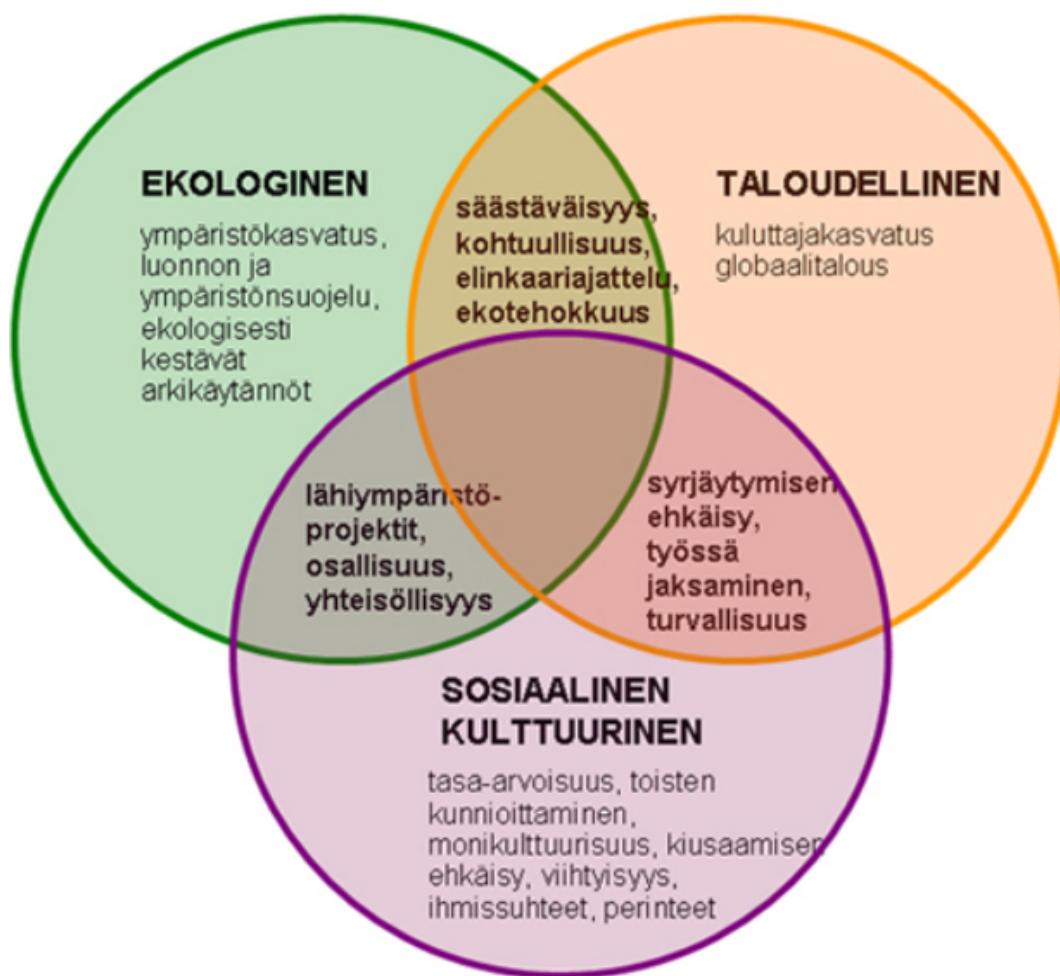
Kuva 1. Kestävän kehityksen ikoniseinämä. [3.]

Kestävään kehitykseen liittyy olennaisesti ajatus planeetan rajoista, jotka määriteltiin vuonna 2015. Planeettamme raaka-aineet eivät ole ehtymättömiä, joten ihmisten toiminta on sopeutettava maapallon luonnonvaroihin ja luonnon kestokykyyn. Planeetan rajat on esitetty tarkemmin kuvassa 2. [4.]



Kuva 2. Planeetan rajat [5.]

Kestävä kehitys voidaan jakaa neljään osa-alueeseen ekologiseen kestävyYTEEN, taloudelliseen kestävyYTEEN sekä sosiaaliseen- ja kulttuuriseen kestävyYTEEN. Kestävän kehityksen edistämiseen vaikuttaa olennaisesti kaikki neljä osa-alueetta. Kestävän kehityksen osa-alueet ja niiden sisältö on esitetty kuvassa 3. [6.]



Kuva 3. Kestävän kehityksen ulottuvuudet. [7.]

Lähtökohtana ekologiselle kestäväälle kehitykselle on ekosysteemin toimivuuden ja luonnon monimuotoisuuden säilyttäminen ja suojeleminen sekä ihmisen taloudellisen ja aineellisen toiminnan sopeuttaminen pitkällä aikavälillä luonnon kestävyys. Pitkän aikavälin kestävyys otetaan huomioon myös tuotantoon, tuotteisiin, resursseihin sekä ilmasto- ja ympäristövaikutuksiin liittyvissä asioissa. Keskeistä ekologiselle kestäväälle kehitykselle on myös varovaisuusperiaatteen noudattaminen. Ympäristöoikeuden periaatteisiin kuuluva varovaisuusperiaate eli ennalta varautumisen periaate. Varovaisuusperiaatteen mukaan tieteellisen näytön puuttumisella ei voida lykätä toimia, jotka estävät ympäristön tilan heikkenemistä. [6; 8.]

Taloudellinen kestävä kehitys tavoittelee kestäväää taloutta ja tasapainoista kasvua, joka ei perustu velkaantumiseen tai varantojen hävittämiseen pitkällä aikavälillä. Kun talous

on kestäväällä pohjalla, se helpottaa myös tulevia haasteita esimerkiksi väestön ikääntymisestä aiheutuvia sosiaaliturva- ja terveystenonja. [6.]

Sosiaalisessa ja kulttuurisessa kestävydessä tavoitteena on taata hyvinvoinnin edellytysten siirtyminen seuraaville sukupolville. Maailmanlaajuisia haasteita sosiaaliseen ja kulttuuriseen sekä taloudelliseen kestävään kehitykseen tuo köyhyys, ruoka- ja terveydenhuolto, sukupuolten välinen tasa-arvo, koulutus sekä väestön jatkuva kasvu. [6.]

### **3 Betonirakentamisen historia**

#### **3.1 Maailmalla**

Betonin historia ulottuu aina muinaiseen Egyptiin saakka. Uskotaan, että noin 4500 vuotta sitten rakennetut pyramidit valettiin betonin kaltaisesta kalkkikiveä, vettä ja tuhkaa sisältävästä materiaalista. Tuhka reagoi kalkkikiven kanssa muodostaen geopolymeerin, jota on vaikea erottaa luonnon kalkkikivestä. Laastina käytettiin kalkin ja kipsin seosta. [9.]

Noin 2000 vuotta sitten antiikin Roomassa valmistettiin sen aikaista betonia, jossa sitä hyödynnettiin muun muassa muurirakenteissa. Roomalaisen ajan betonissa käytettiin sideaineena runsaasti piitä sisältävää tulivuorituhkaa eli ns. pozzolaania sekä kalkkia. Roomassa sijaitseva Pantheonin (kuva 4) temppeli on tunnetuin varhainen betonirakenne, joka on valmistunut vuonna 127. Betonitekniikan osaaminen hiipui Rooman valtakunnan rapistuessa ja lopulta hävisi vuonna 476. [10, s.18; 11.]



Kuva 4. Pantheonin temppli Roomassa on parhaiten säilynyt antiikin aikainen monumentti. [11.]

Tuhat vuotta Rooman kukoistuksen jälkeen nykyisen kaltainen betonitekniikka heräsi eloon. Englantilainen Joseph Aspdin kuumensi keittiössään hienoksi jauhettua kalkkikiveä ja savea, minkä jälkeen hän jauhoi seoksen ja huomasi sen kovettuvan reagoidessaan veden kanssa. Tämä vuonna 1824 tehty keksintö patentoitiin ja tuote nimettiin portlandsementiksi. Se loi pohjan nykyiselle sementtiteollisuudelle. Vuonna 1844 Isaac Johnson kehitti nykyisen kaltaisen portlandsementin polttamalla Aspdinin sementtiä vahingossa liian korkeassa lämpötilassa. Tästä katsotaan alkavan nykyaikaisen portlandsementin historia. [10, s.19.]

Raudoituksia alettiin kokeilla betonissa 1800-luvun puolivälissä. Raudoitusten käyttö avasi mahdollisuudet suunnitella avaria tiloja sekä rakentaa siltoja. Ranskalainen

Francois Hennebique kehitti vuonna 1892 teräsbetonirakenteiden laskentamenetelmän, joka vauhditti teräsbetonirakenteiden kehitystä. Pariisissa maailmannäyttelyssä vuonna 1900 betonin käyttö runkomateriaalina tuli maailmanlaajuisesti tietoisuuteen. Jännitetyt betonirakenteet keksivät saksalainen Dischinger ja ranskalainen Freyssinet 1930-luvulla. Toinen maailmansota lisäsi elementtitekniikan kysyntää, jota oli tutkittu jo ennen toista maailmansotaa. Elementtirakentaminen oli ratkaisu sodan aiheuttamien tuhojen korjaamiseksi mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti. [10 s.19; 12.]

1970-luvulla esiteltiin kuituvahvisteinen betoni ja kiillotettu betoni esiteltiin vuonna 1999. Ympäristöluokitusjärjestelmä LEED lanseerattiin vuonna 2000, tarkoituksena vähentää rakentamisen- ja käytön aikaista ympäristökuormitusta. LEED vaikuttaa myös rakennusmateriaaleihin koko elinkaaren ajalta ja ohjaa niitä ympäristöystävällisempään suuntaan. Betonitekniikan kehitys jatkuu edelleen. [13; 14.]

### 3.2 Suomessa

Suomen suuruutinaskuntaan saapui ensimmäinen tuontisementtiterä vuonna 1856. Kotimaista sementtiä alettiin valmistamaan Saviolla vuonna 1869, mutta sen valmistus lopetettiin vähäisen menekin ja ulkomaalaisen kilpailun takia noin 40 vuotta myöhemmin vuonna 1894. Paraisten Kalkkivuori Oy palautti sementin valmistuksen Suomeen vuonna 1914. Viisi vuotta myöhemmin vuonna 1919 Lohjan Kalkkitehdas Oy aloitti sementin valmistuksen. Tämä mahdollisti laajamittaisen suomalaisen betonirakentamisen. Vuonna 1889 valmistui Suomen ensimmäinen merkittävä betonirakenteinen kohde, Kiviniemen silta. Siinä maatuon rakenteisiin käytettiin betonia. Lähes kaikissa vuosisadan vaihteissa rakennetuissa kivitaloissa on edelleen käytössä taidokkaasti betonista valetut portaikot. [10, s.19.]

Kun betonin käyttö runkomateriaalina tuli maailmanlaajuisesti tietoisuuteen vuonna 1900, alkoi Helsinkiin nousta nopeasti uutta betoniarkkitehtuuria ja betonitekniikkaa edustavia julkisia rakennuksia. Näistä kuuluisimpia ovat muun muassa vuonna 1919 rakennettu Helsingin rautatieasema, vuonna 1928 Helsingin taidehalli, vuonna 1930 Stockmannin tavaratalo sekä vuonna 1931 eduskuntatalo. Suomen betoniyhdistys ry perustettiin vuonna 1925. Sen tarkoitus oli tuoda melko uusi betoni materiaalina tunnetuksi ja sen käytön yleistäminen. Betonitekniikkaa hyödynnettiin kaikilla rakentamisen osa-



alueilla, kun vuosisadan teollistuminen ja kaupungistuminen vuosina 1920–1950 edellyttivät rakentamista. [10, s.19–21.]

Toinen maailmansota aiheutti myös Suomeen suuria rakennustarpeita sekä jälleenrakennustarpeen. Toisen maailmansodan aikana rakennettu Salpalinja rakennettiin turvaamaan itärajaa. Siitä tuli Suomen kaikkien aikojen suurin rakennushanke, sillä yhteen betonirakenteeseen korsiun meni 250 tonnia sementtiä ja 45 tonnia betoniterästä. Kor-suista piti tehdä vahvoja sekä kestäviä, ja se asetti suuret vaatimukset muun muassa betonin lujuudelle. Tämä pakotti kehittämään uusia valutekniikoita ja laadunvalvontaa, esimerkiksi talvibetonointi kehittyi sodan aikana. Tutkimukset ovat osoittaneet, että korsiin käytetty betoni on erittäin lujaa ja siihen on käytetty nykyrakentamiseen verrattuna kaksinkertainen määrä sementtiä, mutta lisäaineita ei ole käytetty samalla tavalla kuin nykypäivänä. Kuvassa 5 on kuvattu Miehikkälän korsiin betonin koostumusta. Betoniin on käytetty karkearakeisempaa sementtiä, sillä se on suunniteltu kestävämmän sota-oloissa. [15; 16.]



Kuva 5. Salpalinjalla Miehikkälässä sijaitsevan korsiin betonia. [16.]

Betoniteollisuus kehittyi 1940- ja 1950-lukujen vaihteessa elementtitekniikan avulla jälleenrakennustarpeen vauhdittamana. Viljo Revellin suunnittelemaan vuonna 1952 valmistuneeseen Palace-taloon tehtiin ensimmäiset tehdasvalmisteiset julkisivuelementit. Kuvassa 6 on kuvattu Palace-talo, johon tuli yhteensä noin 6000 neliometriä hiotusta valkobetonia valmistettuja elementtejä. Vuonna 1957 valmistunut Helsingin Yliopiston Porthania oli ensimmäinen täysin tehdasvalmisteisista betonielementeistä rakennettu rakennus. [12; 18.]



Kuva 6. Eteläranta 10:ssä sijaitseva Palace-talo toimii nykyään teollisuuskeskuksen toimistorakennuksena. [12.]

1960- ja 1970-luvuilla alkoi muuttovirta maalta kaupunkiin ja tarvittiin nopeasti edullisia, mutta varustetasoltaan hyviä asuntoja. Tarpeeseen vastattiin rakentamalla kaupunkeihin lähiöitä. Silloin valmistettiin myös ensimmäiset sandwich-julkisivuelementit. Betonielementtien rakennetyypit ja liitosdetaljit standardoitiin BES-järjestelmässä, joka kehitettiin asuntorakentamista varten vuosina 1968–1970. BES-järjestelmä antaa urakoitsijoille



mahdollisuuden hankkia valmisosia useilta toimittajilta samaan rakennukseen sekä muuntelumahdollisuuden pohjaratkaisuihin. [12.]

1970-luvulla taloista tuli laatikkomaisia, koska rakentamisella oli kiire, eikä visuaaliseen puoleen ehditty kiinnittää huomiota. Rakennuksista ei myöskään tullut pitkäkestoisia, sillä tiedot monista betonin kestävyteen vaikuttavista tekijöistä perustuivat hyvin lyhyeen kokemukseen. Betonilähiöiden rakennuksia ei suunniteltu kestäväksi kuin 30–40 vuotta. Kuvassa 7 on vuonna 1970 Espoon Suvelaan rakennetut asuinkerrostalot, jotka ovat tulleet elinkaarensa päähän, ja ne puretaan uusien asuinkerrostalojen tieltä. [10, s.21; 19.]



Kuva 7. 1970-luvun betonilähiön purkutyöt Espoon Suvelassa ovat täydessä vauhdissa kesällä 2019. [19.]

Rakennusten laatikkomaisuus jatkui 1980-luvun alkuun asti. 1980-luvulla elementtiteknikka jatkoi kehittymistään ja rakennukset suunniteltiin aiempaa kestävimiksi. Vuosikymmenelle tyypillinen laatikkomainen betonirakentaminen näkyy hyvin esimerkiksi Länsi-Pasilan, Kivenlahden, Matinkylän sekä Leppävaaran asuinalueissa. [10, s.21; 17.]

1990-luvulla kehitystyö jatkui ja alettiin kiinnittämään huomiota rakennusten arkkitehtuuriin, rakennusten ominaisuuksiin, elinkaarikustannuksiin sekä ympäristövaikutuksiin. Säänkestävän betonin valmistuksessa oli haasteita vielä 1980-luvulla, mutta ne saatiin hallintaan 1990-luvulla etukäteisselvitysten ja rakennenäytteiden avulla. Nykyään betonteollisuus kilpailee uusilla ominaisuuksilla, kuten äänieristys, kosteustekniikka, taloudellisuus ja ulkonäkö. Betonin kehitystyö Suomessa jatkuu tänäkin päivänä, ja tärkeänä kehityksen kohteena tällä hetkellä on betonin ympäristöystävällisyys. [10, s.21.]

## 4 Betoni materiaalina

Betoni on maailman yleisin rakennusmateriaali, jota valmistetaan vuosittain noin 13 miljardia kuutiota. Betonin pääraaka-aineita ovat sementti, vesi ja kiviaines, jotka kaikki ovat saatavilla maaperästä. Kiviaines koostuu erikokoisista kivirakeista, jotka ovat usein myös kierrätyskiviainesta. Pääraaka-aineiden lisäksi käytetään erilaisia side- ja lisäaineita. Osa-aineiden suhteita muuttamalla voidaan muuttaa betonin ominaisuuksia, eli puhutaan betonin suhteituksesta. [10, s.13.]

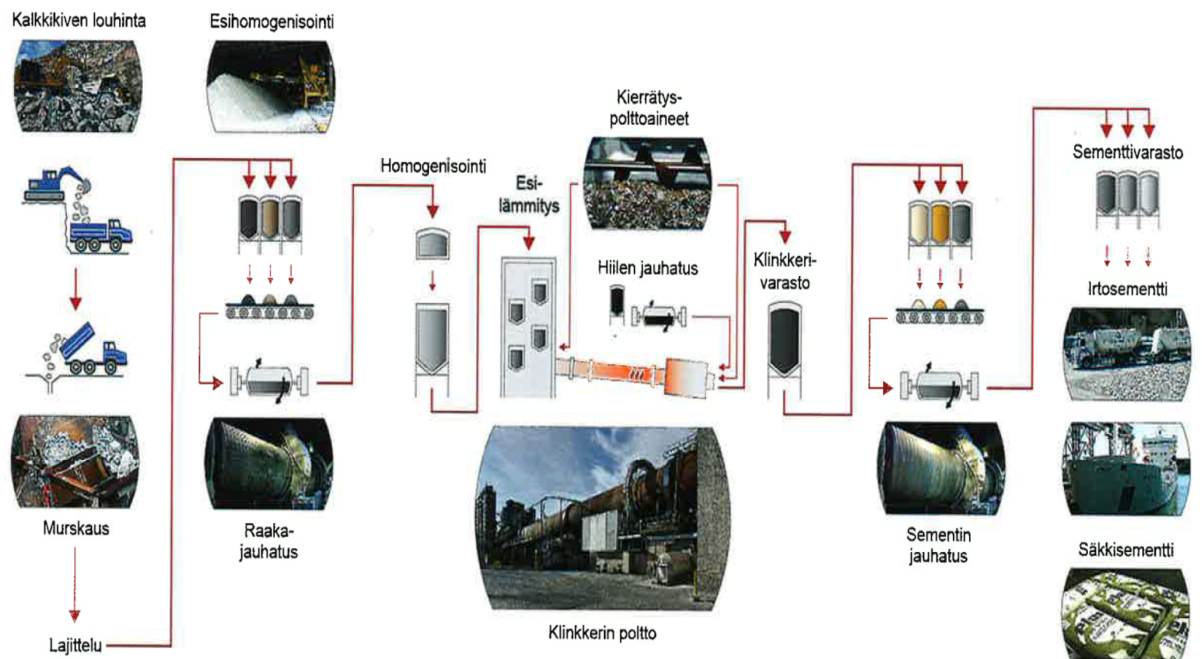
### 4.1 Sementti

Sementti on epäorgaaninen materiaali, joka reagoi veden kanssa sementtikiveksi. Tätä kemiallista reaktiota kutsutaan hydrataatioreaktioksi. Se tarkoittaa veden ja sementin välistä kemiallista reaktiota, jossa sementtikivi muodostuu ja sitoo yhteen betonin muut ainesosat. Sementtikiveä voidaan kutsua myös sementtiliimaksi tai sementtipastaksi. Sementin tärkein osa-aine on portlandklinkkeri. Kalkkikivi on portlandklinkkerin pääraaka-aine, joka on suurimmaksi osaksi kalsiumkarbonaattia  $\text{CaCO}_3$ . [10, s.24.]

Portlandklinkkerin valmistukseen tarvitaan kalkkilouhoksista ja muun teollisuuden sivutuotteista saatavaa piioksidia  $\text{SiO}_2$ , rautaoksidia  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ja alumiinioksidia  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Sementtikemiassa näistä käytetään lyhenteitä piioksidi S, rautaoksidi F sekä alumiinioksidi A. [10, s.24.]

#### 4.1.1 Sementin valmistusprosessi

Valmistusprosessi koostuu raakajauhatauksesta, esilämmityksestä, sementtiklinkkerin valmistuksesta kiertoilmauunissa sekä sementin jauhatuksesta. Valmistusprosessissa sementin raaka-aineista muodostuu korkeassa lämpötilassa klinkkeriä. Klinkkeri ja kipsi yhdessä seosaineiden kanssa muodostavat sementtiä. Rakennussementeissä käytetään seosaineina muun muassa kalkkikiveä ja masuunikuonaa. Valmistusprosessi on esitetty tarkemmin kuvassa 8. [10, s. 25.]



Kuva 8. Sementin valmistusprosessi. [10, s.27.]

Murskattu ja lajiteltu kalkkikivi siirretään raaka-ainesiloihin. Kaikki raaka-aineet jauhaetaan hienoksi raaka-ainemyllyssä. Syöttösuhteet määritellään kemiallisen koostumuksen perusteella ja niitä säätämällä voidaan vaikuttaa sementin ominaisuuksiin. Sementtiklinkkerin oikean koostumuksen takaa tarkka kemiallinen resepti. Klinkkerin sisältämät mineraalit sekä tyypillinen kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 1. [10, s. 25.]

Taulukko 1. Kolmen erilaisen klinkkerin tyypillinen kemiallinen koostumus [10, s.26.]

	Normaali klinkkeri %	SR-klonkkeri %	Valkoklinkkeri %
CaO	64	64	69
SiO <sub>2</sub>	21	22	25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,1	2,9	1,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8	4,4	0,3
MgO	3,5	2,5	0,6
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O *	1,6	1	0,2
Mineraloginen koostumus			
C <sub>3</sub> S	58	65	65
C <sub>2</sub> S	16	14	21
C <sub>2</sub> A	9	1	5
C <sub>4</sub> AF	8	13	1

\* + pieni määrä muita

Esilämmitysvaiheessa jauhe sekoittuu poltosta tuleviin savukaasuihin ja kuumenee. Reaktiota kutsutaan esikalsinoinniksi. Reaktiossa kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi,  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ . [10, s.25.]

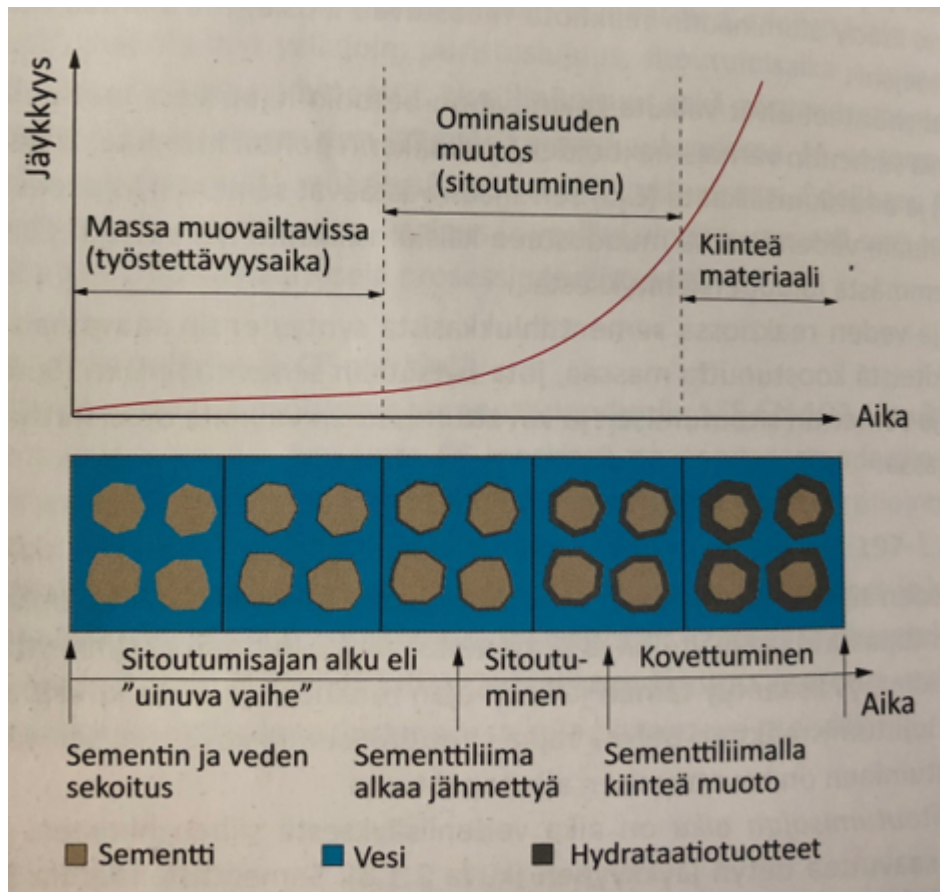
Sementtiklinkkeriä poltetaan hitaasti aina 1450 °C:seen lämpenevässä kiertoilmauksessa, jossa jauhe sulaa osittain ja klinkkerimineraalit muodostuvat. Lopussa klinkkeri jäädytetään nopeasti 275 °C:seen. Poltossa kalkkikiveen ajansaatossa sitoutunut hiilidioksidi vapautuu. Tämä reaktio sekä lämmittämiseen tarvittava energia aiheuttaa noin 70 % sementin valmistuksesta aiheutuvasta ilmastokuormasta. [10, s. 25; 20, s.18]

#### 4.1.2 Sementin ominaisuudet

Sementillä on useita ominaisuuksia, joista tärkeimpänä on kyky reagoida veden kanssa. Veden ja sementin reaktiossa ensimmäiseksi reagoivat klinkkerimineraalien aluminaattiyhdisteet, C<sub>3</sub>A ja C<sub>4</sub>AF. Kipsi hidastaa aluminaatin reaktion alkamista, jotta massaa ehditään työstämään. Sementin lujuudesta vastaavat trikalsiumsilikaatti, C<sub>3</sub>S ja dikalsiumsilikaatti C<sub>2</sub>S. Dikalsiumsilikaatti vastaa myöhemmästä lujuudenkehityksestä ja C<sub>3</sub>S reagoi nopeammin muodostaen yhdessä veden kanssa kalsiumsilikaattihydraatteja, CSH. Muodostuva CSH-geeli eli ettringiitti, Ca(OH)<sub>2</sub> on sementtirakeiden pintaan muodostuvaa hydrataatituetta. [10, s.35.]



Sementin yhtenä ominaisuutena on sitoutuminen, joka riippuu sementin kemiallisesta koostumuksesta sekä lämpötilasta. Sitoutuminen tarkoittaa sementin kovettumista edeltävää reaktiota, jolloin veden ja sementin notkea seos alkaa hyytelöityä sekä menettää plastisuuttaan. Sitoutumisen jälkeen alkaa kovettumisreaktio eli varsinaiset lujittumisreaktiot eli lujuudenkehitys. Sementin sitoutuminen ja siitä seuraava kovettuminen tapahtuu ajan funktiona, joka on kuvattu kuvassa 9. [10, s. 35–36.]



Kuva 9. Sementtiliiman sitoutuminen ja kovettuminen ajan funktiona. [10, s.36.]

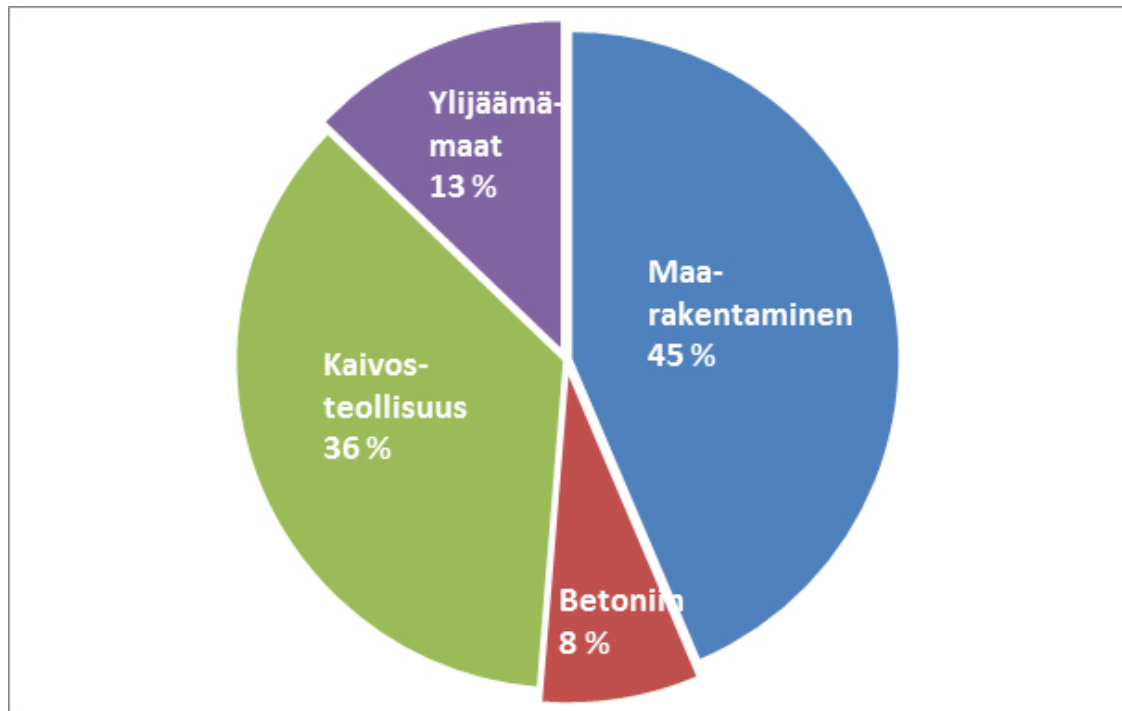
Sitoutumisen päätyttyä alkavassa kovettumisreaktiossa tapahtuvat sementin lujittumisreaktiot riippuvat vesi-sementtisuhteesta ( $v/s$ ). Lujittumisreaktiot vastaavat lujuudenkehityksestä. Lujittumisreaktiot jatkuvat niin kauan kuin, hydratoitumiseen osallistumiskykyistä vettä on käytettävissä. Kovettuneessa sementissä vesi on sitoutunut kemiallisesti tai fysikaalisesti. Hydratoituessaan sementti sitoo itseensä kemiallisesti vettä noin 25 % sementinpainosta. Saatavilla olevasta vesimäärästä riippuu sementtiliiman hydraatioaste ( $\alpha$ ). Täydellisen hydraation edellyttämä vesimäärä on 40–45 % sementinpainosta, sillä vettä sitoutuu myös fysikaalisesti geelihuokosiin noin 20 % sementinpainosta. Muita

sementin ominaisuuksia ovat hienous/vedentarve, kiinto- ja irtotiheys, lämmönkehitys, tilavuuden pysyvyys, kemiallinen kestävyys, väri, lämpötila ja säilyvyys. [10, s. 37.]

#### 4.2 Kiviaines

Rakentamisessa käytettävää rakeista materiaalia, kuten soraa, hiekkaa tai kalliomurskettä, kutsutaan yleisesti kiviainekseksi. Kiviaines on uusiutumaton luonnonvara. Kiviainesten ominaisuuksilla on suoravaikutus betonin ominaisuuksiin, sillä sen tilavuus betonissa on 65-80%. Betonissa voidaan käyttää luonnon kiviaineksia, jotka voivat olla kevyitä vulkaanisia tai raskaita malmipitoisia kiviaineksia. Vaihtoehtona luonnon kiviaineksille voidaan käyttää keinotekoisia materiaaleja, kuten kevytsoraa tai kierrätettyjä materiaaleja mm. ferrokromikuonaa, masuunikuonaa, lentotuhkaa sekä tiili- ja betonimurskettä. Suomessa kalliokiviaineksen käyttö on lisääntynyt, koska sora-alueiden ottoehdot ovat kiristyneet ja rakennettavien alueiden läheisyydessä olevat soravarannot ovat ehtyneet. Myös louhinta- ja murskaustekniikoiden kehitys sekä tutkimukset ovat vaikuttaneet kalliokiviaineksen käytön lisääntymiseen. Suomessa käytetään kiviainesta myös muuhunkin, kuin betonin valmistukseen. Betonin valmistuksen osuus on vain 8 % kokonaismäärästä. Kuvassa 10 on esitetty kiviaineksen käytön jakautuminen. [10, s.43; 21.]





Kuva 10. Kiviaineksen käytön jakautuminen Suomessa. [21.]

Standardissa SFS-EN 12620 Betonin kiviainekset on määritelty, että betonin valmistukseen tulee käyttää CE-merkittyä kiviainesta. Kiviaineksen soveltuvuus betonin valmistamiseen on tutkittava, sillä se ei saa vaikuttaa haitallisesti betonimassaan, kovettuneen betonin ominaisuuksiin tai raudoitukseen. Vaaditut geometriset, fysikaaliset ja kemialliset sekä mekaaniset ominaisuudet tulee täyttyä. [10, s.45.]

Standardin SFS-EN 933-1 mukaan määritellään seulomalla kiviaineksen rakeisuus eli erisuuruisten rakeiden määrien painosuhte. Seulasarjan avulla kiviaines jaetaan raekokoluokkiin. Raekoon jaottelu on esitetty taulukossa 2. [10, s.45.]

Taulukko 2. Kiviainestuotteiden jaottelu [10, s.45.]

Kiviainestuotteiden jaottelu	Raekoot [mm]
Fillerikiviaines	<0,063
Hieno kiviaines	0/1, 0/2 tai 0/4
Luonnon lajittama 0/8	0/8
Koostekiviaines*	0/5, 0/6 tai 0/8
Karkea kiviaines	d/D (d < D, d ≥ 2, D ≥ 4)

\*sora- tai kalliomurske

### 4.3 Vesi

Betonin valmistukseen voidaan yleensä käyttää vettä, joka näyttää puhtaalta eikä haise tai maistu pahalta. Vetenä voidaan käyttää vesijohtovettä, juomakelpoista luonnonvettä sekä kierrätysvettä, joka on betoniteollisuuden prosesseissa talteen otettua vettä. Kierrätysveden soveltuvuus tulee tarkistaa ennen käyttöä. Luonnon pintavedet ja muun teollisuuden vedet pitää tutkia tarkasti ennen käyttöä betonin valmistukseen. Käytettävä vesi ei saa sisältää öljyä, rasvaa, levää tai muita pieneläimiä, eikä se saa vaahdota. Veden kloridipitoisuudelle (Cl<sup>-</sup>) on annettu raja-arvo, joka riippuu betonin käyttökohteesta. Veden kemiallisella analyysillä tai ennalta tehdyllä sitoutumiskokeella voidaan arvioida veden sopivuus betonin valmistukseen standardin SFS-EN 1008 ohjeen mukaisesti. [10, s. 59]

### 4.1 Seos- ja lisäaineet

Betoniin lisätään seos- ja lisäaineita, jotta sen ominaisuuksia voidaan säädellä. Lisä- ja seosaineiden avulla voidaan lisätä työstettävyyttä, tiiviyyttä, parempaa lujuutta sekä säilyvyysominaisuuksia. [22.]

#### Lentotuhka

Lentotuhkaa saadaan teollisuuden sivutuotteena. Kivihillen poltosta voimalaitoksissa syntyy savukaasuja, joista erotellaan pozzolaani eli lentotuhka. Pozzolaanit ovat aineita, jotka reagoivat veden ja kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen sementtikiven kaltaisia yhdisteitä. Lentotuhkaa voidaan käyttää betonissa kiviaineksena sekä sideaineena. Lentotuhkaa käytettäessä voidaan vähentää hienon kiviaineksen eli fillerin määrää, sillä lentotuhka parantaa betonin työstettävyyttä sekä koossapysyvyyttä. Kalsiumsilikaattihydraattigeeliä muodostuu, kun lentotuhka reagoi sementin hydrataatiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa. Lentotuhka parantaa betonin myöhäisiän lujuutta, mutta samalla varhaislujuudenkehitys hidastuu. By65 betoninormien 2016 mukaan lentotuhkan aktiivisuus on 0,40 useissa rasisluokissa. Kun lentotuhkan suhde sementtiin on  $\leq 0,33$ , voidaan 40 % lisätystä lentotuhkasta laskea sementiksi ja 60 % hienoksi kiviainekseksi. Betoninormien mukaan suurin sallittu lentotuhkalisäys on yleisesti 45 % portlandsementin määrästä ja 30 % rakenteisiin, jotka ovat alltiita pakkas- ja kloridirasitukselle. Betonin

värisävy tummenee hieman, kun lentotuhkaa käytetään sen osa-aineena. Tummuus riippuu lentotuhkan hiilipitoisuudesta sekä määrästä. [10, s.56.]

#### Masuunikuona

Masuunikuonaa saadaan teollisuudesta raudan valmistuksen sivutuotteena masuuniuunissa syntyneestä silikaattisulatteesta nopeasti jäähdyttämällä. Masuunikuonajauheella on piilevät hydrauliset ominaisuudet, jotka heräävät hydrataatiossa syntyvän kalsiumhydroksidin vaikutuksesta, jolloin kuona kehittää lujuutta. Masuunikuonajauhe on hienoksi jauhettua granuloitua masuunikuonaa, jonka reaktiivisuus riippuu sen raekoosta ja lasimaisuusasteesta. By65 betoninormien 2016 mukaan masuunikuonajauheen aktiivisuus verrattuna sementtiin on 0,80 tai 1,00 riippuen rasisitusluokasta. [10, s.57.]

Masuunikuonan käyttö sementissä vaalentaa jonkin verran betonin sävyä sekä vähentää veden tarvetta eli notkistaa betonia. Se lisää jonkin verran betonin virumaa ja karbonatisoitumisnopeutta sekä heikentää betonin pakkas-suolakestävyyttä. Sen käyttö lisää myös sulfaatinkestävyyttä. Kun kuonajauheen osuus sideaineesta on yli 70 %, sideaineyhdistelmä lasketaan sulfaatinkestäväksi. Lentotuhkan tavoin myös masuunikuona kasvattaa myöhäisiä lujuuksia ja alentaa varhaislujuuksia. [10, s.57.]

#### Silika

Silika on puhdasta piioksidia eli pozzolaania, joka syntyy teollisuuden sivutuotteena. Sitä erotetaan ferropiin ja alkuaine piin valmistuksessa syntyvistä savukaasuista. Lentotuhkan tavoin se reagoi hydrataatiossa kalsiumhydroksidin kanssa. By65 betoninormien 2016 mukaan silikan aktiivisuus verrattuna sementtiin on 2,0, poikkeuksena rasisitusluokat XC2-XC4, joissa aktiivisuus on 1,0 vesi-sementtisuhteen ollessa >0,45.

Silikaa käytetään betonissa lisäämään lujuutta, parantamaan betonin kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiviyttä ja veden pitävyyttä. Silikan kanssa on käytettävä veden tarvetta vähentäviä lisäaineita, sillä silika lisää betonin vedentarvetta. [10, s. 57-58.]

#### Lisäaineet

Betonin suhteituksen lisäksi betonin ominaisuuksia voidaan säädellä myös erilaisilla lisäaineilla. Lisäaineilla pyritään parantamaan, niin betonin teknisiä ominaisuuksia sekä taloudellista kilpailukykyä. Lisäaineet vaikuttavat kemiallisesti tai fysikaalisesti ja niillä on yleensä myös sivuvaikutuksia, jotka tulee ottaa huomioon. Lisäaineiden toimivuus riippuu sementtilaadusta ja -määrästä, runkoaineen rakeisuudesta, lisäaineenlajista ja

-määrästä, muista lisäaineista, annostusjärjestyksestä, lämpötilasta sekä betonin sekoittimen tehosta. Lisäaineet on luokiteltu standardissa SFS-EN 934-2. Lisäaineita ovat muun muassa notkistin, huokostin, kiihdytin ja hidastin. Valmistajan suosittelemaa annostusmäärää tulee noudattaa, eikä se saa ylittää 50g lisäainetta / kg sementtiä tai lisäaineiden kokonaismäärää. Verrattuna muihin betonin osa-aineisiin, lisäaineen määrä on hyvin pieni. Betoniin lisäaineet annostellaan vesiliuoksena, jossa suurin osa on vettä ja vain pieni osa lisäainetta. [10, s.60; 23.]

#### 4.2 Betonin valmistusprosessi

Betonin valmistus on prosessi, jossa pääraaka-aineet sementti, vesi ja kiviaines sekoitetaan reseptinmukaisesti betoniasemalla myllyssä kuljetettavaksi työmaalle tai elementtitehtaassa tai betonituotekoneessa heti käytettäväksi. Betoni valetaan muottiin ja tiivistetään täryttimellä. Tiivistämisen jälkeen betonipinta hierretään halutun betonipinnan luokan mukaisesti. Betonipinnan liiallinen kuivuminen estetään jälkihoidolla esimerkiksi muovikalvolla ja kastelemalla pintaa ensimmäisten päivien aikana, jotta kovettuminen pääsee tapahtumaan. Muotit voidaan purkaa, kun muotipurkulujuus on saavutettu, minkä jälkeen betoni jatkaa kuivumistaan. Betonin valmistuksessa täytyy ottaa huomioon ympäristön olosuhteet, valettava rakennusosa sekä haluttu lopputulos. Valmisbetonin onnistumisen edellytyksenä on huolellisesti laadittu valusuunnitelma. Valmisosat eli elementit ovat tehtaassa valmiiksi valettuja ja kovettuneita tuotteita, jotka asennetaan paikoilleen työmaalla. Tehtaissa betonin valmistus on lähes täysin automatisoitu. [24; 25.]

#### 4.3 Betonin edut

Betonin etuina on kestävyys ja suuri puristuslujuus 30-80 MPa, joka valitaan käyttötaroituksen mukaisesti. Materiaaliteknologian kehittämisen avulla on pystytty kasvattamaan betonin puristuslujuutta. [26.]

Betoni on taloudellinen, vähäistä huoltoa vaativa ja pitkäikäinen materiaali. Rakennuksilta edellytetään pitkää käyttöikää ja betonirakenteet suunnitellaan yleensä kestämään vähintään 50 vuotta. Esimerkiksi kaupunkikeskustoista löytyy yli 100 vuotta vanhoja, käytössä olevia rakennuksia. Rakenteet voidaan suunnitella jopa 200 vuoden

käyttöiälle, mutta esimerkiksi Euroopassa on käytetty jopa 1000 vuoden suunnittelukäyttöikä. Käyttöikään vaikuttaa betonin lujuusluokka, vesi-sideainesuhde, sementin määrä ja tyyppi, lisäaineistus, betonipeitteen paksuus, raudoitteiden materiaali ja ulkoinen rasiutus. Sisätiloissa betonirakenteiden suunnittelukäyttöiksi voidaan käyttää 200 vuotta, sillä ei ole olemassa vauriomekanismia, joka vaikuttaisi normaaleissa sisätiloissa. [26.]

Betoni on helposti muunneltavaa, eli rakennuksella tai rakenteella on kykyä joustaa sen käyttöään aikana tapahtuviin käyttötarkoituksen muutoksiin. Tämä vaatii suunnittelijalta ennakkointia, koska koko rakenteen ylivoimittaminen ei ole ekotehokasta. Muunneltavuuteen vaikuttaa betonin hyvä kantokyky, pitkät jännevälit ja sen seurauksena vähäinen pystyrakenteiden määrä. [26.]

Betonilla on hyvät äänieristysominaisuudet, esimerkiksi lattioiden askeläänieristävyys saadaan riittäväksi ontelo- tai paikallavalulataalla, jonka paksuus valitaan halutun lattian pintamateriaalin mukaan. Betoni on myös paloturvallinen, sillä palo ei pääse etenemään betonirakenteissa, eikä aiheuta ympäristölle vaarallisia savukaasuja tai muita aineita. [26; 27.]

Betoni kestää hyvin kosteutta, ja se saavuttaa parhaimmat lujuusominaisuutensa, kun sitä säilytetään mahdollisimman pitkään kosteassa. Betonirakenne on tärkeää kuivata riittävästi ennen pinnoittamista, sillä pinnoite voi vaurioitua betonista tulevan alkalisen kosteuden vuoksi. Vesivahinkotapauksissa monet muut rakenteet ja materiaalit on korvattava uusilla, mutta betonille riittää yleensä vain kuivatus eikä rakenteita tarvitse uusia. Betoni ei voi toimia mikrobien esimerkiksi homeiden kasvualustana, sillä se ei sisällä orgaanista materiaalia. Lisäksi uuden betonin pinta on hyvin emäksinen ja se estää tehokkaasti homekasvua. Betoni ei kuitenkaan ole homehtumaton rakennusmateriaali, sillä ajan myötä sen pinnalle kertyy epäpuhtauksia, jotka voivat tarjota kasvualustan mikrobeille. Ei ole olemassa homehtumattomia rakennusmateriaaleja. Jos materiaalin pinnalle kertyy orgaanista likaa ja kosteutta, pinnalle voi kasvaa hometta ajan myötä. [26.]

Massiivinen ja jäykkä betonirakenne ei ole herkkä värähtelylle, ja se vaimentaa hyvin törmäyksistä ja räjähdyksistä aiheutuvia iskuja. Massiivisuuden ja tiiviyden kautta saadaan betonirakenteista ilmatiiviitä ja energiatehokkaita. Betonilla on hyvä lämmönvaurauskyky, betonirakenteet varastoivat ja luovuttavat lämpöä. Massiiviset betonirakenteet

vähentävät lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutusta. Betoni myös suojaa säteilyltä ja radonilta. [27; 28.]

#### 4.4 Betonin heikkoudet

Betonin heikkouksia on pieni vetolujuus, joka on noin 10% puristuslujuudesta. Raudoitus antaa rakenteille vetolujuuden ja sitkeyden. Raudoitettu betonirakenne on ulkotiloissa altis teräskorroosiolle. Teräskorroosio on raudoituksen ruostumista, joka johtuu sähkökemiallisesta ilmiöstä, anodi- ja katodireaktioista. Ilmiössä raudan yhdisteet pyrkivät muuttumaan takaisin luonnollisiksi yhdisteiksi, kuten oksideiksi ja hydroksideiksi. Tästä seuraa, että raudoitteiden pinnasta liukenee materiaalia, ja raudoituksen kannattavuus heikkenee. Raudoitteiden pinnalle muodostuu korroosiotuotteita, jotka tarvitsevat enemmän tilavuutta, josta seuraa betonin halkeilua. Teräskorroosio voidaan kuitenkin estää, suojaamalla teräkset riittävän paksulla ja tiiviillä suojabetonikerroksella tai käyttämällä ruostumatonta terästä. [10, s.108; 29.]

Suomen olosuhteissa betoni on altis myös pakkasrapautumiselle, jos betonissa ei ole tarpeeksi huokoisuutta. Betoni halkeilee ja rikkoutuu, jos huokosverkosto on täysin veden kyllästämä jäätymistilanteessa, sillä veden tilavuus kasvaa jäätyessä noin 10 %. Lisäämällä betonimassaan huokostinta, betonimassaan muodostuu mikroskooppisia ilma- eli suojahuokosia. Suojahuokokset antavat tilaa veden jäätymisestä aiheutuvalle tilavuuden kasvulle, jolloin betoni ei vaurioidu. [29.]

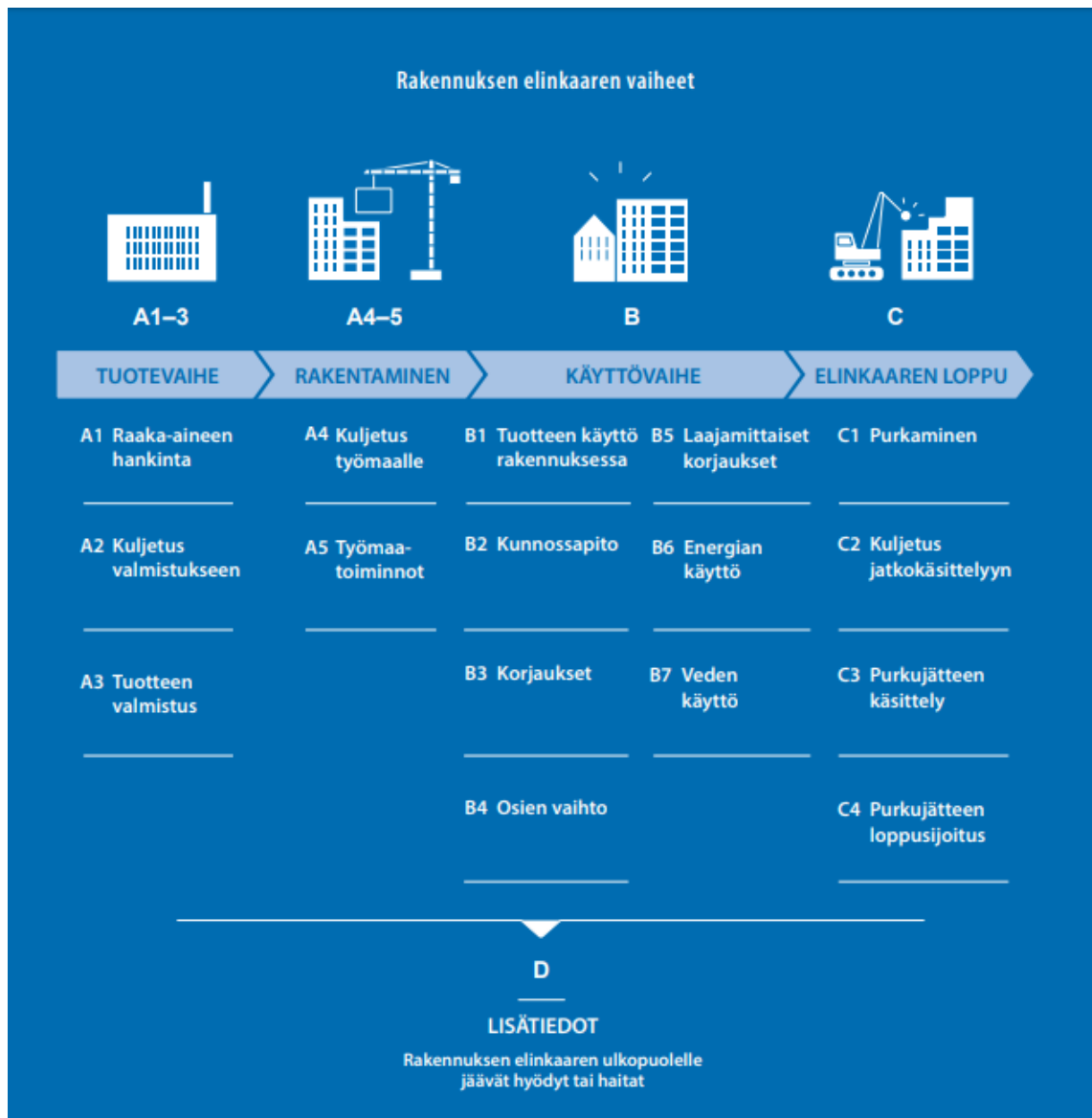
#### 4.5 Käyttökohteet

Rakennetussa ympäristössä ollessasi näet betonia ympärilläsi kaikkialla eri muodoissa ja käyttötarkoituksissa. Betonia käytetään useissa eri kohteissa talonrakentamisessa, infra-rakentamisessa sekä ympäristörakentamisessa. Rakennusten perustuksia, perustuspaaluja, runkoja ja julkisivuja sekä siltoja, patoja, teitä ja muita infra-rakenteita tehdään betonista. Valmisbetonia käytetään suurimmaksi osaksi rakennusten runkorakenteissa. [30.]

## 5 Vähähiilinen rakentaminen

Rakentamisesta ja rakennuksista syntyy yli kolmasosa Suomen kasvihuonepäästöistä. Kasvihuonepäästöt kiihdyttävät ilmastonmuutosta. Rakentamisesta ja rakennuksista syntyvät kasvihuonepäästöt kiihdyttävät ilmastonmuutosta, jopa enemmän kuin autoilu. Vähentämällä rakentamisesta ja rakennuksista syntyviä päästöjä, voidaan vaikuttaa merkittävästi taisteluun ilmastonmuutosta vastaan. Toistaiseksi keinoja rakentamisen päästöjen vähentämiseksi on etsitty rakennusten käytönaikaisesta energiankulutuksesta. Hiilijalanjäljen pienentämiseksi on kuitenkin otettava huomioon myös rakennuksen elinkaaren muut vaiheet: tuotevaihe, rakentaminen, käyttövaihe sekä elinkaaren loppu. Rakennuksen elinkaarenvaiheet on esitetty tarkemmin kuvassa 11. [31; 33.]

Rakennuksen elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia voidaan arvioida ja analysoida LCA-laskennan avulla. LCA, Life cycle assessment eli elinkaariarviointi on menetelmä, jonka avulla arvioidaan tai analysoidaan tuotteen tai palvelun koko elinkaaren aikeiset ympäristövaikutukset. [32.]



Kuva 11. Rakennuksen elinkaaren vaiheet [33.]

Rakennuksen energiatehokkuus, tuotetun energian määrä ja rakennusmateriaalien hiilijalanjälki muodostavat rakennuksen hiilijalanjäljen. Kun huomioidaan koko elinkaaren aikainen hiilijalanjälki, täytyy huomioida myös rakennusmateriaalien valmistus, rakentaminen, korjaukset sekä purkaminen ja kierrätys. Kuvassa 12 on esitetty eri osa-alueiden prosentuaalinen osuus keskimääräisen asuinkerrostalon hiilijalanjäljestä. Rakennusmateriaalien osuus rakennuksen hiilijalanjäljestä on keskimäärin 26 %. Rakennuksen elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä rakennusmateriaaleilla on merkittävä osuus. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden aiheuttamista päästöistä suurin osa muodostuu valmistusvaiheessa. [34.]





Kuva 12. Rakennuksen hiilijalanjäljen muodostuminen [34.]

Rakennuksen elinkaarenaikana saavutettuja, ilmastohyötyjä kutsutaan hiilikädenjäljeksi. Hiilijalanjäljestä ei vähennetä hiilikädenjälkeä. Rakennushankkeista saavutettuja ympäristöhyötyjä ovat muun muassa, rakennusosien uudelleenkäytön ja materiaalien kierrätyksen kautta vältetyt kasvihuonekaasupäästöt, sekä rakennusmateriaaleihin varastoitunut eloperäinen hiili, sekä niihin elinkaarenaikana mahdollisesti sitoutuva ilmakehän hiilidioksidi. [33.]

Suomi tavoittelee vuoteen 2035 mennessä hiilineutraaliutta, sekä ilmastolain (609/2015) mukaan 80 prosentin vähennystä kasvihuonekaasupäästöistä vuoteen 2050 mennessä, vuoden 1990 vertailutasoon nähden. Vuosi 1990 on yleisesti käytetty referenssitaso. Referenssitaso pohjautuu Japanin Kiotossa vuonna 1997 neuvoteltuihin sopimukseen. Sopimuksissa asetettiin tavoite, teollisuusmaiden tulisi vähentää kasvihuonekaasupäästöjään yhteensä 5,2 % vuoteen 1990 verrattuna. Tämä tarkoittaa päästövähennyksiä yhteiskunnan kaikilla osa-alueilla, myös rakennusalalla. [33; 35.]

## Ympäristöministeriön ohje vähähiiliseen rakentamiseen

Ympäristöministeriö on laatinut vähähiilisen rakentamisen tiekartan, sekä kehittänyt yhdessä asiantuntijoiden kanssa vähähiilisen rakentamisen arviointimenetelmän. Vähähiiliseen rakentamiseen on tarkoitus siirtyä vaiheittain. Kuvassa 13 esitetyn tiekartan mukaan rakennustyyppiikohtaiset päästöraajat, ja rakennuksen hiilijalanjäljen arviointi on liitettävä osaksi Suomen rakennusmääräyksiä 2020-luvulla. Ohjaus vähähiilisestä rakentamisesta tulee käyttöön vuonna 2025. Rakentamisen tiekartan täytäntöönpanoa on kuitenkin nopeutettu vuoden 2019 hallituksen linjauksen mukaisesti. Ulkoministeriön erityisasiantuntija Matti Kuittisen mukaan ensimmäisiä selvityksiä vähähiilisen rakentamisen arvioinnista on tehty vuonna 2013. Vähähiiliseen rakentamiseen liittyvää laskentaa on Kuittisen mukaan tehty jo noin 20 vuotta. Uudella menetelmällä on tarkoitus vakioida tapa laskea Suomessa, sekä levittää muualle maailmalle. [33; 36.]

Päästöjä täytyy pystyä mittaamaan ja arvioimaan, jotta niitä voitaisiin vähentää. Arviointimenetelmän avulla pyritään pienentämään rakennuksen kasvihuonekaasupäästöjä huolellisella ennakkosuunnittelulla. Rakennuksen vähähiilisyyden arvioinnissa otetaan huomioon koko rakennus, keskeinen osa talotekniikka järjestelmistä sekä tontinrakenteet ja se tehdään koko elinkaaren ajalle. Vähähiilisyyttä voidaan arvioida rakennussuunnittelun aikana, ja sitä voidaan soveltaa uudis- ja korjaushankkeisiin. [33.]

## Vaiheittain vähähiiliseen rakentamiseen



Kuva 13. Vähähiilisen rakentamisen tiekartta [37.]

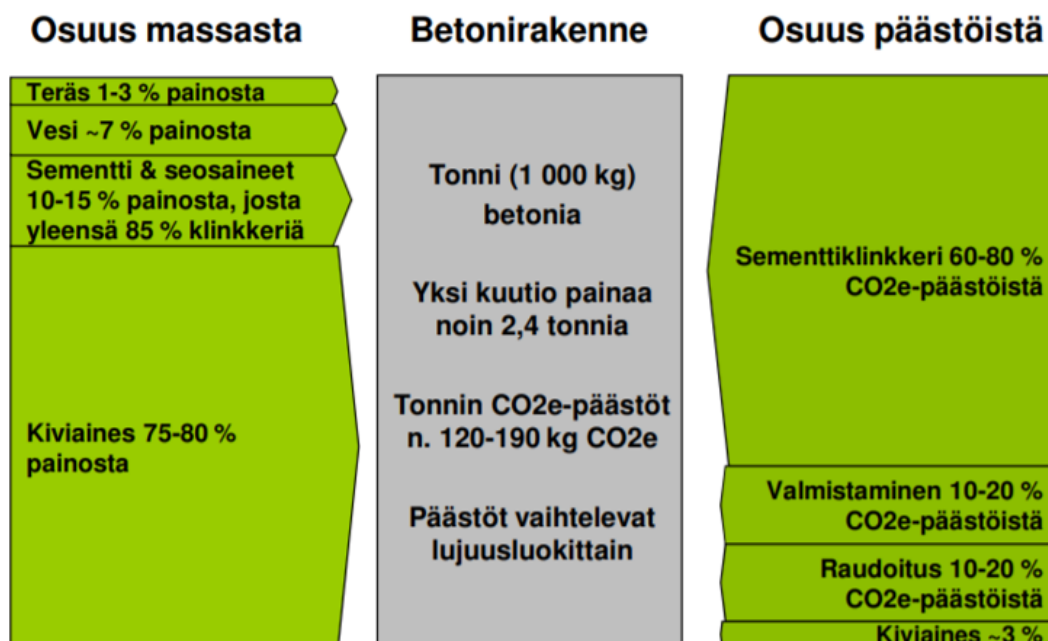
Syksyllä 2019 alkoi vähähiilisen rakentamisen arviointimenetelmän ensimmäisen version pilotointi. Menetelmää käytetään pilottijakson aikana uudisrakennusten ja laajamittaisen korjausten hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen arviointiin. Kuittisen mukaan pilotointi on lähtenyt hyvin käyntiin. Se on herättänyt paljon kiinnostusta ja hakemuksia pilottihankkeeseen tuli paljon. [36.]

## 6 Betonin hiilidioksidipäästöt ja hiilijalanjälki

Betonin hiilijalanjäljellä tarkoitetaan sen aiheuttamaa ilmastokuormaa, joka mittaa ilmaston lämpenemisen vaikutusta. Hiilijalanjälki lasketaan massana (kg), ja siihen vaikuttavat hiilidioksidin lisäksi myös muut kasvihuonekaasut. Lämpeneminen lasketaan hiilidioksidiekvivalentti (CO<sub>2e</sub>) arvona. Lujuus- ja säilyvyysvaatimukset, sidosaineet, valmistustapa ja muut ominaisuudet määrittävät betonin hiilijalanjäljen. [38.]

Betonin hiilidioksidipäästöt ovat noin 100 kiloa tonnia kohti, josta noin 70% aiheutuu sementin valmistuksesta. Käytetty sementin määrä ja tyyppi vaikuttavat betonin hiilidioksidipäästöihin. Suomen vuotuiset hiilidioksidipäästöt ovat noin 80 miljoonaa tonnia, joista sementin osuus on noin 1,5%. Betonirakenteessa hiilidioksidipäästöt aiheutuvat sementin lisäksi raudoituksesta. Kuvassa 14 on esitetty esimerkki betonirakenteen raaka-aineet ja hiilidioksidipäästöt. [39.]

Kalkkikiviraaka-aine ja polttoaineet muodostavat sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöt. Kierrätyspolttoaineilla ja energiatehokkuuden parantumisella on pienennetty huomattavasti polttoaineista syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Kalkkikiven kalsinointi on välttämätön korkean lämpötilan vaativa kemiallinen reaktio, jonka vuoksi siitä aiheutuvaa hiilidioksidipäästöä ei voida pienentää pienentämättä sementtiklinkkerin käyttöä. Sementin valmistuksesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä voidaan pienentää korvaamalla kalkkikiveä vaihtoehtoisilla raaka-aineilla. [40.]



Kuva 14. Esimerkki betonirakenteen hiilidioksidipäästöistä [39.]

Betonin hiilidioksidipäästöistä puhuttaessa täytyy huomioida, että betoni toimii myös hiilinieluna. Kovettunut betoni sitoo itseensä hiilidioksidia eli karbonatoituu. Sementtiklinkkerin valmistuksessa vapautunut hiilidioksidi pyrkii sitoutumaan takaisin sementtikiveen, ja muuttumaan takaisin kalsiumkarbonaatiksi. 23 % vapautuneesta hiilidioksidista sitoutuu takaisin kalsiumkarbonaatiksi. Karbonatoitumista pidetään haitallisena ilmiönä, koska se aiheuttaa betonin neutraloitumisen, ja edesauttaa terästen korroosiota. Karbonatoitumisen etenemistä on pyritty rajoittamaan, muun muassa betonin tiiviydellä sekä riittävän paksuilla suojabetonikerroksilla. Betonin karbonatoituminen on kuitenkin välttämätön ilmiö, jos kosteutta on tarpeeksi. Karbonatoitumista ei toistaiseksi ole huomioitu valtioiden tekemissä vuosittaisissa hiili-inventaarioissa. Tätä varten on kuitenkin kehitetty arviointimenetelmiä. [40.]

Kansainvälisellä Canemure eli kohti hiilineutraaleja kuntia ja maakuntia -hankkeella pyritään edistämään käytännön toimia ilmastonmuutoksen hillintään. Hanke on ajoitettu vuosille 2018–2024, ja Suomessa sitä koordinoi Suomen ympäristökeskus. Tässä EU-rahoitusta saaneessa hankkeessa on mukana 22 toimijaa: kuntia, kunnallisia organisaatioita, tutkimuslaitoksia ja yrityksiä. Canemure-hankkeen osahankkeena on Betoniteollisuus Ry:n toteuttama CO<sub>2</sub>ncrete Solution. Osahankkeessa tutkitaan betonin mahdollisuuksia vähentää ilmakehän hiilidioksidia. Betonirakenteet sitovat ilman hiilidioksidia

itseensä koko käyttöikänsä aikana karbonatisoitumalla. Käyttöiän päätyttyä betonirakenteet tavallisesti murskataan, jolloin hiilidioksidin sitoutuminen betoniin kiihtyy. Tämä johdetaan hiilidioksidille alttiin reaktiopinta-alan lisääntymisestä. CO<sub>2</sub>crete Solution osahankkeessa tutkitaan, paljonko suomalainen rakennuskanta käyttövaiheessa sitoo hiilidioksidia, kuinka paljon betoniin voi sitoutua hiilidioksidia kierrätyksen avulla ja millä kierrätystavoilla sitoutumisen voi maksimoida. [41.]

## 7 Sementinvalmistajan vastaus hiilidioksihaasteeseen

Suomessa sementtiä valmistaa ainoastaan CRH-konserniin kuuluva Finnsementti. Kestävä kehitys on oleellinen osa yrityksen toimintaa. Yritys on tehnyt paljon töitä ympäristövastuullisemman sementin puolesta, ja pyrkinyt vähentämään sementin valmistuksesta syntyviä päästöjä. Finnsementin ympäristöpäällikön Ulla Leevelahden mukaan yritys pyrkii vähentämään sementin valmistuksesta aiheutuvia päästöjään 30 % vuoteen 2025 mennessä vuoden 1990 tasosta. Finnsementin vuoden 2019 ympäristöraportin mukaan päästövähennys on ollut 20 % vuoden 1990 tasosta. Päästövähennyksiin on päästy jo käytössä olevalla teknologialla: parantamalla energiatehokkuutta, lisäämällä kierrätyspolttoaineiden osuutta, sementin seostamisella sekä kalkkikiven korvaamisella vaihtoehtoisilla raaka-aineilla esimerkiksi kierrätysmateriaaleilla. Finnsementillä on arvioitu, että näillä menetelmillä yritys pääsisi noin 32 % päästövähennyksiin vuoteen 2025 mennessä. Leevelahden mukaan esimerkiksi energiatehokkuuden parantamiseksi on tehty pitkään töitä, mutta suurempiin päästövähennyksiin tarvitaan teknologian kehittämistä ja uutta teknologiaa. Tarvitaan myös valtiolta valtavaa panostusta tutkimukseen, tulosten tehdasmittakaavaan satsaamiseen sekä tarvittavan infrastruktuurin luomiseen. [40; 42.]

### Kehityshankkeet

Suomessa Finnsementti on mukana tekemässä tutkimustyötä sementin valmistuksesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi teknologian tutkimuskeskus VTT:n ja LUT-yliopiston hankkeissa. Hankkeissa tutkitaan sähköllä kalsinoimista sekä synteettisen polttoaineen valmistusta hiilidioksidista. Sähköllä kalsinointi tarkoittaa kalsinointiin tarvittavan lämmön tuottamiseen tarvittavien polttoaineiden korvaamista sähköllä. Sähköllä pystytään tuottamaan kalsinointiin tarvittava lämpöenergia. Tutkimuksessa on tärkeää ottaa huomioon sementtiuunin liekin oikea lämpötila ja pituus, sekä miten se siirtää

lämpöä raaka-aineisiin. Tutkimuksessa tutkitaan useita teknologiavaihtoehtoja esimerkiksi plasmaa, mikroaaltoja sekä induktiota. [40.]

Fuel looping -tutkimuksessa tutkitaan synteettisen polttoaineen valmistusta poltosta muodostuvista hiilidioksidipäästöistä. Hiilidioksidia käytetään esimerkiksi biomassan ja biopolttoaineiden tuottamiseksi tarvittavien levien kasvun edistämiseen. Jotta hiilidioksidipäästöistä voidaan tehdä uutta polttoainetta, se edellyttää hiilidioksidin talteenottoa sementin valmistusprosessista. Nämä valmistuvat synteettiset polttoaineet toimivat väliaikaisena hiilivarastona. [40.]

CRH-konserni on mukana useissa käynnissä olevissa kansainvälisissä hankkeissa. CRH-konsernin tutkimuksia ovat esimerkiksi Leilac, Clinker, Oxyfuel ja hiilidioksidin varastointi. [40.]

Leilac eli low emissions intensity lime and cement -hankkeessa sementtiuunin kalsinaattoria muokataan niin, että poltosta syntyvät savukaasut ja kalkkikivestä vapautuva hiilidioksidi pidetään erillään. Toisin sanoen hankkeessa tutkitaan niin sanottua direct separation -tekniikkaa. Tällä menetelmällä saadaan aikaiseksi hyötykäyttöön ja varastointiin hyvin puhdasta hiilidioksidia. Tekniikka on pilottivaiheessa, ja se otettiin käyttöön Belgian Lixhen sementtitehtaalla kesällä 2019. [40.]

Clinker-hankkeen teknologialla syntyy hyvin puhdasta hiilidioksidia hyötykäyttöön ja varastointiin. Tässä hankkeessa tutkitaan carbon looping -käsitettä eli uudenlaista kalsinaattoria, jossa hiilidioksidin talteenotto tapahtuu syklisellä kalsinoinnilla ja kalsiumoksidia sisältävän sorbentin uudelleen karbonatisoitumisella. Italian Vernasca on valittu tämän hankkeen pilottilaitokseksi. [40.]

Myös Oxyfuel-menetelmällä saadaan aikaan hyvin puhdasta hiilidioksidia hyötykäyttöön ja varastointiin. Menetelmässä käytetään sementin valmistuksen lämmöntuotantoon tarvittavien polttoaineiden polttoon puhdasta happea ilman sijasta. Ilma sisältää normaalisti 78% typpeä, 21% happea ja noin 1% argonia. Italian Colleferron ja Itävallan Retznein sementtitehdas on valittu pian alkavan pilottilaitoksen sijoituspaikoiksi. [40.]

Hiilidioksidin varastointia tullaan hyödyntämään rinnakkain tai yhdessä monien nyt tutkitavien sementin valmistusmenetelmien kanssa. Maailman ensimmäistä

tehdasmittakaavaista hiilidioksidin talteenottoa valmistellaan parhaillaan Norjan Brevikissä. Tässä hankkeessa hyödynnetään olemassa olevaa öljynporausreikää Pohjanmerellä hiilidioksidin varastointiin. [40.]

## 8 Hiilineutraalimmat vaihtoehdot perinteiselle betonille

Suomessa ja maailmalla on tutkittu paljon erilaisia vaihtoehtoja, miten betonin hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää. Jotkin tekniikoista ovat jo käytössä tai niistä on käynnissä pilottihankkeita. Osalle tehdään vielä lisää tutkimusta ja kehitystyötä.

### 8.1 Sementin seostaminen

Sementtireseptiä muuttamalla eli sementtiä seostamalla voidaan vaikuttaa siitä aiheutuviin hiilidioksidipäästöihin. Sementtien seostamista on tehty jo pitkään, ja sillä on pystytty helposti vähentämään hiilidioksidipäästöjä. Hiilidioksidipäästöjen väheneminen perustuu hiilidioksidipäästöjä aiheuttavan portlandklinkkerin määrän vähentämiseen. Osa portlandklinkkeristä korvataan muilla seosaineilla. Seosaineet ovat peräisin teollisuuden sivuvirroista. Lentotuhka, masuunikuona sekä silika ovat yleisimpiä betonissa käytettyjä seosaineita. Seosaineet on esitelty tarkemmin luvussa 4.1. [43;44.]

Suomessa Finnsementti valmistaa erilaisia sementtityyppejä. Sementtityyppien ominaisuudet eroavat toisistaan seostuksesta riippuen. Sementin ominaisuudet valitaan käyttötarkoituksen mukaisesti. Finnsementti on kehittänyt ympäristöystävällisemmän sementtilaadun plussementin. Plussementti on portlandseossementti, jossa seosaineena on käytetty kalkkikiveä ja granulikuonaa yhteensä noin 30 %. Plussementti on normaalisti kovettava sementtilaatu, joka saavuttaa 28 vuorokaudessa vähintään 42,5 MPa:n lujuuden. Se soveltuu kaikäntyyppisiin valmisbetonivaluihin, tuotteisiin ja stabilointiin ja sillä on myös standardinmukainen merkintä, CEM II / B-M (S-LL) 42,5 N. [44.]

## 8.2 Vihreä betoni

CRH-konserniin kuuluva kivipohjaisia rakennusmateriaaleja valmistava Rudus Oy on kehittänyt Rudus vihreän betonin. Vihreä betoni valmistetaan Finnsementin ympäristöystävällisemmästä plussementistä. Vihreän betonin ympäristöystävällisyys perustuu seostamiseen. Vihreän betonin reseptiä säädetään käyttökohteen mukaisesti, ja mahdollisimman vähän hiilidioksidipäästöjä sisältäväksi betoniteknologisin toimenpitein esimerkiksi lisäaineita käyttämällä. Vihreällä betonilla pystytään vähentämään betonin hiilidioksidipäästöjä 20-50 % verrattuna normaaliin betoniin. Perustukset ja sisätiloissa olevat rakenteet ovat vihreän betonin tyypillisiä käyttökohteita. Vihreää betonia ei voida täysimääräisesti käyttää vaativissa ulkorakenteissa, erityisesti suola-pakkasrasitetuissa kohteissa. Betonin laatu valitaan yhteistyössä suunnittelijan, rakentajan ja urakoitsijan kanssa. Betonin tulee täyttää betonin valettavuuden, lujuuden kehityksen, loppulujuuden ja säilyvyyden osalta rakenteille asetut vaatimukset. [45.]

## 8.3 Geopolymeeribetoni

Geopolymeeri on yleisnimitys epäorgaanisille materiaaleille, jotka voivat olla uusia materiaaleja, sideaineita tai uutta betonia. Geopolymeereja on tuhansia erilaisia, ja ne on valmistettu tuhansilla eri resepteillä. Niitä käytetään ja tutkitaan nykyään useissa teollisissa sovelluksissa ja tieteen aloilla. Geopolymeerit ovat kovalenttisella sidoksella sitoutuneita mineraalimolekyylien ketjuja tai verkkoja. Betonimainen geopolymeeri syntyy esimerkiksi teräs- tai kaivannaisteollisuuden pii- ja alumiinipitoisesta jäteaineesta korkean pH:n olosuhteissa eli alkalisissa olosuhteissa. Geopolymeerejä kutsutaan myös alkaliaktivoituiksi (AAM) materiaaleiksi. Geopolymeerit ovat ominaisuuksiltaan kovia, palamattomia ja stabiileja aina 1250 °C:n lämpötilaan asti. Olosuhteita muuttamalla voidaan säätää aineen koostumusta. Geopolymeerien valmistuksessa hyödynnetään teollisuudessa syntyvää jätettä, joka samalla vähentää teollisuuden aiheuttamaa ympäristökuormaa. Geopolymeeribetonit ovat ympäristöystävällisempi vaihtoehto tavalliselle betonille, sillä niiden valmistuksesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt voivat olla jopa 80% pienemmät. [46; 47; 48.]

Geopolymeerien löytyminen herätti laajan tieteellisen kiinnostuksen. Geopolymeeritutkimuksia ja niihin liittyviä julkaisuja sekä patenteja on tehty satoja. Vuonna 1972 tehtiin



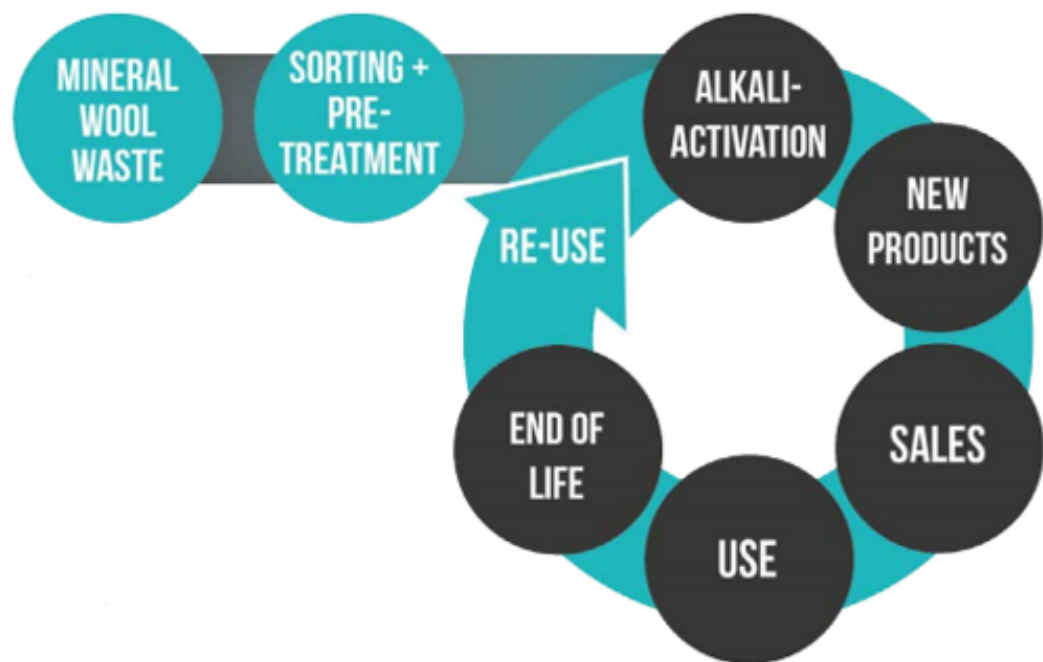
ensimmäinen geopolymeeri tutkimus Cordi-Géopolymère -tutkimuslaboratoriossa Ranskassa. Geopolymeeritekniikan ranskalainen keksijä ja kehittäjä Joseph Davidovits loi termin "geopolymeeri" 1970-luvun lopulla. Termi luotiin luokittamaan hiljattain löydetylle epäorgaanisia polymeerimateriaaleja tuottavalle geosynteesille. Davidovits loi myös loogisen tieteellisen terminologian, joka esiteltiin IUPAC-tiedeyteisölle vuonna 1976. Se perustuu erilaisiin kemiallisiin yksiköihin, pääasiassa silikaatti- ja alumiinisilikaattimateriaaleille. Terminologiaa kehitettiin ja sovellettiin vielä vuonna 1979, ja se oli pohjana uusien materiaalien onnistuneeseen kehittämiseen. [47.]

Geopolymeereja on tutkittu Suomessa jo 1980-luvulla, mutta silloin kehityskulku jäi kesken. Sitten geopolymeeritutkimuksia on tehty muun muassa Oulun yliopistolla, Tampereen yliopistolla sekä Kajaanin Ammattikorkeakoulussa. Oulun yliopiston tutkimukset ovat isoimpia maailmassa. Oulun yliopisto tekee paljon yhteistyötä maailmalla olevien yliopistojen kanssa. Oulun yliopistolla on tutkittu geopolymeereja kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikössä vuodesta 2012 asti. Tutkimuksien tavoitteena on löytää keinoja hyödyntää teollisuudesta syntyvää jätettä, sekä vähentää teollisuuden ympäristölle aiheuttamaa kuormitusta. Tutkimukset on aloitettu biotuhkien ja raskasmetallipitoisten tuhkien tutkimuksella. [49; 50.]

Oulun yliopiston tutkimukset ovat tuottaneet tulosta. Siellä on kehitetty maailman lujin ekokuivabetoni eli geopolymeeribetoni osana GEOBIZ-hanketta. Geopolymeeribetoni on sementtiä sisältämätön betoni, jonka puristuslujuus on 107 megapascalina 28 vuorokauden lujittumisen jälkeen. Geopolymeeribetonin puristuslujuus on kaksinkertainen verrattuna tavalliseen korkealujuusbetoniin, joka on määritetty kestävänsä 55 megapascalin puristuslujuuden. Raudan valmistuksessa syntyvä sivutuote masuunikuona, kiinteä natriumsilikaatti (nk. vesilasi) ja kiviaines ovat geopolymeeribetonin raaka-aineena. Tässä tapauksessa natriumsilikaatti toimii alkalina, ja saa masuunikuonan reagoivaan muotoon. Masuunikuonan lujittumisen mahdollistava alkali toimii aktivaattorina. Aktivointi tapahtuu kemiallisesti, valmistusprosessi ei vaadi korkeaa lämpötilaa, ja sen voi tehdä huoneenlämpötilassa. Masuunikuonaa ei kuitenkaan synny niin paljon, että tällä tuotteella pystyttäisiin korvaamaan maailman sementtituotantoa. [48; 50]

Tällä hetkellä Oulun yliopisto toimii tieteellisenä koordinaattorina WOOL2LOOP-hankkeessa, jossa on mukana yhteensä 15 yritystä ja tutkimuslaitosta sekä laajoja pilottikokeiluja eri puolilla Eurooppaa. Suomessa hanketta koordinoi rakennusmateriaaleja,

myös mineraalivillaa valmistava Saint-Gobain Finland Oy. WOOL2LOOP on EU-rahoitteinen hanke, ja ensimmäinen kaupallistamishanke, jossa mineraalivillajätettä hyödynnetään geopolymeerien raaka-aineena. Siinä tähdätään rakennus- ja purkujätteeksi päätyvän mineraalivillan muuttamiseen uusiomateriaaleiksi. Mineraalivillajätettä syntyy Euroopassa vuosittain noin 2,5 miljoonaa tonnia rakentamisesta ja purkurakentamisesta. Tällä hetkellä lähes kaikki mineraalivillajätteet päätyvät kaatopaikalle, joka aiheuttaa rakennussektorin toimijoille noin 250 miljoonan euron vuosittaiset kustannukset. Geopolymeeritekniikan avulla mineraalivillajätteestä voidaan valmistaa uusia rakennustuotteita, jolloin se korvaa neitseellisiä raaka-aineita pienentäen rakentamisen ja rakennusmateriaalien tuotannon hiilijalanjälkeä. Kuvassa 15 on esitetty hankkeen mukainen mineraalivillajätteen kiertokulku. Oulun yliopiston tutkimuksissa mineraalivilla on osoittautunut sopivaksi raaka-aineeksi, jolla voidaan korvata sementtiä teollisessa mittakaavassa. Se voi olla yksi ratkaisu hiilidioksidipäästöjen pienentämiseen rakennusteollisuudessa. [51.]



Kuva 15. Mineraalivillajätteen kiertokulku [52.]

Suomessa geopolymeeribetonia valmistaa tällä hetkellä Betolar, mutta muitakin toimijoita on tulossa. Yhtiön perustajana toiminut, Juha Leppänen alkoi etsiä uusia kestäviä

ratkaisuja rakennusteollisuudelle vuonna 2013. Alkuun hän kokeili tehdä betonia ilman sementtiä, sekoittamalla vettä, hiekkaa ja tuhkaa. Hän onnistui luomaan betonia muistuttavan tuotteen. Myöhemmin kehitystyön parissa hänelle selvisi, että kyseessä oli geopolymeeri. Geopolymeereja Betolar pyrkii jalostamaan teknologiallaan metsä-, kaivos-, teräs- ja energiateollisuuden jätteistä ympäristöystävällisiä rakennusmateriaaleja. Viimeisten vuosien aikana Betolar on kehittänyt geopolymeeribetonia ja kaupallistanut sen. Intiassa on käynnissä yrityksen pilottihanke sementin korvaamisesta, muun muassa kiivihiilen lentotuhkalla ja terästeollisuuden kuonilla yhdessä paikallisen kiertotalousyrityksen kanssa. [53; 54.]

Maailmalla ollaan tehty paljon tutkimusta geopolymeereistä. Australiassa ollaan geopolymeeribetonin suhteen edelläkävijöitä [49]. Australialainen betonielementtejä valmistava yhtiö ROCLA kaupallisti geopolymeeribetonin 2010-luvun alussa, ja oli samalla ensimmäinen yritys, joka toi geopolymeeribetonituotteen markkinoille [55].

Queensland's Global Change Institute -yliopisto, GCL (kuva 16) on maailman ensimmäinen rakennus, jossa rakennusmateriaalina on käytetty geopolymeeribetonia [56].



Kuva 16. Australian Queenslandin yliopiston rakennus on maailman ensimmäinen rakennus, jossa on käytetty geopolymeeribetonia. [56.]

Rakennus on nelikerroksinen, ja sen lattiaelementit koostuvat 33:sta geopolymeeribetonielementistä. Elementeissä on käytetty ympäristöystävällistä betonia, ja ne on päällystetty geopolymeeribetonilla. Kuvassa 17 on geopolymeeribetonielementin asennus käynnissä Queenslandin yliopiston työmaalla. Ulkonäöltään geopolymeeribetonielementti ei juurikaan eroa tavallisesta betonista valmistetusta betonielementistä. [56.]



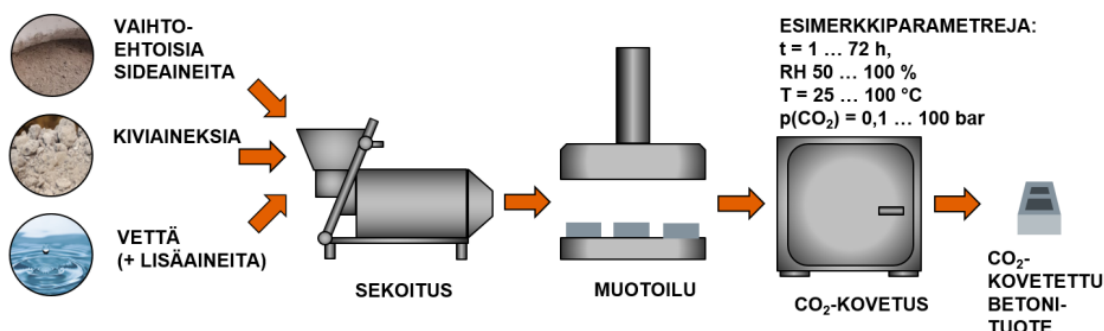
Kuva 17. Geopolymeeribetonielementin asennus maailman ensimmäiseen rakennukseen, jossa käytetään geopolymeeribetonia. [56.]

#### 8.4 Hiilidioksidikivetetty betoni

Teknologian tutkimuslaitos VTT Oy on kehittänyt hiilidioksidijälkihoidolla saatavaa hiilidioksidikivetettyä betonia CO2CRETE-projektissa vuosina 2018–2019. Projektissa kehitetään hiilidioksidijälkihoitoa, johon hyödynnetään mallinnukseen perustuvaa optimointia sekä LCA-laskentaa. Projektin keskeiset tavoitteet olivat sideainesysteemin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen, hiilinegatiivisen betonin kehittäminen ja verifiointi. [57.]

Hiilidioksidijälkihoito toimii täydentävänä teknologiana, jolla voidaan alentaa sideaineiden aiheuttamaa hiilidioksidikuormaa. Hiilidioksidikivetys tarkoittaa, että plastisesta

vaiheesta lähtien betoni jälkihoidetaan hiilidioksidikaasulla. Hiilidioksidipaineen alaisena kovettuvasta betonista syntyy karbonaattipohjaisia reaktiotuotteita, eli prosessi sitoo hiilidioksidia. Näin syntynyt lopputuote on mahdollista saada jopa hiilinegatiiviseksi. Tämä vaatii kuitenkin, että sementti korvataan vaihtoehtoisilla sideaineilla, joilla on pieni hiilijalanjälki. Hiilidioksidikovetetun betonituotteen yleistetty valmistusprosessi on esitetty kuvassa 18. [59.]



Kuva 18. Hiilidioksidikovetetun betonituotteen yleistetty valmistusprosessi. [58.]

Projektin kokeellinen tutkimusosuus jakautui kolmeen osakokonaisuuteen. Ensimmäisessä osassa tehtiin kokeita pienessä autoklaavissa, jossa tutkittiin prosessia ja koostumusta mahdollisimman optimoiduissa olosuhteissa. Kokeita tehtiin masuunikuonalla sekä pikasementillä, ja käytettiin paineistettua ja superkriittistä hiilidioksidia. Painonmuutoksen, paineen sekä lämpötilan mittauksen avulla ja hiilipitoisuusanalyysillä määriteltiin sitoutuneen hiilidioksidin määrää. Kokeista selvisi, että masuunikuona pystyy sitomaan painostaan 10-40% hiilidioksidia. Sitoutuneen hiilidioksidin määrää nosti betonin huokoisuus. Sokerin avulla pysäytetty hydrataatio ei vaikuttanut hiilidioksidin sitoutumiseen. [59.]

Toisessa osassa tutkittiin isossa autoklaavissa mekaanisia ominaisuuksia. Kokeessa betonikappaleita hiilidioksidijälkihoidettiin teräsmuotissa vuorokauden ajan. Tämän jälkeen koekappaleet purettiin ja suojattiin muovilla. Isossa autoklaavissa tehdyissä kokeissa ei saatu yhtä hyvää tuloksia, kuin pienessä autoklaavissa tehdyissä kokeissa, sillä sidotun hiilidioksidin osuus laski. Isommassa autoklaavissa tehdyissä kokeissa todettiin hiilidioksidijälkihoidon vaikuttaneen myös lujuuksiin. Vaikutus oli negatiivinen erityisesti huokoistetuissa, suuren vesi-sementtisuhteen näytteissä. Kokeita tehtiin myös käyttämällä vaihtoehtoisia sideaineita kuten, vihreälipeäsakkaa, masuunikuonaa ja kuorituhkaa.



Hiilidioksidijälkihoidolla ja käyttämällä masuunikuonaa sideaineena saavutettiin nollataso ja pienillä näytteillä hiilinegatiivisuus. Hiilidioksidijälkihoidolla yhdistettynä kuonaan, vihreälipeäsakkaan ja kuorituhkaan saavutettiin hiilinegatiivisuus, myös isoilla kappaleilla. [59.]

Kolmannessa osassa oli termodynaaminen mallinnus mahdollisista reaktiotuotteista, huokosveden pH:n kehityksestä sekä reaktiotuotteiden tilavuudesta. Termodynaamisessa mallinnuksessa selvisi, että hiilidioksidijälkihoitoon soveltuvat hieman erilaiset materiaalit, kuin perinteiseksi sementin seosaineeksi. Lopuksi tehtiin myös laskenta hiilidioksiditaseen todentamiseksi. VTT:n tutkimusryhmän loppupäätelmät projektille olivat, että hiilidioksidin sitoutumismenetelmänä hiilidioksidijälkihoito on lupaava, mutta teknologian valmiusaste on vielä matala. Projekti VTT:llä jatkuu edelleen. [59.]

Maailmalta löytyy betonin hiilidioksidikovettamiseen erikoistuneita yrityksiä muun muassa Yhdysvalloista. Näistä suurimpina Solidia Technologies, joka valmistaa esivalettuja betonituotteita, ja sillä on yhteensä 37 patenttihakemusta. Solidia on kehittänyt Solidia-sementin, joka on 55% kalkkikiveä ja 45% liuskeita, savea sekä hiekkaa. CarbonCure Technologies tekee hiilidioksidikovetusta valmisbetonille. Heillä pienempi hiilijalanjälki saadaan aikaiseksi, koska hiilidioksidikovetus nostaa puristuslujuutta, saadaan aikaan lujempaa betonia, jolloin käytetään enemmän vaihtoehtoisia sideaineita. Yhdysvaltojen lisäksi hiilidioksidikovettamiseen erikoistuneita yrityksiä on muun muassa Kanadassa, Iso-Britanniassa, Australiassa ja Japanissa. [58.]

## 8.5 Päästökompensoitu hiilineutraali betoni

Suomalainen Pielisen betoni Oy on ensimmäinen betonialan yritys, joka valmistaa kaikki tuotteensa päästökompensoidusta hiilineutraalista betonista. Pielisen betonilla on tehty vuosia töitä tuotannon päästöjen minimoimiseksi, ja yritys haluaa kantaa vastuunsa hiilidioksidipäästöistään. Kartoittamalla käytettyjen raaka-aineiden sekä oman toiminnan hiilidioksidipäästöt, yritys on pyrkinyt pienentämään hiilijalanjälkeä. Pielisen betonin toimitusjohtajan Tuija Kilpisen mukaan oman toiminnan hiilidioksidipäästöjä on alennettu parantamalla energiatehokkuutta, sekä siirtymällä vähäpäästöisiin polttoaineisiin ja raaka-aineisiin. Yrityksen omistamat metsät toimivat hiilinieluna, ja ne kattavat sataprosenttisesti tuotteiden kokonaishiilidioksidipäästöt, mukaan lukien raaka-aineiden

hiilidioksidipäästöt. Metsien kasvuun sitoutuva hiilidioksidi kattaa omasta toiminnasta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt yli 20-kertaisesti. Kiinnostus ympäristöystävälliseen rakentamiseen on nostanut hiilineutraalien betonituotteiden kysyntää, ja päästökompensoitu hiilineutraalibetoni on yksi ratkaisu siihen. [60.]

Suomalainen Lujabetoni on myös tuonut markkinoille päästökompensoidun hiilineutraalin valmisbetonin. Kaikille Lujabetonin valmisbetonilaaduille voidaan tehdä päästökompensaatio. Lujabetonilla päästökompensointi lisää valmisbetonin hintaa 5 %, ja se suoritetaan sertifioituilla päästövähennyksillä. Lujabetonin kanssa yhteistyössä päästökompensaatioissa toimii Nordic Offset Oy. Nordic Offset on suomalainen toimija, joka tarjoaa sertifioituilla päästövähennyksillä tai pysyvillä hiilinielujen lisäyksillä yrityksille ja yhteisöille mahdollisuuden kompensoida hiilijalanjälkensä. Nordic Offset myy Lujabetonille Gold Standard -sertifioituja päästövähennyksiä. Lujabetonin toimitusjohtaja Mikko Isotalon mukaan päästökompensointi on tällä hetkellä ainoa nopea tapa tarjota asiakkaille hiilineutraalia valmisbetonia. Lujabetonilla hiilineutraalia valmisbetonia on toimitettu marraskuusta 2019 asti. [61.]

## 8.6 Puurakentaminen

Puu on ekologinen rakennusmateriaali, ja samalla myös uusiutuva sekä kotimainen raaka-aine. Puukuutio sitoo kasvaessaan tonnin ilman hiilidioksidia, ja samalla ilmakehään vapautuu 700 kiloa happea fotosynteesissä. Puolet puun kuivapainosta on hiiltä ja puutuotteet toimivat hiilivarastoina. Puurakentamista Suomessa pyritään lisäämään maailmanlaajuisten ilmasto-, ympäristö- ja luonnonvarakysymysten merkityksen kasvaessa. Rakentamisessa käytetään puuta verrattain vähän globaalilla tasolla. Koko Euroopan rakentamisesta puun osuus on vain noin 4% ja Suomessa noin 40%. Puurakentamista voitaisiin lisätä, sillä Suomen ja Euroopan metsien vuotuinen kasvu on suurempaa kuin poistuma. Puun käytöllä voidaan korvata rakennusmateriaaleja, joiden valmistuksesta aiheutuu hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi betonia. Koko elinkaarensa aikana puutalot aiheuttavat vähemmän ilmasto- ja ympäristöhaittoja, kuin vastaavat betonista, tiilestä tai teräksestä rakennetut talot. Puutuotteet voidaan kierrättää tai muuttaa energiaksi, kun ne tulevat elinkaarensa päähän. Puun polttamisesta saadaan uusiutuvaa energiaa, jolla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita. [62; 63.]



Puu on suosittu rakennusmateriaali pienimittakaavaisessa rakentamisessa. Lähes 99% vapaa-ajan rakennuksista on puurakenteisia. Yli kahdeksan kymmenestä pientalosta on puurunkoisia ja puujulkisivuisia on noin kolme neljäsosaa. Suomi on kuitenkin kerrostalovaltainen maa, jossa noin 46 % kaikista asunnoista sijaitsee kerrostaloissa. Suomessa puurakenteisia kerrostaloja on vielä vähän, sillä viimeisen kuudenkymmen vuoden ajan betoni on hallinnut kerrostalojen markkinoita. Puukerrostalojen rakentamisen ja rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi on tehty kehitystyötä 1990-luvulta lähtien, yhdessä muiden EU-maiden kanssa. Puukerrostalojen määrä on kovassa kasvussa. Yli kaksikerroksisia puisia asuinkerrostaloja on rakennettu Suomeen vuoden 2019 loppuun mennessä 87 kpl, joissa on yhteensä 2505 asuntoa. Lähivuosina puukerrostaloja on tulossa lisää noin 2300 asunnon verran. [62.]

Puukerrostalorakentamisen vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia tutkittiin vuosina 2014-2017 VTT:n LeanWOOD -hankkeessa [64]. Hankkeen päätulokset kertovat, että puukerrostalojen yleistyminen vaatii monia uusia toimenpiteitä ja kehittämistä läpi koko arvoketjun, mutta puurakentamisella on vahvuuksia ja mahdollisuuksia. Tutkimuksen tulokset on esitetty SWOT-analysissä (kuva 19). [65.]

Puurakentaminen Euroopassa SWOT	
<p><b>Vahvuudet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poliittinen tuki</li> <li>• Yleinen kiinnostus puurakentamista kohtaan</li> <li>• Hyvä raaka-aineen saatavuus</li> <li>• Vakiintuneet arvoketjut</li> <li>• Uudet T&amp;K:n luomat markkinat</li> <li>• Laaja-alainen olemassa oleva puuteollisuus</li> <li>• Nopea ja kevyt rakentaminen</li> </ul>	<p><b>Heikkoudet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Määräykset (palomääräykset ja akustiikka)</li> <li>• Hyvien suunnittelijoiden puute</li> <li>• Suurten yritysten muutosvastarinta</li> <li>• Puurakentaminen koetaan kalliimpana kuin vastaava muu rakentaminen</li> </ul>
<p><b>Mahdollisuudet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biotalouden kasvunäkymät Euroopassa</li> <li>• Ilmastopolitiikka ohjaa vähähiiliseen ja energiatehokkaaseen rakentamiseen</li> <li>• Puun joustavat käyttökohteet</li> <li>• Tiivistysrakentaminen kaupungissa</li> <li>• Ketterät massaräätälöinnit nykyaikaisilla tuotantomenetelmillä</li> <li>• Rakentamisen ja suunnittelun virtaviivaistaminen</li> </ul>	<p><b>Uhat</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suurten rakennusliikkeiden laimea kiinnostus puurakentamista kohtaan</li> <li>• Puurakentamisen kustannukset eivät palaudu matalampina elinkaarikustannuksina</li> <li>• Taitojen ja kokemuksen puute suunnittelussa ja toteutuksessa</li> <li>• Muita rakennusmateriaaleja suosivat lait ja määräykset</li> <li>• Suorituskyky ydinosaamisalueella</li> </ul>

Kuva 19. Puurakentaminen Euroopassa SWOT-analyysi [64.]

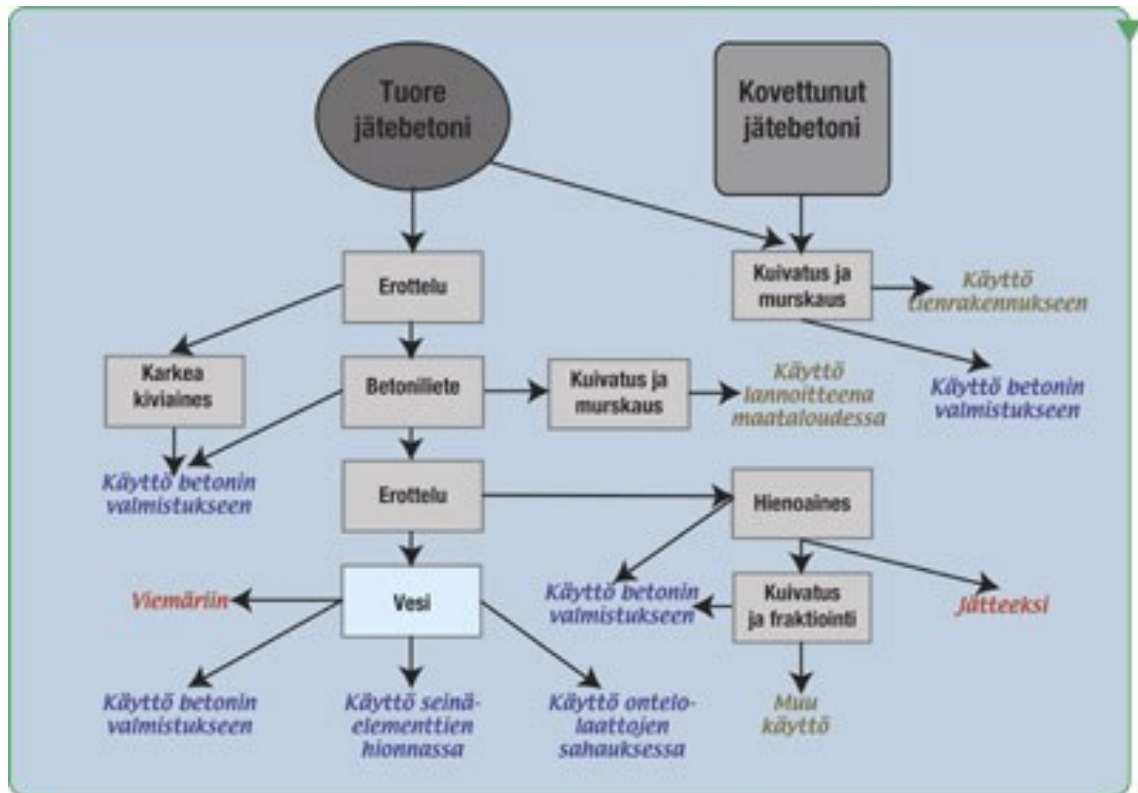
Tutkimustulosten yhteenvedossa nousee esille tämän hetkinen poliittinen tahtotila, joka ohjaa kohti ympäristöystävällisempiä rakennuksia, ja sitä kautta tuo puurakentamiselle ainutlaatuisia vahvuuksia ja mahdollisuuksia. Puurakentamisen pariin tarvitaan lisää kokeneita ja taitavia suunnittelijoita. Lisäksi pitäisi ratkaista kustannuksiin kohdistuvat uhat, ja parantaa puurakentamisen asemaa rakentamisen muuttuvassa kentässä. [65.]

## 9 Betonin kiertotalous

Kiertotalouden perusidea on, ettei jätettä synny, ja että raaka-aineita käytetään uudelleen ja uudelleen. Tämä huomioidaan jo tuotteiden suunnittelussa. Yritykset haluavat tehdä toiminnastaan tehokkaampaa, ja saada aikaan valmistuksessa suljetut prosessierot, käyttämällä samoja resursseja uudelleen ja uudelleen. Uusien tuotteiden valmistuksessa halutaan hyödyntää mahdollisimman paljon kierrätettyjä raaka-aineita. Betoni on 100-prosenttisesti kierrätettävä materiaali. Suomessa syntyy vuosittain arviolta miljoona tonnia betonijätettä, ja betonin kierrätysaste on noin 80 % [67]. [66.]

Betonin kiertotalous alkaa sementin valmistuksessa, jossa käytetään kierrätettyjä raaka-aineita sekä energianlähteenä bio- ja kierrätyspolttoaineita. Bio- ja kierrätyspolttoaineina käytetään muun muassa pakkausjätteestä valmistettua kierrätysmateriaalia, lihaluujauhoa ja autonrenkasrouhetta. Sementin valmistuksessa käytettävistä uuneista otetaan energiaa talteen, ja sitä hyödynnetään kaukolämpönä yli 2000 omakotitalon lämmitykseen. [67.]

Tuore ylijäämäbetoni erotellaan pesemällä, karkeaksi kiviaineeksi ja betonilietteeksi. Kiintoaines selkeytetään lietteestä erilleen, ja vesi kierrätetään uudelleen prosessiin. Kovettunutta ylijäämäbetonia voidaan käyttää myös murskattuna uusiokiviaineeksena betonin valmistuksessa. Kierrätysvettä saadaan betonisekoittimien, betoniauton kuljetussäiliöiden ja betonin kuljettimien puhdistuksesta. Kovettuneen betonin sahauksesta, hiomisesta ja vesisuihkupudistuksesta saadaan myös kierrätysvettä. Kierrätysvettä voidaan käyttää betonin valmistukseen sekoittamalla sitä vesijohtoveteen, tai käyttämällä sellaisenaan. Kovettuneen betonin sahauksesta syntyy betonilietettä, jota voidaan käyttää maanparannusaineena. Betoniliete sisältää kalkkia, ja sillä on korkea pH-arvo, jonka vuoksi se soveltuu esimerkiksi peltojen happamuuden vähentämiseen [68]. Maanrakennuskäyttöön, kuten teiden rakentamiseen voidaan käyttää pesuvedestä tai betonimasasta pestyä kiviainesta. Pesty kiviaines soveltuu tähän yhtä hyvin kuin vastaava luonnonkiviaines, ja sitä voidaan käyttää myös jakamattomana betonin valmistuksessa. Kuvassa 20 on esitetty betonin kiertotalous. [67.]



Kuva 20. Betonin kiertotalous. [67.]

Kun betonirakenteiset rakennukset tulevat elinkaarensa päähän, ne puretaan yleensä murskaamalla. Betonimurske ja rakenneteräkset erotellaan. Rakenneteräkset menevät metalliromuksi ja sulatetaan uudelleen. Rakenneterästen kierrätys vähentää huomattavasti kasvihuonepäästöjä verrattuna neitseellisten teräksien käyttöön. Vaativissa maa-rakenteissa, kuten teiden jakavissa ja kantavissa rakenteissa, käytetään betonimurskeesta jalostettua uusiokiviainesta. Tiivistetty betonimurske on kovaa, ja sillä saadaan aikaan erinomainen kantavuus ohuemmillä rakenteilla luonnonsoraan verrattuna. Luonnon kiviainesta säästyy, kun käytetään kierrätettyä betonimursketta eli kierrätyskiviainesta. Kierrätyskiviainesta käytetään vuosittain noin 1 miljoona tonnia. Eri puolilla Suomea on yli 20 keräyspistettä, mihin betonijätettä voidaan toimittaa. [67.]

## 9.1 Betonimurskeen käyttö uusiobetonin valmistuksessa

Suomessa betonimursketta hyödynnetään pääasiassa maarakennuksessa, mutta sitä olisi mahdollista käyttää myös uusiobetonin raaka-aineena. Rakennuskohteissa käytettäville rakennusmateriaaleille vaaditaan CE-merkintä, myös betonimurskeelle. [69.]

Standardin SFS-EN 13242 mukaisesti on CE-merkitty useiden valmistajien betonimurskeet. Standardi SFS-EN 13242, koskee kuitenkin vain maa- ja vesirakentamisessa käytettäviä sitoutumattomia ja sidottuja kiviaineksia. Uusiobetonin valmistuksessa voitaisiin helposti ja luotettavasti alkaa hyödyntämään vastaavalla menetelmällä valmistettua mursketta. Myös valmisbetonin ja betonituotteiden valmistuksesta saadaan kierrätettävää betonimursketta, joka on yleensä puhtaampaa verrattuna purkubetonista saatavaan murskeeseen. Käyttämällä uusiobetonin valmistuksessa betonimurskeesta jalostettua uusiokiviainesta, voitaisiin mahdollisesti vähentää tarvittavaa sementin määrää. Uusiokiviaineksen käyttö betonissa aiheuttaa lujuuden alenemista, ja se saattaa aiheuttaa myös muiden ominaisuuksien heikkenemistä. Tutkimukset ovat osoittaneet, että korkeammalla uusiokiviaineksella on positiiviset vaikutukset uusiobetonin ominaisuuksiin. Käyttäessä uusiokiviainesta tulisi ottaa huomioon, sen parempi imeytymiskyky, alhaisempi ominaispaino sekä korkeampi kloridipitoisuus. Uusiobetonissa kuivumiskutistuminen ja viruminen on suurempaa kuin tavallisessa betonissa. Valmistustekniikkaa kehittämällä voitaisiin kuitenkin parantaa uusiobetonin ominaisuuksia. Monissa Euroopan maissa muun muassa Tanskassa, Alankomaissa ja Belgiassa betonipurkujätettä hyödynnetään yleisesti uusiokiviaineksena betonissa. [69; 70.]

## 9.2 Betonielementtien uusio- ja uudelleenkäyttö

Kierrättämisellä on suuri rooli kestävä kehityksen mukaisen kestävä rakentamisen tavoitteiden saavuttamiseksi. Sillä voidaan vähentää rakentamisen aiheuttamaa luonnonvarojen kulutusta, ja vähentää rakentamisesta syntyvien jätteiden määrää. Uusio- ja uudelleenkäytöllä saavutetaan säästöä raaka-aineissa ja energiankulutuksessa. Sen avulla pystytään vähentämään myös päästöjä ja kaatopaikkajätteitä. Tämä korostuu etenkin betonielementtien uusiokäytössä, sillä betonielementtien valmistus kuluttaa paljon energiaa. Jotta kierrätyksestä saadaan mahdollisimman materiaalitehokas, se tulee ulottua kaikille rakennuksen sisältämille tasoille sekä rakennuksen koko elinkaaren ajalle.

Betonielementtien kierrättäminen ja osien uudelleenkäyttö on vaihtoehto kokonaan purkamiselle. Betoni on Suomessa selvästi yleisin rakennusten runkomateriaali, ja sen osuus on 98% kaikista runkomateriaaleista. Suomessa betonielementtien kierrätys ja uudelleenkäyttö nousee merkitykselliseksi, sillä Suomi on betonielementtitekniikan käytössä maailman kärkimaita. Kierrätys ja uudelleenkäyttö tulisi ottaa huomioon myös uusien elementtirakennusten suunnittelussa. Suomessa rakennuskanta on suhteellisen nuorta, sillä 70 % rakennuksista on rakennettu vuoden 1960 jälkeen. Aikakaudelle tyypillisesti niiden rakentamiseen on käytetty pääsääntöisesti rakennusmateriaalina betonia sekä elementtitekniikkaa. 1970-luvulla rakennettiin kymmeniä tuhansia elementtikerrostaloasuntoja. Rakennuksista ei tullut pitkäaikaisia, ja rakennuksia joudutaan purkamaan verrattain nuorina. Osa näistä elementtitaloista on jo tullut elinkaarensa päähän, ja niiden purkua harkitaan tai niitä ollaan jo purkamassa. Ne tarjoavat paljon potentiaalista materiaalia uudelleenkäyttöä ajatellen. [71.]

Betonielementtien uudelleenkäyttö ja osapurkaminen edellyttää hellävaraista purkua. Se tuo haasteita uudelleenkäytölle, sillä purkumenetelmiä, jotka eivät vaurioita rakenteita, on vähän. Elementtien tapaan myös paikallavaletusta betonista timanttisahalla leikattuja paloja voidaan käyttää uudelleen. Puretut elementit lajitellaan vaurioitumisen mukaan erilaisiin kuntoluokkiin. Tarvittaessa elementeistä otetaan erilaisia kelpoisuuskokeita, kuten puristuslujuus, kantokyky, terästen korroosio ja asema sekä betonin karbonatisoitusaste. Halutessaan kaikille osille voidaan suorittaa kokeet ensimmäisen koerakennuksen yhteydessä, jos poikkeamia ei löydy kokeita voidaan vähentää. Kelpoisuuskokeiden tarpeellisuus arvioidaan myös niiden tulevien uudelleenkäyttökohteiden mukaisesti. [71.]

Betonielementtien kierrätystä ja uudelleenkäyttömahdollisuuksia on tutkittu jo 1990-luvun alusta lähtien Saksassa, Berliinin teknillisessä yliopistossa sekä Cottbusin teknillisessä yliopistossa. Vuonna 1993 tutkimuksessa tutkittiin DDR:n aikaisista elementtitaloista purettujen elementtien uudelleenkäyttömahdollisuuksia. Silloin todettiin yläpohjien kokonaisuutena irrottaminen ja uudelleenkäyttö mahdolliseksi. Tutkimukset laajenivat myöhemmin myös muiden elementtien uudelleenkäyttömahdollisuuksien tutkimiseen. Saksalaisten yliopistojen tutkimuksissa todettiin myös, että elementtien uudelleenkäyttö on mahdollista, vaikka niitä ei olisi erikseen suunniteltu uudelleenkäytettäväksi. [71.]

2000-luvulla käynnistettiin liittovaltion Stadtumbau Ost -kaupunkireformiohjelma, joka on saksalaisten betonielementtien uudelleenkäytön tutkimusten taustalla. Toisistaan

hieman poikkeavia betonielementtien uudelleenkäyttöjärjestelmiä kehitettiin eri puolilla maata ohjelman yhteydessä. 2000-luvulla Saksassa oli ylitarjontaa asunnoista, erityisesti taantuvilla itäisillä kaupunkiseuduilla. Saksassa oli 1,3 miljoonaa asuntoa tyhjiillään vuonna 2003, joista suuri osa oli DDR:n aikaisia elementtitaloja. Nämä elementtitalot eivät ole houkuttelevia asuntomarkkinoilla. Kuitenkin kysyntää oli erityisesti omakoti- ja paritaloille. Ohjelman tavoitteena oli muun muassa vähentää asuntojen ylitarjontaa purkamalla, parantamalla ja monipuolistamalla elementtitalojen arkkitehtuuria, sekä täydennys rakentaa olemassa olevaan infrastruktuuriin tukeutumalla. Arvioitiin, että Saksassa purettavia elementtikerrostaloja oli noin 200 000 kappaletta. Kierrätystä haluttiin edistää, ja betonielementtien uudelleenkäytön mahdollisuuksia haluttiin tutkia purkutoiminnan yhteydessä. Ohjelma mahdollisti tutkimustulosten testaamisen käytännössä ja koerakentamiskohteiden aloittamisen. [71.]

Betonielementtien uudelleenkäyttöä sekä osapurkamista on sittemmin kokeiltu monessa eri kohteessa. Seuraavissa kappaleissa on esitetty rakennuskohteita, missä osapurkamista ja betonielementtien uudelleenkäyttöä on kokeiltu. [71.]

Berliinin Marzahn-lähiöön oli rakennettu vuonna 1985 11-kerroksisia lamellikerrostaloja, joissa oli yhteensä 1607 asuntoa. Rakennukset olivat vuokrataloja, jotka kärsivät matalasta käyttöasteesta. Talot purettiin osittain, eli tässä tapauksessa osa madallettiin 2-3 kerroksisiksi ja osa 5–6-kerroksisiksi. Kuvassa 21 ja 22 on esitetty osittain puretut talot ennen ja jälkeen. Muokatut talot sisälsivät yhteensä 409 asuntoa, kattoterasseja ja asuntopihoja. Osapurkamisen projekti valmistui vuonna 2005, ja loi samalla uuden värikkään sekä modernimman ilmeen aiemman harmauden tilalle. Korjauksen jälkeen korttelialue nimettiin Ahrensfelder Terrasseniksi. [71.]





Kuva 21. 11-kerroksiset lamellitalot ennen muutosta. [71.]



Kuva 22. Ahrensfielder Terrassen muutoksen jälkeen. [71.]

Berliinin teknillisen yliopiston rakennuslaboratorioon koottiin uudelleenkäytettävistä elementeistä koerakennus. Koerakennus oli 6 x 6 m:n minikodiksi sisustettu paviljonki, jota arkkitehdit tutkivat työssään. Koerakennuksen runkoelementit olivat peräisin Marzahn -lähiöstä madalletusta asuinkerrostalosta, ja niiden kelpoisuus uudelleenkäyttöön tutkittiin kokein ja mittauksin. Paviljonki siirrettiin rakennuslaboratoriosta Berliinin keskustassa sijaitsevaan Mittenin kaupunginosaan, jossa se on toiminut taidegalleria Plattenplastina vuodesta 2009. [71.]

Ensimmäinen todellinen Berliinin teknillisen yliopiston koerakennuskohde oli kuitenkin kaksikerroksinen omakotitalo Berliinin läheisyydessä. Vuonna 2005 valmistunut koerakennus on nimeltään Haus Z. Omakotitalon ja tontilla sijaitsevan kaksipaikkaisen autotallin koko rakennusaika oli viisi kuukautta. Runko ja vaippa tulivat noin 30-40% edullisemmaksi, kuin uusista raaka-aineista rakennettaessa. Runkomateriaali saatiin ilmaiseksi Marzahin -lähiöstä puretusta asuinkerrostalosta. Koerakennukseen käytettiin yhteensä 22 väliseinäelementtiä ja 27 välipohjaelementtiä. Elementit kuljetettiin valmiiksi oikeaan muotoon leikattuina uudelle rakennuspaikalleen noin viiden kilometrin päähän. [71.]

Toinen todellinen kohde oli paritalo Berliinin esikaupungissa. Tätä koerakennusta kutsuttiin nimellä Haus L. Sen rakentamiseen hyödynnettiin yhteensä 50 väliseinäelementtiä ja 60 välipohjaelementtiä. Kohde eroaa Haus Z:sta siten, että siinä kokeiltiin kaksikerroksisen korkeantilan rakentamista olohuoneeseen sekä harjakaton valmistamista elementeistä leikkaamalla. [71.]

Saksan lisäksi osittaista purkamista on kokeiltu muun muassa Ruotsissa ja Suomessa. Suomessa osittaista purkamista on kokeiltu Raahessa Kummatin ongelmallisessa kaupunginosassa. Kummatin asunnot ovat pääsääntöisesti kaupungin vuokratalo-yhtiön omistamia, eivätkä asuntomarkkinoilla houkuttelevimpia vaihtoehtoja. Osa asunnoista oli purkukuntoisia, sekä osa isoista perheasunnoista oli tyhjillään kysynnän puutteesta johtuen. Vuonna 2005 järjestettiin ideakilpailu, jossa ehdoksi asetettiin, ettei yhtään rakennusta saanut esittää purettavaksi kokonaan. Harri Hagan arkkitehtitoimisto voitti kilpailun, ja esitti suunnitelmat rakennusten madaltamiseksi sekä asuntojen purkamiseksi. [71.]

Asunnoista haluttiin esteettömiä, mikä näkyi kylpyhuoneratkaisuissa ja huoneistojen avaruudessa sekä talojen hissit suurennettiin. 50 neliön kaksiot olivat ehdottomasti halutuin huoneistotyyppi tulevassa asuntojakauksessa, ja myös senioriasumiseen mahdollistavia palveluja tarvittiin. Projekti toteutettiin vuosina 2008-2015, muutaman korjattavan rakennuksen vuosivauhtia. Projektilla oli tiukat taloudelliset rajoitukset, joten suunnitteluvaihtoehtoja tehtäessä oli panos-tuotosajattelulla suuri merkitys. Kuvassa 23, on kuvattu Raahen Kummatin lähiö ennen korjauksia 1970-luvulla. [72.]



Kuva 23. Taustalla Raahen Kummatin lähiö 1970-luvulla. [72.]

Kummatissa korjattiin ensin kolme matalaa elementtikerrostaloa sekä neljä tornitaloa. Kuvassa 24 on kuvattuna tornitalot korjauksen jälkeen. Matalat elementtikerrostalot olivat tyypillisiä kolmilamellisia taloja, joissa jokaisessa oli lähes 600 erilaista elementtiä. Kokonaan puretusta kolmekerroksisesta rakennuksesta syntyy noin 2500 tonnia jätettä, joista 95% oli betonia. Kolmikerroksisen rakennuksen valmistuksessa syntyneet hiilidioksidipäästöt olivat olleet 250 000 kiloa, ja siihen oli käytetty merkittävä määrä uusiutumattomia luonnonvaroja sekä energiaa. Kummatissa kehitettiin myös purkutekniikkaa, jotta syntyisi mahdollisimman vähän jätettä. Valtaosa purettavasta materiaalista päätyi



kierrätettäväksi. Puretuista elementeistä osa myytiin uusiokäyttöön maatalousrakennuksiin, ja osa uusiokäytettiin paikallisesti muun muassa huoltorakennukseen, piharakennuksiin sekä autokatoksiin. Kestävän kehityksen kannalta rakennusosien korjaaminen ja kunnostaminen on tärkeää. Se on myös luonnollinen prosessi rakennetussa ympäristössä. [72.]



Kuva 24. Kummatin lähiön tornitalot korjauksen jälkeen. [72.]

## 10 Kestävän kehityksen vaikutus rakennesuunnitteluun

Rakentamista koskevat yleiset edellytykset, olennaiset tekniset vaatimukset sekä rakentamisen lupamenettely ja viranomaisvalvonta määritellään maankäyttö- ja rakennuslaissa. Rakennesuunnittelu perustuu Eurokoodi-mitoitusjärjestelmään sekä Suomen lakeihin ja asetuksiin. [73, s. 7.]

Rakennesuunnittelijan on suunniteltava rakenteet siten, että ne kestävät niille kohdistuvat kuormat sekä soveltuvat rakennuspaikan olosuhteisiin ja kestävät koko suunnitellun käyttöiän. Rakennesuunnittelija määrittelee betonin vähimmäislujuusluokan muun

muassa rakenteeseen kohdistuvan kuormituksen ja rasitusluokan perusteella. Betonielementtitehtaalla ja työmaalla määritellään betoniin tarvittavat lisäaineet muiden ominaisuuksien lisäksi. Rakennesuunnitelmien tulee sisältää vähintään seuraavat tiedot betonista: lujuusluokka, betonipeitteen nimellispaksuus, laadunarvosteluikä, jos muu kuin 28 vrk, erityisvaatimukset sideaineelle tarvittaessa, betonin koostumukseen liittyvät poikkeavat vaatimukset sekä kiviaineksen ylänimellisraja. [74.]

Rakennuksen runko on yleensä merkittävin tekijä rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen osalta, sen osuus on jopa 60%. Yleensä rakennuksen tilaaja tai arkkitehti määrittävät rakennuksessa käytettävät materiaalit konsultoimalla tarvittaessa rakennesuunnittelijan kanssa. Rakennusmateriaaleiksi voidaan valita esimerkiksi betonin, teräksen tai puun lisäksi myös niiden yhdistelmiä. Muun muassa betonirakenteiden kestävyys suunnitellaan usein varmuuden vuoksi ohjearvoja suuremmaksi, jolloin betonin menekki on suurempaa. Myös betonin toimittajat varmistavat betonin lujuuden ja käytettävä betoni on yleensä annettua arvoa lujempaa. Tämän toimintatavan seurauksena lopullisen rakenteen lujuus on yleisesti varmalla puolella. Optimoimalla rakenteet vastaamaan paremmin oikeita kuormitusolosuhteita voitaisiin vähentää betonin kulutusta. Mitä enemmän betonia käytetään, sitä enemmän siitä syntyy hiilidioksidipäästöjä. Rakennesuunnittelijan tulee huomioida suunnittelussa myös rakenteiden käyttöikä. Rakenteet tulee suunnitella siten, että käyttöikä on mahdollisimman pitkä ja vaurioriskit mahdollisimman pienet. Suunniteltu käyttöikä on usein lyhyempi kuin rakennuksen todellinen käyttöikä. Rakennuksen käyttöiän määrittää yleensä tilaaja tai arkkitehti. Myös rakenteiden huollontarve tulee huomioida suunnittelussa, sillä se voi vaihdella suuresti. [74.]

Rambollin rakennetekniikan toimialalla on tehty selvitystyötä vähähiiliseen rakentamiseen liittyen, muun muassa rakennusten, rakennusosien ja rakennetyyppien hiilijalanjäljen laskemista. Rakennusten hiilijalanjälki pystytään laskemaan One Click LCA -laskentaohjelmalla. One Click LCA on verkkopohjainen sovellus, jonka avulla voidaan määrittää koko rakennuksen tai rakennuksen osien hiilijalanjälki sekä elinkaaren aikainen ympäristövaikutus. One Click LCA tukee myös ympäristöministeriön arviointimenetelmää. Laskennan pohjalta pyritään valitsemaan vähähiilisemmät vaihtoehdot. Sen pohjalta pystytään parantamaan suunnitelmia vähähiilisempään suuntaan. Rakennustyyppien hiilijalanjäljen laskentaa on pilotoitu onnistuneesti Ida Aalbergin tien -projektissa ja sitä tullaan tekemään jatkossa myös muissakin kohteissa. [75; 76.]

Kiertotalous on osa kestävästä rakennesuunnittelusta, sillä kiertotalouden tavoitteet tulee huomioida jo suunnitteluvaiheessa sekä koko rakennuksen elinkaaren ajalta. Muista osa-alueista, kuten arkkitehtisuunnittelusta tai taloteknisestä suunnittelusta aiheutuvat ympäristövaikutukset ovat yleensä suurempia, kuin rakennesuunnittelun ratkaisusta aiheutuvat vaikutukset. Jätteen vähentäminen ja käytetyt raaka-aineet tulee huomioida kestävässä rakennesuunnittelussa. Myös rakennusten ja rakennusosien uusio- ja uudelleenkäyttö sekä kierrätysmateriaaleista valmistettujen tuotteiden käyttö tulee huomioida kestävässä rakennesuunnittelussa. Rakennesuunnittelussa tulee tehdä myös elinkaarisuunnittelua eli pyrkiä kestävässä ratkaisuun koko rakennuksen elinkaaren ajalta. Elinkaarisuunnittelun tärkeimpiin tavoitteisiin kuuluu muun muassa materiaalitehokkuus sekä jätteiden vähentäminen varautumalla rakennuksen mahdollisiin käyttömuutoksiin ja rakennuksen kierrätettävyyteen. [77.]

Rambollilla tehdään osana rakennetekniikan kiertotaloutta rakennusten purkusuunnitelmia. Osaksi purkusuunnittelua kuuluu purkukatselmus. Purkukatselmus on vapaaehtoinen ennen purkutyötä tehtävä selvitys. Purkukatselmus sisältää haitta-ainekartoituksen sekä purkumateriaaliselvityksen. Haitta-ainekartoituksessa selvitetään haitta-aineiden määrät, sijainti sekä purkusuositukset. Purkumateriaaliselvityksessä selvitetään purkumateriaalien määrä, niiden sijainti sekä purkusuositukset. Lisäksi määritellään tavoitteet, hyödyntämissuositukset sekä uudelleenkäyttöpotentiaali. Tällä hetkellä on käynnissä purkumateriaalikalibroituksen pilottihanke Helsingin Vesalan ala-asteelle. Pilottihanke on esitetty tarkemmin kuvassa 25. [76.]

## VESALAN ALA-ASTE – Purkumateriaalikalibroitus, 2019

### HAASTE

EU:n jätedirektiivi edellyttää muun kuin maa- ja kiviainekseen luettavan rakennus- ja purkujätteen materiaalina hyödyntämisen nostamista 70 %:iin vuoteen 2020 mennessä.

### MITÄ TEIMME

Tavoitteena oli:

- laatia purkumateriaalien määrät (sisältäen irt- ja kiintokalusteet) sisältävä purkukartoitus
- tunnistaa uudelleenkäytettäviä rakennusosia ja/tai kalusteita/laitteita
- testata YM:n laatimaa Purkukartoituksen raportointilomaketta

### VAIKUTUS

Hankkeessa inventoitiin purettava koulu (rakenteet ja kalusteet) ja luotiin tavoitteet purkujätteen käsittelylle materiaaleittain eriteltynä uudelleenkäytettäviin rakennusosiin ja kalusteisiin sekä tavanomaiseen purkujätteeseen.

Kuva 25. Rambollin tekemä purkumateriaalikalibroitus Vesalan ala-asteelle. [76.]

## 11 Yhteenveto

Betonin pitkä historia ulottuu aina antiikin Roomaan tai jopa muinaiseen Egyptiin asti. Historiaan mahtuu paljon betonin kehitystyötä ja tutkimusta. Betonista rakennetut rakennukset tai rakenneosat ovat yleisesti säilyneet hyvinä. Betonin suosio perustuu lujuuteen, jäykkyyteen, kosteuden keston, turvallisuuteen, muokattavuuteen ja edulliseen hintaan. Betoni ei ole turhaan maailman yleisin rakennusmateriaali.

Myös betonilla on huonot puolensa. Betonin osa-aineen sementin valmistuksesta aiheutuu suuret hiilidioksidipäästöt. Tämä on tiedetty jo pitkään, mutta vasta kestävä kehityksen ja ilmastonmuutoksen käsitteiden ja tietoisuuden yleistyessä asiaan on herätty. Maailmalla ja Suomessa on tehty paljon tutkimusta siitä, miten betonin hiilidioksidipäästöjä voitaisiin pienentää tai miten sementti voitaisiin korvata. Suomessa kehitys- ja tutkimustyötä on vauhdittanut entisestään hallituksen asettama tavoite, Suomi hiilineutraaliksi vuoteen 2035 mennessä. Vähähiilinen rakentaminen sekä rakennuksen koko elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen laskeminen ovat omalta osalta vauhdittaneet rakennusmateriaalien kehitystä ja tutkimusta hiilineutraalimpaan suuntaan. Rakennuksen hiilijalanjäljen arviointiin on kehitetty arviointimenetelmä, jotta päästöjä pystytään mittaamaan ja sitä kautta vähentämään.

Betonialan toimijat ovat ottaneet hiilidioksidahaasteen tosissaan, ja tekevät yhteistyötä muun muassa eri yliopistojen ja ammattikorkeakoulujen kanssa. Avainasemassa hiilidioksidahaasteessa on Suomen ainoa sementinvalmistaja Finnsementti. Yritys on tehnyt paljon töitä asian eteen ja saavuttanut päästövähennyksiä. Päästövähennyksiin on päästy jo olemassa olevalla teknologialla, energiatehokkuuden parantamisella, sementin seostamisella, kierrätyspolttoaineiden käytöllä sekä kalkkikiven korvaamisella vaihtoehtoisilla raaka-aineilla. Finnsementillä kehitys- ja tutkimustyö jatkuu. Finnsementillä on taustalla suuri CRH-konserni, joka omalta osalta mahdollistaa laaja-alaisen ja globaalin tutkimuksen.

Hiilineutraalimpia vaihtoehtoja betonille on etsitty pitkään, mutta yhtä potentiaalista korvaajaa ei ole löytynyt. Uudella tekniikalla tai uusilla raaka-aineilla valmistettavaa betonia pitäisi pystyä valmistamaan todella suurella volyymilla. Sementin seostaminen on ollut hyvä alku hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi, mutta sillä ei pystytä saavuttamaan tarpeeksi suuria hiilidioksidipäästövähennyksiä.



Ruduksen kehittämällä vihreällä betonilla, pystytään korvaamaan vain osa rakenteista. Sillä sen käyttö rajautuu perustusten ja sisätilojen betonointiin. Vihreän betonin ympäristöystävällisyys perustuu seostamiseen. Vihreä betoni ja päästökompensoitu hiilineutraalibetoni ovat pieniä, mutta tärkeitä askeleita kohti hiilineutraalimpaa betonia.

Myös VTT:n kehittämä hiilidioksidikövetetty betoni on vain täydentävä teknologia. Silläkään ei pystytä korvaamaan betonin valmistuksesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä kuin osittain.

Geopolymeeribetoni on todettu toimivaksi perinteisen betonin korvaajaksi, mutta sen valmistamiseen tarvittavat raaka-aineet eivät riitä. Teollisuuden sivuvirroista ei saada tarpeeksi raaka-ainetta geopolymeerien valmistukseen. Geopolymeeribetonia pystytään tällä hetkellä valmistamaan vain pieniä määriä. Tutkimus- ja kehitystyö geopolymeerien parissa jatkuu edelleen.

Puurakentaminen on hyvä vaihtoehto betonin kulutuksen vähentämiseen. Puurakentamisesta puhuttaessa täytyy kuitenkin huomioida, että myös puurunkoisessa rakennuksessa on betoniosia, esimerkiksi perustukset ovat usein betonia. Puulla ei pystytä korvaamaan betonia täysimääräisesti. Puu ei riitä raaka-aineena kattamaan kaikkea betonirakentamista. Puurakentamisen teknologian pitäisi vielä kehittyä, jotta siitä voitaisiin alkaa puhumaan betonin korvaajana. Myös suunnittelijoiden osaamista puurakentamiseen pitäisi lisätä.

Betonin kiertotaloudesta löytyy kestävän kehityksen näkökulmasta hyviä asioita. Betoni on 100-prosenttisesti kierrätettävä materiaali, mutta Suomessa kierrätysaste on vain noin 80%. Tätä voitaisiin kuitenkin lisätä jo olemassa olevilla tekniikoilla. Betonielementtien uusio- ja uudelleenkäyttö on varteenotettava teknologia, jolla voitaisiin säästää uuden betonin valmistuksesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Betonielementtien uusio- ja uudelleenkäytöstä on tehty hyvää tutkimusta Tampereen yliopistolla. Tämä mahdollisuus pitäisi saattaa myös suunnittelijoiden tietoisuuteen, jotta sitä pystyttäisiin hyödyntämään enemmän.

Rakennesuunnittelussa pystytään vaikuttamaan betonin kestävään kehitykseen, mutta vain pieneltä osin. Rakennesuunnittelija pystyy vaikuttamaan materiaalien valintaan, optimoimaan betonirakenteet hoikemmaksi, ja suunnittelemaan käyttöiän mahdollisimman

pitkäksi sekä minimoimaan vaurioitumisen riskit. Osana kestävästä rakennesuunnittelusta suunnittelija voi laatia purkusuunnitelmia, jotka lisäävät purettavien rakennusten kierrätystä.

Työn tulokseksi saatiin laaja selvitystyö, jossa on koottu yhteen olennaisia tutkimus- ja kehitystietoja aiheeseen liittyen. Työn ensimmäisessä osassa selvitettiin perusteita kestävästä kehityksestä sekä betonista materiaalina ja syvennettiin betonin historiaan. Toisessa osassa selvitettiin vähähiilisen rakentamisen tavoitteita ja määräyksiä, sekä selvitettiin, mitä betonin hiilineutraalisuuden tavoittelemisen eteen on jo tehty tai mitä ollaan tekemässä. Tutkimus- ja kehitystyötä aiheesta on tehty paljon, mutta sitä katsottiin pääosin talonrakentamisen sekä Suomen ja Suomeen liittyvästä näkökulmasta. Betoni materiaalina kestävässä kehityksessä on aiheeltaan erittäin laaja, joten rajaukset olivat paikallaan. Kirjallisuus selvityksenä toteutettu opinnäytetyö vaatii laajaa perehtymistä lähteaineistoihin sekä selvitystä mahdollisista asiantuntijoista. Paljon on tehty, mutta yksiselitteistä ratkaisua ei vielä ole. Suuria haasteita ovat käytettävän betonin volyyymi sekä tutkimuksiin ja kehitykseen tarvittava raha. Teknologian kehitys vaatii aina paljon rahaa ja aikaa. Kaikki tähän opinnäytetyöhön kootut asiat ovat hyviä ja toivottuja askeleita kohti hiilineutraalimpaa betonia.

## Lähteet

- 1 Historiaa ja toiminnan taustoja. Verkkoaineisto. Suomen YK-liitto. <<https://www.ykliitto.fi/yk-teemat/kestava-kehitys/historiaa-ja-toiminnan-taustoja>>. Luettu 25.11.2019
- 2 Rion ympäristökokous lähestyy epävarmoissa merkeissä. 2012. Verkkoaineisto. <<https://yle.fi/uutiset/3-6172545>>. Luettu 25.11.2019
- 3 Kestävä kehitys haltuun. Kuva. Suomen YK-liitto. <<https://www.ykliitto.fi/uutiset-media/uutiset/kestava-kehitys-haltuun-viela-voit-ilmoittautua>>.
- 4 Kestävän kehityksen tavoitteet. Verkkoaineisto. Suomen YK-liitto. <<https://www.ykliitto.fi/yk-teemat/kestava-kehitys/kestavan-kehityksen-tavoitteet>>. Luettu 25.11.2019
- 5 Käyhkö, Jukka. Globaalimuutos, planeetan rajat ja ihminen. Kuva. Turun Yliopisto. <[https://www.helsinki.fi/sites/default/files/atoms/files/kayhko\\_gloaalimuutos\\_241018-.pdf](https://www.helsinki.fi/sites/default/files/atoms/files/kayhko_gloaalimuutos_241018-.pdf)>.
- 6 Mitä on kestävä kehitys. 2017. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <[https://www.ym.fi/fi-fi/ymparisto/kestava\\_kehitys/mita\\_on\\_kestava\\_kehitys](https://www.ym.fi/fi-fi/ymparisto/kestava_kehitys/mita_on_kestava_kehitys)>. Luettu 5.11.2019
- 7 Mitä on kestävä kehitys. Kuva. Suomen ympäristöopisto, SYKLI. <<http://www03.edu.fi/aineistot/keke/yleistietoa/kestavakehitys.htm>>. Luettu 5.11.2019
- 8 Varovaisuusperiaate. Verkkoaineisto. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Varovaisuusperiaate>>. Luettu 25.11.2019
- 9 Egyptin pyramidit tehtiinkin ehkä valamalla. 2010. Verkkoaineisto. Tekniikka & Talous. <<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/egyptin-pyramidit-tehtiinkin-ehka-valamalla/8f67b937-a7ba-3b04-8d18-3dea84d58f73>>. Luettu 26.11.2019
- 10 Suomen betoniyhdistys. 2018. By201, betonitekniikan oppikirja. Vaasa: BY-koulu-tus Oy.
- 11 Betonin historia. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betonin-historia/>>. Luettu 28.11.2019
- 12 Elementtirakentamisen historia. Verkkoaineisto. <<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/valmisosarakentaminen/elementtirakentamisen-historia>>. Luettu 28.11.2019

- 13 Pepin, Roxanne. The History of Concrete. 2019. <<https://www.giatecscientific.com/education/the-history-of-concrete/>>. Luettu 29.11.2019
- 14 Berlin Robin. 2013. LEED-sertifikaatin asettamat vaatimukset hankekehitys- ja suunnitteluvaiheessa. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/56271/Opinnaytetyo\\_20130423.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/56271/Opinnaytetyo_20130423.pdf?sequence=1)>. Luettu 29.11.2019
- 15 80 vuotta sitten käsin rakennetun korsun betoni osoittautui lujemmaksi kuin nykyajan kerrostaloissa. 2019. Verkkoaineisto. <<https://yle.fi/uutiset/3-10724625>>. Luettu 28.11.2019
- 16 Salpalinja ja sotakorvaukset opettivat suomalaiset rakentamaan betonista ja elementeistä. 2019. Verkkoaineisto. <<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/salpalinja-ja-sotakorvaukset-opettivat-suomalaiset-rakentamaan-betonista-ja-elementeista-yhteen-korsuun-meni-45-tonnia-betoniterasta-ja-250-tonnia-sementtia/593a7892-5ae6-32fb-9d75-094934bff9fa>>. Luettu 28.11.2019
- 17 Miten betoni tuli Suomeen. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betonin-historia/miten-betoni-tuli-suomeen/>>. Luettu 28.11.2019
- 18 Porthania. Verkkoaineisto. Helsinki. <<https://www.myhelsinki.fi/fi/nae-ja-koe/nah-tavydydet/porthania>>. Luettu 28.11.2019
- 19 1970-luvun betonilähiöitä jyrätään nyt surutta. 2019. Uutinen. Helsingin sanomat. <<https://www.hs.fi/kaupunki/espoo/art-2000006130777.htm>>. Luettu 28.11.2019
- 20 Kokko, Outi. 1.11.2019. Pahasta päästäjästä hyväksi hiilinieluksi. Rakennuslehti.
- 21 Kiviaines. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/kiviaines/>> Luettu 13.11.2019
- 22 Lisäaineet. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/lisaaineet/>>. Luettu 3.12.2019
- 23 Sementti ja kasviuonekaasupäästöt. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>>. Luettu 3.12.2019
- 24 Betonin valmistus. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/>>. Luettu 3.12.2019
- 25 Virtanen, Juha. 2019. Betonitekniikka 1. Oppimateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

- 26 Ominaisuudet ja edut. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/>>. Luettu 4.12.2019
- 27 Eniten käytetty rakennusmateriaali maailmassa. Verkkoaineisto. <<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/valmisosarakentaminen/ymparistoominaisuudet/betoni-rakennusmateriaalina>>. Luettu 4.12.2019
- 28 Betoni säästää aikaa ja selvää rahaa. Verkkoaineisto. <<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/valmisosarakentaminen/ymparistoominaisuudet/lammonvarauskyky>>. Luettu 4.12.2019
- 29 Betonin vaurioituminen. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-vaurioituminen/>>. Luettu 4.12.2019
- 30 Mihin betonia käytetään. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/mihin-betonia-kaytetaan/>>. Luettu 4.12.2019
- 31 Vähähiilinen rakentaminen. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <[https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Rakentamisen\\_ohjaus/Vahahiilinen\\_rakentaminen](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Vahahiilinen_rakentaminen)>. Luettu 6.12.2019
- 32 Elinkaariarviointi, jalanjäljet ja panos-tuotosmalli. 2013. Verkkoaineisto. Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. <[https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus\\_ja\\_tuotanto/Tuotesuunnittelu\\_ja\\_tuotteet/Elinkaariarviointi\\_jalanjaljet\\_ja\\_panoistuotosmalli#Elinkaariarviointi%20\(LCA\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Tuotesuunnittelu_ja_tuotteet/Elinkaariarviointi_jalanjaljet_ja_panoistuotosmalli#Elinkaariarviointi%20(LCA))>. Luettu 17.01.2020.
- 33 Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö. <[http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM\\_2019\\_22\\_Rakennuksen\\_vahahiilisyyden\\_arviointimenetelma.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf)>. Luettu 6.12.2019
- 34 Tiekartta rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen vähentämiseksi valmisteilla. Verkkoaineisto. <[https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus\\_ja\\_tuotanto/Tiekartta\\_rakennusmateriaalien\\_hiilijala\(40813\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Tiekartta_rakennusmateriaalien_hiilijala(40813))>. Luettu 6.12.2019
- 35 Kioton pöytäkirja. Verkkoaineisto. <<http://ilmasto.org/ilmastonmuutos/ilmastopoliitikka/kansainvalinen-ilmastopoliitikka/kioton-poytakirja>>. Luettu 20.12.2019
- 36 Kuittinen, Matti. 2019. Erityisasiantuntija, Ympäristöministeriö. Keskustelu 13.11.2019

- 37 Kuittinen, Matti. 2019. Vähähiilisen rakentamisen säädöskehitys. Verkkodokumentti. <<https://www.vtt.fi/Documents/tapahtumat/1%20Kuittinen%20%28YM%29%20-%20V%20%28h%20%28hiilisen%20rakentamisen%20s%20%28a%20%28d%20%28b6skehitys.pdf>>. Luettu 6.12.2019
- 38 Vares, Sirje. 2019. Hiilijalanjälki, hiilikädenjälki ja hiilineutraalituotteet. Esitysmateriaali. VTT, Suomen betoni hiilineutraaliksi 2035 -seminaari. <<https://www.vtt.fi/Documents/tapahtumat/7%20Vares%20%28VTT%29%20-%20Hiilijalanj%20%28a%20%28l%20%28hiilik%20%28a%20%28denj%20%28a%20%28ja%20%28hiilineutraalit%20tuotteet.pdf>>.
- 39 CO2 vähentäminen betonirakentamisessa. Verkkodokumentti. Bionova. <[http://www.prizz.fi/sites/default/files/asiakaskuvat/Julkaisut/Bionova\\_CO2\\_vahentaminen\\_betonirakentamisessa\\_Prizztech\\_23marras2012.pdf](http://www.prizz.fi/sites/default/files/asiakaskuvat/Julkaisut/Bionova_CO2_vahentaminen_betonirakentamisessa_Prizztech_23marras2012.pdf)>. Luettu 3.12.2019
- 40 Ympäristöraportti 2019. Verkkodokumentti. Finnsementti. <[https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti\\_ymparistoraportti\\_2019\\_aukeamittain\\_lowres-1.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti_ymparistoraportti_2019_aukeamittain_lowres-1.pdf)>. Luettu 8.12.2019
- 41 Jussila, Matti. 2019. CON2CRETE tutkimushankkeen sisältö. Verkkoaineisto. <<https://concretesolution.fi/co2ncete-solution-tutkimushanke/>>. Luettu 8.12.2019
- 42 Leevelahti, Ulla. 2019. Ympäristöpäällikkö, Finnsementti. Keskustelu 3.12.2019
- 43 Betonikoulu. 2018. Verkkoaineisto. Rakentaja. <[https://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita\\_betoni\\_on.htm](https://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita_betoni_on.htm)>. Luettu 27.12.2019
- 44 Fiksumpi sementti, vähemmän päästöjä. Verkkodokumentti. Finnsementti. <[https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2018/09/plus\\_esite\\_flash.indd\\_.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2018/09/plus_esite_flash.indd_.pdf)>. Luettu 27.12.2019
- 45 Vihreäbetoni voi puolittaa betonin hiilidioksidipäästöt. 2012. Verkkoaineisto. <<https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/06/T5-Lumme-Vihre%C3%A4-betoni.pdf>>. Luettu 17.01.2020
- 46 What is a geopolymere. 2012. Verkkoaineisto. Geopolymer institute. <<https://www.geopolymer.org/science/introduction/>>. Luettu 28.12.2019
- 47 Davidovits, Joseph. 2005. Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable development solutions. E-kirja.
- 48 Tuominen, Raija. 2016. Geopolymeerit muuttavat maailmaa. Verkkoaineisto. Oulun yliopisto. <<https://www oulu.fi/yliopisto/node/41024>>. Luettu 3.1.2020

- 49 Yliniemi, Juho. 2019. Geopolymeeri -tutkija, Oulun yliopisto. Keskustelu 22.11.2019
- 50 Pulkkinen, Katja. 2019. Ekobetoni on vihreämpi vaihtoehto. Verkkoaineisto. Kemia-lehti. <[https://www.kemia-lehti.fi/wp-content/uploads/2019/03/Ekobetonin\\_on\\_vihreampi\\_vaihtoehto\\_Kemia-lehti\\_13\\_3\\_2019.pdf](https://www.kemia-lehti.fi/wp-content/uploads/2019/03/Ekobetonin_on_vihreampi_vaihtoehto_Kemia-lehti_13_3_2019.pdf)>. Luettu 3.1.2020
- 51 Oulun yliopiston innovaation pohjalta käyntiin laaja EU-hanke mineraalivillajätteen hyödyntämiseksi. Verkkoaineisto. <<https://www oulu.fi/yliopisto/node/59094>>. Luettu 3.1.2020
- 52 Illikainen, Mirja. 2019. Teollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen sementtiä korvaavana sideaineena. Verkkodokumentti. Oulun yliopisto. <<http://www.betoniyhdistys.fi/media/betonitutkimusseminaari/teollisuuden-sivuvirtojen-hyodyntaminen-sementtia-korvaavana-sideaineena-illikainen.pdf>>. Luettu 3.1.2020
- 53 Turning industrial waste streams into low carbon construction materials. Verkkoaineisto. <<https://betolar.com/>>. Luettu 4.1.2020
- 54 Betoni tuottaa enemmän ilmastopäästöjä kuin lentoliikenne. 2019. Yle-uutiset. <<https://yle.fi/uutiset/3-10816632>>. Luettu 4.1.2020
- 55 'World first' production run: 2,500 tonnes of geopolymers. 2012. Verkkoaineisto. Geopolymer institute. <<https://www.geopolymer.org/news/world-first-production-run-2500-tonnes-of-geopolymer/>>. Luettu 5.1.2020
- 56 World's first public building with structural Geopolymer Concrete. 2013. Verkkoaineisto. Geopolymer institute. <<https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>>. Luettu 5.1.2020
- 57 Muutetaan betonin ongelmat ratkaisuksi. Verkkoaineisto. VTT. <<https://vtt-blog.com/2019/12/16/muutetaan-betonin-ongelmat-ratkaisuksi/>>. Luettu 6.1.2020
- 58 Mäkikouri, Sampo. 2019. Hiilidioksidikivetetty betoni ja muut päästövähennyskeinot. Esitysmateriaali. VTT, Suomen betoni hiilineutraaliksi 2035 -seminaari. <<https://www.vtt.fi/Documents/tapahtumat/3%20M%c3%a4ki-kouri%20%28VTT%29%20-%20Hiilidioksidikivetetty%20betoni%20ja%20muut%20p%c3%a4%c3%a4st%c3%b6v%c3%a4hennyskeinot.pdf>>.
- 59 Itälä, Korpijärvi, Mäkikouri, Vehmas. 2019. CO2CRETE, "Low carbon to carbon negative concrete". Esitysmateriaali. VTT, Suomen betoni hiilineutraaliksi 2035 -seminaari. <<https://www.vtt.fi/Documents/tapahtumat/6%20Vehmas%20%28VTT%29%20-%20CO2CRETE.pdf>>.



- 60 Ensimmäiset hiilineutraalit betonituotteet markkinoille. 2019. Verkkoaineisto. STT-info. <<https://www.sttinfo.fi/tiedote/ensimmaiset-hiilineutraalit-betonituotteet-markkinoille?publisherId=69817745&releaseld=69869828>>. Luettu 7.1.2020
- 61 Lujabetoni tuo markkinoille päästökompensoitua hiilineutraalia valmisbetonia. 2019. Verkkoaineisto. Lujabetoni. <<https://www.sttinfo.fi/tiedote/ensimmaiset-hiilineutraalit-betonituotteet-markkinoille?publisherId=69817745&releaseld=69869828>>. Luettu 7.1.2020
- 62 Karjalainen, Markku. 2019. Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa. Verkkoaineisto. Puuinfo. <<https://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakentamisen/puurakentamisen-asema-ja-mahdollisuudet-suomessa>>. Luettu 7.1.2020
- 63 Puurakentaminen ja ekologinen kestävyys. Verkkoaineisto. Puuinfo. <<https://www.puuinfo.fi/node/1505>>. Luettu 7.1.2020
- 64 Puukerrostalorakentaminen vaatii erityisosaamista ja omia järjestelmiä. 2017. Verkkoaineisto. VTT. <<https://www.vtt.fi/medialle/uutiset/puukerrostalorakentaminen-vaatii-erityisosaamista-ja-omia-j%C3%A4rjestelmi%C3%A4>>. Luettu 7.1.2020
- 65 Puurakentaminen Euroopassa. Verkkodokumentti. VTT. <<https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2017/T297.pdf>>. Luettu 7.1.2020
- 66 Cement, concrete and the circular economy. 2016. Verkkoaineisto. Cembureau. <[https://www.youtube.com/watch?v=GMV5o\\_TS-dk](https://www.youtube.com/watch?v=GMV5o_TS-dk)>. Luettu 16.12.2019
- 67 Kierotalous toimii. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus Ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ekologisuus/kierratys/>>. Luettu 22.12.2019
- 68 Heilä, Sampo. 2011. Betoniteollisuus kohti suljettua kiertoa. Verkkoaineisto. Betoni-lehti. <[https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1102\\_s42-45.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1102_s42-45.pdf)>. Luettu 17.1.2020
- 69 Nieminen, Anna-Maria. 2015. Murskatun betonin hyödyntäminen uusiokiviaineksenä betonissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu.
- 70 Aggregates for concrete. Verkkoaineisto. Greenspec. <<http://www.greenspec.co.uk/building-design/aggregates-for-concrete/>>. Luettu 8.1.2019
- 71 Huuhka, Satu. 2010. Betonielementtien ja muiden rakennusosien uudelleenkäyttö uudisrakentamisessa ja lähiöiden energiatehokkaassa korjaus- ja täydennysrakentamisessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.

- 72 Koy Raahen Kummatti- rakennusten osapurku ja betonielementtien uudelleen-  
käyttö. Verkkodokumentti. <[https://www.rakennustieto.fi/Down-  
loads/RK/RK130304.pdf](https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK130304.pdf)>. Luettu 23.12.2019
- 73 Suomen betoniyhdistys. 2016. By 65, betoninormit. Vaasa: BY-koulutus Oy.
- 74 Kadak, Jaak. 2020. Osastopäällikkö, elementtisuunnittelu. Ramboll Finland Oy,  
betonirakenteet ja asuntorakentamisen yksikkö. Keskustelu 09.01.2020.
- 75 Majoinen, Laura. 2020. Kehityspäällikkö, kestävä kehitys. Ramboll Finland Oy,  
korjausrakentaminen ja tutkimukset yksikkö. Keskustelu 09.01.2020.
- 76 Majoinen, Laura. 2019. Kestävä kehitys rakennesuunnittelussa. Koulutusmateri-  
aali.
- 77 Vilander, Miku. 2019. Kiertotalous rakennesuunnittelussa. Kandidityö. Aalto-yli-  
opisto, Insinööritieteiden korkeakoulu.