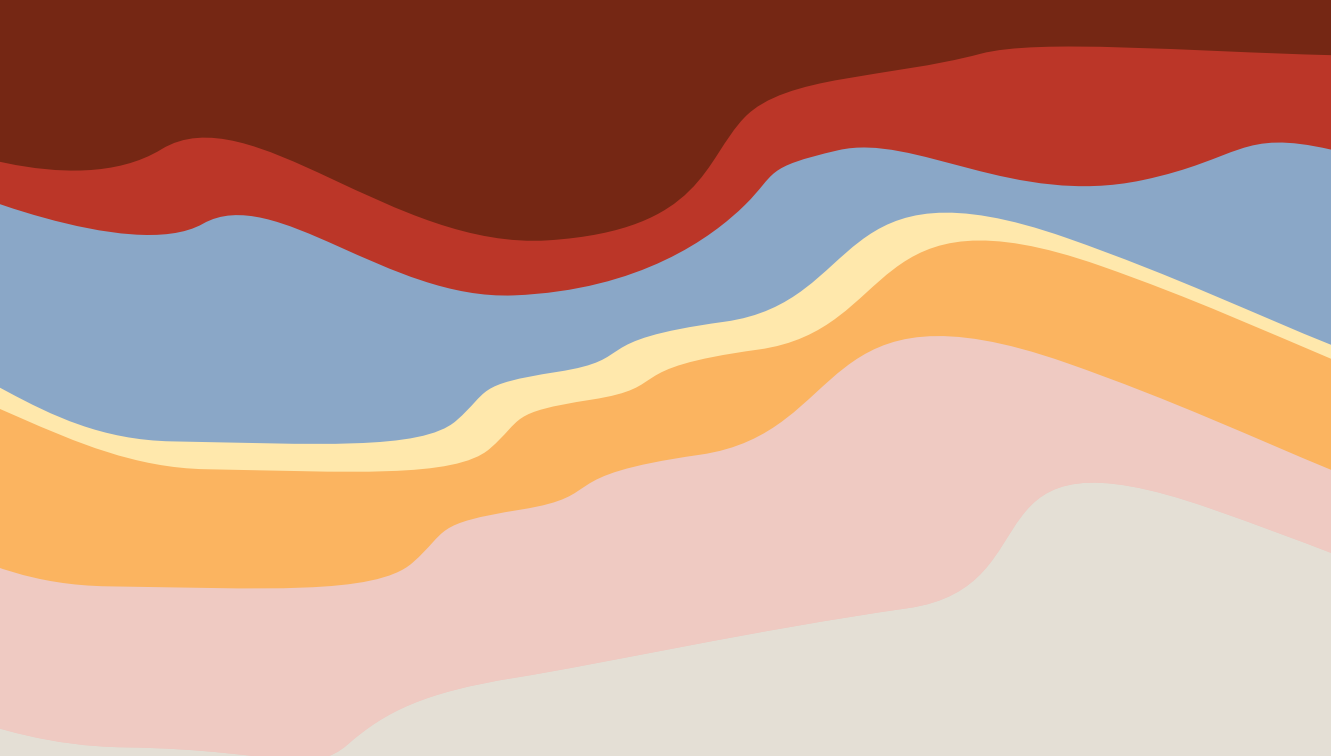




BETONI- OPTIMISMI

*Betonin kestävydestä ja arkkitehdin vaikutusmahdollisuuksista
ilmastonmuutoksen aikakaudella*



Diplomityö, Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin yksikkö
Niko Kotkavuo

BETONIOPTIMISMI –

Betonin kestävydestä ja arkkitehdin vaikutusmahdollisuuksista ilmastonmuutoksen aikakaudella

Diplomityö

87 s. + liitteet 9 s.

Oulun Yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Arkkitehtuurin yksikkö

Pääohjaaja: Janne Pihlajaniemi



Niko Kotkavuo 16.3.2022.

Kaikki kuvat ja kuviot, ellei erikseen mainittu,
Niko Kotkavuo

Tiivistelmä

Betoni on maailman ylivertaisesti eniten käytetty rakennusmateriaali, ja sen keskeisen osa-aineen, portlandsementin tuotanto on sekä hiili-intensiivinen että päästöiltään vaikeasti vähennettävä prosessi. Sementin tuotannon hiili-intensiivisyyden ja betonin valtavan kuluksen vuoksi betonin osuus kaikista maailmanlaajuisista hiilidioksidipäästöistä on jopa noin 7 % luokkaa. Luku tekee betonista toisaalta merkittävän ympäristöongelman, mutta myös yhden selkeän kohteen päästövähennystoimia ajatellen.

Korkeista päästöistään huolimatta betoni on ihmiskunnalle kriittinen materiaali, jota voidaan pitää viimeisen sadan vuoden aikana tapahtuneelle yhteiskunnalliselle ja taloudelliselle kehitykselle välttämättömänä. Siinä missä muiden hyödykkeiden kulutus on korkein nimenomaan vauraimmissa ja kehittyneimissä maissa, betonin asukaskohtainen kulutus on ollut laskussa jo 70-luvun öljykriisistä lähtien. Valtaosa betoninkulutuksesta tapahtuukin tälläkin hetkellä juuri nousevissa talouksissa, jotka kaupungistuvat vauhdilla ja tarvitsevat uutta infrastruktuuria. Ilmastonmuutoksen vuoksi paine saada betonin hiilijalanjälkeä reilusti madallettua ovat erittäin korkeat, mutta

samalla betonin maailmanlaajuinen kulutus on nousussa.

Päästövähennykseen on monia keinoja, niin sementintuotannon prosessien, rakentamisen materiaalitehokkuuden kuin elinkaaren jälkeisen kierrätyksenkin kehittämisen kautta. Arkkitehdin vaikutusmahdollisuudet betonin hiilipäästöjen vähentämisessä liittyvät ennen kaikkea materiaalitehokkuuteen, jota voi edistää runkoratkaisun valinnalla ja mitoituksella, sekä muuntojouston ja purettavuuden suunnittelulla. Erityisesti purettavaksi suunnitellut pilari- ja palkkiperusteiset ratkaisut ovat suositeltavia hyvän muuntojoustavuuden ja uudelleenkäytettävyyden vuoksi. Karbonatisoitumisen myötä syntyvää hiilinielua voidaan edistää joko käyttöiän aikana pintamateriaalivalinnoilla tai murskaamalla betoni elinkaarensa päässä. Rakennusten hiilijalanjälkeä voidaan vähentää myös passiivisin keinoin, hyödyntämällä betonin korkea lämpökapasiteetti aurinkoenergian varastoimisessa.

Avainsanat: betoni, kestävä rakentaminen, rakennuksen käyttöikä, muuntojousto, kiertotalous, betonin karbonatisoituminen, terminen massa

CONCRETE OPTIMISM –

On sustainability of concrete and architects' influence in the era of climate change

Master's thesis

87 p. + appendices 9 p.

University of Oulu

Faculty of Technology

Oulu School of Architecture

Thesis supervisor: Janne Pihlajaniemi

Unless otherwise stated, all images and graphs by
Niko Kotkavuo

Abstract

Concrete is the most used building material in the world and the production of its central constituent, Portland cement is a carbon intensive and hard to abate process. Because of the massive consumption of concrete and the carbon intensity of cement production, concrete is responsible for approximately 7 % of all global carbon dioxide emissions. On one hand it makes concrete a considerable environmental problem, and on the other, it represents a clear target for emission abatement action.

Despite the high level of emissions, concrete is a critical material for humanity, which one could consider as a necessity for the economic and social development in the past century. Whereas other goods and services are consumed the most in the wealthiest and most developed countries, per capita consumption of concrete has been on the decline since the 70s global oil crisis. Most of the current consumption of concrete happens in rising economies, which are experiencing a high rate of urbanisation and need new infrastructure. Due to climate change, pressures to abate the carbon emissions of concrete are very high, but at the same time the global demand for concrete is rising.

There are multiple ways for abatement of concrete related carbon emissions through the development of cement production processes as well as material efficiency of construction and better recycling and reuse at the end of service life. From an architect's perspective the opportunities for abatement are largely based on material efficiency, which can be achieved through the choice of structural system and dimensioning as well as design for flexibility and disassembly. Column and beam based systems that are designed for disassembly should be encouraged as they are both flexible and demountable for re-use. Carbon sink through carbonation can be enhanced at the end of concrete's life cycle by crushing it or during the life cycle via surface finish choices. Concrete's high thermal capacity can also be harnessed to absorb and store solar energy.

Keywords: concrete, sustainable construction, building service life, adaptability, circular economy, carbonation of concrete, thermal mass

TIIVISTELMÄ / ABSTRACT	2
JOHDANTO	8
OSA 1 – POHJATIETOA BETONISTA JA SEN KESTÄVYYDESTÄ	11
1.1 – Betonin ja sen hiilijalanjäljen historia	12
Esihistoriallinen Lähi-itä ja kalkkilaastit	12
Antiikki ja hydrauliset sementit	13
Valistusaika ja portlandsementin synty	14
Teräsbetonin synty ja vallankumous	16
Päästöt lähtevät nousuun	22
1.2 – Betonin osa-aineiden hiilijalanjälki ja ympäristövaikutukset	24
Sementti	25
Kiviaines	26
Vesi	27
Seosaineet	28
Lisäaineet	28
Teräs	28
1.3 – Betonin ekologiset, taloudelliset ja sosiaaliset ulottuvuudet	30
1.4 – Betoni verrattuna muihin rakennusmateriaaleihin	32
Puu	32
Teräs	32
Tiili ja savi	33
1.5 – Betonin ja sementin hiilijalanjäljen pienentäminen	36
Pozzolaanit ja muut klinkkerin korvikkeet	36
Geopolymeerit ja muut vaihtoehtoiset sideaineet	38
Hiilidioksidin talteenotto	38
Sementtien tulevaisuus	39
1.6 – Betoni ja kiertotalous	40
Kierrätys betonin tuotannossa	40
Kierrätys betonin elinkaaren lopulla	40
Uudelleenkäyttö	41

2.1 – Betonirakennusten käyttöikä ja päästöt	46
Betonin käyttöikäsuunnittelu	46
Tuotesidonnaiset ja käyttösidonnaiset päästöt ja niiden vähentäminen	47
Betonin säilyvyys ja sen takaaminen	48
Betonirakennuskannan säilyvyys	50
Johtopäätelmiä purkutilastoista: rakennuskantaan ei sitouduta	52
Betonijulkisivujen materiaalivalinnat	53
2.2 – Betoniset runkorakenteet ja muuntojousto	54
Muuntojouston termeistä ja käsitteistä	54
Ilmastokriisin asettamat joustavuustarpeet	56
Elementtirunkojärjestelmät Suomessa: taloudellinen etu joustavuuden edellä	57
Kantavat seinät -järjestelmä	58
Pilari-palkki-järjestelmä	60
Pilari-laatta-järjestelmä	61
Kehityksen kärkeä ulkomailta	63
Paikallavalurakentamisen mahdollisuudet	66
2.3 – Betoni hiilinieluna	68
Vauriomekanismista hiilinieluksi	68
Lisää paljasta pintaa	69
Sisäpintojen merkitys kokonaisuudessa	72
2.4 – Terminen massa ja aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen	74
Termisen massan toimintaperiaatteet	74
Termisen massan energiataloudellinen merkitys	75
Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen	76
Ikkunoiden koko ja sijoittelu	77
LOPUKSI	78
Kiitokset	80
Lähteet	81
Kirjallisuus ja multimedia	81
Kuvat	86
Liite 1. Sementtikemian lyhenteitä, kaavoja ja reaktioita	88
Liite 2. Kaavioissa käytetyt aluejaot	90
Liite 3. Betonituotteiden hiilijalanjälkiä	92

14

miljardia m³

Maailman betoninkulutus vuonna 2020.

Sisältäen myös sementti-pohjaiset tuotteet, kuten laastit, tasoitteet, harkot, kuitusementtilevyt yms.

CCCA, Concrete Future – The CCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete.

4

miljardia m³

Maailman metsien hakkuut vuonna 2018.

Rakennusteollisuuden osuus hakatusta tukkipuusta noin 1,2 miljardia m³

FAO, Yearbook of Forest Products 2018.

0,2

miljardia m³

Maailman metsien runkopuun vuosittainen lisäys keskimäärin 2010 ja 2020 välillä.

2020 runkopuuta yhteensä 557 miljardia m³.

FAO, Global Forest Resources Assessment 2020

Johdanto

Betoni on maailman eniten käytetty rakennusaine. Se on heti veden jälkeen ihmiskunnan toiseksi eniten käyttämä aine ylipäätään. On arvioitu, että betonia kulutetaan maailmanlaajuisesti joka vuosi noin 14 miljardia kuutiota¹, yli viisi kertaa niin paljon kuin koko Suomen metsissä on puuta², yli puolitoista kuutiota jokaista maailman ihmistä kohden. Valtavasta kulutuksesta johtuen betoni ja erityisesti sen sisältämä portlandsementti ovat myös yksi suurimmista ihmisen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen lähteistä, noin 7 % kaikista maailmanlaajuisista hiilidioksidipäästöistä ja teollisuuden energiankulutuksesta.³

Kun minulle tarjottiin syksyllä 2016 vaihto-opiskelupaikkaa Tohokun yliopistossa Japanissa, laboratoriossa jossa tutkittiin nimenomaisesti betonia, epäröin hetken lähtemistä. Opintourani aikana minulle oli iskostunut hyvin yksiselkoinen käsitys siitä kuinka betonirakentaminen on ympäristörikos, ja vihreämmässä puurakentamisessa on arkkitehtuurin tulevaisuus. Minulle tuli jollakin tasolla likainen olo pelkästä ajatuksesta betonin parissa työskentelestä. Keskusteluni muiden arkkitehtien ja arkkitehtiopiskelijoiden kanssa ovat osoittaneet, ettei entinen ajattelumallini ole alallamme mikään harvinaisuus.

Vaihdossa ollessani törmäsin kolmeen keskeiseen lukuun, joista lopulta muodostui diplomityön kantava motivaatio, ja jotka olen alla päivittänyt viimeisimpiin saatavilla oleviin. Ensimmäinen on 0,2 miljardia kuutiota – maailman metsien runkopuun (eng. growing stock) keskimääräinen vuosikasvu hakkuiden jälkeen YK:n elintarvike- ja maatalousjärjestö FAO:n

tietojen mukaan (runkopuun kokonaismäärä 557 miljardia kuutiota 2020)⁴. Toinen on 4 miljardia kuutiota – maailman metsissä tehdyt hakkuut vuonna 2018, josta rakennusteollisuuden käyttöön päätyvien saha- ja viilutukkien osuus oli noin 1,2 miljardin kuutiota (valmistusprosessin hukan jälkeen)⁵. Kun lukuja vertaa toisiinsa, voidaan arvioida että jo pienehkö, noin 5% korotus vuosittaisissa hakkuissa riittäisi kääntämään metsien kasvun negatiiviseksi. Kolmas luku on jo kertaalleen mainittu 14 miljardia kuutiota, eli betonin vuosittainen maailmanlaajuisen kulutus. On selvää etteivät maailman metsävarat riitä nykyisen betonirakentamisvolyymien korvaamiseen puurakentamisella. Puurakentaminen betonirakentamisen osittaisena korvaajana on toki yksi merkittävä tekijä globaalin sementintuotannon päästöjen pienentämisessä, mutta kuitenkin parhaimmillaankin vain yksi monista tarvittavista toimista.

Asenteet betonia kohtaan ovat yleisellä tasolla kielteisiä ja mediassa betoni ja betonirakentaminen ovat saaneet viime vuosina paljon kritiikkiä. Kansainvälisestä mediasta esimerkkinä brittilehti *The Guardian* julkaisi vuonna 2019 artikkelin otsikolla “Concrete: the most destructive material on Earth”. Laaja-alainen artikkeli käsittelee muun muassa globaalin betonintuotannon valtavaa skaalaa, talouden keinotekoista pumppaamista tarpeettomilla rakennushankkeilla, sekä globaalin rakennusalan runsasta korruptiota. Itse artikkelissa käsitellään sekä betonin hyötyjä että haittoja, joita kumpikin on lukuisia. Otsikko sen sijaan antaa yksinkertaistetun ja virheellisen kuvan betonista mainittujen ongelmien kulmakivenä, josta luopumalla ongelmat jäisivät historiaan.

“Betoni on suurempi ilmastopahis kuin lentäminen” on eri muodoissaan muodostunut Suomessa klikkiotsikoiden vakioksi, jota on käytetty hieman eri muodoissa niin Helsingin Sanomissa⁶, Turun Sanomissa⁷, kuin Ylelläkin^{8,9}. Vertaus on sikäli ontuva, että betoni on suurempi osa keskivertoihmisen päivittäistä elämää, kuin lentoliikenne. Betoni on läsnä niin asumisessa, töissä käymisessä, harrastamisessa, kuin paikasta toiseen siirtymisessäkin. Betonin hiilijalanjälkeä kauhistellaan, mutta samalla sen keskeistä roolia lähes kaikessa yhteiskuntamme toiminnassa pidetään itsensä selvyytenä tai ei edes huomata.

Betoni on sosiaalista kestävyyttä tarkastellen ihmiskunnalle tärkeä materiaali, ja sen valtavaa kulutusta pitäisi muistaa tarkastella myös tästä näkökulmasta. Betonin maailmanlaajuisesta kulutuksesta isoin ja koko ajan kasvava osuus tapahtuu kehittyvissä maissa. Kehittyvät maat kaupungistuvat ja tarvitsevat infrastruktuuria, kun taas kehittyneimmissä maissa ensimmäinen rakentamisen kierros on valmistunut ja siihen liittyvät päästöt päästetty kauan sitten. Nykyisin betonia käytetään olemassa olevan kaupunkirakenteen huoltoon ja kehittämiseen.

Betonin kulutus on niin valtava, betonin valta-asema rakennusmateriaalina niin vahva, ja jäljellä oleva aika ilmastomuutoksen torjumiseen niin lyhyt, ettei ole aikaa tai varaa yksiselitteisesti torjua betonia hiilipahiksena. Ei ole varaa odottaa uusien materiaalien markkinoiden valtaamista, mikä ei lopulta ole paljoakaan arkkitehdin käsissä. Betonilla on hiilikuormastaan huolimatta pitkä lista positiivisia ominaisuuksia, jotka ovat tehneet siitä maailman ylivoimai-

sesti käytetyimmän rakennusmateriaalin, eikä niitä ole järkevää sivuuttaa. Huomiota olisi siis syytä kiinnittää ja lisätä tutkimusta kohdentaa siihen, miten voidaan yleisesti, ja toisaalta arkkitehtien osalta vaikuttaa *nyt* rakennettavien betonirakennusten vähähiilisyyteen.

Diplomityössä tavoitteenani on koota arkkitehdeille ja arkkitehtiopiskelijoille tietopohjaa betonin ympäristönäkökulmista, sillä kokonaisvaltaisen, osin ehkä teknisenkin ymmärryksen omaaminen avaa arkkitehdille mahdollisuudet kehittää uusia ratkaisuja. Toinen tavoite on karsoittaa arkkitehdin *nyt* käytössä olevia keinoja vähentää betonirakennusten hiilijalanjälkeä, perehtyä niihin, ja koota niitä yksiin kansiin.

¹ GCCA, Concrete Future, 6.

² Peltola & al., *Suomen metsätilastot 2019*, 12

³ IEA, *Energy Technology Perspectives 2020*, 216.

⁴ FAO, *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*, 129.

⁵ FAO, *FAO Yearbook of Forest Products 2018*, 82, 128.

⁶ Lappalainen, “Sementti on lentämistä suurempi ilmastopahis ja nyt sille on vaihtoehto.”

⁷ Hakanen, “Sementti tuottaa paljon isommat ilmastopäästöt kuin lentäminen.”

⁸ Toivonen, “Sementti on isompi ilmastopahis kuin lentokoneet, ja nyt se pitäisi korvata – mutta miten?”

⁹ Ukkonen, “Oulun yliopistossa kehitetään sementtiä, joka sitoisi itseensä hiilidioksidia – nykyään sementin päästöt jopa suuremmat kuin lentoliikenteen.”

Osa 1

POHJATIETOA BETONISTA JA SEN KESTÄVYYDESTÄ

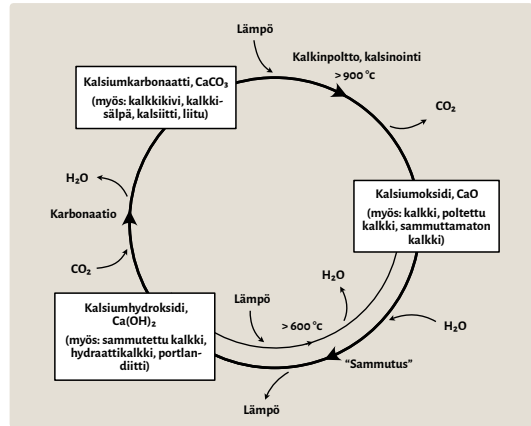
1.1 – Betonin ja sen hiilijalanjäljen historia

Betoni on samanaikaisesti yksi vanhimmista, ja toisaalta verrattain hyvinkin nuori rakennusmateriaali. Miten pitkälle betonin historialliset juuret yltävät riippuu siitä, miten betoni ja sen tärkein osa-aine sementti määritellään. Kuitenkin yhdistävänä tekijänä niin modernille kuin roomanaikaiselle betonille, sekä kaikkein vanhimille esihistoriallisille betonin esiasteille voidaan pitää niiden perustumista *kalkkiin*. *Kalkilla* voidaan tarkoittaa joko kalkkikivestä polttamalla syntyvää *polttettua kalkkia*, tai laajemmin kalkin eri muotoja—*kalkkikivi*, *polttettu kalkki*, ja *poltetun kalkin* veden kanssa reagoidessa syntyvä *sammutettu kalkki*. Kun *sammutettu kalkki* puolestaan reagoi veden ja hiilidioksidin yhdisteen, eli hiilihapon kanssa, se kovettuu jälleen *kalkkikiveksi*. Kalkin muuttumista eri olomuotojensa välillä kutsutaan kalkkikierroksi, joka on havainnollistettu kuviossa 2.

Nykyaikaiset betonit pohjautuvat yleensä portlandsementtiin, joka on aiempien kalkkipohjaisten laastien ja sementtien pidemmälle kehitetty, *hydraulinen* eli vedessä kovettuva johdannainen, joten historiallisessa katsauksessa on luontevaa lähteä liikkeelle nimenomaan (poltetusta) kalkista.

Esihistoriallinen Lähi-itä ja kalkkilaastit

Ennen kalkinpolton keksimistä kivien yhteen liittämiseen käytettiin mutaa ja savea, jotka eivät kestä vettä, siis kalkin poltto on pysyvien asutusten ja ihmiskunnan kehityksen kannalta keskeinen keksintö. On puhtaasti spekulatiivista miten kalkin poltto on keksitty. Suosittu teoria on, että kalkkikiveä on käytetty nuotion



Kuvio 2: Kalkkikierto.

rajaamiseen, jolloin kalkkikiven pintaan on muodostunut pieniä määriä voimakkaasti ihoa ärsyttävää polttettua kalkkia. Koska kalkki on voimakkaasti ihoa ärsyttävää, se on kiinnittänyt sitä koskettaneen ihmisten huomion ja johtanut materiaalin tutkimiseen.¹

Kalkkipohjaisten sementtien ja laastien historia on uusien arkeologisten löytöjen ja tutkimusten myötä karannut jatkuvasti kauemmaksi, ja nykytiedon valossa niitä on osattu hyödyntää jo esikeraamisissa neoliittisissa kulttuureissa. Erityisen huomionarvoista kalkkipohjaisen sementin käytössä on, että kalkkikiven polttamiseen tarvittava noin 850–900 °C lämpötila on niin korkea, että sen aikaansaamiseksi tarvittiin tarkoitusta varten rakennettuja uuneja. Näin ollen poltetun kalkin käytön voidaan ajatella kertovan kehittyneestä tuotantoprosessista, johon kuuluu kalkkikiven louhiminen, murskaaminen, ja poltto lämpötilasäädelyissä uuneissa.²

Ensimmäiset merkit kalkin poltosta ja kalkkilaastin valmistamisesta on löydetty Lähi-idästä, ns. hedelmällisen puolikuun alueelta, jossa myös maanviljelyn uskotaan alkaneen. Vanhin esimerkki sementtisen reaktion hyödyntämisestä löydettiin nykyisessä Turkissa sijaitsevan Göbekli Tepen löytöpaikalta, jossa aloitettiin yhä käynnissä olevat kaivaukset 1995. Göbekli Tepeä pidetään nykyään vanhimpana esimerkkinä monumentaalisesta arkkitehtuurista, toisin sanoen betonin juurten voidaan katsoa ylettyvät liki yhtä kauas kuin on olemassa säilyneitä rakenteitakin. Osassa Göbekli Tepen lattioista on käytetty betonin kaltaista noin 9000 EAA radiohiiliajoitettua keinotekoista kiveä, jota arkeologit kutsuvat nimellä *terrazzo* monessa kielessä (englanti, ruotsi, saksa ym.) visuaalisesti samankaltaisesta mosaiikkibetonista käytetyn nimityksen mukaan.

Noin 100 kilometrin päässä Göbekli Tepestä sijaitsee vanhimpana pysyvästi asuttuna kylänä pidetty Cayönü -löytöpaikka. Siellä 1964 aloite-
tuissa kaivauksissa on löydetty noin 90 m² kokoinen alue vastaavaa *terrazzo*-lattiaa noin vuodelta 7000 EAA, joka kemiallisen analyysin kautta todettiin koostuvan noin 70 % murska-
tusta 1–10 mm partikkelikoon kalkkikivestä ja 30 % poltetusta kalkista tehdystä kalkkilaastista.³

Ennen Göbekli Tepen löytöä vanhimpina betonirakenteina on pidetty nykyisen Israelin alueella, Yiftah'elin löytöpaikalta vuonna 1985 löydettyä betonilattiaa (noin 7000 EAA), ja Serbiassa Tonavan rannalla sijainneen, 1967 löydetyn Lepinski Vir -kylän lattioita (5600 EAA). Kummassakin sideaineena käytettiin kalkkilaastia.

Antiikki ja hydrauliset sementit

Muinaiset kreikkalaiset ovat nykytiedon valossa ensimmäiset, jotka noin 500 EAA alkaen keksivät sekoittaa sammutettuun kalkkiin *pozzolaania* aineksia, tässä tapauksessa huokoista hohkakiveä ja tuhkaa sisältänyttä "*Santorin*in maata" Theran (nyk. Santoríni) saarelta, jossa sitä oli runsaasti saatavilla tuhoisan tulivuorenpurkauksen (n. 1600 EAA) jäljiltä. Kun pozzolaania sekoittaa sammutettuun kalkkiin (kalsiumhydroksidi, Ca(OH)₂), syntyy voimakkaasti *hydraulinen* sementti, jolla pystyy valamaan myös veden alla kovettuvia rakenteita.

Ensimmäiset sekä kalkkilaasteihin että betonirakentamiseen liittyvät kirjalliset lähteet ovat antiikin Rooman ajalta. Cato vanhemman *De Agricultura* kuvaa kalkin kalkkiuunissa polttamisen prosessin, ja Vitruvius *De Architectura* kertoo pozzolaanien käytöstä hydraulisen sementin aikaan saamiseksi, sekä roomalaisten betonirakentamisesta laajemmin. Vitruvius kuvasi pozzolaaneja seuraavasti:

"On myös erästä tomua, joka saa luonnostaan aikaan ihailtavia tuloksia. Sitä löytyy Baian seudulta ja Vesuviusta ympäröivien kylien mailta. Kalkkiin ja kivimurskaan sekoitettuna se ei ainoastaan paranna muiden rakennusten kestävyyyttä, vaan sallii rakenteiden kovettua veden alla laitureita mereen rakennettaessa."⁴

Roomalaiset perivät pozzolaanien käytön kreikkalaisilta ja betonista tuli ensimmäistä kertaa osa rakentamisen valtavirtaa. Sana pozzolaani

¹ Courland, *Concrete Planet*, 25–9.

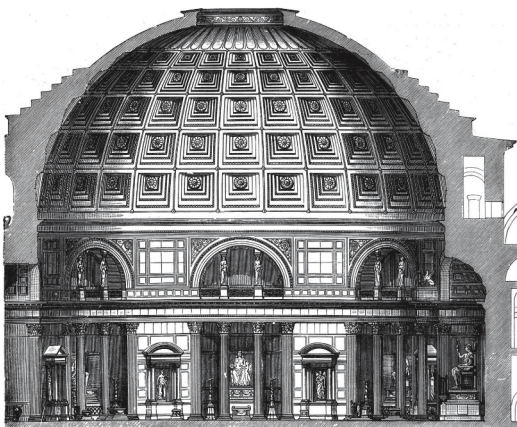
² Newman, "The Evolution of Cement and Concrete", 63.

³ Gourdin & Kingery, "Beginnings of Pyrotechnology", 139–146.

⁴ Vitruvius, *Ten Books on Architecture*, 46. (Oma käänös.)

on perua Puteolin, nyk. Pozzuolin maakunnasta, jonka tuliperäinen “Puteolin tomu” (*pulvis puteolanus*, tai monikossa kuten Vitruvius kirjoittaa, *pulvere puteano*) oli tärkein roomalaisten käyttämä pozzolaani. Kun luonnon pozzolaaneja ei ollut saatavilla, roomalaiset käyttivät murskattua tiiltä ja keramiikkaa, eli poltettua savea, jolla on myös pozzolaanisia ominaisuuksia. Roomalaiset käyttivät betonia mm. julkisten rakennusten, teiden ja muurien, akveduktien ja satamarakennusten, siis julkisen infrastruktuurin rakentamiseen. Esimerkkejä Rooman säilyneistä betonirakennuksista on Colosseum ja ehkä kuuluisimpana erinomaisessa kunnossa ja edelleen maailman suurimpana raudoittamattomasta betonista rakennettuna kupolina säilynyt Pantheon.

Rooman imperiumin romahdettua vuonna 476 JAA pitkälti keisarilliseen rahoitukseen perustunut betonirakentaminen hiipui, ja betonirakennustekniikka unohtui. Seurasi noin tuhatvuotinen jakso, jonka aikana rakentaminen perustui jälleen lähinnä puuhun ja kalkki- tai kipsilaasteilla sidottuun kivirakentamiseen.



Kuva 1. Pantheonin kupoli, Rooma. Leikkaus.

Valistusaika ja portlandsementin synty

Hydraulinen sementti palasi hiljalleen rakentajien tietoisuuteen, kun Vitruviuksen *De Architectura* löydettiin uudestaan 1500-luvulla, käännettiin muinaisesta kreikasta ja painettiin Euroopan valtakielillä. Pozzolaaneihin perustuvat vedessä kovettuvat laastit pysyivät kuitenkin rakentamisen marginaalissa, ns. vesirakentamisen erikoistuotteena.

1600-luvulla hollantilaiset kauppiat alkoivat tuoda Saksasta uutta pozzolaania, *trassia*, huokoista tuliperäistä kiveä, jonka oli huomattu murskattuna muodostavan kalkin kanssa vedessä kovettuvan seoksen. Kotimaanmarkkinat tyydytettyään hollantilaiset alkoivat myydä *trassia* edelleen Englantiin ja Ranskaan.¹

Englantilainen insinööri ja tutkija, John Smeaton, laati Eddystonen majakkaa suunnitellessaan vuonna 1756 sarjan kokeita löytääkseen sideaineen, joka soveltuisi parhaiten majakan vaativiin olosuhteisiin. Smeaton tutki kalkin ja pozzolaanien, kuten *trassin* ja “Pozzuolin maan” seoksia, mutta myös eri lähteistä peräisin olevia kalkkeja yksinään. Uhmaten vallassa ollutta, Vitruviukselta periytynyttä uskomusta, jonka mukaan parhaat kalkit saatiin polttamalla kovimpia ja valkeimpia, siis kalsiittipitoisuuksiltaan puhtaimpia kalkkikiviä, Smeaton tutki laajasti myös huonompina pidettyjä kalkkikivilaatuja. Tutkimuksissaan Smeaton huomasi, että savimineraaleja sisältäneistä kalkkikivistä poltetut kalkit kovettuivat vedessä ilman kaukaa tuotavien pozzolaanien lisäystä, ja tuli samalla uudelleen löytäneeksi hydraulisen kalkin, jota nykyisin kutsutaan myös luonnonsementiksi.

Smeaton ei koskaan patentoinut löydöstään, ja julkaisi tutkimuksensakin vasta vuonna 1791, vuotta ennen kuolemaansa. Muutama vuosi Smeatonin julkaisun ja kuoleman jälkeen, 1796, James Parker patentoi identtisen luonnonse-



Kuva 2. Eddystonen 3. majakka, John Smeaton.

mentin nimellä roomalaissementti (*roman cement*). Roomalaissementti menestyi markkinoilla hyvin ja patentin rautessa vuonna 1810 myös monet kilpailijat siirtyivät valmistamaan sitä päätuotteenaan.

Vuonna 1824 englantilainen Joseph Aspdin patentoi kehittämänsä sementin ja nimesi sen portlandsementiksi, koska se muistutti Portlandin saarelta louhittua ja rakennuskivenä suositua kalkkikiveä. Patentti ei sisältönsä puolesta ole kovin merkittävä: uusia sementtipatentteja myönnettiin tuohon aikaan tiuhaan, eikä Aspdinin patentti sisältänyt innovaatioita, jotka olisivat tehneet siitä Parkerin roomalaissementtiä parempaa. Aspdin ei ollut myöskään ensimmäinen, joka keksi verrata sementtiään Portlandin kalkkikiveen — “portland cement” oli ollut käytössä brändinimenä jo vuosia aiemmin. Jopa

Aspdin itse luovutti patenttisementtinsä suhteen ja mainosti yritystään myöhemmin nimenomaan roomalaissementin valmistajana.²

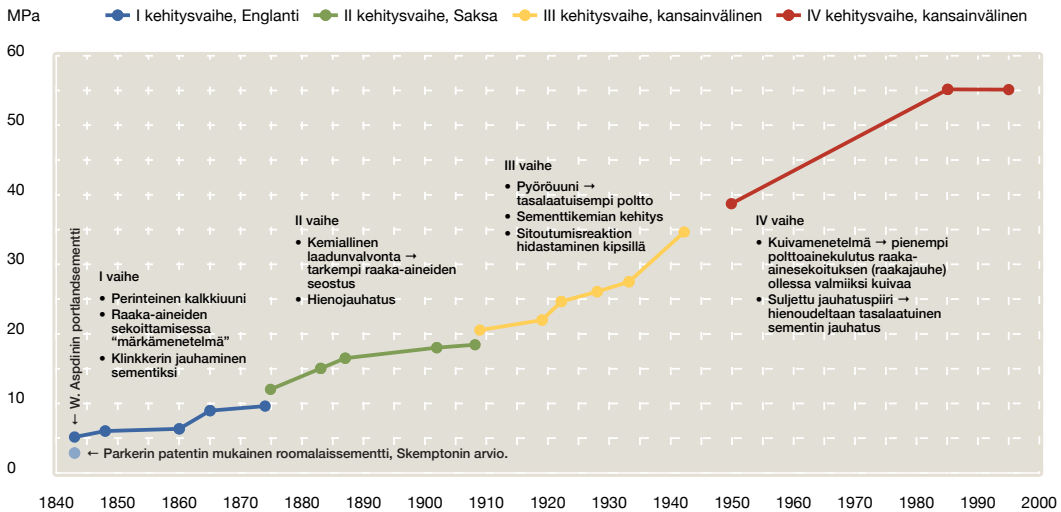
Patentti on jäänyt historiaan Joseph Aspdinin pojan, William Aspdinin myötä. William keksi, että murskaamalla “ylipalanutta” sementtiklinkkeriä syntyi lujuudeltaan roomalaissementtiin verrattuna ylivertaista sementtiä. Sementtiklinkkeri syntyy poltettaessa kalkkia eli kalsiumoksidia (CaO) sekä saven sisältämiä piioksidia (SiO_2), alumiinioksidia (Al_2O_3) ja rautaoksidia (Fe_2O_3) 1450°C lämpötilassa, jolloin osa-aineiden partikkelit sintraantuvat (liittyvät yhteen saavuttamatta sulamispistettä) muodostaen erittäin kovia, huokoisia nokareita (ks. liite 1). Tähän asti klinkkeriin oli suhtauduttu vain epäonnistuneessa sementinpoltossa syntyvänä jätteenä, joka oli liian kovaa jauhettavaksi. Nuorempi Aspdin irtautui isänsä yrityksestä paljastamatta löytöään ja muutti vuonna 1841 Lontooseen perustaakseen oman yrityksen ja markkinoidakseen uutta ylivertaista sementtiään. Aspdin ei patentoinut löydöstään, vaan varjeli sitä tarkasti omana salaisuutenaan, myyden sementtiään portlandsementin nimellä ja muka isänsä patentoimana. Vuonna 1843 laadittu puolueeton testi vahvistaa uuden portlandsementin olleen noin kaksinkertaisesti kilpailevia roomalaissementtejä lujempaa³ ja myöhemmin on myös mikroskooppisin menetelmin todennettu, että Aspdinin sementti todellakin sisälsi merkittäviä määriä aliittia, joka syntyy 1450°C lämpötilassa klinkkeröitymisen yhteydessä ja on modernin portlandsementin lujuuden kannalta tärkein sementtikomponentti⁴.

¹ Courland, *Concrete Planet*, 143–5.

² Courland, *Concrete Planet*, 184–190.

³ Trout, “The History of Calcerous Cements”, 13.

⁴ Blezard, “The History of Calcerous Cements”, 9.



Kuvio 3. Portlandsementin puristuslujuuden kehitys.

Lähteet: Livesey, "The Rise, Fall and Revival of Natural Cements"; Skempton, "Portland Cements 1843-1887".

Huomiot: Lujuudet 28 vuorokautta valun jälkeen, sementti-hiekkasuhde 1:3. Alkuperäisen kaavion laatinut Skempton (Vaiheet I-III), tarkennettu ja täydennetty (Vaihe IV) Liveseyn toimesta. Piirretty uudelleen, suomennettu, ja selitystekstejä täydennetty.

Kilpailevan roomalaissementtiä valmistaneen yrityksen kemisti Isaac Johnson onnistui kuitenkin selvittämään Aspdinin salaisuuden ja pian koko teollisuus siirtyi roomalaissementistä portlandsementin valmistukseen.

Portlandsementtiklinkkerin keksimisen jälkeen tärkeimmät nykysementtien tuotannon osat olivat olemassa. Aspdinin ja Johnsonin aikaisen sementtien puristuslujuus oli kuitenkin vain noin 5 MPa, kun nykysementtien lujuus on tyypillisesti luokkaa 50–60 MPa, ja sementtiä käytettiin lähinnä laasteissa ja "vesirakentamisessa" betonirakentamisen muuten ollessa marginaalista. Lisääntynyt kilpailu johti kuitenkin portlandsementin nopeaan kehitykseen ympäri maailmaa. Seuraavan 150 vuoden aikana portlandsementin lujuus on yli kymmenkertaistunut mm. hienomman jauhatuksen, tarkemman seostuksen, pyöröuunien kehityksen ja liian nopeaa sitoutumisreaktiota hillitsevän kipsin lisäämisen myötä.¹ (Kuvio 3)

Teräsbetonin synty ja vallankumous

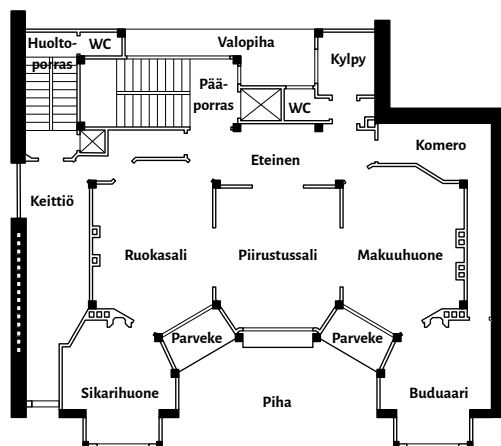
Portlandsementin lujuuskehityksen ohella raudituksen keksiminen avasi betonille uusia käyttömahdollisuuksia rakennusteollisuudessa ja sen ulkopuolella. Raudituksen käyttäminen lähti liikkeelle Ranskasta, jossa ensimmäisen rautabetonirakenteisen talon, 4-kerroksisen asuintalo St. Denis'ssä, rakensi vuonna 1853 ranskalainen kemianteollisuuden insinööri ja sementtiyrittäjä François Coignet. Samoihin aikoihin toinen ranskalainen, puutarhuri nimeltään Joseph Monier keksi käyttää rautaverkolla vahvistettua betonia istutusastioiden materiaalina. Monier ei ollut ensimmäinen betonin raudalla vahvistamista tutkinut, mutta hän oli ensimmäinen innovaatiotaan laajasti ja onnistuneesti, esimerkiksi 1867 Pariisin maailmannäyttelyssä markkinoinut innovaattori. Sitten hän kehitti rautabetonin käyttöä ja haki patenteja myös muihin tarkoituksiin, mukaan lukien rakentamiseen.²

Vaikka raudan ja betonin yhdistelmiä oli tutkittu jo pitkään, vasta Saksassa 1880-luvulla kehitetyt lujuimmat portlandsementit olivat riittävän lujia toimimaan käytännöllisenä materiaaliparina teräksen kanssa. Paikalliset rakentajat omaksuivat Monier'n opit ja rautabetoni yleistyi nopeasti Saksan ja Itävallan alueella.³

Monier'n kukkaruukuista inspiroitui myös ranskalainen rakennusalan yrittäjä François Hennélique, joka alkoi kehittää rautabetonia rakennusmateriaalina ja patentoi oman täyden ja kokonaan teräsbetoniin perustuvan rakennusjärjestelmänsä vuonna 1892.⁴ Hennélique rakensi nopeasti laajan verkoston järjestelmää markkinoivia yrityksiä, perusti *Le béton armé* -aikakauslehdhen (suomeksi teräsbetoni) ja myi lisenssejä järjestelmänsä käyttöön ympäri Eurooppaa. Vuoteen 1909 mennessä järjestel-



Kuva 3. Rue Franklin 25, Pariisi, Auguste Perret, 1903.



Kuva 4. Rue Franklin 25, peruserroksen pohjapiirustus 1:250.

mällä oli toteutettu maailmanlaajuisesti yli 20 000 projektia, mikä merkitsi lähes monopoliasemaa.⁵

Betonirakentamisen ohella ensimmäisenä varsinaisen betoniarkkitehtuurin uranuurtajana voidaan pitää ranskalaisarkkitehti Auguste Perret'tä, jonka läpimurtotyö vuodelta 1903 oli ensimmäinen teräsbetonirunkoinen kerrostalo, Rue Franklin 25 Pariisissa (kuvat 3 ja 4). Paitsi ensimmäinen teräsbetonikerrostalo, se on myös ensimmäinen rakennus, jossa teräsbetonia on hyödynnetty voimakkaasti arkkitehtonisen ilmaisun keinona. Sen siro kantava pilari-palkki-runko on jätetty sisätiloissa paljaana osaksi arkkitehtuuria ja julkisivussa se erottuu selvästi kukka-aiheisin laatoin koristellusta kantamattomasta osasta. Pilari-palkki-rungon ja ei-kantavien väliseinien mahdollistama suunnitteluvapaus enteilivät modernismia ja

¹ Trout, "The History of Calcerous Cements", 21.

² Newman, "The Evolution of Cement and Concrete", 68–9.

³ Trout, "The History of Calcerous Cements", 22.

⁴ Newman, "The Evolution of Cement and Concrete", 69.

⁵ Cimbéton, *Histoire du béton. Naissance et développement, 1818-1970*, 15.

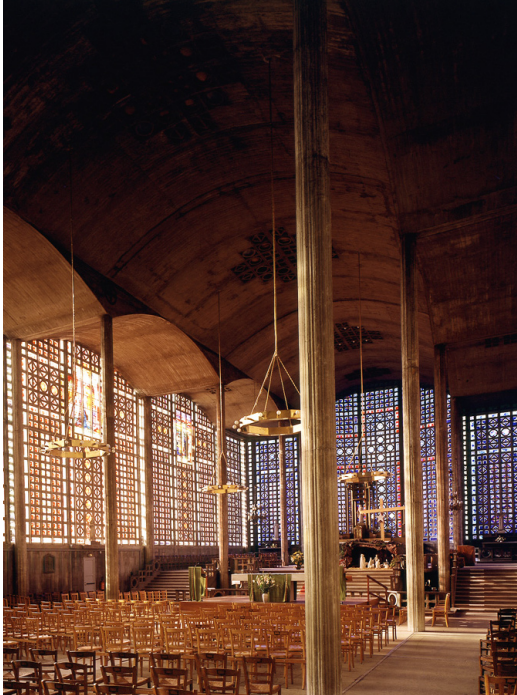
Perret'n oppipojan, Le Corbusier'n, uuden arkkitehtuurin mukaista vapaata pohjaratkaisua. Aikakauden ennakkoluuloja betonia kohtaan kuvaa se, että pankit kieltäytyivät lainoittamasta hanketta asiantuntijoiden ennustaessa sen pikaista luhistumista.¹ Ennusteista huolimatta rakennus on edelleen pystyssä. Perret kehitti edelleen betoniin perustuvaa ilmaisuun, joka ilmenee kenties puhtaimmillaan vuonna 1923 valmistuneessa Notre Dame du Raincy -kirkossa (kuva 5). Holvikattoa kantavat sirot betonipilarit mahdollistavat avoimen pohjan ja vapauttavat julkisivut kantavasta roolista. Tilan tunnelman luovat sen avaruus ja paljas, koruton betonirunko yhdistettynä runsaaseen, julkisivujen rei'itettyjen betoni-elementtien läpi siivilöityvään valoon.

Yhdysvalloissa betonin läpimurtoa edisti englantilaissyntyinen insinööri Ernest Ransome, jonka 1884 patentoima betonin raudoi-

tusmenetelmä ja siihen perustuva rakennusjärjestelmä levisivät Hennébiquen järjestelmän tavoin laajaan käyttöön. Keskeisessä roolissa oli Ransomen järjestelmällä vuonna 1904 rakennettu Ingalls Building, ensimmäinen betoninen pilvenpiirtäjä (kuva 6). Pilvenpiirtäjä oli todiste teräsbetonin kilpailukyvyistä myös suurissa ja haastavissa rakennushankkeissa.

Jarruna toimivat kuitenkin muun muassa muurariliitot, jotka aiheellisesti pelkäsivät ammatinsa säilymisen puolesta ja pyrkivät parhaansa mukaan estämään betonirakentamisen yleistymistä tuntemattomana ja epäturvallisena rakennustapana.²

Betoniteollisuuden kaipaama lisäsysäys tuli vuonna 1906, kun San Franciscon maanjäristys ja sitä seurannut tulipalo tuhosivat suuren osan kaupungista. Tulipalossa säilyi kuitenkin ehjänä ja vähäisin vaurioin mm. kaksi Ranso-



Kuva 5. Notre Dame du Raincy, Ranska, Auguste Perret, 1922.



Kuva 6. Ingalls Building, Cincinnati. (LOC Photo)

men Stanfordin yliopiston kampukselle rakentamaa kokeellista rakennusta, sortuneiden tai palaneiden tiili- teräs- ja puurakennusten keskellä. San Franciscon katastrofin jälkeen varhainen betoniteollisuus ryhtyi lobbaamaan betonin maanjäristyksen ja tulipalon kestäväksi materiaaliksi. Kampanja toimi ja pian niin lainsäädäntö kuin väestökin hyväksyivät betonin rakennusmateriaaliksi.³ Muuttunutta ilmapiiriä kuvaa Los Angeles Heraldissa julkaistu kirjoitus vuodelta 1908, joka onnistuneesti ennusti betonin pian syrjäyttävän teräksen rakennusmateriaalien kuninkaana (kuva 7).

Betoni nousi nopeasti myös arkkitehtien suosioon ja esimerkiksi Frank Lloyd Wright piti ensikosketustaan teräsbetoniin, vuonna 1908 valmistunutta Unity Temple -kirkkoa (kuva 8) ensimmäisenä modernistisena rakennukseksi.⁴ Teräsbetonista tuli nopeasti modernismin ja sitä myötä 1900-luvun arkkitehtuurin tärkein rakennusmateriaali. Le Corbusier'n veistoksellinen Notre Dame du Haut, Eero Saarisen TWA Flight Centerin lennokkaat kuorirakenteet, Louis Kahnin monumentaalinen Phillips Exeter -akatemian kirjasto, Ricardo Bofillin surrealistinen asuinlabyrintti La Muralla Roja, ja Tadao Andon minimalistinen Valon kirkko (kuvat 9–13) ovat vain muutama valikoitu esimerkki lukemattomista 1900-luvun arkkitehtuurin klassikoista, jotka olivat mahdollista rakentaa uusvanhan betonin ansiosta. Eikä betoni mullistanut vain arkkitehtuuria, vaan koko yhteiskunnan. Paitsi rakennukset, myös erilaiset tiet, sillat, tunnelit, padot, voimalaitokset ja muu nyky-yhteiskunnan kannalta kriittinen yhdyskuntateknikka rakennetaan nykyään tyypillisimmin betonista.

¹ Giedion, *Scape, Time and Architecture*, 328–331.

² Courland, *Concrete Planet*, 228–33.

³ Ibid.

⁴ "Unity Temple", Frank Lloyd Wright Foundation, viitattu 9.3.2022. <https://franklloydwright.org/site/unity-temple/history.php>.

CONQUEST OF MIXTURE TO SOON BE COMPLETE

Are there no limits to the conquests of concrete?

Every day this new-old building material, as hard as stone, as strong as steel, almost as cheap as lumber, and as plastic as clay, is put to some new use. Reinforced with iron bars it makes stanch buildings that resist even an earthquake. "Poured" houses are growing in favor because of their enduring, fireproof and sanitary qualities. Bridges and factories and tunnels are often of concrete construction.

But the most surprising suggestion now comes from Italy. It is that sea-going craft can be economically and effectively constructed of concrete. Even warships, according to the Italian expert, can be better "poured" than built of steel. It appears that the first concrete boat was built in 1855, and that the little craft is still afloat. But no one gave much heed to the notion till 1896, when an Italian engineer built several steamers with concrete hulls, and some of these are now in use on Italian rivers.

More recently the Italian government has been experimenting with concrete hulls for battleships. The ordinary reinforced concrete construction is used, except that for the outer skin wire netting covered with concrete is put in place, and made smooth and watertight by a coat of pure cement.

These ships will evidently entail no expense for maintenance and cannot be burned. It is said that they suffer less damage from ramming than a steel boat, and it is believed that they will stand up better under gun fire. They cost only half as much to build as the ordinary battleship.

Steel has been king for a long time. Concrete seems in a fair way to usurp the throne.

Kuva 7. Los Angeles Herald, 15. marraskuuta 1908.



Kuva 8. Unity Temple, Frank Lloyd Wright, 1908.



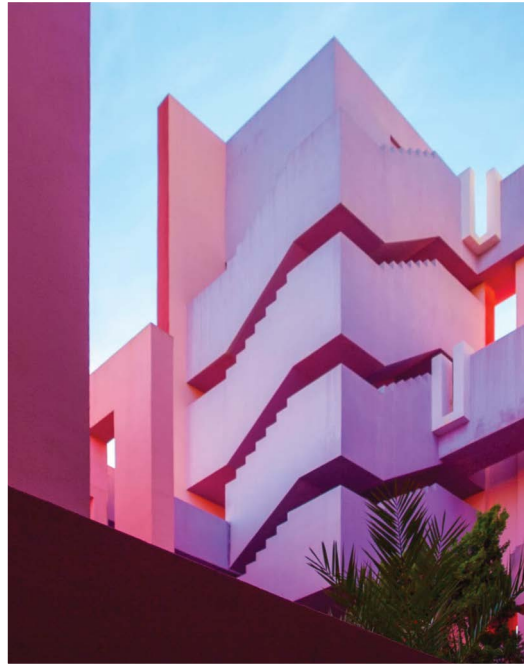
Kuva 9. Phillips Exeter -akatemian kirjasto, Yhdysvallat, Louis Kahn, valmistunut 1971.



Kuva 10. Notre Dame du Haut, Ranska, Le Corbusier, 1955.



Kuva 11. TWA Flight Center, Yhdysvallat, Eero Saarinen, 1962.



Kuva 12. La Muralla Roja, Espanja, Ricardo Bofill, 1973.



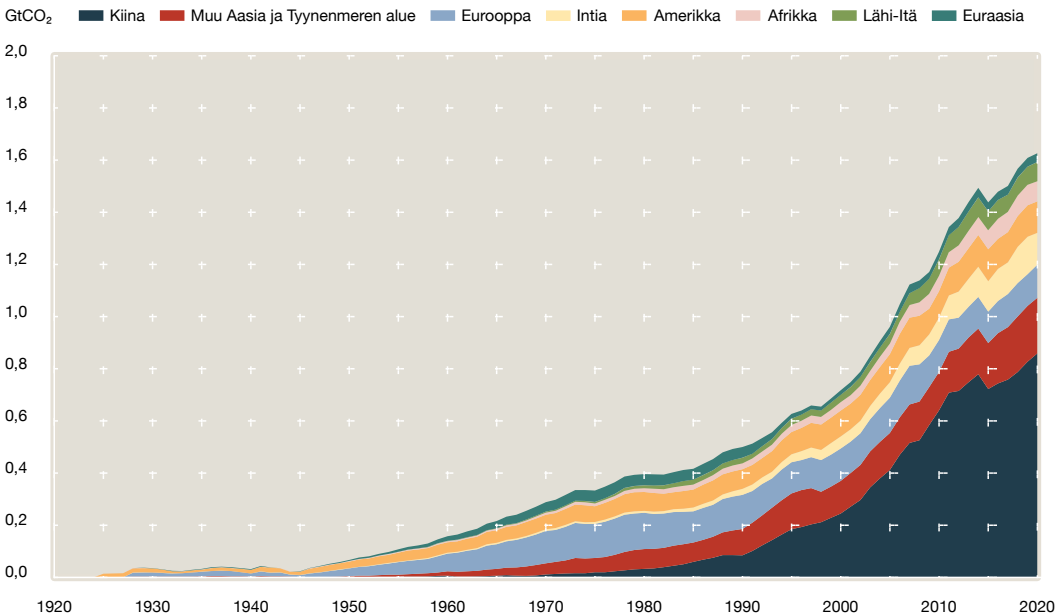
Kuva 13. Valon kirkko, Japani, Tadao Ando, 1989.

Päästöt lähtevät nousuun

Betonin yleistyttyä 1900-luvun alussa, kulutus ja päästöt pysyivät melko tasaisina 40-luvun puoleen väliin asti. Toisen maailman sodan loputtua päästöt lähtivät länsimaiden johtamana jyrkkään nousuun jälleenrakennuksen sekä talouden ja väestön kasvun mukana. Sodanjälkeinen nousukausi jatkui vuoteen 1973, jolloin maailmanlaajuinen öljykriisi ja pörssiromahdus koettelivat markkinoita, ja länsimaiden sementintuotannon päästökasvu pysähtyi kuin seinään. Seuranneen puolen vuosisadan aikana kehittyneimpien maiden asukaskohtaiset sementtipäästöt ovat pysyneet tasaisina ja jopa hieman laskeneet (kuvio 5). Päästöjen tasaannuttua kehittyneimmissä maissa, ne ovat jatkaneet nousuaan kehittyvissä maissa ja erityisesti Kiinassa, jonka päästöt ovat nousseet

kovaa vauhtia 70-luvulta lähtien ja saavuttaneet korkeimmillaan peräti 60 % osuuden kaikista sementin päästöistä vuonna 2014.

Kuvio 4 kuvaa sementintuotannon prosessipäästöjä, eli kalsinaation (ks. s. 25) yhteydessä vapautuneita hiilidioksidipäästöjä siltä ajalta, kun sementtien tuotantomääriä on tilastoitu. Koska kalsinaatiopäästöt sementtiyksikköä kohti ovat pysyneet 2000-luvulle pitkälti muuttumattomina, päästölukemat kertovat myös sementin kulutuksesta. Betonista ei ole olemassa vastaavia tilastoja, mutta koska sementin ja betonin kulutusmäärät ovat teräsbetonin läpimurrosta lähtien kulkeneet käsi kädessä, sementtitilastojen voidaan katsoa kuvaavan kohtalaisen tarkasti muutoksia myös betonin kulutuksessa ja päästöissä.



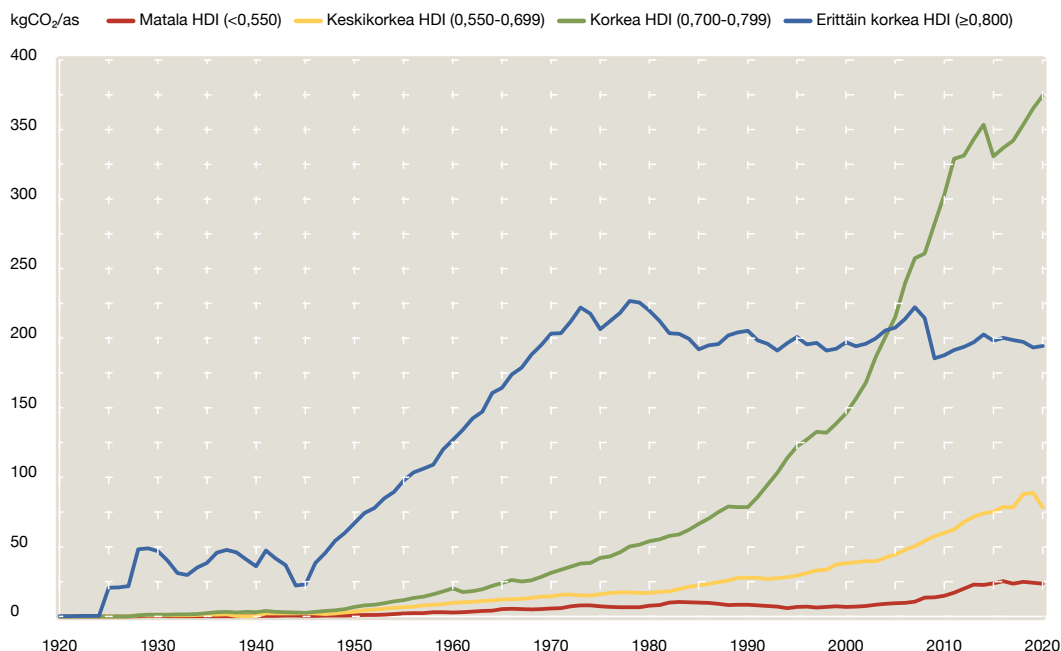
Kuvio 4. Sementintuotannon historialliset maailmanlaajuiset prosessipäästöt.

Lähde: Andrew, *Global CO₂ emissions from cement production* (2021); IEA, *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry* (2018).

Huomiot: Aluejako IEA:n mukaan. Tarkempi aluejaon määrittely liitteissä.

Kuviossa 5 on kuvattuna valtioiden historialliset asukaskohtaiset sementtipäästöt jaettuna neljään ryhmään valtioiden inhimillisen kehityksen indeksin (eng. human development index) eli HDI:n mukaan. HDI on YK:n vuonna 1990 käyttöön ottama indeksi, joka huomioi valtioiden keskimääräisen tulotason lisäksi elinajanodotteen ja koulutustason. Toiseksi korkein ryhmä, johon lukeutuvat mm. Kiina, Vietnam, Meksiko ja Indonesia, ohitti päästöissään korkeimman HDI:n ryhmän 2000-luvun alkuvuosina ja kolmanneksi korkeimmankin ryhmän (mm. Intia, Bangladesh ja Pakistan), päästöt ovat nousseet 1990–2020 välillä suurin piirtein samaa rataa kuin toiseksi korkeimman ryhmän kolme vuosikymmentä aikaisemmin, 1960–1990. Ryhmäjaon tarkemman määrittelyn voi lukea liitteestä 2.

Sementin päästöistä on teknologian kehityksen myötä onnistuttu leikkaamaan jo paljon. Esimerkiksi 70-luvulla markkinoille tullut ja nykyisin lähes koko markkinat vallannut sementin raaka-aineiden sekoittamisen “kuivamennetelmä” on vähentänyt polttoainepäästöjä aiempaan märkämenetelmään verrattuna noin kolmanneksen. Vuodesta 1990, jota pidetään laajasti ilmastomuutoksen vertailuvuotena, sementtiteollisuuden sementtiyksikkökohtaisia päästöjä on onnistuttu vähentämään noin viidennes. Kuitenkin kehittyvän yhteiskunnan rakennustarpeen edelleen kasvaessa kokonaispäästöt ovat yhä nousussa, ja päästöjen vähentämiseksi kestäväälle tasolle edessä on vielä valtava, muttei mahdoton urakka.



Kuvio 5. Sementintuotannon asukaskohtaiset prosessipäästöt valtioiden inhimillisen kehityksen indeksiryhmän mukaan.

Lähteet: Andrew, *Global CO₂ emissions from cement production* (2021); UN DESA, *World Population Prospects 2019*; UNDP, *Human Development Report 2020*.

Huomiot: Ryhmitysperusteena käytetty UNDP:n mukaista ryhmäjakoa ja valtiot on ryhmitelty vuoden 2019 HDI:n mukaan. Tarkempi ryhmäjaon määrittely liitteissä.

1.2 – Betonin osa-aineiden hiilijalanjälki ja ympäristövaikutukset

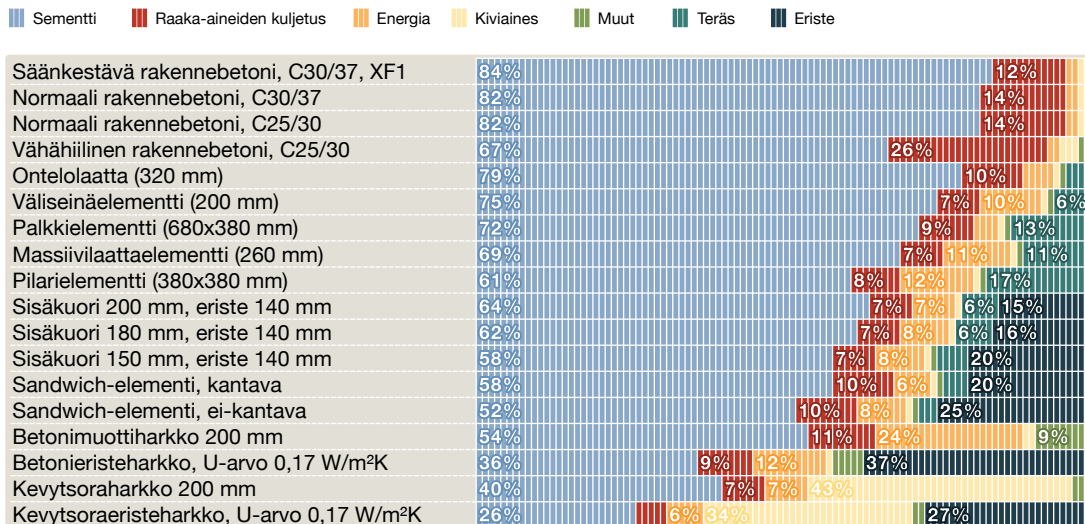
Viimeisimmän teknisen määritelmän mukaan nykyaikainen betoni koostuu sementistä, kiviaineksesta ja vedestä, sekä mahdollisesti lisäaineista, seosaineista ja kuiduista¹. Tyypillisen suomalaisen rakennebetonin ns. “kehdosta tehtaan portille” (eli *tuotevaiheen* elinkaari-moduulien A1-A3, ks. kuvio 10, s. 42) hiilidioksidipäästöt ovat noin 260 kilogrammaa kuutiota kohden² (lisää materiaalien hiilijalanjälkiä on lueteltu taulukossa 2, s. 33).

Ympäristövaikutusten kannalta selvästi merkittävin osa-aine on sementti. Tuotevaiheen hiilidioksidipäästöistä sen osuus on lähes kaikissa betonituotteissa yli puolet ja valmisbetoneissa tyypillisesti yli 80 %, muiden osa-aineiden osuuksien jäädessä pieneen marginaaliin (taulukko 1). Kaikesta tuotetusta sementistä beto-

nintuotantoon käytetään noin 70 %, lopun jakautuessa erilaisten laastien ja tasoitteiden tuotantoon³. Betoni- ja sementtiteollisuudet ovat siis tiiviisti kytköksissä toisiinsa ja niiden päästöjen voidaan katsoa kulkevan käsi kädessä. Liitteessä 3 on taulukoitu tarkemmin suomalaisten sementtien ja betonituotteiden tuotevaiheen hiilijalanjälkiä.

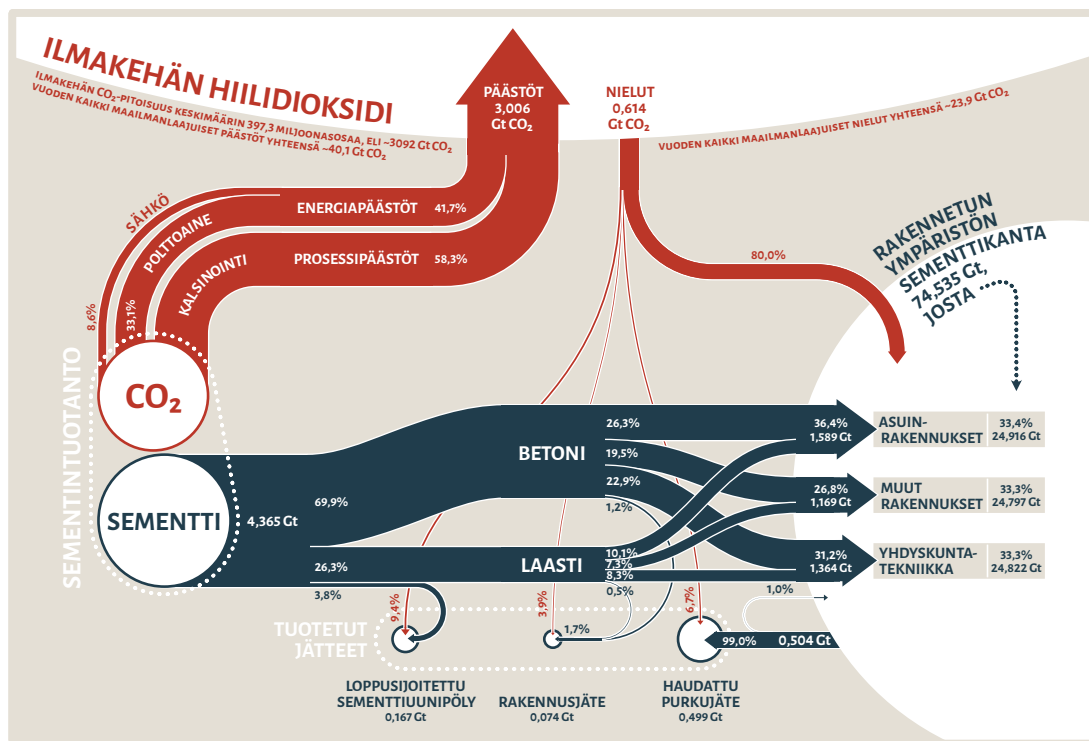
Vaikka betonintuotannon hiilipäästöt perustuvatkin pitkälti sementtiin, myös muilla betonin osa-aineilla on omat negatiiviset ympäristövaikutuksensa, joita on aiheellista käsitellä tarkemmin. Lisäksi merkittävä osa betonirakenteiden hiilipäästöistä on peräisin rauditus-teräksestä ja vaipparakenteiden eristeistä, jotka eivät ole itse betonin varsinaisia osa-aineita. Näitä tekijöitä on käsitelty tarkemmin alla.

Taulukko 1. Suomalaisen betonituotteiden hiilijalanjäljen koostumus.



Lähde: Salminen & al., Betonituotteiden ympäristöselosteet.

Huomioit: Hiilijalanjälkien arvot perustuvat elinkaaren tuotevaiheeseen (A1-A3). Yksi pylväs kaaviossa vastaa yhtä prosenttia tuotteen päästöistä. Tarkkaa, vertailukelpoista tietoa eri tuoteryhmien suhteellisista myyntimääristä ei ole vapaasti saatavilla. Kuvion tietojen pohjalta ei voi suoraan päätellä eri tekijöiden osuutta betonituotteiden päästöjen kokonaisuudesta.



Kuvio 6. Sementin ja siihen liittyvän hiilidioksidin maailmanlaajuinen kierto vuonna 2014.

Lähteet: Cao & al., "The Sponge Effect and Carbon Emission Mitigation Potentials of the Global Cement Cycle"; Friedlingstein & al., "Global Carbon Budget 2021".

Huomiot: Alkuperäisen kaavion laatinut Cao & al. Kaavio käännetty, piirretty uudelleen ja täydennetty ilmakehän hiilidioksidilla sekä maailmanlaajuisilla päästöillä ja nieluilla laskettuna Friedlingstein & al. datalla ja muutokertoimilla. Nuolet ja niiden paksuudet kuvaavat sementin ja sen tuotantoon liittyvän hiilidioksidin ainevirtoja. Ympyröiden pinta-alat kuvaavat kuvattujen kategorioiden kokonaismassoja. Prosenttiosuudet ovat osuuksia kuvattujen virtojen tai kategorioiden kokonaismassasta. 1 Gt = miljardi tonnia.

Sementti

Sementti on betonin tärkein osa-aine niin hiilipäästöjen kuin toiminnankin kannalta. Se on sideaine, joka veden kanssa reagoidessaan liimaa kiviainekset yhteen. Vaikka sen painosuus tyyppillisimmissä betonituotteissa ja -rakenteissa on pieni, noin 7,5–17 %⁴, valtaosa betonin kasvihuonepäästöistä liittyy sementtiin.

Sementtiteollisuuden päästöt jaetaan *prosessipäästöihin* ja *energiapäästöihin*. Prosessipäästöt ovat tuotantoketjussa välttämättömiin kemialisiin reaktioihin liittyviä päästöjä, eli sementin tapauksessa kalkkikiven kalsinoimisreaktioon

liittyviä päästöjä. Väistämättömästi syntyvien prosessipäästöjen vähentäminen onnistuu ainoastaan ottamalla päästetty hiilidioksidi tuotannon yhteydessä talteen, mikä on vielä tällä hetkellä todella kallista (ks. Luku 1.5). Energiapäästöt puolestaan koostuvat valmistusprosessissa tarvittavan energian tuotannon päästöistä, sementin tapauksessa pääosin polttoainepäästöistä, jotka syntyvät kun kierto-

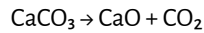
- ¹ SFS-EN 206 2014 + A2 2021, *Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus*, 10.
- ² Salminen & al., *Betonituotteiden ympäristöselosteet*.
- ³ Cao & al., "The Sponge Effect and Carbon Emission Mitigation Potentials of the Global Cement Cycle," 3.
- ⁴ Salminen & al., *Betonituotteiden ympäristöselosteet*.

uunit lämmitetään klinkkerin syntymisen edellyttämään lämpötilaan. Prosessi- ja energiapäästöt raportoidaan usein erikseen erilaisissa päästöinventaariorissa, ja tyypillisesti raporteissa käsitellään vain yhtä tai toista luokkaa. Tästä syystä asiaan vihkiytymättömälle sementin päästöistä selville pääseminen voi olla haastavaa.

Jakautuminen prosessi- ja energiapäästöihin tekee myös sementin kokonaispäästöjen arvioimisesta vaikeaa. Eri maiden sementintuotannon määriä ei voi kertoa yhdellä yleisellä päästökertoimella, sillä osuudet prosessipäästöjen ja polttoainepäästöjen välillä vaihtelevat maiden ja tehtaiden välillä runsaasti.¹ Yleinen kirjallisuudessa käytetty jako prosessi- ja polttoainepäästöjen välillä on 60 % prosessipäästöjä ja 40 % energiapäästöjä², mutta luvut eivät ole vakioita vaan vaikeasti vähennettävien prosessipäästöjen osuus on kasvussa. Vuonna 2005 kansainvälinen energiajärjestö IEA arvioi prosessipäästöjen osuuden olevan 57 %³, vuoteen 2019 mennessä osuus oli kasvanut 65 %:iin (prosessipäästöt 1,55 GtCO₂, energiapäästöt 0,83 GtCO₂) ja sen ennustetaan nousevan vuoteen 2070 mennessä 70 %:iin⁴. Suomessa prosessipäästöjen osuus on hieman globaalia keskiarvoa suurempi, noin 67 %⁵, mikä käytännössä johtuu ja kertoo siitä, että polttoainepäästöt ovat keskiarvoa pienemmät kierrätyspolttoaineiden korkean käytön takia, ja/tai että lopullisen sementtituotteissa käytetyn klinkkerin osuus on korkeampi.

Sementin valmistuksessa sementin raaka-aineet, kalkkikivi, sekä piin-, raudan-, alumiinin- ja mahdollisesti jotkin muut oksidit poltetaan korkeissa lämpötiloissa kiertouuneissa.

Prosessipäästöt syntyvät kalkkikiven kalsinoituessa, eli muuttuessa kalsiumoksidiksi vapauttaen sisältämänsä hiilidioksidin alkaen noin 850 °C lämpötilassa alla olevan reaktioyhtälön mukaisesti.



Raaka-aineita lämmitetään edelleen noin 1450 °C lämpötilaan asti, jotta kalsinaatioreaktion tuotteena syntynyt kalsiumoksidi reagoi edelleen muiden raaka-aineiden kanssa muodostaen klinkkeriä, josta jauhamalla saadaan aikaiseksi portlandsementtiä. *Energiapäästöt* syntyvät pääosin uunin lämmittämisestä riittävän korkeisiin lämpötiloihin, joihin ei nykytekniikalla päästä kustannustehokkaasti esimerkiksi sähköllä, vaan tarvitaan paljon lämpöenergiaa sisältäviä polttoaineita. Loput energiapäästöt sementin tuotantoprosessissa, karkeasti 20 % energiapäästöistä, tulee sähkönkulutuksesta.⁶

Kiviaines

Kiviaineksen hiilipäästöt ovat suomalaisten betonituotteiden kokonaispäästöissä pienet, tyypillisesti 1–3 %. Poikkeuksen muodostavat kevytsorabetonituotteet. Niiden kiviaineksena käytettävä kevytsora tehdään polttamalla kiertouunissa savea energiantensiivisessä prosessissa, jossa savi paisuu vapautuvien kaasujen seurauksena muodostaen kovia, keveitä ja huoikoisia rakeita.

Raekoko vaihtelee yleensä millimetrin sadasosista muutamaan senttimetriin. Kansankielellä betonissa käytettävä kiviaines on enimmäkseen

soraa (raekoko 2–60 mm) ja hiekkaa (raekoko 0,06–2 mm). Raekokojakauma määritellään siten, että kiviainekset limittyvät jättäen mahdollisimman vähän tilaa partikkelien väliin. Näin vähennetään tarvittavan sideaineen määrää, jolla on betonin osa-aineksista sekä korkein hiilijalanjälki että hinta. Koska kiviaineksen osuus betonirakenteen tilavuudesta on yleensä noin 65–80 %, betoniseoksen ominaisuudet riippuvat paljon kiviaineksen ominaisuuksista.

Erityisesti betoniin soveltuva hienojakoinen hiekka, jonka muodostuminen luonnollisen eroosion seurauksena kestää miljoonia vuosia, on vaarassa loppua. Hiekan tuottaminen keinotekoisesti murskaamalla on sitä kalliimpaa ja energiantensiivisempää, mitä hienojakoisempaa ainesta halutaan tuottaa. Keinotekoisesti murskattu kiviaines on raemuodoltaan luonnon kiviainesta teräväreunaisempaa, mikä heikentää tuoreen betonin työstettävyyttä ja vaatii työstettävyyden korjaamiseksi suurempaa sementtimäärää suhteessa kiviainekseen⁸. Valmistuskeinoja voidaan kuitenkin kehittää murskatun kiviaineksen laadun parantamiseksi.

Suomessa kiviaineksen loppumisesta ei ole vaaraa. Käytettävä kiviaines on yleensä graniittipohjaista luonnonkiviainesta, jota saadaan joko kivennäismaalajeista lajittelemalla, tai kivennäismaalajeja ja kalliota murskaamalla. Suomen kalliot ovat hyvin betoniin soveltuvaa kiviainesta ja ne ovat yleensä lähellä maanpintaa. Kalliovarat ovat uusiutumattomat, mutta niiden määrä on niin valtava, että murskaamalla tuotettu kiviaines on käytännössä ehtymätön luonnonvara. Murskatun kiviainek-

sen osuus on jatkuvassa nousussa, sillä sora- ja hiekkamuodostumia suojellaan, eikä uusia ympäristölupia enää juurikaan myönnetä.⁹

Vesi

Veden tehtävä betoniseoksessa on reagoida sementin kanssa muodostaen sementtiliimaa, ja toisaalta parantaa seoksen työstettävyyttä. Vaikka vesi parantaa työstettävyyttä, sen määrä pyritään kuitenkin pitämään työstettävyyden puitteissa mahdollisimman pienenä, sillä veden ja sementin välinen suhde on kaikista oleellisista tekijä betonin lujuus- ja säilyvyysominaisuuksien kannalta.

Suomessa vedestä ei ole puutetta, mutta erityisesti kehittyvässä maailmassa juoma- ja käyttövedestä on pulaa ja betonirakentaminen, jota voi pitää ainakin historiallisesti taloudellisen kehityksen edellytyksenä, vaikeuttaa ongelmaa entisestään. Betoniteollisuuden lietevesi, ja monesti muukin juotavaksi kelpaamaton vesi soveltuu kuitenkin käytettäväksi betonin kanssa.

¹ Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018".

² Esim. Finnsementti, *Ympäristöraportti 2021*, 13.

³ IEA, *Energy Technology Perspectives 2008*, 491.

⁴ IEA, "Energy Technology Perspectives 2020. Report extract."

⁵ Finnsementti, *Ympäristöraportti 2021*, 10.

⁶ Cao & al., "The Sponge Effect and Carbon Emission Mitigation Potentials of the Global Cement Cycle," 3.

⁷ Suomen betoniyhdistys, *Betonitekniikan oppikirja 2018*, 43.

⁸ Ibid., 48.

⁹ Ibid., 43.

Seosaineet

Betoninormien mukaisesti *“seosaine on hienojakoinen epäorgaaninen osa-aine, jota käytetään parantamaan betonin tiettyjä ominaisuuksia”*. Tyypillisimmin seosaineet ovat teollisuuden sivutuotteita, minkä vuoksi niiden hiilijalanjäljet ovat vähäisiä. “Tiettyjen ominaisuuksien” parantamisen ohella seosaineilla voidaan vähentää betonissa käytettävän sementin määrää ja siten päästöjä. Seosaineina käytettäviä pozzolaaneja ovat mm. lentotuhka ja mikrosilika. Esimerkki piilevästi hydraulisesta seosaineesta on masuunikuona. Seosaineita käsitellään tarkemmin luvussa 1.5.

Lisäaineet

Lisäaineet ovat osa-aineita joita lisätään betoni-seokseen pieniä määriä betonin ominaisuuksien säätämiseksi.¹ Vaikka lisäaineiden tuotesidonnaiset päästöt voivat olla korkeat (luokkaa kgCO₂e/kg), yksittäistä lisäaineen määrä seoksessa on tyypillisesti vain muutama promille seoksen kokonaispainosta ja siten niiden ympäristövaikutukset ja päästöt ovat kokonaisuutta katsoen merkityksettömän pienet, erityisesti kun huomioi, että lisäaineita käytetään yleensä ympäristökuormaan vaikuttavien ominaisuuksien parantamiseen. Esimerkiksi huokostimet lisäävät betonin pakkaskestoa ja siten käyttöikä. Notkistimet mahdollistavat pienemmän vesi-sementtisuhteen ja siten pienemmän sementin tarpeen tai paremman tiiviyyden ja lujuuden — kaikki ominaisuuksia, jotka vähentävät betonin elinkaarenaikaisia päästöjä.² Käytettävistä lisäaineista vain pieni osa on lievästi myrkyllisiä, mutta nekin ovat kovettuneessa betonissa sitoutuneena hydrataatiotuotteisiin³.

Teräs

Kantavissa betonirakenteissa käytettävän teräksen osuus koko rakenteen tilavuudesta on melko pieni, korkeimmillaan parin prosentin luokkaa⁴. Se on silti merkittävä osuus huomioiden teräksen energia- ja hiili-intensiivisyyden (taulukko 2, s. 33). Kierrätysteräs soveltuu kuitenkin hyvin käytettäväksi jännittämättömän betonin raudoituksessa, ja betoniteräksen kierrätysmateriaaliosuus on korkea (ks. luku 1.6). Suomessa käytettävä betoniteräs on vuodesta 1994 lähtien ollut lähes täysin romupohjaista⁵. Jännitetyissä rakenteissa käytetään neitseellistä terästä, mutta niiden teräsmäärä on kokonaisuudessaan pienempi, minkä takia myös teräksen osuus rakenteen hiilijalanjäljestä jää pienemmäksi (vrt. esim. ontelolaatta ja massiivilaattaelementti taulukossa 1). Terästä käsitellään lisää luvussa 1.4.

¹ Suomen betoniyhdistys, *Betoninormit 2016*, 30.

² Suomen betoniyhdistys, *Betonitekniikan oppikirja 2018*, 150.

³ Häkkinen & al., *Betonirakenteiden ympäristövaikutukset*, 45.

⁴ Salminen & al., *Betonituotteiden ympäristöselosteet*.

⁵ Häkkinen & al., *Betonirakenteiden ympäristövaikutukset*, 39.



Kuva 14. Betonin kiinteitä osa-aineita.

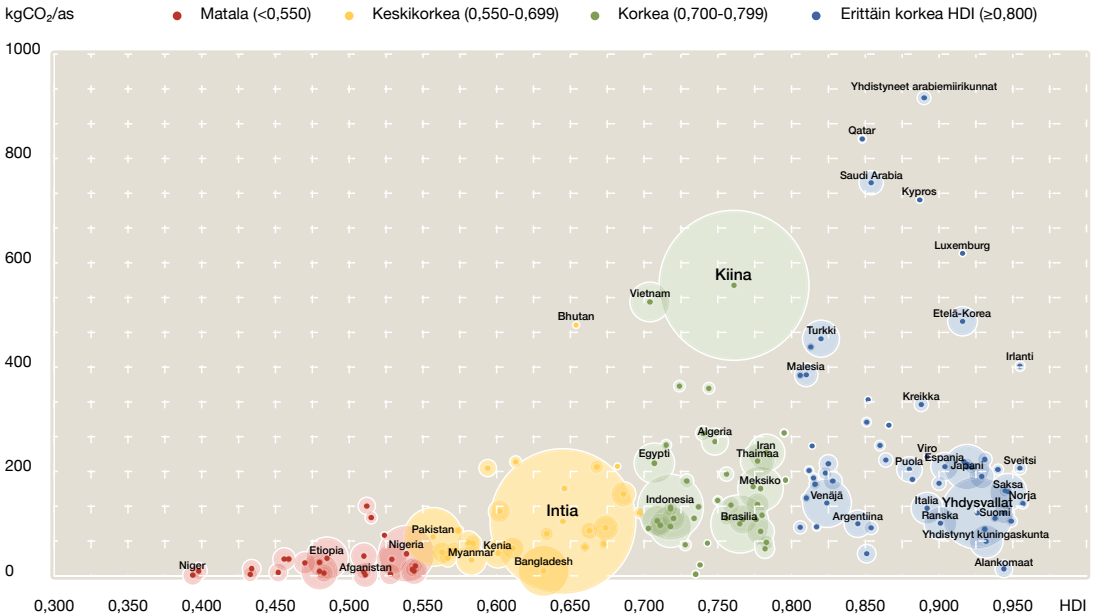
1.3 – Betonin ekologiset, taloudelliset ja sosiaaliset ulottuvuudet

Betonin valtavan kulutuksen vuoksi sen päästöt ovat kiistatta aivan liian suuret. Keskustelussa betonin kestävydestä huomio kohdistuukin yleensä sen suureen osuuteen globaaleista hiili-dioksidipäästöistä, sosiaalisen ja taloudellisen kestävyden jäädessä vähemmälle huomiolle. Ilman taloudellisen ja sosiaalisen puolen tarkastelua jäädään kuitenkin ilman selkeää kokonaiskuvaasiasta. On tarkasteltava myös missä betonia kulutetaan ja mitä sillä saadaan aikaan.

Ylivoimainen ykkönen betonin kulutuksessa on Kiina, jonka osuus globaalista sementintuotannosta oli korkeimmillaan, vuonna 2014, peräti 60 % (kuvio 8). Kaukaisena kakkosena on Intia, jossa tuotetaan sementtiä noin seitsemäsosa Kiinan tuotannosta.

Globaalilla tasolla betonin taloudellista ja sosiaalista kestävyyttä voi tarkastella vertaamalla valtioiden asukaskohtaisia sementintuotantoon liittyviä päästöjä niiden inhimillisen kehityksen indeksiin, HDI:hin (eng. Human Development Index). HDI on YK:n kehitysohjelman vuodesta 1990 käyttämä mittari, joka kehitettiin taloudellisten mittareiden kuten bruttokansantuotteen rinnalle kuvaamaan myös valtioiden sosiaalista kehitystä. HDI huomioi asukaskohtaisen tulotason lisäksi myös keskimääräisen koulutustason ja eliniän odotteen.

Vertailtaessa valtioiden asukaskohtaisia hiilijalanjälkiä yleisellä tasolla, siis ei vain betonin näkökulmasta, on havaittavissa selvä yhteys taloudellisen ja sosiaalisen kehityksen ja hiili-



Kuvio 7. Valtioiden inhimillisen kehityksen indeksin (2019) suhde sementin asukaskohtaisiin prosessipäästöihin (2018).

Lähteet: Andrew, *Global CO₂ emissions from cement production* (July 2021); UN DESA, *World Population Prospects 2019*; UNDR, *Human Development Report 2020*.

Huomioit: Ympyrät pisteen ympärillä kuvaavat valtioiden asukaslukea (2020 arvio). Kuvattuna 147 valtiota, joista sekä sementin päästötiedot, että inhimillisen kehityksen indeksi saatavilla. Kuvatut valtiot kattavat noin 95,6% maailman väestöstä Yhdistyneiden kansakuntien väestötietojen mukaan. Tarkempi ryhmäjaon määrittely liitteissä.

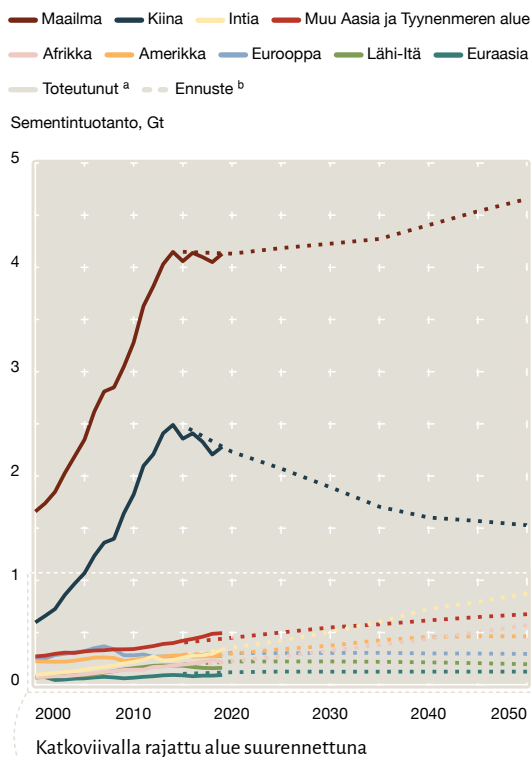
jalanjäljen välillä. Kehittyneemmät maat kuluttavat enemmän ja aiheuttavat siten enemmän päästöjä. Betonin päästöt ovat kuitenkin tästä yleisestä trendistä poikkeus.

Kuvio 7 kuvaa kuplakaavion muodossa valtioiden sementintuotannon asukaskohtaisia hiilidioksidipäästöjä suhteessa inhimillisen kehityksen indeksiin. Pisteitä ympäröivien ”kuplien” pinta-alat kuvaavat kyseisten valtioiden asukaslukuja.

YK:n kehitysohjelma jakaa raporteissaan valtiot neljään kehittyneisyyden ryhmään HDI-arvojen mukaan. Asukaskohtaisen kulutuksen kärkivii-sikko ovat kaikki korkeimman HDI-ryhmän maita, mutta niiden asukasmäärät ovat varsin pieniä. Valtaosa kehittyneimmistä maista on verrattain matalalla tasolla. Kiina, joka on sekä maailman väkirikkein valtio että ylivertaisesti suurin sementin ja betonin kuluttaja on huolestuttavan korkealla kuudennella sijalla.

Yleisesti ottaen kehittyneimmät maat ovat sementin asukaskohtaisissa päästöissä olleet jo 70-luvun öljykriisistä lähtien paikallaan ja jopa hieman laskussa, kehittyvien valtioiden päästöjen edelleen kiihtyessä (kuvio 5, s. 23). Esimerkiksi Suomessa sementtiin liittyvien päästöjen huippuvuodet olivat jo 70-luvulla¹ ja sementintuotannon nykyinen osuus kaikista hiilidioksidipäästöistä on noin 1,8 %², siinä missä globaali arvo on 7 % luokkaa³.

Kehittyvillä alueilla Aasiassa, Afrikassa ja Etelä-Amerikassa betonin ja sementin kulutus ovat puolestaan ymmärrettävästi kasvussa ja niiden ennustetaan nousevan vielä runsaasti (kuvio 8).



Kuvio 8. Sementintuotanto ja ennusteet alueittain.

Lähteet: ^{a)} USGS, Cement Statistics and Information; ^{b)} IEA, Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry (2018).

Huomiot: ^{a)} data jaettu alueisiin ^{b)} n aluejakoa mukaillen. Tarkempi aluejaon määrittely liitteissä. Ennusteina käytetty ^{b)} n todennäköisimpänä pitämiä ”matalan vaihtelevuuden” kysyntäennusteita. Toteutuneen kulutuksen data yltää vuoteen 2019 asti ja kysyntäennusteet pohjautuvat vuoden 2014 dataan.

¹ Andrew, *Global CO₂ emissions from cement production*.

² Finnsementti, *Ympäristöraportti 2021*, 12.

³ IEA, *Energy Technology Perspectives 2020*, 216.

1.4 – Betoni verrattuna muihin rakennusmateriaaleihin

Betonin ympäristövaikutuksia ei voi kokonaisvaltaisesti arvioida käsittelemättä sen suhdetta kilpaileviin rakennusmateriaaleihin.

Puu

Kerta toisensa jälkeen betoni- ja puurakentamisen elinkaarivertailussa puurakentamisen hiilijalanjälki on selvästi pienempi. Puu on yleisesti käytetyistä rakennusmateriaaleista ainoa, jota voi pitää täysin uusiutuvana.

Johdannossa käsiteltiin muutamalla tilastollisella numerolla miksi betonirakentamista ei voida korvata puurakentamisella. Suomessa, jonka kokonaispinta-alasta kolme neljännestä on metsän peitossa, tilanne on toki erilainen ja usko puurakentamisen tulevaisuuteen ymmärrettävää. Puurakentaminen on Suomessa tällä hetkellä kovassa nosteessa betonirakentamisen vaihtoehtona. CLT-elementeillä voidaan rakentaa esimerkiksi asuinkerrostaloja pitkälti samaan malliin kuin betonielementeilläkin.

Luonnonvarakeskuksen mukaan Suomen metsissä on runkopuuta noin 2,5 miljardia kuutiota ja määrä kasvaa joka vuosi. Vuonna 2018 metsien hakkuut ja sitä myötä poistuma nousi uusiin ennätyslukemiin, mutta tuoltakin vuodelta kasvun ja poistuman erotukseksi jäi puuvarantoon 14 miljoonan kuution nettokasvu.¹ FAO:n tilastojen mukaan Suomen puutuoteteollisuuden sahatavaratuotanto oli vuonna 2018 noin 12 miljoonaa kuutiota ja levytavaratuotanto noin 1,3 miljoonaa kuutiota.² Suomen sementtituotanto samana vuonna oli betoniyhdistyksen tilastojen mukaan noin 1,4 miljoonaa tonnia³, mikä kääntyy betonin kulutuksena noin 3 miljoonaan kuutioon, jos arvioidaan betoniin käytettävän tyypillisesti noin 350 kiloa

sementtiä per kuutio betonia ja tuotetusta sementistä noin 70 % (kuvion 6, s. 25 mukaisesti) päätyvän betonin valmistukseen. Näiden lukujen valossa siis tavaraa riittäisi. Sahatavara-tuotannon ja betoniteollisuuden kuutiomääriä ei tuki ei toki voi suoraan verrata toisiinsa betoni- ja puurakenteiden erilaisuuden takia. Kuitenkin käy järkeen, että Suomessa betoninkulutuksesta voisi korvata merkittävän osan puulla kestävästi.

Elinkaarivertailussa ei kuitenkaan tavallisesti huomioida puurakentamisen biogeneettistä hiilivelkaa, eli negatiivista vaikutusta metsien hiilivarastoihin ja -nieluihin. Rakennusteollisuuden tilaaman selvityksen mukaan biogeneettisen hiilivelan huomioiminen voi jopa kääntää puurakentamisen hiilikädenjäljen negatiiviseksi, siis lisäykseksi hiilijalanjälkeen. Tämä tarkoittaa sitä, että rakennuksessa käytetyn puumateriaalin sekä sitä varten kaadetun metsän uudelleen kasvaessa sitoma hiilimäärä on rakennuksen elinkaaren aikana pienempi, kuin mitä metsä olisi samassa ajassa sitonut, jos se olisi jätetty kasvamaan. Samassa selvityksessä tehdyn elinkaariarvion mukaan betonirakennuksen hiilijalanjälki voi olla puurakennusta pienempi, jos biogeeninen hiilivelka otetaan huomioon.⁴

Teräs

Terästä käytetään runkomateriaalina lähinnä toimistorakennuksissa. Teräksen, erityisesti neitseellisen rautamalmista tuotetun teräksen hiilikuorma niin massan kuin tilavuudenkin kautta vertailtaessa on valtava.

Neitseellinen teräs valmistetaan rautamalmista masuunissa erittäin korkeissa lämpötiloissa,

Taulukko 2. Valikoitujen rakennustuotteiden hiilijalanjälkiä.

	Tiheys kg/m ³	Massaan perustuva GWP kgCO ₂ e/kg	Tilavuuteen perustuva GWP kgCO ₂ e/m ³
Teräsrakenne, kantava rakenne	7850	2,5	19625,0
Tasolasi	2500	1,2	3000,0
Kuitusementtilevy	1300	0,96	1248,0
Luonnonkivilaatta julkisivuihin ja lattioihin	2700	0,31	837,0
Betonivalmisosat, väliseinä 200 mm	2465	0,15	369,8
Poltettu tiili, punainen, täystiili	1800 ^a	0,18	324,0
Lämpökäsitelty sahatavara	430	0,75	322,5
Valmisbetoni, C30/37	2363	0,11	259,9
Poltettu tiili, punainen, reikätiili	1400 ^a	0,18	252,0
Betonivalmisosat, sandwich 150+220+80 mm	1251	0,17	212,7
Höyrykarkaistu kevytbetoni, raudoitettu	475	0,4	190,0
Betonivalmisosat, ontelolaatta 370 mm	1300	0,14	182,0
Kipsi-kartonkilevy sisäkäyttöön	670	0,26	174,2
CLT, ristiinliimattu monikerroslevy	470	0,17	79,9
Kyllästetty puu	435	0,14	60,9
Liimapuu	430	0,11	47,3
EPS-eriste	16	2,9	46,4
Kivivilla, pieni tiheys, keskiarvo 29,5 kg/m ³	29,5	1,2	35,4
Sahatavara	474	0,069	32,7
Lasivillaeriste, tiheys 20 kg/m ³	20	1	20,0

Lähteet: ensisijaisesti www.co2data.fi.Puuttuvilta osin täydennetty: ^a) Siikanen, *Rakennusaineoppi*Huomio: GWP on lyhenne sanoista *Global Warming Potential* ja kuvaa kuinka moninkertainen materiaalin ilmaston lämmittävä vaikutus on verrattuna hiilidioksidiin 100 vuoden aikavälillä. Kaikki arvot on muunnettu massa ja tilavuusperusteisiin yksiköihin vertailukelpoisuuden vuoksi ja perustuvat elinkaaren tuotevaiheeseen (A1-A3).

joiden tuottamiseen käytetään fossiilisia polttoaineita. Kierrätysteräs puolestaan valmistetaan teräsromusta sähköisin menetelmin, ja sen hiilijalanjälki on huomattavasti pienempi, mutta siltikin korkea ainakin vertailtaessa muihin materiaaleihin massan tai tilavuuden kautta.⁵ Teräsrakenne mahdollistaa kuitenkin suuria lujuuksia pienillä rakennepaksuuksilla, minkä takia vertailu teräksen ja betonin hiilijalanjälkien välillä massaan tai tilavuuteen perustuvien GWP-arvojen kautta ei ole järkevää.

SSAB:n Raahen terästehdas yksistään tuottaa 7 % Suomen hiilidioksidipäästöistä, eli liki nelinkertaisen määrän Suomessa tuotettavaan sementtiin nähden. SSAB:n tavoitteena on kuitenkin siirtyä hiilivapaaseen teräksen valmistukseen perustuen vedyn käyttöön, mikä tulee muuttamaan tilannetta.⁶ Teräs on käytännössä 100 % kierrätettävää ja sen käyttöarvon menetys on vähäinen. Esimerkiksi betonirakenteiden

raudoituksissa käytetään nykyisin pääasiassa kierrätysterästä, mutta jännitetyt rakenteet vaativat neitseellistä terästä.

Tiili ja savi

Savirakentamisen tyypillisin ilmentymä Suomessa on poltetut tiilet. Tiili on nykyisin harvinainen runkomateriaali käsityöpainotteisuutensa ja isojen elementtien valmistamis-

¹ Peltola & al., *Suomen metsätilastot 2019*, 12.

² FAO, *FAO Yearbook of Forest Products 2018*.

³ Betoniteollisuus, *Betoniteollisuuden yhteenvetotaulukko 2019*.

⁴ Laine & al., *Väähähiilisten rakennusmateriaalien hiilikädenjälki osana sääntelyä – haasteet ja mahdollisuudet*, 23–28.

⁵ IEA, *Energy Technology Perspectives 2020*, 199–200.

⁶ Mölsä, "Sementin ja teräksen ilmastopäästöt tulevat jo valmistusprosessista."

vaikuden takia. Kuitenkin esimerkiksi tiili-harkoista voidaan rakentaa varsin ekologisia taloja. Samoin kuin betoni, tiili toimii erinomaisena termisenä massana aurinkotaloja suunnitellessa. Tiilellä on erinomaiset säilyvyysominaisuudet ja se soveltuu hyvin uudelleenkäytettäväksi elinkaarensa päässä, kun sideaineena käytetään kalkkilaastia. Sementtilaasti puolestaan muodostaa niin lujan siteen, että tiiliä on vaikea jälkeinpäin erottaa toisistaan niitä rikkomatta.¹ Yleisimmin tiiltä käytetään nykyisin julkisivumateriaalina, missä sen säilyvyysominaisuudet menevät helposti hukkaan, koska tiilimuurin suojaamien eristeiden tekninen käyttöikä on huomattavasti lyhempi.

Tiilen ohella myös muinainen savirakentamisen tekniikka, ns. *pisé-* tai *savivalurakentaminen*² (eng. rammed earth), on viimeisinä vuosikymmeninä nostanut jälleen päätään betonin vähähiilisenä vaihtoehtona. Perinteisessä pisé-tekniikassa maakostea saven ja kiviaineksen sekoitus sullotaan mahdollisimman tiiviisti muottien väliin noin 15 senttimetrin kerroksissa. Savivalurakenteilla on paljon samoja ominaisuuksia kuin betonilla, kuten muovattavuus, palamattomuus, hyvä ääneneristävyyys, oikein toteutettuna pitkäikäisyys ja korkea terminen massa. Modernissa savivalurakentamisessa voidaan käyttää samoja muotteja kuin betonin paikallavalurakentamisessa. Se soveltuu niin perustusten, lattioiden, kuin seinienkin rakentamiseen. Elinkaarensa päässä (stabiloimattomat) savivalurakenteet voidaan joko palauttaa sellaisenaan takaisin luontoon tai *kierrättää loputtomasti uudestaan käyttöön ilman käyttöarvon menetystä*, mikä on maalle ja savelle ominainen ja poikkeuksellinen ominaisuus. Savivalurakenteiden keskeisimmät heikkoudet ovat huono kosteuden kesto, työläs rakentaminen ja verrattain heikko puristuslujuus, jonka vuoksi kahden kerroksen korkeutta pidetään tyyppillisesti ylärajana.³ Lujuutta ja kosteudenkestoa voidaan

paikata stabiloinnilla, joka tehdään yleensä sekoittamalla hiekan ja saven sekaan sementtiä. Käytettäessä sementtiä, mikä on yleisin käytetty ratkaisu, stabilointi on kuitenkin ominaisuuksien parantamisen kannalta kyseenalainen keino, koska sillä voidaan katsoa menetettävän rakentamistavan parhaat ympäristöominaisuudet ja käytännössä lopputuloksena saadaan pahimmillaan vain huonolaatuista betonia.⁴

Vasten nykyistä kahden kerroksen ylärajaa ja stabiloinnin tarvetta, Saksassa on kuitenkin jo vuonna 1828 rakennettu jopa kuusikerroksinen kerrostalo savivalutekniikalla ja ilman stabilointia (kuva 15).⁵

Viimeisin innovaatio savivalurakentamisen saralla on betoniteknologiasta tuttuja tehonotkistimia lisäaineena hyödyntävä itseitiivistyvä savibetoni (eng. self-compacting clay concrete, eli sccc, tai nasevammin “poured earth”), jolla voidaan valaa rakenteita betonin tavoin ilman erillisen sullomisen tarvetta ja samoilla työvälineillä.⁶ Tässäkin on toistaiseksi rajoitteena kahden kerroksen maksimikorkeus, mutta tutkimus on vielä tuoretta ja ainakin betonin paikallavalurakentamisesta tuttujen työtapojen ja tehokkuuden hyöty on ilmeinen.

Kaiken kaikkiaan savivalurakentamisesta ei vielä ole ainakaan vielä betonin syrjäyttäjäksi, mutta joissain tilanteissa sitä voi käyttää vähähiilisenä ja loputtomasti kierrätettävänä betonin korvikkeena ja jatkuvan tutkimuksen myötä sen kilpailukyky voi tulevaisuudessa parantua.

¹ Pelsmakers, *The Environmental Design Pocketbook*, 228.

² Jokiniemi & Davies, *Kuvitettu rakennussanakirja*, 279.

³ Berge, *The Ecology of Building Materials*, 208–11.

⁴ Van Damme & Houben, “Earth concrete. Stabilization revisited”, 90.

⁵ Harper, “Outrage: greenwashing risks giving dirt a filthy name.”

⁶ Ouellet-Plamondon & Habert, “Self-Compacted Clay based Concrete (sccc): proof-of-concept”.



Kuva 15. Haus Rath, Saksa, Wilhelm Wimpf, 1828.

1.5 – Betonin ja sementin hiilijalanjäljen pienentäminen

Betonin päästöjen vähentämiseksi on olemassa lukuisia keinoja. Osa on jo nykyisellään markkinoilla, osa yhä kehitteillä laboratorioissa ja osa erilaisten pilottihankkeiden muodossa jossain sillä välillä. Tässä diplomityössä en käsittele näitä keinoja kovin laajasti, sillä ne ovat yleensä arkkitehdin vaikutuspiirin ulkopuolella. Koska tutkimuskentällä tapahtuva innovaatio antaa kuitenkin aihetta suhtautua optimistisesti betoniteknologiaa kohtaan, on joitain keskeisimpiä lähestymistapoja aiheellista käsitellä lyhyesti.

Pozzolaanit ja muut klinkkerin korvikkeet

Vanhin ja vakiintunein päästöjen vähentämisen keino on erilaiset portlandsementtiklinkkeriä korvaavat seosaineet (eng. supplementary cementitious materials, SCM). Näistä yleisimpiä ovat pozzolaanit, kuten *lentotuhka* ja *mikrosilika*, sekä piilevästi hydrauliset aineet kuten *masuunikuona*. Pozzolaanit saavat nimensä Roomalaisessa esibetonissa käytetystä Puteolin, nykyisin Pozzuolin tuliperäisestä maa-aineksestä (ks. s. 13). Nykymääritelmän mukaan pozzolaani on *”pii- tai pii- ja alumiinipitoinen materiaali, joka hienojakoisessa olomuodossa, kosteissa olosuhteissa ja normaalissa ympäristön lämpötilassa reagoi sementin sisältämän kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen yhdisteitä, joilla on sementtimäisiä ominaisuuksia”*.¹

Piilevästi hydraulisella aineella tarkoitetaan aineita, jotka eivät yksinään reagoi veden kanssa, vaan tarvitsevat emäksisen aktivaattorin kuten portlandsementin hydrataatioreaktion käynnistämiseksi². Tyypillisimmin käytetyt seosaineet ovat nykyisin kierrätettyjä teollisuuden sivutuotteita kuten *lentotuhka*, *masuunikuona* tai (*mikro*)*silika*, mutta myös luonnonpozzolaaneja kuten edellä mainittu *”Pozzuolin*

maa”, kreikkalainen *”Santorínin maa”* ja saksalainen *trassi* käytetään edelleen niiden ollessa saatavilla.

Lentotuhka on energiateollisuuden sivutuote, joka kerätään hiilivoimaloiden savukaasuista. Se on hyvin hienojakoista (raekoko noin 1–100 µm), raemuodoltaan pyöreää, pulverimaista tuhkaa, jonka kemiallinen koostumus vaihtelee poltetun hiilen mukaan.³

Masuunikuona on nimensä mukaisesti terästeollisuuden masuuniuuneissa rautamalmin erotelussa syntyvä, ei-toivotuista aineksista koostuva sivutuote. Se voi olla joko raekooltaan noin hiekkaa vastaavaa *rakeista* masuunikuonaa tai karkeampirakeista *pelletoitua* masuunikuonaa. Jauhamalla noin sementtiä vastaavaan raekoon masuunikuonasta saadaan seosaineena käytettävää, piilevästi hydraulista masuunikuonajauhetta.⁴

Mikrosilika on piintuotannon sivutuotteena syntyvää äärimmäisen hienojakoista piidioksidipölyä. Yksi mikrosilikapartikkeli on tyypillisesti kooltaan vain 0,1 µm luokkaa, eli karkeasti millimetrin kymmenestuhannesosa.⁵ Sementti- ja betoniteknisessä yhteydessä puhutaan yleensä yksinkertaisesti silikasta, mutta laajemmassa merkityksessä sillä voidaan tarkoittaa myös piidioksidin (SiO₂) muita muotoja, kuten mineraalimuotoinen kvartsi, tai elintarvikepakkauksista tuttu kuivausaine, silikageeli. Englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetäänkin yleensä tarkempaa termiä *silica fume*.

Erilaisia seosaineita käytetään hiilijalanjäljen vähentämisen lisäksi myös betonin ominaisuuksien parantamiseen. Käyttämällä seosaineita voidaan esimerkiksi vähentää betonin veden tarvetta, vähentää lämpöhalkeilua ja

lisätä säilyvyyttä kemiallisia vauriomekanismeja vastaan. Seosaineiden ominaisuudet vaihtelevat ja esimerkiksi lentotuhkan ja masuunikuonan vähentäessä veden tarvetta, mikrosilika lisää sitä. Seosaineet ovat tärkeitä osa-aineita korkealujuusbetonien, itse tiivistyvien betonien ja muiden korkean suoritustason betonien (eng. high performance concrete, HPC) valmistuksessa.⁶

Yleisimmille ja tunnetuimmille seosaineille, kuten lentotuhka, masuunikuona, mikrosilika ja luonnonpozzolaanit, sekä reagoimattomalle kalkkikivifillerille on jo nykyisessä eurooppalaisessa standardissa⁷ määritelty ylimmäisrajat portlandsementin korvaamiseksi. Suomessa seosaineita on kuitenkin käytetty maltillisesti. Tavallisten portlandsementtien (CEM I, ei seosaineita) rinnalla vähemmän seostettuja *portlandseossementtejä* (luokka CEM II, seosaineita korkeintaan 35 % painosta) on ollut saatavilla jo vuosia, mutta ensimmäinen varsinainen *masuunikuonasementti* (CEM III, korkeintaan 95 %, kyseisessä tapauksessa 40–46 %⁸ masuunikuonaa) kuitenkin saatiin Suomen markkinoille vuonna 2021.⁹ Enemmän seostetut *pozzolaaniseментit* (CEM IV, korkeintaan 55 % silikaa, luonnonpozzolaaneja ja/tai lentotuhkaa) puuttuvat Suomen markkinoilta edelleen.

Lentotuhka, masuunikuona ja mikrosilika eivät kuitenkaan ole sementin päästöjen vähentämiselle hopealuoti, sillä niiden tuotannon määrä on huomattavasti pienempi kuin sementin. Lisäksi hiilienergiasta uusiutuviin energiamuotoihin siirryttäessä ja metalliteknologian vähähiilistyessä uusin teknologioin, lentotuhkan ja masuunikuonan tuotantomäärät laskevat lähitulevaisuudessa. Lentotuhka poistunee Suomen markkinoilta jo lähivuosina, kun hiilivoimalat sulkeutuvat ja masuunikuonan tuotanto tulee laskemaan kun terästeollisuus siirtyy koksipohjaisesta pelkistyksestä vetypelkistykseen. Varsinaisia tuotteita niistä ei voi

myöskään tehdä: esimerkiksi lentotuhkan hiilijalanjalan lasketaan nykyisin olevan lähes nolla juuri sillä perusteella, että se on energiateollisuuden sivutuote, mutta jos vaihtaa tarkastelukulmaa ja ajatteleekin lentotuhkan päätuotteena, sitä syntyy noin tonni jokaista kymmentä poltettua kivihiilitonnia kohden, ja sen GWP-arvoksi saataisiin noin 33 kgCO₂/kg¹⁰: portlandsementtiinkin verrattuna noin 40–50 kertainen lukema.

Pozzolaanien käyttö ei silti ole häviämässä. Uusia pozzolaaneja etsitään ja tutkitaan esimerkiksi erilaisista teollisuuden sivuvirroista jatkuvasti. Viime aikoina tyypillisimpien pozzolaanisten seosaineiden rinnalla on päätään nostanut metakaoliini, jota saadaan kalsinoimalla (lämmön avulla vesi poistamalla) kaoliinisavea. Tässä ns. LC³-teknologiassa (limestone calcined clay cement) sekoitetaan hienojakoista kalkkikivijauhetta eli filleriä metakaoliiniin ja seoksella voidaan korvata jopa 50 % portlandsementistä betonin lujuusominaisuuksien heikentymättä ja säilyvyysominaisuuksien jopa hieman parantuessa¹¹. Maaperässä runsaasti esiintyvillä kalkkikivillä ja kaoliinisavella ei ole odotettavissa vastaavia riittävyysrajoitteita kuin esimerkiksi lentotuhkalla ja masuunikuonalla.

¹ ACI CT-13, *ACI Concrete Terminology*, 50. (Oma käännös.)

² Harrison, "Constitution and Specification of Portland Cement", 140.

³ Mehta & Monteiro, *Concrete – microstructures, properties and materials*, 292–5.

⁴ Ibid., 295.

⁵ Ibid., 295,7.

⁶ Ibid., 297–300.

⁷ SFS-EN 197-1, *Sementti. Osa 1: tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus*.

⁸ Mattila, "Kolmossementti vie ympäristöloikkaan."

⁹ Punkki, "Betonin sideaineet tulevaisuudessa."

¹⁰ Davidovits, *State of the Geopolymer R&D 2021*.

¹¹ Scrivener, "Calcined clay limestone cements (LC3)", 49.

Geopolymeerit ja muut vaihtoehtoiset sideaineet

Toinen betonin hiilijalanjäljen laskemisen keino ovat vaihtoehtoiset sideaineet, jotka eivät sisällä portlandsementtiä ollenkaan. Tunnetuimpia vaihtoehtoisideaineita ovat geopolymeerit ja alkaliaktivoitunut materiaalit. Geopolymeerien ja alkaliaktivoitujen materiaalien raaka-aineena käytetään usein samoja pii- ja alumiinipitoisia pozzolaaneja kuin portlandsementin seostamisessa: metakaoliini, lentotuhka ja masuuni-kuona. Kuitenkin myös uusia teollisuuden sivuja jätevirtoja tutkitaan.

Oulun yliopiston kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikössä kehitetään esimerkiksi alkaliaktivoituja materiaaleja, joiden raaka-aineina hyödynnetään mineraali- ja lasivillajätettä¹, sekä kaivostoiminnassa syntyvää rikastushiekkaa². Toisin sanoen samalla kun kierrätetään ympäristölle haitallisia aineita, jotka muuten päätyisivät kaatopaikalle, voidaan vähentää sementin hiilijalanjälkeä parhaimmillaan yli 90 %³.

Merkittävimmät esteet vaihtoehtoisten sideaineiden yleistymisen kannalta on standardien puute, minkä vuoksi niitä ei vielä juuri voida käyttää kantavissa rakenteissa, vaan käyttö rajoittuu lähinnä määrällisesti pieniin erikoistuotteisiin. Toisaalta ne käyttävät pitkälti samoja raaka-aineita, joilla voidaan jo tunnetuin menetelmin seostaa tavanomaisia sementtejä, ja siten laskea sementin hiilikuormaa astetta helpommin.⁴

Hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidin talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi (eng. Carbon capture, utilisation and storage, eli CCUS) on jo kauan tutkittu, nouseva teollisuudenala, joka pyrkii poistamaan ilmakehän hiilidioksidia ja liittämään sen osaksi kierrotalouden mukaista ainekiertoa tai varastomaan sen pysyvästi ilmakehän hiilikierron ulkopuolelle. Hiilentalteenotto voi tapahtua joko *pistemäisestä päästölähteestä* (eng. point source capture, eli PSC), joka on korkeampien hiilidioksidipitoisuuksien vuoksi tehokkaampi keino, tai *suoraan ilmakehästä* (eng. direct air capture, eli DAC), joka on myös pitkäaikaisten ilmastotavoitteiden kannalta tarpeellista, sillä ilmakehän hiilidioksidin määrää pitää saada myös laskettua, kunhan sen kertyminen saadaan ensin pysäytettyä. Eniten hiilidioksidin talteenottoa on tutkittu ja kokeiltu energian tuotannossa, hiilivoimaloiden pistemäisistä päästölähteistä, mutta myös päästöiltään vaikeasti alennettavat teollisuudenalat, kuten terästeollisuus, kemianteollisuus, ja sementti-teollisuus ovat pistemäisten päästölähteidensä vuoksi potentiaalisia ja vaihtoehtoisten vähennyskeinojen vähäisyyden vuoksi tarpeellisia kohteita hiilidioksidin talteenotolle.⁵

Teknologiaa on koeteltu kaupallisilla markkinoilla erilaisten pilottihankkeiden muodossa jo vuosia ja heikoin tuloksi, mutta kiristyvän hiilihinnoittelun vuoksi teknologian taloudellinen kannattavuus on nousussa, ja uusia pilottihankkeita on enemmän kuin koskaan⁶. Maailman ensimmäinen sementtitehtaan yhteyteen rakennettu hiilidioksidin talteenottolaitos on tällä hetkellä rakenteilla Norjassa ja tarkoitus ottaa käyttöön vuonna 2024. Laitoksen on määrä ottaa talteen noin 50 % tehtaan päästöistä ja varastoida ne pysyvästi yli kilometrin syvyyteen merenpohjan alapuolelle⁷.

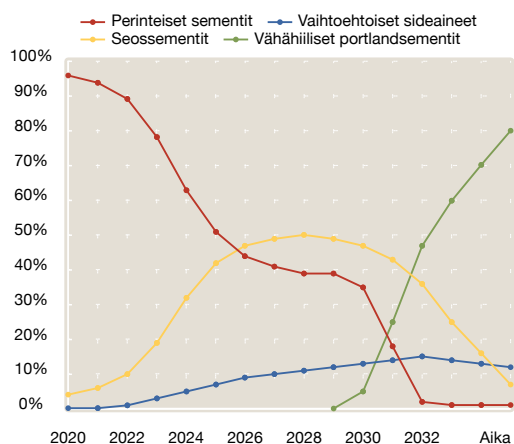
Sementtien tulevaisuus

Kaikilla edellä kuvatuilla vähennyskeinoilla on osansa sementin hiilijalanjäljen vähennystä tavoiteltaessa, eikä mikään keinoista yksin riitä ilmastotavoitteiden saavuttamiseen.

Lopullisena ratkaisuna voidaan nähdä hiilidioksidin talteenotto, ja kalsinoinnissa käytettävien fossiilisten polttoaineiden korvaamista sähköllä, mutta sen toteutumiseen tarvitaan vielä suuria investointeja ja merkittävän muutoksen on arvioitu vievän vielä ainakin kymmenisen vuotta.⁸ Sitä odottaessa päästöjen vähentäminen on kuitenkin aloitettava seosaineita ja vaihtoehtoisia sideaineita käyttämällä. Yksi arvio eri keinojen merkityksestä Suomen hiilineutraaliustavoitteeseen, vuoteen 2035 mennessä on kuvattu kuviossa 9.

Suomessa tärkeä askel päästöjen vähennyksessä on alkuvuodesta 2022 julkaistu betonin vähähiilisyysluokitus, joka tulee uudeksi betonirakenteille määriteltäväksi luokitukseksi esimerkiksi lujuus- ja rasitusluokkien rinnalle. Luokitusta voidaan käyttää työkaluna sekä hankkeiden tavoiteasetannassa että vähähiilisempien betonirakennusten suunnittelussa. Luokitus lähtee referenssitasosta, joka perustuu betonivalmistajien keskimääräiseen päästötasoon vuonna 2021 (elinkaarimoduulit A1–A3), ja luokat jatkuvat 15 %:n päästövähennyspykälissä alaspäin, siten että rakenteen hiilipäästöjen ylärajaksi voidaan määrittää 85, 70, 55, tai 40 % referenssitasosta. Betonin valmistajat puolestaan laskevat mihin vähähiilisyysluokkaan heidän reseptinsä yltävät ja voivat sen pohjalta tehdä tarjouksia suunnitelmissa määriteltyjen luokkien mukaisesti.⁹

Betoniteollisuuden maailmanlaajuinen kattojärjestö GCCA julkaisi 2021 lopulla tiekartan ja sitoumuksen alan muuttamiseksi hiilineutraaliksi vuoteen 2050 mennessä. Välitavoitteeksi



Kuvio 9. Arvioitu sideaineiden käytön kehittyminen.

Lähde: Punkki, "Betonin sideaineet tulevaisuudessa." Piirretty uudelleen.

Huomiot: Kuvatut osuudet ovat suhteellisia ennustettuja osuuksia kaikista sideaineiden käytöstä. Perinteisillä sementillä tarkoitetaan nykyisiä seostamattomia (CEM I), ja vähän seostettuja (CEM II) portlandsementtejä. Seossementillä tarkoitetaan enemmän seostettuja masuunikuonasementtejä (CEM III). Vaihtoehtoisilla sideaineilla tarkoitetaan sementtejä, jotka eivät sisällä portlandsementtiä ollenkaan ja vähähiilillä portlandsementillä tarkoitetaan portlandsementtejä, joiden valmistamisessa ei ole käytetty fossiilisia polttoaineita, ja joiden hiilipäästöt on otettu talteen.

on asetettu vuosi 2030, johon mennessä betonin hiilijalanjäljen on tarkoitus pienentyä 25 % ja sementin 20 % vuoden 2020 tasoon verrattuna. Tiekartassa käsitellyt vähentämisen keinot ovat pitkälti samat kuin yllä luetellut, sekä lisäksi suunnitteluun liittyvät keinot, joita käsitellään lisää tämän diplomityön toisessa osassa.¹⁰

¹ Yliniemi & al., "Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor."

² Kiventerä & al., "Mine tailings as a raw material in alkali activation: A review."

³ Luukkonen & al., "One-part alkali-activated materials: A review."

⁴ Punkki, "Betonin sideaineet tulevaisuudessa".

⁵ IEA, *Energy Technology Perspectives 2020*, 103–9.

⁶ IEA, "Carbon capture in 2021: Off and running or another false start?"

⁷ Leveelahti, "Suuri askel sementtiteollisuudelle – ensimmäinen CO₂ talteenotto- ja varastointihanke etenee."

⁸ Punkki, "Betonin sideaineet tulevaisuudessa".

⁹ Vuori & Punkki, "BY-Vähähiilisyysluokitus käyttöön."

¹⁰ GCCA, *Concrete Future*.

1.6 – Betoni ja kiertotalous

Kiertotaloudella on sementti- ja betoniteollisuudessa jo nykyisin merkittävä rooli. Betonin tuotannossa käytetään hyödyksi paljon teollisuuden jätteitä ja sivuvirtoja, ja toisaalta elinkaarensa päässä kierrätetylle betonille on useita käyttötarkoituksia ja selvästi enemmän kysyntää kuin tarjontaa. Suomessa betonin kierrätysaste on nykyisin eri lähteiden mukaan yli 80 %¹, jopa yli 90 %². Parantamiseen on kuitenkin selvästi varaa, sillä valtaosa kaikesta betoniin liittyvästä materiaalin kierrätyksestä on *uusio-käyttöä*, missä kierrätettävä materiaali elinkaarensa päässä prosessoidaan uudeksi aineeksi ja eri käyttötarkoitukseen. Kiertotalouden periaatteiden kannalta parempi *uudelleenkäyttö*, missä materiaalin käyttötarkoitusta ei tarvitse muuttaa, on vielä harvinaista. Betonin kiertotalous on pyritty kuvaamaan kootusti kuviossa 10.

Kierrätys betonin tuotannossa

Betonin tuotannossa hyödynnetään paljon muun teollisuuden tuottamia kierrätysmateriaaleja ja sivuvirtoja. Sementintuotannossa hiiliintensiivistä portlandsementtiä korvataan seosaineilla kuten lentotuhka, masuunikuona tai (mikro)silika. Ne ovat teollisuuden sivutuotteita, jotka päätyisivät muuten kaatopaikalle, mutta betoni tarjoaa niille huomattavasti hyödyllisemmän loppusijoituksen. Jätteenä ne voivat olla jopa myrkyllisiä — esimerkiksi mikrosilika on äärimmäisen hienojakoisuutensa vuoksi hengitettynä vaarallista — mutta sitoutuessaan betoniin niistä tulee vaarattomia ja yleensä ne samalla parantavat betonin lujuus- ja säilyvyysominaisuuksia.

Myös luonnon kiviainesta voidaan monissa tilanteissa korvata kierrätetyillä materiaaleilla kuten betoni- ja lasimurskeella. Tällaisia

kierrätyskiviaineita ei voida kuitenkaan aina käyttää, sillä ne monesti heikentävät betonin ominaisuuksia.

Lisäksi sementintuotannon hiilijalanjälkeä lasketaan korvaamalla fossiilisia polttoaineita vaihtoehtoisilla polttoaineilla, kuten käytöstä poistetuilla autonrenkailla. Kierrätyspolttoaineiden käyttö voi sinänsä jopa nostaa sementinvalmistuksen hiilipäästöjen määrää, mutta jos jätteelle ei löydy parempaa käyttötarkoitusta ja se käsitellään joka tapauksessa polttamalla, vältetyn neitseellisen fossiilipolttoaineen muodostama kädenjälki tekee yhtälöstä lopulta edullisen.

Kierrätys betonin elinkaaren lopulla

Tavallista teräsbetonia voidaan pitää täysin *kierrätettävänä* materiaalina. Elinkaaren päässä siitä saadaan murskaamalla eroteltua raudoitteet, jotka sulatetaan uusioteräkseksi, ja myös itse betonimurskeelle on markkinoilla selvästi enemmän kysyntää kuin tarjontaa. Betonimurskeelle on monia käyttötarkoituksia. Eniten sitä käytetään maarakentamisessa ja teiden pohjissa, missä tavallisesti käytetään 90 % kaikesta rakentamisen kiviaineksestä. Betonimurske on myös neitseellistä kiviainesta halvempaa ja kovettumattomien sementtijäämien vuoksi lujuusominaisuuksiltaan parempaa. Muihin käyttötarkoituksiin lukeutuvat mm. betoniset ympäristörakenteet, joilla on matalat lujuusvaatimukset, viherkatot, joissa betonimurske toimii hyvänä kasvualustana, sekä kivi-korirakenteet, joissa betoni paitsi korvaa neitseellistä kiviainesta, myös sitoo karbonatisoitumisen kautta tehostuneesti ilmakehän hiilidioksidia. Kovettumattomien sementtijäämien vuoksi betonimursketta voidaan hyödyn-

tää myös savivalurakentamisessa (ks. s.32) itses-
tabiloituvana kiviaineksena, mikä parantaa
lujuutta ja kosteudenkestävyyttä ilman erillistä
stabilointiainetta kuten sementti.

Hyvän käytettävyytensä lisäksi betonin murs-
kaaminen moninkertaistaa betonin pinta-alan
ja suuren ilmalle altistuvan pinta-alansa vuoksi
murske onkin nopeutuneen karbonatisoitui-
misen kautta tehokas hiilinielu, mikä taas voi
laskea betoniteollisuuden kokonaishiilijalanjäl-
keä merkittävästi (ks. Luku 2.3). Suomalaisen
CO₂ncrete Solution -tutkimushankkeen välira-
portissa arvioitiin, että betonin murskaamisella
voidaan saada elinkaaren päässä kalsinointivai-
heen päästöistä talteen jopa 80 %³, eli noin 50 %
suomalaisen betonin kokonaispäästöistä (ks.
prosessi- ja energiapäästöt, s.25, sekä luku 2.3).

Betonimurskeen käyttö- ja erityisesti hiilinielu-
potentiaalia rajoittaa lainsäädäntö, joka määrit-
telee betonimurskeen jätteeksi jatkojalostuk-
sesta riippumatta. Ns. MARA-asetuksen nojalla
jätteeksi luokiteltava betonimurske täytyy joko
päällystää asfaltilla, peittää vähintään 100 mm
kerroksella luonnon kiviainesta, tai paljaaksi
jättämiselle täytyy hakea erillinen ympäristö-
lupa⁴. Betonimurskeen jäteluokittelun päätty-
misen mahdollistavat kansalliset ns. EoW-kri-
teerit (End-of-Waste, ei-enää-jätettä) ovat
valmisteilla⁵.

Uusiokäytön ei välttämättä tarvitse olla murs-
ketta. Käytöstä poistetuista betonirakenteista
voi esimerkiksi sahata ympäristörakentamiseen
soveltuvia betonilankkuja ja laattoja, tai lohkoa
suurempia betonikivilohkareita. Pyrittäessä
uusiokäytössä hiilinielun edistämiseen, uusi
ilmalle altis pinta-ala on tärkein tavoiteltava
tekijä.

Uudelleenkäyttö

Kiertotalouden keskeinen tavoite on säilyttää
tuotteiden ja materiaalien arvo materiaalikierr-
rossa mahdollisimman pitkään. Betoniraken-
teiden uudelleenkäyttö on siksi toivottavampi
vaihtoehto kuin murskaaminen, jossa menetee-
tään rakennusosan alkuperäinen käyttöarvo.

Toistaiseksi betonielementtien ja laajemminkin
purkutuotteiden uudelleenkäytölle on hidasa-
teena EU:n lainsäädäntö, joka vaatii rakennus-
tuotteille CE-merkinnän. Käytetyille betoniele-
menteille on hankalaa saada CE-merkintää, joka
edellyttää tuotteiden uudelleen valmistamista,
ja vaihtoehtoiset menettelyt ovat yksittäisen
rakennushankkeen mittakaavassa mutkikkaita.
Suomi teki vuonna 2019 aloitteen EU:n raken-
nustuoteasetuksen muuttamisesta kiertotalou-
den paremmin huomioivaan muotoon, mutta
EU-lainsäädännön muutosprosessi on pitkä, ja
sitä odotellessa prosessien kehittäminen kan-
sallisella tasolla olisi varmaankin tarpeen ilmas-
totavoitteita ajatellen.⁶

Vuoteen 2022 mennessä betonielementtien
uudelleenkäyttö ehjänä on ollut Suomessa hyvin
vähäistä. Ensimmäinen ja toistaiseksi ainoa esi-
merkki kerrostalon betonielementtien
uudelleenkäytöstä on Raahen Kummatissa osit-
tain puretut asuinkerrostalot: 364 asunnosta
purettiin peruskorjauksen yhteydessä lähion
käyttöasteen ja viihtyisyyden parantamiseksi

¹ Suomen betoniyhdistys, *Betonitekniikan oppikirja 2018*,
153.

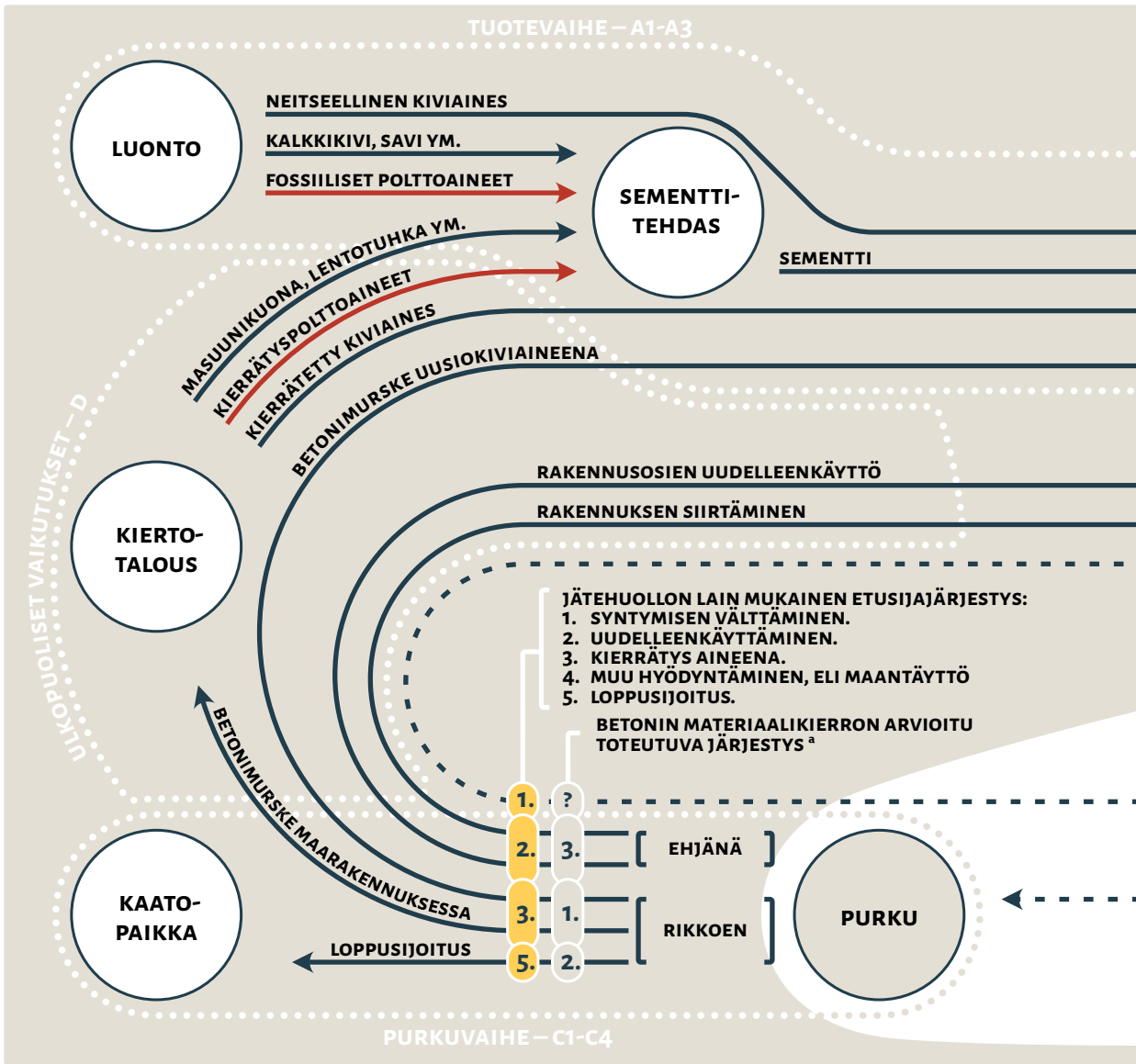
² Laine & al., *Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035. Osa 1.*
Rakennetun ympäristön hiililinkaaren nykytila, 19

³ CO₂ncrete solution – Report Q1/2020, Kirjallisuusreferaatti, 4.

⁴ Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä
maarakentamisessa 843/2017, 3 §, kohdat 4–5, 4 §, kohta 4.

⁵ Ympäristöministeriö, ”Rakennusalan odottama
betonimurskeasetus lausuntokierrokselle.”

⁶ Lehtonen, ”Purkuhankkeen toteutus kiertotaloutta
tukien”, 126–9.



Kuvio 10. Betonin materiaalikiertokulku ja rakentamisen elinkaaren vaiheet.

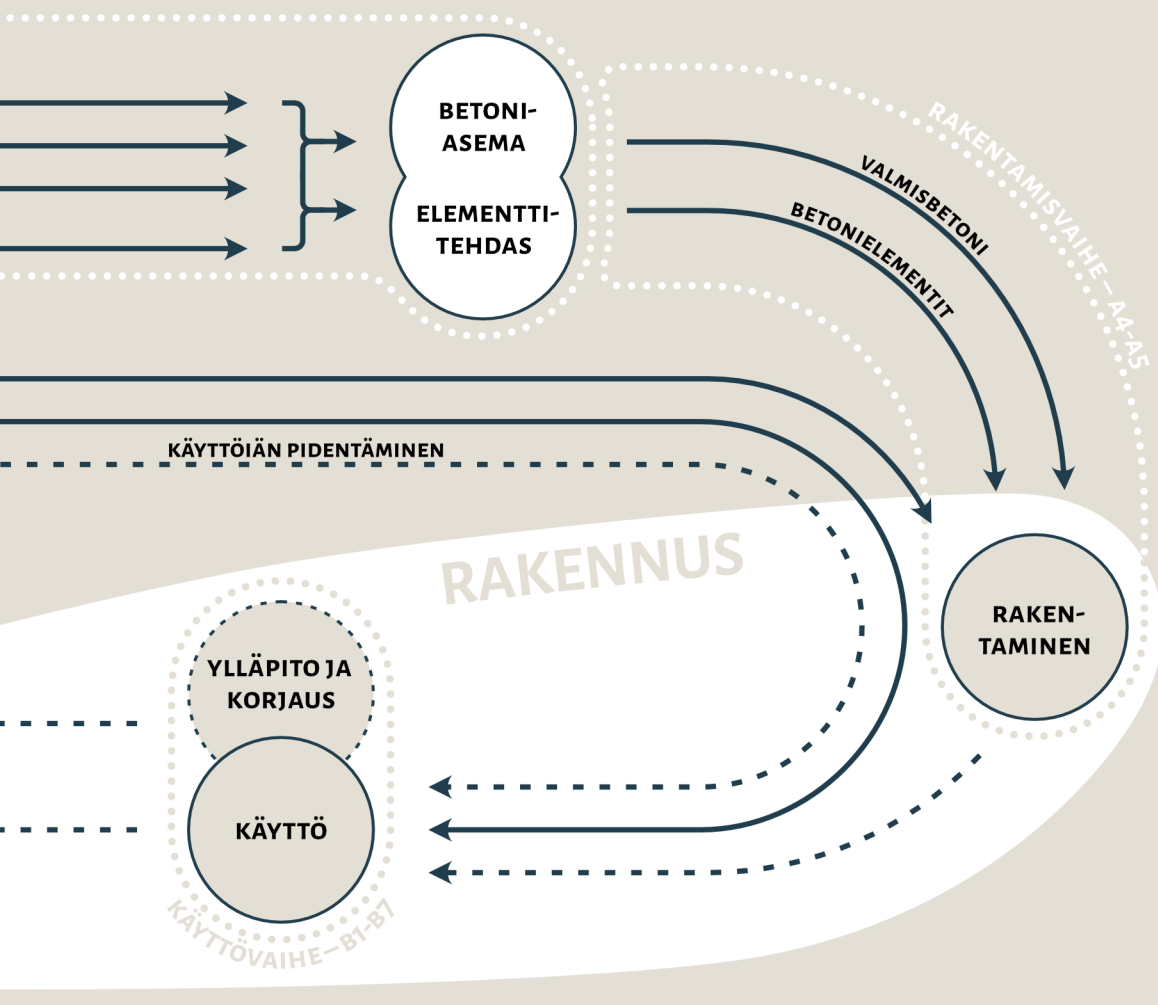
Lähteet: SFS-EN 15804:2012 + A2:2019; Jätelaki 646/2011, 8§.

120, ja purettuja elementtejä hyödynnettiin sekä tontilla uusien autokatosten ja piharakennusten rakenteina että myytiin ulkopuolisille tahoille käytettäväksi maatalousrakennuksissa.¹ Myös hallimaisten rakennusten pilari ja palkkirakenteita on käytetty jonkin verran uudelleen. Rajoittavana tekijänä on, ettei elementtien dimensioita voida muuttaa jälkeenpäin, koska

raudoitukset suunnitellaan aina rakennusosakohtaisesti ja esimerkiksi palkkien päissä tarvitaan raudoitusta leikkauskuormien hallitsemiseksi. Siksi betonirakenteiden uudelleenkäytettävyyttä suunnitellessa olisikin hyödyllistä pitäytyä mahdollisuuksien mukaan tietyissä standardoiduissa mitoissa, kuten esimerkiksi 70-luvulla kehitetyssä PLS-80 järjestelmässä on

Elinkaariarvioinnin moduulit standardin SFS-EN 15804 mukaan:

A1–Raaka-aineen hankinta, A2–Kuljetus valmistukseen, A3–Tuotteen valmistus, A4–Kuljetus työmaalle, A5–Työmaatoiminnot, B1–Tuotteen käyttö rakennuksessa, B2–Kunnossapito, B3–Korjaus, B4–Osien vaihto, B5–Laajamittaiset korjaukset, B6–Energian käyttö, B7–Veden käyttö, C1–Purkaminen, C2–Purkuvaiheen kuljetukset, C3–Purkujätteen käsittely, C4–Purkujätteen loppusijoitus, D–Uudelleenkäyttö, hyödyntäminen ja kierrätys.



^{a)} Kierrätysosuudeksi arvioitu 80–90% ja elementtien uudelleenkäyttö oletettu hyvin vähäiseksi hankalan lainsäädännön ja vähäisten julkaistujen esimerkkihankkeiden vuoksi.

tehty (ks. s. 61). Vaikka betonirakenteita ei Suomessa tällä hetkellä käytetä juurikaan uudelleen, tilanteeseen vaikuttaisi ainakin viimeaikaisen tutkimuspanoksen perusteella olevan tulossa muutos. Uudelleenkäyttöpotentiaalia on tutkittu jo niin tekniseltä² kuin terveydellistään³ kannalta ja 2021 käynnistyi Tampereen yliopiston koordinoima kansainvälinen suur-

hanke ratkaisujen kehittämiseksi⁴.

¹ Huuhka, *Kierrätys arkkitehtuurissa*, 76–8, 93–4.

² Lahdensivu & al., *Betonelementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet*.

³ Zhu & al., *Purkumateriaalien kelpoisuus eri käyttökohteisiin turvallisuuden ja terveellisuuden näkökulmasta*, 86–92.

⁴ Tampereen yliopisto, “Käytetyt betonielementit kokonaisina osaksi uutta taloa”

Osa 2

KESTÄVÄN BETONIRAKENNUKSEN SUUNNITTELU

2.1 – Betonirakennusten käyttöikä ja päästöt

Betonin käyttöikäsuunnittelu

Betoni tunnetaan laajasti kestäväenä (vähintäänkin rakenteellisesti, jos ei aina ympäristön kannalta) ja pitkäikäisenä materiaalina. Esimerkiksi Rooman Pantheon (kuva 1, s. 16) on säilynyt hyväkuntoisena jo liki 2000 vuotta. Vuodesta 2005 lähtien betonirakennusten suunnittelussa on Suomessa vaadittu käyttöikäsuunnittelua. Yksinkertaistetusti käyttöikäsuunnittelu tarkoittaa betonirakenteiden osalta kahta rakennekuviin merkittävää tietoa: *suunniteltu käyttöikä* ja *rasitusluokka*. Betonin määrittelevässä standardissa SFS-EN 206 betonirakenteen *suunniteltu käyttöikä* määritellään olevan

“oletettu ajanjakso, jonka rakennetta tai sen osaa käytetään suunniteltuun käyttötarkoitukseen ennakkoidulla kunnossapidolla, mutta tarvitsematta tehdä suurehkoja korjauksia¹.”

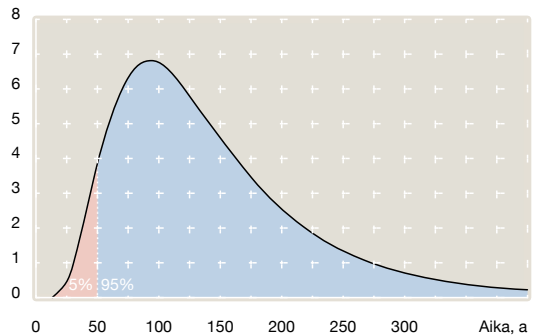
Rasitusluokka puolestaan kuvaa millaisille olosuhteille, ja siten vauriomekanismeille (karbonatisoituminen, pakkasrasitus, kemialliset rasitteet, ym.) alttiina rakenteen täytyy kestää määrätty ajanjakso.

Käyttöikäsuunnittelussa suositellaan käyttämään 50, 100 tai 200 vuoden *suunniteltua käyttöikää*. Ensin tilaaja valitsee rakennukselle *tavoitekäyttöiän*, jonka pohjalta rakennesuunnittelija valitsee *suunnittelukäyttöiän* ensin koko rakennukselle, ja sen jälkeen rakennekohtaisesti, huomioiden kuinka vaikeita yksittäiset rakenteet ovat korjata tai vaihtaa. Esimerkiksi perustusten ja rungon suunnittelukäyttöiksi on valittava aina *vähintään* koko rakennuksen suunnittelukäyttöikä. Rakennuksen tasolla 50 vuoden suunniteltu käyttöikä on tyypillisin ja voidaan pitää oletusarvona, 100 vuotta valitaan jos tavoitellaan erityisen pitkää käyttöikää ja 200 vuotta on käytännössä julkisille, monumentaalisille rakennuksille soveltuva luokka. Myös

25 vuoden suunnittelukäyttöikä voidaan valita rakenteille, jotka on tarkoitettu väliaikaisiksi, tai alttiina poikkeuksellisen ankarille olosuhteille. Rakentamismääräyskoelmassa ei aseteta vähimmäisvaatimuksia tavoiteltavan käyttöiän suhteen.

Koska sekä olosuhteisiin, että betonin ominaisuuksiin sisältyy runsaasti hajontaa, suunnittelua ei ole mielekästä, tai edes mahdollista tehdä yksittäisien, tai välttämättä edes kymmenien vuosien tarkkuudella. Sen sijaan tavallisesti käytetään sovittuja luokkia, 50, 100 tai 200 vuotta, ja tilastolliseen jakaumaan (ns. *log-normaali jakauma*) perustuvaa menetelmää, missä esimerkiksi tyypillinen rakenne, jolle on määrätty tyypillinen 50 vuoden suunniteltu käyttöikä, kestää määrätyn iän ilman suurehkoja korjauksia 95 % varmuudella (ks. kuvio 9). Samaa jakaumaan perustuen tällaiset rakenteet kestävät keskimäärin lähes 150 vuotta ja pitkäikäisimmät yli 300 vuotta ennen korjaustarvetta.² Käyttöikäsuunnittelu on vaadittu normatiivisella tasolla vuodesta 2005, mutta ensimmäiset ohjeet aiheesta julkaistiin jo vuonna 1989³.

Todennäköisyys, %



Kuvio 9. 50 vuoden suunnittelukäyttöiän jakaumakäyrä.

Lähde: Punkki & al., *Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille* 2016. Piirretty uudelleen. Teknisen käyttöiän mediaani 145 vuotta, variaatiokerroin 0,6.

Tuotesidonnaiset ja käyttösidonnaiset päästöt ja niiden vähentäminen

Rakennuksen elinkaaren aikana syntyvät päästöt voidaan jakaa *tuotesidonnaisiin* ja *käyttösidonnaisiin* päästöihin. *Tuotesidonnaisilla* päästöillä tarkoitetaan kasvihuonepäästöjä, jotka liittyvät rakennustuotteisiin ja rakentamiseen koko rakennuksen elinkaaren aikana mukaan lukien rakentamisen (elinkaarimoduulit A1-A5, ks. kuvio 11, s. 56), ylläpidon ja korjaamisen (B1-B5), sekä purkuvaiheen (C1-C4). *Käyttösidonnaisilla* päästöillä tarkoitetaan rakennuksen käytön aikaiseen energian- ja vedenkulutukseen (B6-B7) liittyviä kasvihuonepäästöjä.⁴

Karkeasti ottaen, mitä kauemmin rakennus kestää käytössään, sitä harvemmin tarvitsee rakentaa samaan käyttötarkoitukseen uutta rakennusta ja tuottaa uutta kierrosta rakentamiseen liittyviä tuotesidonnaisia päästöjä. Rakennuksen hiilijalanjäljen kannalta sen toteutunut käyttöikä on siis ratkaiseva tekijä — erityisesti käytettäessä betonia, jolla on huomattavat hiilipäästöt ja jonka suurimpiin vahvuuksiin lukeutuu nimenomaan sen erinomaiset säilyvyysominaisuudet.

Vielä pari vuosikymmentä takaperin rakentamisen tuotesidonnaiset päästöt ovat ainakin Euroopassa olleet käyttösidonnaisiin päästöihin verrattuna pienet. Energiatehokkuuden paranemisen sekä vähäpäästöisempien energiamuotojen lisääntymisen seurauksena tuotesidonnaisten päästöjen merkitys on kuitenkin lisääntynyt huomattavasti ja tulee edelleen lisääntymään.

2019 julkaistussa ja tutkimuskentällä suurta huomiota herättäneessä meta-analyysissä⁵ analysoitiin noin 150 tutkimusta ja 650 elinkaaria-nalyysiä. Meta-analyysin mukaan rakennuksissa, jotka on rakennettu ennen voimassa olevia määräyksiä, tuotesidonnaisten päästöjen

osuus on ollut noin 15–20 %, tavanomaisissa nykyisten energiamääräysten mukaisissa rakennuksissa noin 20–25 % ja määräysten normitason ylittävissä (matala-, nolla-, ja lähes nollaenergiatalot) 45–50 % luokkaa 50 vuoden tarkastelujaksolla.

Tuotesidonnaisista päästöistä valtaosa syntyy rakennusvaiheessa, muodostaen ns. *hiilipiikin*. Hiilipiikistä johtuen esimerkiksi matala-energiarakentamisen kokonaispäästöt ovat normien mukaista rakentamista korkeammat elinkaaren alkuvuosina, kunnes normitason rakennusten päästöt menevät ohi korkeampien käyttösidonnaisten päästöjen takia. Hiilipiikin voi siis ajatella myös *hiili-investointina*, ja elinkaaren osan, jolloin kokonaispäästöt ovat korkeammat kuin vertailukohdan, investoinnin *takaisinmaksuaikana*.

Kuviossa 10 on piirrettynä edellä mainitun meta-analyysin pohjalta elinkaaripäästökäyriä. Kuvioista on havaittavissa, että matalaenergiarakentamisen hiili-investoinnin takaisinmaksuaika verrattuna määräysten mukaiseen rakentamiseen on verrattain lyhyt. Verratessa normitason ja matalaenergiatason rakennuksia olemassa olevaan rakennuskantaan matala-energiarakentamisen takaisinmaksuaika on lyhyempi kuin normitason rakentamisella. Esimerkki elinkaaripäästöjen tarkemmasta jakautumisesta tuote- ja käyttösidonnaisiin päästöihin ja eri elinkaarivaiheisiin on kuvattu kuviossa 11.

¹ SFS-EN 206:2014 + A2:2021, *Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus*, 11.

² Punkki & al., *Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille* 2016, 7–9.

³ Suomen Betoniyhdistys, *Betonirakenteiden säilyvyys ja käyttöikämitoitus* 1989.

⁴ Häkkinen & Kuittinen, *Kohti vähähiilistä rakentamista*, 40–1.

⁵ Röck & al., “Embodied GHG emissions of buildings”, 6.

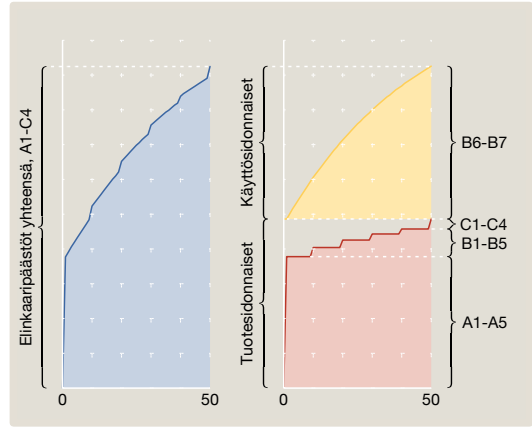
Peruskorjaus vaikuttaa kuitenkin olevan yleensä vielä selvästi hiiliedullisempi vaihtoehto kuin vanhan rakennuskannan korvaaminen uudella. Ympäristöministeriön tilaamassa kirjallisuustutkimuksessa 60 %:ssa tapauksista korjaaminen on purkavaa uudisrakentamista vähähiilisempi vaihtoehto koko elinkaaren ajan ja loppuissakin tapauksissa takaisinmaksuaika on keskimäärin 34 vuotta.¹ Olemassa olevaa rakennuskantaa pitäisi siis korjata ja varjella. Erityisesti hiilineutraaliustavoitteiden kannalta — Suomessa vuoteen 2035 ja EU-maissa vuoteen 2050 mennessä — hiilipiikin minimoimisella ja nopealla takaisinmaksuajalla, sekä olemassa olevan rakennuskannan peruskorjaamisella ja käyttöiän pidentämisellä on ratkaiseva rooli.

Betonin säilyvyys ja sen takaaminen

Säilyvyys (eng. durability) on esimerkiksi Suomen rakennusinsinööriliiton, ja muussa teknisessä kirjallisuudessa vakiintunut termi, jolla tarkoitetaan materiaalin kykyä vastustaa ympäristön rasituksia. Näin se erotetaan englanninkielisen durability sanan kansanomaisemmasta suomenkielisestä käännöksestä, kestävyys, jolla puolestaan yleisemmin tarkoitetaan kestävän kehityksen mukaista kestävyyttä (eng. sustainability).

Materiaalina betonin tärkeimmät säilyvyyttä rajoittavat tekijät ovat rakenteita vahvistava rauditus ja sen korroosioalttius, sekä betonimassan tiiviys ja huokoisuus.

Betonilla on korkea puristuslujuus, mutta sen heikkoa veto- ja leikkauslujuutta joudutaan lähes aina kompensoimaan teräksellä. Betonin ja teräksen liitto tarjoaa ratkaisevasti monipuolisempia ominaisuuksia kuin kumpikaan materiaali yksinään. Teräksen vetolujuus mahdollistaa pitkät jännevälit ja hillitsee betonimassan muodonmuutoksiin liittyvää halkeilua. Betoni



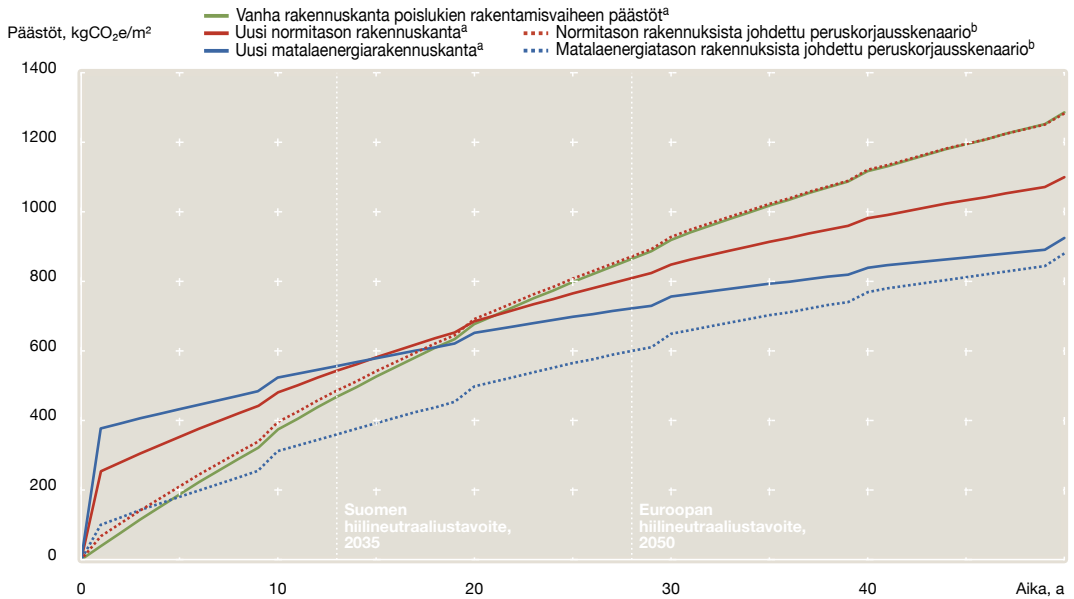
Kuvio 11. Elinkaari päästöjen muodostuminen.

Lähde: Röck & al., "Embodied GHG emissions of buildings".

Piirretty matalaenergiatason rakennusten elinkaari päästökäyrän pohjalta.

puolestaan tarjoaa puristuslujuuden lisäksi erinomaisen palon ja kosteuden keston sekä massaa, joka vähentää värinää, parantaa ääneristystä ja varastoi lämpöä (tai kylmää). Liiton mahdollistaa se, että betonin ja teräksen lämpölaajenemiskertoimet ovat hyvin lähellä toisiaan, eikä lämpöeläminen siksi aiheuta rakenteeseen haitallisia sisäisiä jännitteitä. Teräs on kuitenkin säilyvyyden kannalta nykybetonin "Akilleen kantapää", sillä yleisimmät ja vaikeimmin hallittavat betonin vaurioitumismekanismit perustuvat teräksen korroosioon.

Korrooitueessaan, eli ruostuessaan teräs laajenee aiheuttaen betonirakenteeseen sisäisiä jännitteitä, jotka johtavat lopulta betonin halkeamiseen tai lohkeiluun. Halkeilu on alkuun yleensä pientä, silmin havaitsematonta, mutta edistää entisestään aggressiivisten aineiden tunkeutumista betoniin, mikä puolestaan kiihdyttää vaurioitumista. Samaan aikaan toiminnallisen teräksen läpimitta kutistuu ja sen vetolujuus vähenee. Tyypillisesti korroosion aiheuttama vaurio on jo pitkällä, kun sen voi nähdä paljain silmin.



Kuvio 10. Erilaisten rakennusten 50 vuoden elinkaari päästöt verrattuna Suomen ja Euroopan hiilineutraaliustavoitteisiin.

Lähteet: Röck & al., "Embodied GHG emissions of buildings"; Huuhka & al., *Purkaa vai korjata?*

Huomiot: Lähtöaineistoissa vertailujen elinkaariarvioiden hajonta on suurta ja arviointikäytännöt kirjavia. Lisäksi Röck & al. tutkivat tapauksia kaikissa ilmastotyypeissä, kun Huuhka & al. vain Suomen kaltaisissa ilmastotyypeissä. Näistä syistä kaavioon ja erityisesti sen peruskorjausskenaarioihin on syytä suhtautua vain periaattellisesti ja suuntaa-antavana. Hiilineutraaliustavoitteet sijoitettu aikajalalle perustuen lähtövuoteen 2022.⁴⁾ Piirretty Röck & al. keskiarvojen ja oletusten mukaan. Jakautuminen tuote- ja käyttösidonnaisiin (B6-B7) päästöihin perustuu yhteensä 238 elinkaariarvioon, joista normitasoa 111, matalaenergiatasoa 60, ja vanhaa rakennuskantaa 67 tapausta. Tuotesidonnaisen päästöjen jakautumisessa oletettu rakennusvaiheen muodostavan 64% (A1-A5), ylläpito ja korjaukset 22% (B1-B5) ja purkuvaihe 14% (C1-C4). Vähähiilistymisoletta 2%/a. Ylläpidon ja korjauksen päästöt jaettu elinkaarelle neljään osaan 10 vuoden välein (ks. myös kuvio 11).⁵⁾ Variatitot nykymääräysten mukaisen normitason ja matalaenergiatason rakennusten käyrästä perustuen Huuhka & al. kirjallisuustutkimusosan keskiarvoihin (vain peruskorjaustapaukset, 20 kpl, s. 22-26). Peruskorjauksen rakennusaikaisiksi päästöiksi (A1-A5) oletettu 27% ja käytön aikaisiksi päästöiksi (B1-B7) 145% uudisrakennuksiin verrattuna. Purkuvaiheen päästöissä (C1-C4) ei muutosta.

Raudoitusta suojaa korroosiolta sen ympärille emäksisissä olosuhteissa luontaisesti syntyvä tiivis *oksidikalvo* tai *passiivikalvo*. Korroosio tapahtuu pääsääntöisesti kahdella tavalla. Tyyppillisempi, laaja-alainen korroosio tapahtuu terästä suojaavan emäksisen betonikerroksen neutraloitua hiilidioksidin ja veden muodostaman hiilihapon vaikutuksesta. Betonin neutraloitumista kutsutaan karbonatisoitumiseksi. Kun terästä suojaavan betonikerroksen pH laskee alle yhdeksän, oksidikalvoa ylläpitävät olosuhteet häviävät ja teräksen korroosio voi alkaa. Korroosion alkaminen vaatii kuitenkin edelleen happea ja korkeaa kosteustasoa (RH > 80%), minkä vuoksi esimerkiksi sisärakeneet ovat yleensä turvassa karbonatisoitumisesta huolimatta. Toinen tapa on korroosio, jossa korroosiota aiheuttava aine, kuten jokin kloridi, tunkeutuu betoniin ja tuhoaa terästä suojaavan

oksidikalvon emäksisistä olosuhteista huolimatta. Tällainen korroosio tapahtuu pistemäisesti pienillä alueilla, mutta voi olla hyvin nopeaa ja pienentää raudoitustangon leikkauspinta-alaa ja samalla tuhota raudoituksen vetolujuuden lyhyessä ajassa.²

Kun korroosio on havaittavissa paljain silmin, sen aiheuttamat vahingot ovat jo pitkällä ja vaativat korjausta. On kuitenkin menetelmiä, joilla korroosiota voidaan tutkia aiheuttamatta betoni piteelle vahinkoa ja jos on syytä epäillä, että rakenteessa on korroosioriski, se voidaan hyvissä ajoin suojata esimerkiksi käyttäen hiilidioksidin tunkeutumista hidastavia suoja-

¹ Huuhka & al., *Purkaa vai korjata?*, 26–8.

² Suomen Betoniyhdistys, *Betonitekniikan oppikirja* 2018, 108–114.

aineita tai halkeamat täyttäviä injektioaineita. Alkaneen korroosion taas voi pysäyttää esimerkiksi muuttamalla raudoituksen sähkökemiallista potentiaalia ns. katodisella suojauksella, tai uudelleenalkaloimalla betonirakenne.¹ Paras keino suojata korroosiolta on kuitenkin suunnitella rakenne alun perin korroosioriski minimoiden. Riittävän paksu raudoitusta suojaava betonipeite varmistaa ettei karbonatisoituminen pääse suunnittelun käyttöiän aikana etenemään teräkseen asti. Vaadittu paksuus riippuu suunnittelukäyttöiästä ja rakenteen rasitusluokasta. Suojaavan betonipeitteen paksuuden ohella oleellisin ominaisuus on betonin *tiiviy*s, josta riippuu kuinka tehokkaasti aggressiiviset aineet pääsevät tunkeutumaan betoniin.

Betonin tiiviy s puolestaan riippuu betonin *huokoisuudesta*, millä tarkoitetaan betonin sisältämien huokosten, eli ilman tai veden täyttämän tai tyhjän tilan määrää. Lähtökohtaisesti mitä huokoisempaa, sitä vähemmän tiivistä betoni on. Suhde ei kuitenkaan ole täysin suoraviivainen, sillä betonirakenteessa esiintyy useita huokostyyppisiä, joista kaikki eivät ole tiiviiden kannalta haitallisia.²

Oleellisin huokostyyppi on kapillaarihuokonen, joka nimensä mukaisesti mahdollistaa kokonsa ja jatkuvuutensa puolesta kapillaari-ilmiön. Kapillaari-ilmiön seurauksena vesi imeytyy pinnalta syvemmälle betoniin kuljettaen mukanaan haitallisia aineita. Jäättyessään vesi laajenee ja aiheuttaa halkeamia, joita pitkin vesi pääsee kapillaarisesti etenemään yhä pidemmälle. Jäätymis-sulamissykliä toistuessa betonin tiiviy s ja lujuus huonontuvat hiljalleen ja betoni rapautuu.

Kapillaarihuokosten määrä riippuu ennen kaikkea vesi-sementtisuhteesta: mitä enemmän sementtipastassa on vettä suhteessa sementtiin, sitä suurempia ja jatkuvampia huokosia

sen kovettuessa muodostuu. Sementin kovettuessa sementtihiukkasten pinnalle alkaa muodostua sauvamaisia ja levymäisiä kiteitä, jotka limittyvät kytkien ja ketjuttaen sementtihiukkasia toisiinsa. Kun vettä on vähemmän, sementtikiteet ovat seoksessa suhteellisesti lähempänä toisiaan, jolloin sementtihiukkaset ketjuutuvat toisiinsa tiiviimmin.³

Toinen betonin säilyvyyden kannalta oleellinen huokostyyppi on suojahuokonen, joka syntyy lisäämällä betoniseokseen huokostimia. Suojahuokosten tarkoitus on suojella betonia pakkasrapautumiselta. Jos käytetään riittävän alhaista vesi-sementtisuhdetta, betonista voidaan saada pakkasrapautumisen kannalta riittävän tiivistä myös ilman suojahuokosia. Suojahuukokset ovat pyöreitä ilmakuplia muistuttavia huokosia, joiden halkaisija on riittävän suuri katkaistaan kapillaari-ilmiön. Betoniin imeytyvä vesi ei pääse täyttämään suojahuokosia, ja kapillaarihuokosissa oleva vesi pääsee jäätymisen yhteydessä laajetessaan purkautumaan suojahuukosiin, eikä betonia vahingoittavaa painetta muodostu. Koska vesi ei pääse kapillaarisesti kulkemaan suojahuokosten läpi, ne eivät heikennä betonin vesitiiviyttä, eivätkä siten aiheuta haittaa betonin säilyvyydelle.

Betonirakennuskannan säilyvyys

Yleisen uskomuksen mukaan 60- ja 70-luvuilla rakennetut lähiöt olisi alun perin ajateltu, suunniteltu, ja rakennettu käytettäväksi vain noin 30 vuotta⁴. Näyttää siltä, että periaatetta olisi aina-kaan järjestelmällisesti sovellettu rakentamisessa ja suunnittelussa, ei tätä diplomityötä tehdessä ole löytynyt. Kirjallisuusviitteiden jäljityksen pohjalta uskomus vaikuttaisi olevan perua VTT:n tutkimuksesta vuodelta 1970, jossa ennustettiin sen aikaisille uudisrakennuksille ”rakennusalan kehityksen” ja ”tulotason kasvun” vuoksi noin 30–40 vuoden *taloudellista käyttö-*

aikaa⁵. Taloudellinen käyttöaika kuitenkin tarkoittaa aikaa, jonka kuluttua kohde olisi taloudellisesti kannattavaa joko uusina tai peruskorjata, ja on siis eri asia kuin tavoiteltu tai suunniteltu käyttöaika. Ajalle keskeisessä BES-tutkimuksessa sen sijaan annettiin kehitettävälle järjestelmälle mm. seuraavia pitkää käyttöikää puoltavia vaatimuksia:

- *“Rakennus on myöhemmin helposti saneerattavissa.”*
- *“Muuntojoustavuus ts. rakennusten sisäisten muuntelumahdollisuuksien on oltava mahdollisimman suuret. Asuntojen pitkän teknisen kestoian vuoksi tämä on taloudellisesti välttämätöntä, jotta voitaisiin ottaa huomioon asumisväljyyden ja varustetason kasvun aiheuttamat vaatimukset”*
- *“BES-järjestelmällä toteutetun rakennuksen tulisi olla purettavissa, siirrettävissä uuteen paikkaan ja pystytettävissä kokonaan uudelleen. Tätä saattavat vaatia mm. kehittyvien kaupunkien vaikeasti ennakoitavien liikenne- yms. saneeraustarpeiden synnyttämät uudet tilanteet.”*⁶

Suomen betonirakennuskannassa on silti ollut säilyvyyden (eng. durability) suhteen selviä puutteita säälle alttiina olevien julkisivujen ja parvekkeiden osalta, joissa enimmäkseen pakkasrapautuminen ja raudoituksen korroosio ovat aiheuttaneet korjaustarvetta.⁷ Säilyvyyspuutteet selittyvät matalan suunnittelukäyttöiän sijaan paremmin löyhillä säädöksillä, puutteellisella ohjeistuksella ja tietotaidolla, sekä rakennusvirheillä esimerkiksi betonin suojapeitesyvyyden osalta⁸.

Keskeisimmät säilyvyysongelmiin vastanneet normimuutokset ovat vuonna 1980 voimaan tulleet rasisolosuhteita kuvanneet ja niiden pohjalta betonin peitepaksuutta, lujuutta ja pakkaskestävyyttä määrittäneet ympäristöluokat⁹, jotka korvattiin vuonna 2005 yhä käytössä olevilla rasisluokilla¹⁰, sekä 1993 nostetut lujuusvaatimukset¹¹. Lujuuden nosto parantaa betonin säilyvyyttä epäsuorasti koska lujemmat

betonit ovat tavallisesti tiiviimpiä ja sisältävät enemmän sementtiä eli karbonatisoituvaa ainesta, jotka kumpikin johtavat hitaampaan karbonatisoitumiseen¹². Huomattavaa on myös, että Suomen betoniyhdistys julkaisi rakenne-suunnittelijoiden käyttöön ensimmäiset käyttöikämitoitukseen liittyvät ohjeet vuonna 1989¹³, mikä luonnollisesti edisti laajamittaisempaa paremmin säilyvien betonirakenteiden suunnittelua. Yleisesti voidaan sanoa, että 90-luvulle tultaessa suurimmat säilyvyysongelmat oli saatu kuriin. Ilmastonmuutoksen tuomat lisääntyneet viistosateet ja pakkassyklit aiheuttavat tulevaisuudessa jonkin verran nykyistä enemmän kuormitusta, mutta nykyiset vaatimukset ovat riittävät, kunhan betonin lisähuokoistus onnistuu aina ja raudoituksia suojaavan peitepaksuudet toteutuvat vaatimusten ja toleranssien puitteissa.¹⁴

¹ Suomen Betoniyhdistys, *Betoniteknikan oppikirja* 2018, 553–60.

² Neville, *Properties of Concrete*, 486.

³ Suomen Betoniyhdistys, *Betoniteknikan oppikirja* 2018, 35–7, 80–4.

⁴ Alatalo, *Hurmaava lähiö*, 4. (Viittaa edelleen teokseen, Hankonen, *Lähiöt ja tehokkuuden yhteiskunta*, jossa ei ole mainintaa 30 vuoden käyttöikätaavoitteesta, mutta joka puolestaan (s.183) viittaa edelleen Suokkoon (5, alla). Toisessa artikkelissa, Hankonen, “Asuinkerrostalojen kerta-käyttöisyydestä 1960-luvun aatemaailmassa” siteerataan suoraan Suokon arviota 30–40 vuoden taloudellisesta käyttöajasta, mutta korostetaan myös, “ettei tässä ole tarkasteltu rakentamisen käytäntöä elementtitehtaissa ja työmaila.”)

⁵ Suokko, *Asuinkerrostalon taloudellinen käyttöaika*, 70.

⁶ Seppänen & Koivu, *BES – Tutkimus avoimen elementtijärjestelmän kehittämiseksi*, 5, 20–1.

⁷ Lahdensivu & al., *Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet*, 36.

⁸ Lahdensivu, *Durability Properties and Actual Deterioration of Finnish Concrete Facades and Balconies*, 103–11.

⁹ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, *Betoninormit* 1980.

¹⁰ Suomen Betoniyhdistys, *Betoninormit* 2004.

¹¹ Suomen Betoniyhdistys, *Betoninormit* 1993.

¹² Lahdensivu & al., *Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet*, 46.

¹³ Suomen Betoniyhdistys, *Betonirakenteiden säilyvyys ja käyttöikämitoitus* 1989.

¹⁴ Vinha & al. *Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset*, 146–8.

Lämpimissä sisätiloissa säältä suojassa olevat runkorakenteet sen sijaan ovat yleisesti edelleen moitteettomassa kunnossa¹. Nykyisellä käyttöikämitoituksella tällaiset rakenteet luokitellaankin tyypillisesti joko rasisitusluokkaan, x0 — ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä, tai xC1 — karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio, kuiva tai jatkuvasti märkä rakenne. Kyseiset rakenteet karbonatisoituvat siinä missä muutkin, mutta olosuhteet eivät altista terästä korroosiolle, joten karbonatisoituminen on vain positiivinen asia (ks. Betoni hiilinieluna, s.62). Kummassakaan rasisitusluokassa ei siksi katsota betonilla olevan vaurioitumismekanismeja, ja rakenteiden voidaankin ajatella olevan käytännössä ikuisia ja niille voi vapaasti valita suunnittelukäyttöiän.²

Johtopäätelmiä purkutilastoista: rakennuskantaan ei sitouduta

Suomessa vuosien 2000–2012 välillä purettujen rakennusten keskimääräinen ikä oli noin 51 vuotta ja betonirunkoisilla rakennuksilla vielä vähemmän, noin 40 vuotta. Betonirakennusten alhainen purkuikä selittyy osittain sillä, että valtaosa betonirakennuksista on rakennettu vasta 60-luvulla tai myöhemmin, eikä niiden joukosta ole voinut päätyä tilastoihin yli 50 vuoden käyttöiän saavuttaneita rakennuksia. Verrattaessa eri materiaaleista eri vuosikymmeninä rakennettujen rakennusten osuuksia purkutilastoissa niiden osuuteen koko rakennuskannasta on päätelty, että erittäin hyvistä säilyvyysominaisuuksistaan huolimatta betonirunko ei vaikuta keskimäärin pidentäneen rakennusten käyttöikää.³

Matalat purkuiät eivät johdu materiaalien rappeutumisesta. Ylivoimaisesti yleisin ilmoitettu syy, 47 % kaikesta puretusta kerrosalasta (ja jopa 60 % kaupunkikeskustojen kerrosalasta), on uudisrakentaminen, jonka tieltä “vanhanaikais-

tuneet” rakennus puretaan pois, kun taas rakennuksen tuhoutuminen tai hylkääminen nimettiin syyksi vain 9 %:ssa puretusta kerrosalasta ja sen tarkemmin jaottelemaan “muut syyt” 44 %:ssa kerrosalasta. Uudisrakentamisen tapauksessa tilastot eivät sisällä tarkempaa tietoa siitä, missä kunnossa uudisrakentamisen alta purettu rakennukset ovat olleet.⁴ Näin ollen tilastoista ei voida päätellä esimerkiksi mikä Suomessa yleisten sisäilmaongelmien merkitys on rakennusten purkamisen kannalta. Oletettavasti osuus on kuitenkin merkittävä, sillä sisäilmaongelmista seuraa rakennuksille varsin usein vähintään käyttökielto. Purkavan uudisrakentamisen, sekä purkamisen ylipäänsä keskittyminen kaupunkeihin (76 % kaikesta purkamisesta⁵), kallistuvalle ja nousevien tehokkuusvaatimusten alaiselle tonttimaalle, viittaa kuitenkin enemmän taloudellisiin tai toiminnallisiin syihin, kuin teknisen käyttöiän päättymiseen.

Erityisen huomionarvoinen on liike- ja toimistorakennusten matala purkuikä, keskimäärin 39 vuotta⁶, tai betonirakenteisena 41 vuotta⁷. Ristiriitaisesti, kyseisissä rakennuksissa käytetään runkomateriaalina yleisimmin hiili-intensivistä, mutta pitkäikäistä betonia, ja suhteellisen tiuhaan vaihtuvien vuokralaisten kirjaviiden tarpeiden vuoksi yleensä pilari-palkki-runkoa, joka mahdollistaa korkean muuntojoustavuuden. Vaikuttaisikin siltä, että ajan hammasta kestävä materiaalit yhdistettynä monikäyttöisyyteen ja sisäiseen muunneltavuuteen (ks. Luku 2.2) eivät vielä riitä takaamaan pitkää käyttöikää. Tämä koskee pääpiirteissään myös teollisuus- ja varastorakennuksia, joiden purkuikä on samaa luokkaa, ja jotka ovat myös tavallisesti betonirakenteisia ja pilari-palkkirunkoisia. Erona on, että teollisuusrakennukset ovat usein yksikerroksisia hallirakennuksia ja runko suunnitellaan tyypillisesti tietyn teollisen toiminnan ympärille, mikä voi vaikeuttaa muunneltavuutta seuraavia käyttäjiä ajatellen

pitkistä jänneväleistä huolimatta.

Asuinrakennukset ovat kaikista rakennustyypeistä selvästi pitkäikäisimpiä. Niiden keskimääräinen purkuikä on 58 vuotta, betonirakenteisilla 47 vuotta, kun ei-asuinrakennuksilla purkuiät ovat vastaavasti 43 ja 39 vuotta.⁸

VTT:n tutkimushankkeessa ehdotettiin rakennusten käyttöiälle luokittelua, jossa alle 50 vuoden käyttöiän rakennuksia kuvattiin sellaisiksi *“joiden väliaikaisuus taikka ajallisesti lyhyt käyttötarkoitus tunnistetaan ja perustellaan”*, ja joiden suunnittelussa on *“kiinnitettävä erityistä huomiota rakennusten purettavuuteen ja rakennusosien ja materiaalien kierrätykseen”*⁹. Myös Suomen rakennusinsinöörien liiton ohjeessa 50 vuoden suunnittelukäyttöikä alempaan, 25 vuoden luokitukseen kuuluu *“tilapäiset rakennukset, esim. majotusparakit, tilapäisvarastot ym”*¹⁰. Tavallisten rakennusten suunnittelukäyttöikä on vähintään 50 vuotta, mutta koska toteutuva käyttöikä on hyvin usein sen alapuolella, olisi aiheellista kiinnittää laajemmin huomiota myös alle 50 vuoden toteutuvan käyttöiän mahdollisuuteen ja sen pidentämiseen esimerkiksi kiinnittämällä enemmän huomiota rakennusten purettavuuteen ja siirrettävyyteen, vähintäänkin liike- ja toimistorakennusten kohdalla.

Keskimääräinen purkuikä ei ole sama asia kuin rakennuskannan keskimääräinen käyttöikä, sillä yhä käytössä olevat rakennukset nostavat kunkin rakennusten ikäluokan keskimääräistä käyttöikää jatkuvasti, mutta silti pitkäikäisempien asuinrakennustenkin 58 vuoden purkuikää voi pitää huolestuttavan matalana. Kaikkien rakennusten keskimääräinen purkuikä, 51 vuotta, tarkoittaa että keskimääräistä rakennusta purettaessa voisi käytännössä todeta, että *“tämäkin rakennus olisi alun perin pitänyt suunnitella väliaikaiseksi ja siirrettäväksi”*.

“Kertakäyttörakentamisessa” ei siis ole kyse vain

siitä, että rakentamisen tekninen laatu olisi ollut huonoa ja rakennukset alun perinkin rakennettu lyhytikäisiksi vaan ennemmin, että jo rakennettuihin rakennuksiin ei sitouduta ympäristön ja kansantalouden kestävyys edellyttämällä tavalla, niitä ei ole suunniteltu ja rakennettu riittävän hyvin joustamaan nykyajan ja tulevaisuuden tarpeisiin, tai niiden ulkoarkkitehtoniseen laatuun ei ole panostettu riittävästi, jotta ne vastaisivat väestön kaupunkikuvallisia standardeja. Kaupunkien kasvaessa myös tehokkuusvaatimukset kiristyvät, mistä seuraa juurikin rakennusten taloudellisen käyttöiän umpeutuminen ennen suunniteltua tai teknistä käyttöikää. Tällaisissa tilanteissa rakennusten, jotka ovat jo alun perin suunniteltu elinkaarensa päässä siirrettäväksi, olisi mahdollista pysyä käytössä jossakin muualla. Toki vielä parempi olisi suunnitelma, aina kaavoituksesta rakennuksen toteutukseen asti, jossa siirtämisen tarpeeltakin vältyttäisiin.

Arkkitehdin mahdollisuudet vaikuttaa betonirakennuksen käyttöiän pituuteen tulevatkin pitkälti muuntojoustavasta tilasuunnittelusta ja rakennusrungon mitoituksesta.

¹ Lahdensivu & al., *Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet*, 36.

² Punkki & al., *Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille 2016*, 13, 17.

³ Huuhka, “Demolished buildings: empirical evidence on types, ages and construction materials”.

⁴ Huuhka & Lahdensivu, “Statistical and geographical study on demolished buildings”, 89–92.

⁵ Ibid., 80.

⁶ Ibid., 87.

⁷ Huuhka, “Demolished buildings: empirical evidence on types, ages and construction materials”.

⁸ Ibid.

⁹ Häkkinen & al., *Tuotteiden käyttöikäinformaatio ja sen käyttö rakennushankkeissa*, liite 7.

¹⁰ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, *Rakenteiden ja rakennusten elinkaaren hallinta*, 44.

2.2 – Betoniset runkorakenteet ja muuntojousto

Koska betonissa materiaalina yhdistyvät verrattain suuret päästöt, mutta pitkä käyttöikä ja korkea huoltovarmuus, keskeisintä betonirakennusten hiilikuorman pienentämisessä on pyrkiä kaikin keinoin mahdollistamaan betonirakennukselle mahdollisimman pitkä käyttöikä. Koska tyyppillisin syy rakennusten purkamiselle on uudisrakentaminen ja muuttuneet tarpeet, paras keino käyttöiän pidentämiseen on muuntojouston maksimoiminen.

Muuntojouston termeistä ja käsitteistä

Rakennuksen muuntojoustavuudella tarkoitetaan sen mukautumiskykyä erilaisiin tilanteisiin ja olosuhteisiin, ja tarpeisiin muuttaa sen tiloja tai järjestelmiä. Tarkempi muuntojoustavuuteen liittyvä terminologia on hyvin kirjavaa ja sen määrittelystä on paljon eroavuuksia lähteestä riippuen. Termistöä käsittelevässä RT-ohjekortissa 93-11231 muuntojousto jaetaan *suunnittelujoustoon*, *monikäyttöisyyteen* ja *muunneltavuuteen*, jotka määritellään seuraavasti:

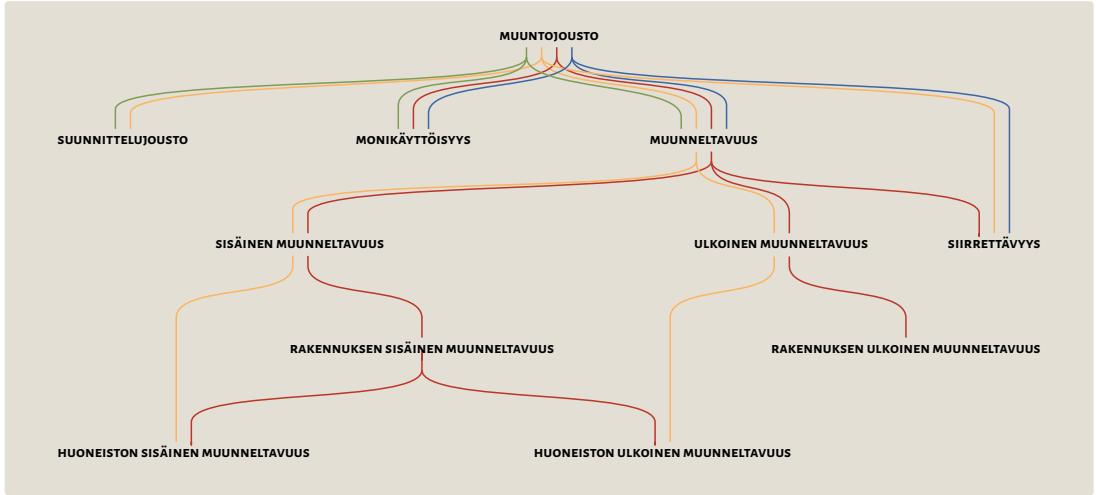
- *”Suunnittelujousto tarkoittaa suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa tapahtuvaa suunnitelmien ja tilojen mukauttamista esille tuleviin tarpeisiin. Käsite viittaa reagointikykyiseen suunnittelu- ja rakentamisprosessiin.”*
- *”Monikäyttöisyys tarkoittaa rakennuksen, asunnon tai huonetilan kykyä mukautua eri tarpeisiin tai olosuhteisiin ilman rakennusteknisiä muutoksia. Monikäyttöisyyden edellytyksenä on mukautumisen sallivat pohjaratkaisut, huonetilat ja kulkuyhteydet.”*
- *”Muunneltavuus tarkoittaa rakennuksen, asunnon tai huonetilan kykyä mukautua eri tarpeisiin tai olosuhteisiin tekemällä rakennusteknisiä muutoksia. Muutoksen kohteina voivat olla rakennuksen tilajärjestely, yksittäiset asunnot ja huonetilat sekä rakenteet ja talotekniikka.”¹*

Suunnittelujoustoon ei tässä diplomityössä paneuduta sen tarkemmin, koska sillä ei ole yllä mainitun määritelmän mukaisesti merkitystä käyttöiän pidentämisen kannalta.

Monikäyttöisyys on tilasuunnittelussa perusperiaate, johon on aiheellista pyrkiä rakennusmateriaalista ja rakennustyyppistä riippumatta. Monikäyttöisyyteen liittyen betoni on edullinen materiaali lähinnä, koska se mahdollistaa rakenteille pitkät jännevälit. Toisaalta asuntojen monikäyttöisyyden suunnittelussa erityisesti huoneiden mitoitus on ratkaisevassa roolissa. Sopivasti väljä ja tarkoin tutkittu toiminnallinen mitoitus, joka mahdollistaa yksittäisille huoneille monipuolisia käyttövaihtoehtoja, soveltuu hyvin myös pilari-laatta-järjestelmien mitoitukseen, sillä pilariruudukko täytyy sijoittaa huone- ja huoneistojaon kannalta mahdollisimman vähän häiriötä aiheuttaen.

Muunneltavuus voidaan jakaa edelleen useampaan alakategoriaan. Yksi on jako *sisäiseen* ja *ulkoiseen muunneltavuuteen*, mutta tässä kohtaa termistö alkaa mutkistua, sillä sisäisellä ja ulkoisella muunneltavuudella voidaan tilanteesta riippuen viitata joko kokonaiseen rakennukseen tai sen hallinnolliseen osaan, huoneistoon. Rakennuksen tasolla sisäinen muunneltavuus tarkoittaa esimerkiksi osasto- tai huoneistojaon muutosmahdollisuuksia ja ulkoinen muunneltavuus mahdollisuutta laajentaa tai supistaa rakennusta. Huoneiston sisäinen muunneltavuus puolestaan tarkoittaa huonejakoa koskevia, ja ulkopuolinen muunneltavuus huoneistojakoa koskevaa muunneltavuutta. Muunneltavuuden kolmas tyyppi on *siirrettävyys* tai *purettavuus* (suomen kielessä käytettävä termi ei ole vakiintunut, englanniksi käytetään termiä Design for Disassembly, lyhyesti DfD, eli purettavuuden suunnittelu),

— RT 93-11231 — Seppänen & Koivu — Tarpio — Häkkinen & Kuittinen



Kuvio 12. Kaavio muuntojoustavuuden käsitteellisestä jaosta eri lähteissä.

Lähteet: RT 93-11231, *Muuntojousto asuntosuunnittelussa – Yleiset perusteet*; Seppänen & Koivu, *BES – Tutkimus avoimen elementtijärjestelmän kehittämiseksi*; Tarpio, "Hierarkkiset joustavuusastot ja rakennusten kiertotalous"; Häkkinen & Kuittinen, *Kohti vähähiilistä rakentamista*.

Huomio: kaaviossa käytetyt termit eivät aina vastaa lähteissä mainittuja, sillä eri lähteissä samoja käsitteitä kuvataan eri termein. Kaaviossa on pyritty harmonisoimaan vaihtelevaa terminologiaa ja havainnollistamaan käsitteiden välisten suhteiden vaihtelevuutta.

joka joskus luokitellaan myös muunneltavuudesta seuraavaksi joustavuuden askeleeksi ja omaksi erilliseksi muuntojouston yläkategoriaksi. Yllä olevia käsitteitä ja niiden välisiä suhteita eri lähteissä on esitetty kuviossa 12. Muunneltavuus riippuu oleellisesti rakennuksen runkotyypistä ja rungon mitoituksista, minkä kannalta betonilla runkomateriaalina on suuri merkitys. Erityisesti huoneistojaon ja käyttötarkoituksen muutoksiin varautumisessa betonirakenteiden pitkät jännevälit tarjoavat mahdollisuuksia.

Siirrettävyys on keskeistä rakennuksen elinkaaren jälkeisen uudelleenkäytön ja siten koko kiertotalouden toteutumisen kannalta. Perinteisesti siirrettävyyden suunnittelu on koskenut lähinnä väliaikaiseksi tarkoitettua rakentamista, jossa oleellimmat runkomateriaalit ovat olleet puu ja teräs. Betonissa on keinotekoisena kivenä tiettyä pysyvyyden symboliarvoa, jonka vuoksi siirrettävyys tuntuu betonille materiaalina vieraalta ominaisuudelta. Kuiten-

kin myös betonirakenteet voidaan, ja elinkaaren pidentämisen kannalta pitäisi suunnitella siirrettäviksi. Betonirakenteille elementointi ja esivalmistus on hyvän purettavuuden edellytys, sillä paikallavaletut rakenteet voidaan tyypillisesti kierrättää ainoastaan murskeena². Siksi tässä kappaleessa pitäydytäänkin enimmäkseen elementtirunkojen tarkastelussa. Toki monet elementtirunkojen hyvistä ominaisuuksista toteutuvat myös paikallavaletuissa rungoissa.

Tampereen yliopiston rakennustekniikan laitoksella on tutkittu betonirakenteiden uudelleenkäyttöä lupaavin tuloksin. Valtaosalla ole-massa olevan rakennuskannan betonielementeistä on ainakin kuntonsa puolesta edellytykset uudelleenkäyttöön. Poikkeuksen muodostavat vain kuorilaatat ja -elementit,

¹ RT 93-11231, *Muuntojousto asuntosuunnittelussa – Yleiset perusteet*, 1.

² Lahdensivu & al., *Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet*, 66–7.

joita on käytetty paikallavalun ja elementtien sekarungoissa valumuotteina. Erityisesti pulttiliitoksia hyödyntävät pilari-palkki-rungot ja niihin liittyvät ontelo- ja TT-laatat katsottiin helpommin uudelleenkäytettäviksi. Asuinrakennuksissa käytettävät juotosvaluihin perustuvat liitokset ovat työläitä purkaa ja vaativat piikkaamista tai timanttisahaamista, ja tutkimus peräänkuuluttaakin helpommin purettavien liitosratkaisuiden kehittämistä. Nykyrakennuskannan siirrettävyyden taloudellisiin näkökulmiin tutkimus ei sen tarkemmin ota kantaa.¹

Ilmastokriisin asettamat joustavuustarpeet

Tulevaisuuden ennustaminen on tunnetusti haastavaa, ja toteutuvaan käyttöikään vaikuttaa lukuisia tekijöitä, niin kulttuurillisia, taloudellisia, ekologisia kuin mekaanisiaakin. Niiden pohjalta on hyvin vaikeata, ellei mahdotonta johtaa mitään kattavaa teoriaa. Näin ollen nykyvalossa tuntuu naiivilta odottaa, että nyt rakentamamme talot pärjäisivät tulevaisuudessa sen paremmin kuin olemassa oleva rakennuskantakaan (ks. s.52–3), ellei niiden muuntojoustavuutta merkittävästi paranneta ja elleivät asenteet olemassa olevaa rakennuskantaa kohtaan muutu.

Toimisto-, liike-, ja julkisten rakennusten suhteen tarve muuntojoustavuudelle on tiedostettu, ja myös rakentamisessa huomioitu jo vuosikymmeniä. Esimerkiksi elementtirakenteisten toimisto- ja liikerakennusten runkorakennejärjestelmänä käytetty Runko-BES kehitettiin alusta lähtien korkeita muunneltavuusominaisuuksia silmällä pitäen.

Vuosituhanne vaihteessa julkaistussa tutkimuksessa² arvioitiin muuntojouston kuitenkin siihen asti rajoittuneen rakennuksen ensimmäisen käyttäjän näkökulmaan ja mahdollisiin käyttötarkoituksen muutoksiin neuvottiin kiin-

nittämään suurempaa huomiota käyttämällä yleispätevää toiminnallista ja rakenteellista mitoitus-

“Kiinteistön omistajan näkökulmasta katsottuna suunnittelu ja rakennusvaiheessa rakennusrunkoon tehtävä lisäinvestointi voi tulevaisuudessa säästää kymmenkertaisen määrän rahaa.”

Taloudelliset kannustimet toimisto-, liike- ja julkisten rakennusten muunneltavuudelle ovat siis olemassa. Kehittyneillä suunnittelukäytännöillä on todennäköisesti rakennuskannan toteutuvaan käyttöikään nostava vaikutus. Purkutilastojen antama kuva on kuitenkin selvä: pelkkä sisäinen muunneltavuus ei riitä edes kohtalaisen käyttöiän saavuttamiseksi, joten vaatimustasoa olisi aiheellista nostaa sisältämään laajemmin myös käyttötarkoituksen muutosten ja siirrettävyyden huomioinnin.

Asuinrakennuksissa huoneistojen sisäinen muunneltavuus on hyvällä tasolla, mutta esimerkiksi huoneistojaon muokkaamiseen elinkaaren aikana, siirrettävyydestä puhumattaakaan, kiinnitetään vain harvoin huomiota. Viime vuosina asuntotuotannossa on ollut myös paljon puhuttu yksiöbuumi. On selvää, että yksiöitä on rakennettava, kun väestörakenne ja markkinat niitä vaativat, mutta yksiötarpeen pitkäaikaiselle pysyvyydelle ei ole takuita. Yksiöiden osuus urbaanista asuntotuotannosta on noin 40 % ja niistä edelleen noin 80 % on alle 30 m² kokoisia, kantavien seinien väliin sijoitettuja, joustamattomia, kapeita ja syviä putkiyksiöitä³, joilla ei ole edellytyksiä joustaa tulevaisuuden muuttuviin käyttötarpeisiin. Muuntojouston lisäämistä on taloudellisesta näkökulmasta koitettu perustella sillä, että se tarjoaa mahdollisuuksia asuntojakauman joustoon ja helpottaa siten asuntojen myynnissä⁴, mutta rakennusliikkeiden mukaan asuntotuotannossa muuntojoustavuudelle ei ole markkinoilla kysyntää⁵.

On ymmärrettävää, ettei ainakaan asunnon ulkopuoliselle muunneltavuudelle ole markkinoita, koska uudisrakentamisen asuntajakamat hiotaan markkinoiden nykytilanteen mukaisesti, kun taas muunneltavuudella pyritään usein vastaamaan juuri tulevaisuuden odottamattomiin muutostarpeisiin. Toisaalta yksiöistä, joiden joustavuus on kaikkein huonoin, valtaosa on sijoitusasuntoja: vuoden 2017 tilastojen mukaan pienimpien, 20–29 neliön kerrostaloasuntojen asutokunnista 86 % asui vuokralla.⁶

Nykyasuntotuotanto on siis jo vain yksiöiden rakentamistavan vuoksi joustamaton tulevaisuuden muuttuviin tarpeisiin. Muuntojouston kysynnän puutteesta riippumatta vaatimustason nostolle on kuitenkin vahvat ympäristö- ja asuntopoliittiset perusteet. Suurin ongelma kai on, että eri tahot maksavat rakentamisen ja myöhemmin muuntojoustavuuden puutteesta aiheutuvat kustannukset. Välittömien taloudellisten kannustimien puuttuessa tilanteen korjaamiseen tarvittaneen säädännöllisiä keinoja.

Elementtirunkojärjestelmät Suomessa: taloudellinen etu joustavuuden edellä

Nykyinen suomalainen betonielementtirakentaminen perustuu voimakkaasti betoniteollisuuden kehittämiin avoimiin rakennusjärjestelmiin. Näistä rakentamisen käytännön kannalta keskeisimmät ovat alkuperäinen, asuntotuotantoa varten 1968–1970 kehitetty kantavat seinät -runkoon perustuva BES-järjestelmä, sekä teollisuus-, liike- ja julkisia rakennuksia varten 1980–1983 kehitetty pilari-palkki-runkoinen Runko-BES.⁷ Järjestelmiä on vuosien varrella jatkokehitetty, mutta betonielementtirakentamisen peruseräpäätökset ovat pääsään-

töisesti pysyneet muuttumattomina.

Ei ollut kaukana, että jo 70-luvulla elementtitekniikan standardoinnin pohjalle olisi valittu joustavampi pilari-laatta-malli. Alkuperäiseen BES-järjestelmään johtaneessa tutkimuksessa vertailtiin asuinrakennusten toteuttamista ajatellen neljää eri rakennejärjestelmämallia. Kantavat seinät -mallille (A-malli) vaihtoehtoina oli pilari-palkki-malli (B-malli), pilari-laatta-malli (C-malli) ja tilaelementtimalli (D-malli), joita tutkittiin laajasti niin käytön kuin kustannustenkin kannalta. BES-tutkimusjulkaisussa esitetyssä käyttöominaisuuksien pisteytyksessä A-malli ylsi parhaille pisteille C-mallin jäädessä täpärästi kakkoseksi.⁸ Rakennuslehdessä julkaistun artikkelin mukaan C-malli tosin voitti alkuperäisen käyttöominaisuusvertailun, mutta sementtiteollisuuden painostuksesta analyysin painotuksia muutettiin jälkikäteen, jotta *enemmän sementtiä kuluttava* A-malli saatiin voittajaksi.⁹ Pilareihin ja palkkeihin perustuva B-malli jäi kärkeä kaksikosta hieman kauemmas ja tilaelementteihin perustuva D-malli jäi selvästi viimeiseksi ja karsiutui ulos runkokustannusten vertailusta. Runkokustannusten vertailussa puolestaan karsiutui kalleimpana myös käyttöominaisuuksissa tappiolla jäänyt B-malli, jonka arvostelussa todettiin suuren erilaisten runko-

¹ Lahdensivu & al., *Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet*, 73–4.

² Valtion kiinteistölaitos, *Elinkaariselvitys*, 5, 14.

³ Pelsmakers & al., "Avoiding Macro Mistakes: Micro-homes in Finland Today", 92.

⁴ RT 93-11232, *Muuntojousto asuntosuunnittelussa. Tila- ja pääsuunnittelu*, 3.

⁵ Taipale, "Puhetta on paljon, mutta uusissa asunnoissa on vain vähän joustoa".

⁶ Kannisto & al., "Myös yksiöiden rakennusbuumi hiipuu".

⁷ Suomen Betoniyhdistys, *Betonitekniikan oppikirja 2018*, 427.

⁸ Seppänen & Koivu, *BES – Tutkimus avoimen elementtijärjestelmän kehittämiseksi*, 42.

⁹ Mölsä, "Pilari-laattarunko voisi vähentää betonirakennuksen ilmastopäästöjä."

osien määrän, työlään asentamisen ja helposti nousevan kerroskorkeustarpeen vuoksi soveltuvan paremmin muun tyyppiseen rakentamiseen. A- ja C-mallien välille jäi erotukseksi noin 20–30 mk/kem² (inflaatiokorjattuna 30–45 €/kem² vuonna 2021¹) A-mallin hyväksi.²

Koska käyttöominaisuuksien ja kustannusten vertailusta ei erottunut selvää voittajaa, A- ja C-mallin välillä tehtiin vielä tarkentavia vertailuja, jossa tutkittiin mahdollisuuksia lisätä A-mallin joustavuusominaisuuksia tekemällä poikittaisten seinien sijaan pitkittäiset ulkoseinät kantavana ja toisaalta tuoda C-mallin kustannuksia alas mm. juotossaumoilla ja pilareiden jatkoksia muuttamalla. Mallien välillä tehtiin vielä tarkempi kokonaiskustannusarvio, jossa erotukseksi jäi noin 13 mk/asm² (20 €/asm², 2021), eli noin 2,5 % ero kokonaiskustannuksissa.³ Jatkotutkimusten valmistuttua erityisesti arkkitehdit olivat joustavamman C-mallin, ja teollisuuden edustajat ennalta tutumman A-mallin puolella. Kantavat seinät -mallin lopullisesta läpi runnomisesta kertoo päätöksen tehneen kokouksen puheenjohtajana toimineen Lauri Jämsän muistelu:

“[Tutkimusryhmän puheenjohtaja] Palenius kuis-kasi minulle ennen kokousta, että katso nyt, tutkijat aikovat osoittaa edullisemmaksi ratkaisun, joka ei sovi käytännön rakentamiseen yhtä hyvin kuin tämä pitkälaattajärjestelmä. Palenius pyysi tutkijoiden seikkaperäisten esitysten väliin puheenvuoron ja ehdotti pitkälaatan hyväksymistä oikopäätä. Minä löin nuijan pöytään ja totesin pitkälaatan tulleen valituksi.”⁴

Perusteluna kantavat seinät -mallin valintaan kirjattiin sen parempi soveltuvuus nopeaan käyttöönottoon ja asuntotuotannon kustannusten laskemiseen, sekä pilari-laatta-järjestelmässä avoimeksi jääneet rakennus- ja kustannustekniset kysymykset. BES-toimikunta kuitenkin piti tarpeellisena välittömiä lisäselvityksiä ja koerakentamista tappiolle jääneen pilarilaatta-järjestelmän avoimien kysymysten

selvittämiseksi⁵.

Valittu järjestelmä jäi käyttöön ja on edelleen käytössä, toki useiden jatkotutkimusten kautta kehittyneenä. Vaikka huomattavasti joustavamman pilari-laatta-järjestelmän valitsematta jääminen oli hyvin pienestä kiinni, nykyään se on pitkälti unohdettu. Ilmastonmuutoksen aiheuttamat tarpeet huomioiden, niin muuntojoustavuuden, kuin materiaalitehokkuudenkin suhteen, aika voisi olla kypsä uudelleenarvioille. Suomi, jossa on suhteellisen pienet markkinat ja paljon erillisiä, pienehköjä toimijoita, vaikuttaa olevan otollinen maa avointen rakennusjärjestelmien kehittämisen kannalta. BES-järjestelmän jälkeen kehitettyjä järjestelmiä ovat esimerkiksi pilari-laatta-järjestelmä PLS-80, toimisto ja teollisuusrakentamiseen kehitetty Runko-BES, puurakentamiseen kehitetyt Runkopes ja Hallipes, sekä lähiöiden energiakorjaamiseen kehitetty puurakenteinen TES Energy Façade -järjestelmä. “Joustava elementtisyysteemi” olisi vain luonteva jatke tälle kehitystyön perinteelle.

Pilari-laatta-järjestelmäkin on jo kertaalleen kehitetty kaupalliseen valmiuteen asti yllä mainitun PLS-80-järjestelmän muodossa. Vaikka se luonnollisesti onkin 50 vuodessa monilta osin vanhentunut, iso osa tarvittavasta työstä on silti jo tehty ja kerää tällä hetkellä pölyä kirjastojen hyllyissä.

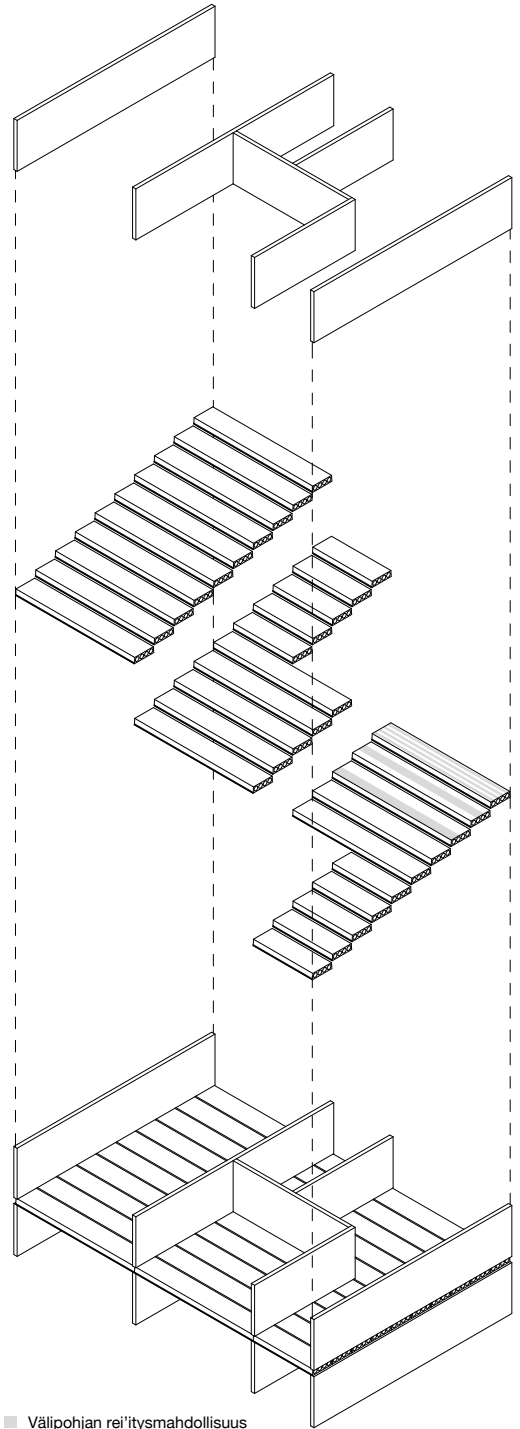
Kantavat seinät -järjestelmä

Asuntotuotantoa varten kehitetyssä BES-järjestelmässä asuntojen väliset seinät ja päätyseinät ovat kantavia. Yleistyessään 70-luvulla järjestelmä oli elementtirakentamisessa muuntojouston suhteen selvä parannus. Pitkät onteloalat mahdollistivat ajalle tyyppillisiä suurlevyjä pidemmät jännevälit, ja huoneistojen sisäiset väliseinät voitiin toteuttaa kevyinä, mikä mah-

dollistaa asunnon sisäisen huonejärjestyksen muuttamisen⁶. Toisaalta järjestelmän voinee myös katsoa yleistyyssään olleen surmanisku huomattavasti muuntojoustavampien pilari-pohjaisten järjestelmien käyttöle asuinkerrostaloissa. Suomalaisen kerrostalokannan inventoinnissa vielä 1940–1960 rakennetuissa taloissa yli 50 %:ssa tutkitusta otannasta oli betonipilarirunko (joko muurattujen ulko- ja porrashuoneiden seinien, sekä betonipilareiden muodostama sekarunko tai puhdas betonipilarirunko)⁷. 1960–1975 rakennettujen talojen osalta samojen runkotyyppien osuus oli romahtanut noin 4 %:iin⁸.

Järjestelmä johti myös erityisesti 70-luvun ”hulluina vuosina” kaupunkikuvallisesti hyvin monotooniseen arkkitehtuuriin, joka on saanut osakseen paljon aiheellista arvostelua. Sen seurauksena järjestelmää on jatkokehitetty mm. Asukas-BES- ja sitä seuranneen ns. Julkisivu-BES-tutkimusten muodossa, jotka ideoivat massoitellun ja julkisivujen suhteen monipuolisempaa järjestelmän hyödyntämistä.

Hyvän tilasuunnittelun avulla järjestelmä mahdollistaa asunnon sisäisen muunneltavuuden lisäksi myös huoneistojakauman säätelyn ns. avoimen rakentamisen periaatteita noudattamalla. Tällaisen asuntojen ulkopuolisen muunneltavuuden aikaansaaminen kantavat seinät



■ Välipohjan rei'itysmahdollisuus

Kuva 16. BES-järjestelmän kantavat seinät-runko.

¹ ”Rahanarvomuunnin”, Tilastokeskus, viitattu 12.3.2022. <https://www.stat.fi/tup/laskurit/rahanarvonmuunnin.html>.

² Seppänen & Koivu, *BES – Tutkimus avoimen elementtijärjestelmän kehittämiseksi*, 39–44.

³ Seppänen & Koivu, *BES – Tutkimus avoimen elementtijärjestelmän kehittämiseksi*, 46–7.

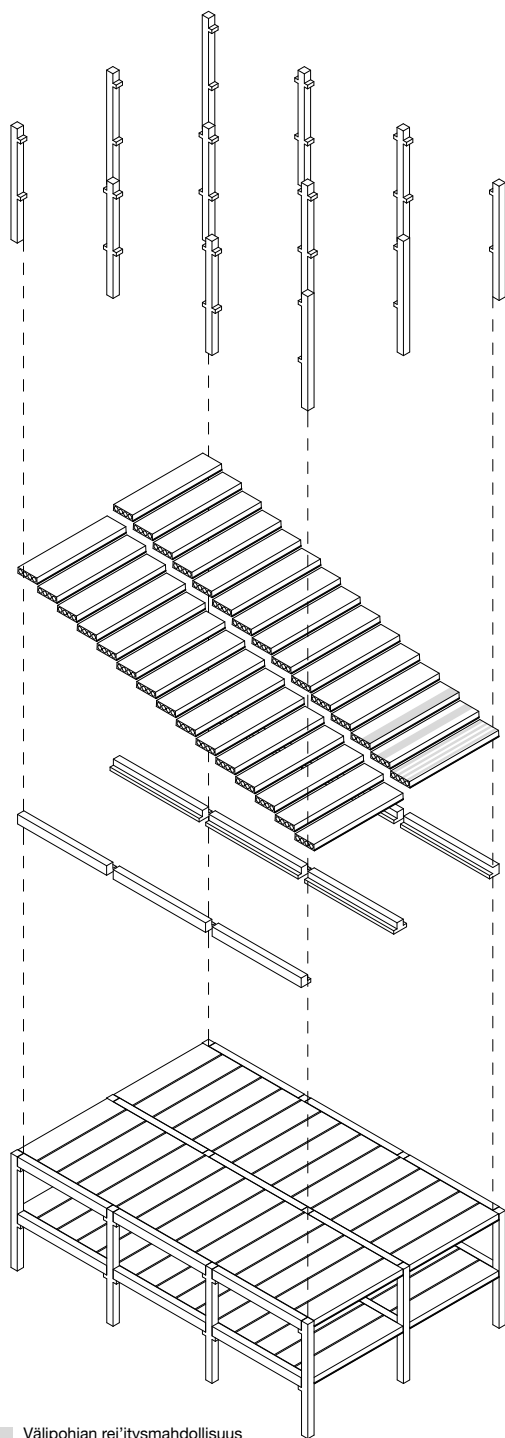
⁴ Hytönen & Seppänen, *Tehdään elementeistä*, 97–8.

⁵ Seppänen & Koivu, *BES – Tutkimus avoimen elementtijärjestelmän kehittämiseksi*, 48.

⁶ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, *Betonelementtirakenteet*, 30.

⁷ Mäkiö & al., *Kerrostalot 1940–1960*, 12.

⁸ Mäkiö & al., *Kerrostalot 1960–1975*, 9.



Kuva 17. Runko-BES-järjestelmän pilari-palkki-runko.

-järjestelmällä on kuitenkin arkkitehdin näkökulmasta erityisen vaativaa, sillä edellytyksenä on ennakoiva suunnittelu ja rakennusten jakaminen kiinteisiin ja muunneltaviin osiin jo suunnitteluvaiheessa. Yksi keino on käyttää *kytköhuoneita*, jotka voi liittää tarpeen mukaan osaksi useampaa eri asuntoa joko siten, että asuntojen välisessä seinässä on ennalta määritelty sijainti myöhemmin avattavalle aukolle, tai käyttämällä kevytrakenteisia osastoivia seiniä, joihin voi tehdä laajempia muutoksia sen vaikuttamatta rungon kantavuuteen. Toinen keino on tehdä rungon suhteen pitkittäiset, tyypillisesti ulkoseinät kantavina, jolloin asuntojen välisiä poikittaisseiniä voi rakentaa kevytrakenteisina, mutta tämä rajoittaa runkosyvyyttä ja julkisivun suunnittelumahdollisuuksia.

Pilari-palkki-järjestelmä

Liike-, toimitila-, varasto- ja teollisuus- ja julkinen rakentaminen, sikäli kun se on betonielementtipohjaista, perustuu Suomessa yleensä pilari-palkki-järjestelmään, joka pohjaa vuonna 1983 julkaistuun Runko-BES-tutkimukseen. Runsaiden yhtäläisyyksien vuoksi sitä voi pitää alkuperäisessä BES-tutkimuksessa hylätyn B-mallin jatkokehityksenä.

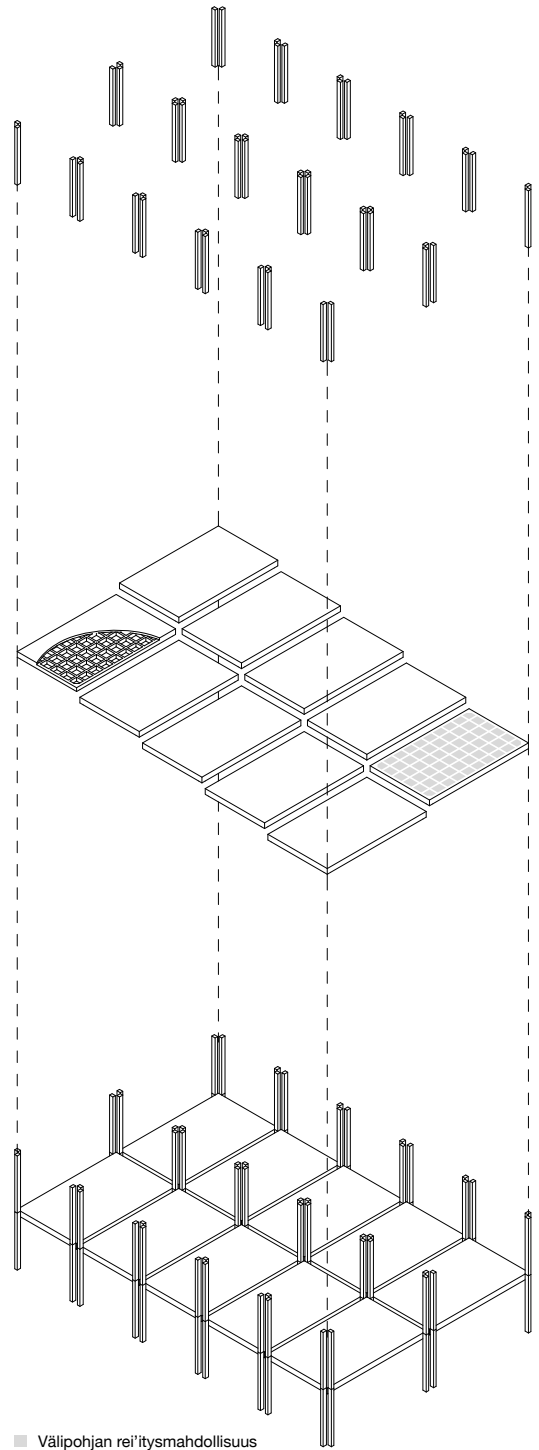
Pilari-palkki-järjestelmä mahdollistaa vakiintuneista järjestelmistä pisimmät jännevälit ja siten niin suunnittelun kuin muunneltavuudenkin suhteen vapaimmat pohjaratkaisut. Pitkän jännevälin kääntöpuolena on korkeat rakennepaksuudet, mikä selittää sitä, ettei järjestelmää juurikaan käytetä asuinkerrostalorakentamisessa, jossa minimi- ja kustannussyistä yleensä myös maksimikerroskorkeus on 3 metriä, ja minimihuonekorkeus 2,5 metriä, joista jää rakenteelle ja talotekniikalle keskenään jaettavaksi korkeimmillaan puoli metriä. Laattojen alapuolelle ulottuvat palkkirakenteet

vaikuttavat talotekniikan vientejä välipohjan alapuolella, minkä vuoksi rakenteiden suunta valitaan yleensä siten, että keskirungon palkit kulkevat rakennuksen pituussuunnassa. Alkuperäisen Runko-BES-tutkimuksen jälkeen markkinoille tosin on tullut erilaisia matala-palkkiratkaisuja, joilla palkit saadaan paremmin ujutettua laattarakenteiden väliin rakennepaksuuden säästämiseksi. Näistä tyypillisin lienee teräksinen, kahden ontelolaattarivin väliin asennettava Delta-palkki, joka liitetään juotosvalulla laatastoon betonin ja teräksen liit-
torakenteeksi ilman rakennekorkeuden kasvamista.

Toinen, varmaankin oleellisempi selitys järjestelmän harvinaisuudelle asuntorakentamisessa on, ettei sen tarjoamaa lisäjoustavuutta pidetä tarpeellisena asuntotuotannossa. Asuntojen huonetilojen tyypilliset leveydet ovat suhteellisen pieniä ja tarvittavat jännevälit siksi lyhyitä.

Pilari-laatta-järjestelmä

Pilari-laatta-järjestelmien suurimpia etuja on pilarien mahdollistama joustavuus niin pohjien suunnittelun kuin esimerkiksi huoneistojaon muuntelunkin suhteen. Toinen merkittävä etu tavoiteltaessa vähähiilisyttä on yksinkertaisesti se, että runkoon kuluu vähemmän betonia, mikä vähentää myös päästöjä. Pilari-laatta-run-
got ovat tyypillisesti paikallavalettavia, mutta myös elementtiteknikkaan perustuvia pilari-laatta-järjestelmiä on kehitetty Suomessa ja ulkomailla. Nurkistaan kannatetuilla ristiin kantavilla laatoilla ei päästä yhtä pitkiin jänneväleihin kuin pilari-palkki-järjestelmällä, mutta saavutettavat jännevälit soveltuvat silti hyvin erityisesti asuinrakentamiseen, ja myös esimerkiksi toimistorakennuksiin, kunhan mitat sovi-
tetaan hyvin tavallisimpiin huonemittoihin.



Kuva 18. PLS-80-järjestelmän pilari-laatta-runko.

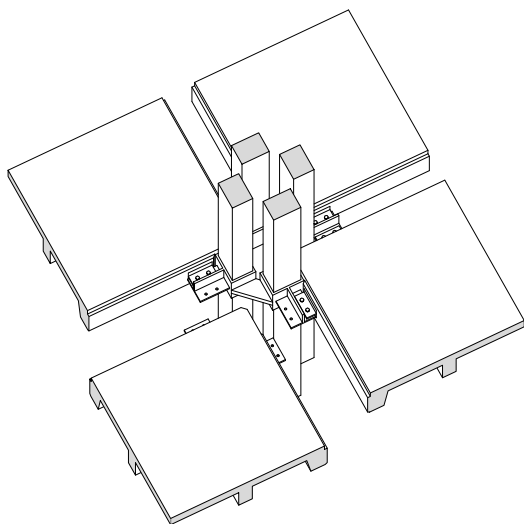
PLS-80 -järjestelmä on SAFAn tilaamaan tutkimukseen perustuva pilari-laatta-järjestelmä, jolla pyrittiin parempaan suunnittelu- ja muuntojoustoon. PLS-80-tutkimus julkaistiin vuonna 1972 ja se on suoraa jatkoa BES-tutkimukselle, jossa kantavat seinät -järjestelmä voitti täpärästi pilari-laattajärjestelmän tutkimuksen runkojärjestelmävertailussa.

PLS-80-tutkimuksen erottaa muista Suomessa tehdyistä avointa rakennusjärjestelmää tavoitteista tutkimuksista sen tilasuunnitteluvetoisuus ja laaja pohjustava selvitystyö asumisen tilantarpeisiin ja ihmisen mittaan.

BES-järjestelmään verrattuna paremman muuntojoustavuuden lisäksi järjestelmän ura-uurtavia ominaisuuksia oli liitosten toteutus pääosin kuivina pulttiliitoksina. Kuivat liitokset mahdollistavat rakennusten huomattavasti helpomman purettavuuden ja siirrettävyyden, sekä talotekniikan erittäin joustavat sijoitusmahdollisuudet. Laatan hyvien rei'itysmahdollisuuksien lisäksi

talotekniikkaa pystyi sijoittamaan neutraalivyöhykkeelle, jossa pystyvedot oli mahdollista sijoittaa seinien sisälle ja vaakavedot laattojen väliin. Tarvittaessa massiivisten betonipilareiden sijaan voitiin käyttää myös onttoja teräksisiä tai betonisia kimpupilareita, joiden sisällä oli mahdollista viedä talotekniikan pystyvetoja (kuva 19).

Toki PLS-80-järjestelmä on myös jossain määrin vanhentunut. Merkittävin heikkous on 12 m kerrannaismitta sekä rungon syvyydessä, että leveydessä. Sama heikkous oli myös alkuperäisessä BES-järjestelmässä, mutta nykyään BES-rungot voidaan mitoittaa juuri sille syvyydelle ja leveydelle kuin tarve vaatii. Nykyinen 1300 mm halkaisijan pyörähdyskartio ei sovi järjestelmän tilasuunnittelun pohjana käytettyihin 6 m kerrannaisiin mittoihin ja aiheuttaa siksi erityisesti 18 m ja 24 m leveissä tiloissa kiusallisia 100 mm tilavajeita. Tämänkin ongelman tosin ratkoisi useimmissa tilanteissa 2 m leveät neutraalivyöhykkeet, josta jäisi keveän väliseinänkin kanssa juuri sopivasti 100 mm lisätilaa.



Kuva 19. Esimerkki PLS-80-järjestelmästä: kimpupilari ja "kuiva" pulttiliitos.

Järjestelmän kaupalliselle epäonnistumiselle on tarjottu selitykseksi sen heikompaa suunnittelujoustavuutta: 12 m kerrannaismoduulilla ei pystynyt optimoimaan rakennusta käyttämään juuri kaavanmukaista kerrosalaa, ja asuntojakauman säätö oli vaikeampaa kun BES-järjestelmällä¹. Nykyvalossa pieni menetys suunnittelujoustossa on kuitenkin pieni hinta järjestelmän tarjoamasta muunneltavuudesta ja siirrettävyydestä, mitkä mahdollistaisivat rakentamisen kiertotalouden periaatteita noudattaen. PLS-80 oli myös jo valmistuessaan auttamatta myöhässä: keskellä Suomen historian suurinta asunto-rakennusbuumia ja turvatuin tulevaisuusnäkymin, rakennusteollisuus oli jo voinut tehdä tuotantolinjoihin tarvitsemansa lisäinvestoinnit suosimansa BES-järjestelmän mukaisesti, eikä järjestelmän vaihtamiseen ollut motiivia².

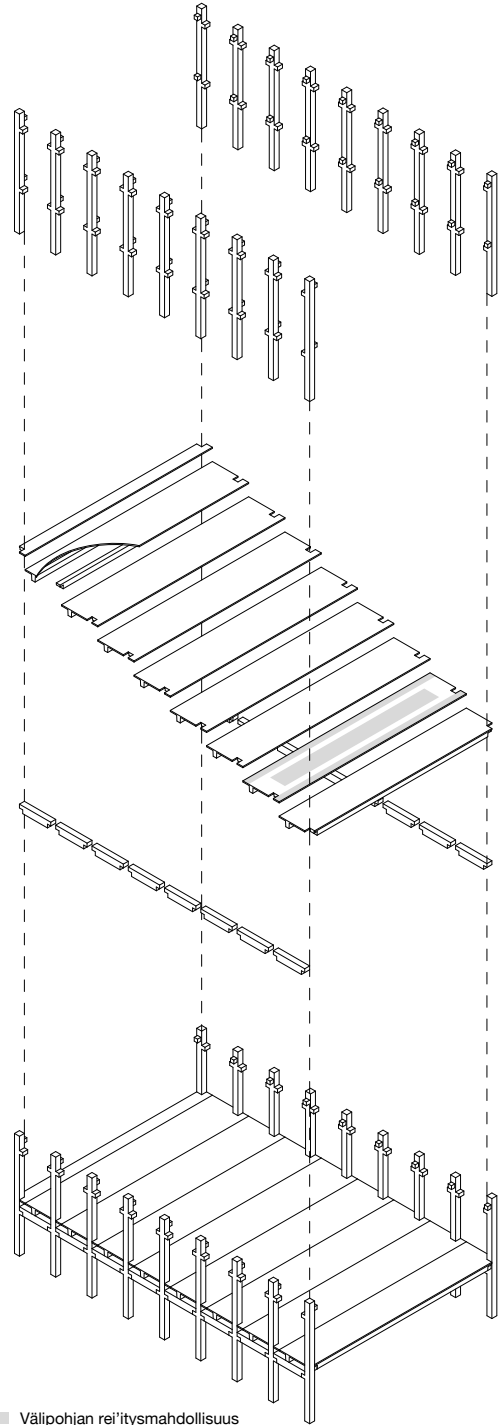
Alkuperäisen tutkimuksen johdannon sanoja on lainattu ennenkin³, ja niiden ajankohtaisuus on vuosien kuluessa vain lisääntynyt:

“[A]suinkerrostalon purkaminen merkitsee asukasta kohden noin 20 tonnin siirtämistä kaatopaikalle ja siten oleellista luonnonvarojen tuhlaamista ja saasteongelman lisäämistä. Kehitetty pilari-laattajärjestelmä täyttää näin ollen luonnonhoitolliset vaatimukset, koska toiminnallisten vaatimusten edellyttämät muutokset on järjestelmän puitteissa tehtävissä niin, että materiaalihukka on mahdollisimman pieni.”⁴

Vaikka järjestelmä ei saanut Suomessa tuulta siipiensä alle, maailmalla siitä on kuitenkin toteutuneita esimerkkejä. Alankomaissa kehitettiin 70-luvulla alun perin purettavien ja siirrettävien koulujen rakentamiseen CD20-järjestelmä, joka on yhä käytössä ja jolla on tähän päivään mennessä toteutettu satoja rakennuksia kouluista toimistoihin ja kerrostaloihin⁵.

Kehityksen kärkeä ulkomailta

Berliiniin valmistui vuonna 2019 FAR Frohn & Rojas -toimiston suunnittelema kokeellinen betonielementtikerrostalo nimeltä Wohnregal, suomeksi “asuinhylly”, joka nostaa muunneltavuuden riman erittäin korkealle. Talosta tekee poikkeuksellisen sen pilari-palkki-runko yhdistettynä TT-laatoista koostuvaan välipohjaan (kuva 20). Suomalaisittain jo pilari-palkki-runko on kerrostalolle poikkeuksellinen ratkaisu, mutta TT-laattojen valinta on vielä erikoisempi. Niitä käytetään tavallisesti suuria jänne-



Kuva 20. Wohnregal -talon runkoperiaate.

¹ Hytönen & Seppänen, *Tehdään elementeistä*, 226–7.

² Hankonen, *Lähiöt ja tehokkuuden yhteiskunta*, 215.

³ Hankonen, *Lähiöt ja tehokkuuden yhteiskunta*, 212.

⁴ Koivu & al., *PLS-80 – yleisen elementtijärjestelmän kehittämistutkimus*, 14.

⁵ “History”, CD20 Building Systems, viitattu 8.3.2022.
<https://www.cd20.nl/en/organization/history.php>.



Kuva 21. Wohnregal, Saksa, FAR Frohn & Rojas, 2019. Valokuva: David von Becker.

väläjä vaativien tuotanto- ja varastorakennusten yläpohjissa, sekä myymälä- ja pysäköintirakennusten välipohjissa.¹ Wohnregalissa sillä on kuitenkin saatu aikaan täysin kantavista rakenteista vapaa plaani, ja yhdistettynä verhorakenteiseen lasijulkisivuun siitä huolimatta poikkeuksellisen valoisat sisäolosuhteet.

Paitsi että asukkaat voivat itse vapaasti muokata asuntojensa huonejakoa, myös asuntopakettia voidaan tarvittaessa muuttaa hyvin vapaasti. Rungon pituussuuntaiset seinät voidaan sijoittaa uudelleen käytännössä täysin vapaasti. Laatat on sijoitettu pilari-palkki-runkoon

nähdessä siten, että jokaisen TT-laatan toinen ripa osuu pilarin kohdalle, ja toinen pilarivälin keskelle, minkä ansiosta rungon syvyysuuntaiset osastoivat seinät voidaan sijoittaa vain reilun metrin jaotuksella ripojen kohdille, tai julkisivun jakoa noudattaen 2,2 metrin pilari-jaon mukaan. Talotekniikan pystynousut on sijoitettu kahteen ryhmittymään rungon keskelle, mutta ripalaatta tarjoaa tarpeen tullen erittäin laajat lisäaukoitusmahdollisuudet.

Järjestelmä on myös siirrettävyyden kannalta erinomainen: rungossa on käytetty juuri niitä rakennusosia ja liitoksia, jotka suomalaistutki-



Kuva 22. Wohnregal, Saksa, FAR Frohn & Rojas, 2019. Valokuva: David von Becker.

muksenkin mukaisesti ovat kaikista helpoimpia purkaa rikkomatta ja käyttää uudelleen.²

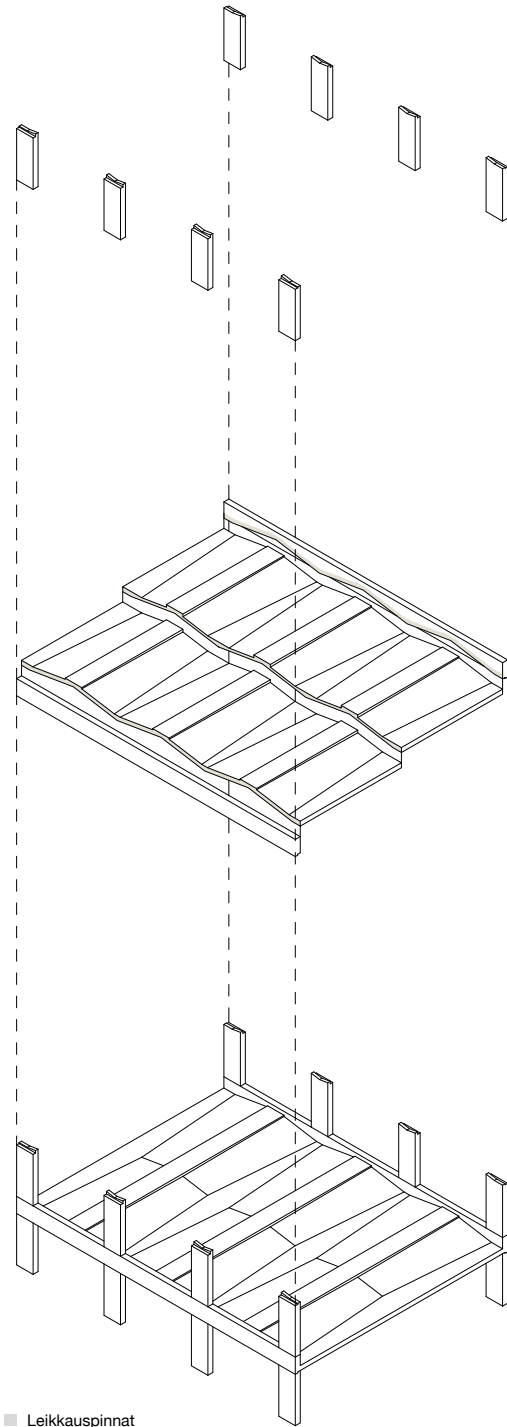
Todettakoon vielä, että rakennus noudattaa betonin hyödyntämisessä myös muilta osin hyviä periaatteita. Sisätilan betonipinnat on jätetty lähes kaikkialla muutenkin teollisuusromanttiseen ilmeeseen sopivasti paljain (kuva 22), mikä mahdollistaa termisen massan täyden hyödyntämisen (ks. luku 2.4), ja edistää sisärakenteiden karbonatisoitumista, eli hiilinieluna toimimista (ks. luku 2.3).

Mitä taloudelliseen puoleen tulee, runkotyöt kestivät korkean esivalmistusasteen vuoksi vain kuusi viikkoa ja huolimatta siitä, että kyseessä oli järjestelmän ensimmäinen prototyyppi, kokonaiskustannuksiksi muodostui Saksan hintatasolla erittäin matala 1500 euroa neliötä kohden.³

¹ Suomen Betoniyhdistys, *Betonitekniikan oppikirja* 2018, 444.

² Lahdensivu & al., *Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet*, 66–7.

³ Frohn & Rojas, “Wohnregal building”, 94.



Kuva 23. Paikallavalettu runko kevennetyllä taitelaatalla

Paikallavalurakentamisen mahdollisuudet

Kuten jo aiemmin on todettu, valmisosarakentamisella on selvästi paikallavalurakentamista paremmat edellytykset kiertotalouden periaatteiden mukaiseen rakentamiseen. On kuitenkin tunnustettava, että joissain tilanteissa paikallavalutekniikka mahdollistaa ratkaisuja, joihin standardoidut, pitkälle esivalmistetut elementit eivät helposti taivu. Yksi esimerkki tällaisesta on Sveitsin St. Gallenin arvokkaaseen vanhaan kaupunkirakenteeseen vuonna 2017 valmistunut, arkkitehtien Corinna Menn ja Mark Ammann suunnittelema toimistorakennus.

Rakennuksessa toteutuvat, noin 13 metrin runkosyvyydestä huolimatta kaksi perinteisesti toisensa poissulkevaa tavoitetta: täysin rakenteista vapaa plaani (pois lukien rakennuksen päädyissä sijaitsevat liikennetilat), ja erittäin runsaasti aukotettu julkisivu. Tavoitteisiin on päästy käyttämällä välipohjissa origamimaista jälkijännitettyä taitelaattarakennetta, jossa tarvittavan betonin määrä ja rakenteen paksuus (laatan paksuus on jännevälän keskellä 150 mm ja päissä 230 mm, kokonaisrakennekorkeus taitteen kanssa on noin 900 mm) on tarkasti optimoitu.¹ Periaate on havainnollistettu kuvassa 23. Taitelaatan voi ajatella periaatteessa modernina holvirakenteena, jossa hyödynnetään optimaalisesti sekä betonin puristuslujuus että vahvistavan teräksen vetolujuus. Optimointi on viety myös kantaviin pystyrakenteisiin, missä ulkoseinien kantavat pilarit kevenevät kerroksittain ylöspäin mentäessä. Teoriassa ei liene mitään estettä miksi rakenne ei olisi toteutettavissa myös elementein, mutta koska se on tarkoin optimoitu nimenomaisesti kyseessä olevaan rakennukseen ja paikkaan, elementoinnista ei varsinaisesti ole hyötyä tai lyhyen tuotantosarjan vuoksi järkeä. Valettaessa käytetyt muotit on joka tapauksessa voitu hyö-



Kuva 24. Namics toimistorakennus, Sveitsi, Corinna Menn ja Mark Ammann, 2017. Valokuva: Roger Frei.

dyntää uudelleen rakennettaessa kerroksittain ylöspäin. Sen lisäksi että taitelaattavälipohja luo mielenkiintoisen sisäkattorakenteen, se toimii samalla myös asennuslattiana, mikä tukee avoimen plaanin periaatetta (kuva 24).

Nimenomaan rakennuskohtaisen materiaali-tehokkuuden optimoinnin vuoksi paikallavalu-tekniikallakin on oma selvä roolinsa vähähiilisemmässä betonirakentamisessa. Huonompien siirrettävyyssominaisuuksiensa vuoksi paikallavalu-urakentamista on syytä käyttää säästeliäästi ja vain kohteissa, joissa on selvästi nähtävissä

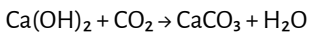
hyvät edellytykset pitkään käyttöikään, kuten julkiset monumenttirakennukset. Tässä suhteessa myös yllä mainittua esimerkkikohtetta voi pitää kyseenalaisena, ainakin kun vertaa Suomessa toimistorakennuksille toteutuviin käyttöikiin.

¹ Pedrazzini, "Folded Plate Floor Slabs in Prestressed Concrete", 29–30.

2.3 – Betoni hiilinieluna

Vauriomekanismista hiilinieluksi

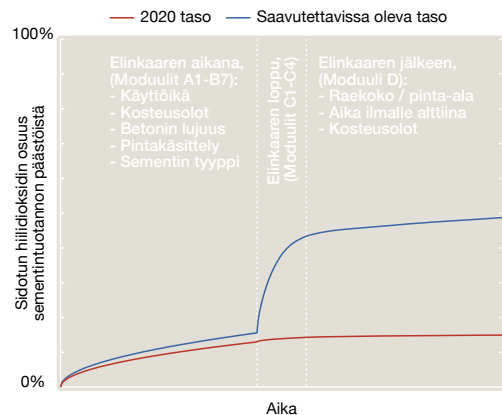
Betoni, tai tarkemmin sen sideaineena toimiva kovettunut sementti, on *hiilinielu*, eli hiilidioksidia ilmakehästä poistava mekanismi. Betonin toiminta hiilinieluna perustuu sementtikiven karbonatisoitumiseen, jota voi pitää kalsinoitumisen (ks. kuvio 2, s. 12) käänteisreaktiona. Kovettunut sementtipasta, tarkemmin sen sisältämät CSH -geeli ja kalsiumhydroksidi, eli sammutettu kalkki, reagoivat ilman hiilidioksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia, eli kalkkikiveä, ja vettä alla olevan yksinkertaistetun reaktioyhtälön mukaisesti. Muita oleellisia karbonatisoitumisen reaktioyhtälöitä on esitetty liitteessä 1.



Karbonatisoituminen on tunnettu jo vuosikymmeniä betonin vaurioitumismekanismina (ks. s. 48-50), mutta sen potentiaaliin hiilinieluna on laajemmin herätty vasta hiljattain. Hallitustenvälinen ilmastopaneeli IPCC tunnusti sementin karbonatisoitumisen maailmanlaajusten hiilinielujen kannalta merkittäväksi ensimmäistä kertaa vuonna 2021.¹ IPCC:n raportissa viitatussa tutkimuksessa on mallinnettu sementiteollisuuden globaali hiilenkierto vuonna 2014 (ks. kuvio 6, s. 25). Tutkimuksen mukaan kyseisenä vuonna sementin hiilipäästöistä noin 20 % sitoutui takaisin sementtipohjaisiin materiaaleihin.²

2016 julkaistussa, laajassa sementin maailmanlaajuisesta hiilinielua mallintaneessa tutkimuksessa arvioitiin, että vuoteen 2013 mennessä 43 % vuosien 1930 ja 2013 välillä syntyneistä sementin prosessipäästöistä (eli energiapäästöt pois lukien, ks. s.25) oli jo sitoutunut takaisin³. Saman tutkijaryhmän vuoteen 2019 asti päivate-

tyssä tutkimuksessa takaisin sitoutuneiden päästöjen uudelleen arvioitu osuus on 55 % prosessipäästöistä⁴. Keskeinen tekijä hiilen takaisin sitoutumisessa on purkuvaihe betonirakenteiden elinkaaren päässä. Kun betoni elinkaarensa päässä murskataan, sen ilmakehän hiilidioksidille altis pinta-ala, ja samalla karbonatisoitumisnopeus moninkertaistuvat. (kuvio 13). Betonia säilötään keskimäärin vain noin 5 kuukautta ennen sen hautaamista tai uusiokäyttöä kierrätysbetonissa, mikä jälleen hidastaa murskeen karbonatisoitumista⁵. Täydellisen karbonatisoitumisen vaatima aika vaihtelee betonityypistä ja murskeen hienoudesta riippuen noin 1–10 vuoden välillä⁶, mikä tarkoittaa, että nykyisellään merkittävä hiilinielupotentiaali jää hyödyntämättä. Teoriassa riittävän pitkällä säilytysajalla, hienolla jauhanalla, ja suotuisilla olosuhteilla prosessipäästöistä voi sitoutua jopa 100 % takaisin



Kuvio 13. Sementin hiilikädenjälki, periaatekuva

Lähteet: ^a)Stripple & al., CO₂ uptake in cement-containing products; ^b)Stripple, Greenhouse gas strategies for cement containing products

Huomioit: Keskimääräiseksi karbonatisoitumisen kautta sitoutuvan hiilen osuudeksi on arvioitu käyttövaiheessa 20 % ja käyttövaiheen jälkeen 3 % kalsinaatiopäästöistä. Käyttövaiheen jälkeen käytännössä saavutettavissa olevaksi osuudeksi on arvioitu 75 % kalsinaatiopäästöistä.^a Elinkaarenaikaisen hiilinielun nostamista ei ole juurikaan tutkittu, mutta esimerkiksi ruotsalaisten kerrostalojen pinta-alainventaarion^b ja las-kentaohjeen^a pohjalta voidaan arvioida lisäpotentiaaliksi noin 20 % nykyiseen tasoon nähden. Muutettu kokonaispäästöosuudeksi kertoimella 0,65.

karbonatisoitumisen kautta. Käytännössä saatutettavissa olevan tason on arvioitu olevan noin 75 %⁷, mikä vastaa prosessi- (65 %) ja energiapäästöjen (35 %) nykyosuuksilla noin 50 % tuotevaiheen kokonaispäästöistä⁸. Huomion arvoista on, että vielä tällä hetkellä rajoittavan kalliin hiilen talteenoton (ks. luku 1.5) kanssa hiilinielupotentiaali mahdollistaa sementin ja betonin kehittymisen tulevaisuudessa jopa hiilinegatiiviseksi materiaaliksi.

Kuivissa sisätiloissa (RH < 80 %), kuten tyypilliset asuintilat märkätiloja lukuun ottamatta, karbonatisoituminen ei aiheuta betonille vaurioita, sillä raudoitusten korroosiovaara on pieni.⁹ Toisaalta sisäilmassa on tyypillisesti enemmän hiilidioksidia kuin ulkoilmassa, joten sisätiloissa on hyvät olosuhteet karbonatisoitumiseen. Hydratoituneen sementin karbonatisoituminen etenee sisällä nopeammin, mutta betonirakenteiden karbonatisoitumisaste (karbonatisoitunut aines karbonisoitumisrintaman millimetriä kohti) on pienempi, sillä sisätilojen kuivissa oloissa betonirakenteissa on verrattain paljon hydratoitumatonta sementtiä (CaO) joka ei karbonatisoidu.¹⁰ Karbonatisoitumisen yhteydessä sitoutuvan hiilen määrä riippuu useasta tekijästä, kuten betonin lujuus, tiiviys, sementin tyyppi ja määrä, ilman kosteus ja hiilidioksidipitoisuus. Kuitenkin yleisesti ottaen sisätiloissa olevat rakenteet sitovat ulkorakenteita enemmän hiiltä betonin pinta-alaa kohti (taulukko 3).

Lisää paljasta pintaa

Arkkitehti voi omalta osaltaan edistää (sisätiloissa olevien) betonirakenteiden karbonatisoitumista pintakäsittelyvalinnoillaan, jotka vaikuttavat oleellisesti karbonisoitumisen nopeuteen. Pintamateriaalien vaikutusta karbonisoitumiseen on tutkittu lähinnä sen hidastamisen näkökulmasta ja ulkotiloissa,

minkä takia sisäpintojen käsittelystä karbonisoitumista ajatellen on melko vähän tutkittua tietoa. Jonkin verran tutkimusta on kuitenkin tehty esimerkiksi Ruotsissa, missä paikallisen ilmaston ja rakentamistapojen voidaan arvioida olevan varsin samankaltaisia kuin Suomessa. Pintakäsittelyn vaikutus hiilikädenjälkeen ei ole yhtä suuri kuin esimerkiksi kierrätykseen murskaamisen, mutta sitä ei silti pidä vähätellä: missä betonin murskaaminen tapahtuu ainakin uudisrakennusten osalta ja ilmastotavoitteiden kannalta aivan liian myöhään, sekä rakenteen käyttöarvon kustannuksella, pintakäsittely vaikuttaa hiilen sitoutumiseen elinkaaren alusta lähtien, ja eniten nimenomaan ensimmäisinä vuosina.

Yleisellä tasolla voidaan todeta, että mitä paremmin pintakäsittely läpäisee hiilidioksidia ja vesihöyryä, sitä nopeammin betonin karbonisoituminen etenee. Ruotsalaisen rakennuskannan näytekappaleista tehtyjen mittausten tuloksista (rakennusten ikä näytteenottohetkellä oli noin 40 vuotta) summattiin, että verrattuna pinnoittamattomaan rakenteeseen:

- Jokseenkin vesihöyryä ja hiilidioksidia läpäisevät pinnoitteet, kuten maali tai tapetti, hidastavat karbonisoitumista noin 50 %.

¹ Canadell & al., "Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks", 32

² Cao & al., "The Sponge Effect", 3.

³ Xi & al., "Substantial Global Carbon Uptake by Cement Carbonation", 880.

⁴ Guo & al., "Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019", 1791.

⁵ Wang & al., *Global CO₂ uptake of cement in 1930-2019*.

⁶ Guo & al., "Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019", 1798.

⁷ Stripple & al., *CO₂ uptake in cement-containing products*, 27.

⁸ IEA, *Energy Technology Perspectives 2020. Report extract*.

⁹ Suomen betoniyhdistys, *Betonitekniikan oppikirja 2018*, 109.

¹⁰ Fridh & Lagerblad, *Carbonation of indoor concrete*, 32-5.

Taulukko 3: Tyypillinen betoniin sitoutuva hiilidioksidimäärä eri olosuhteissa ja tarkastelujaksoilla.

	Aika (vuotta)						
	1	2	5	10	20	50	100
Sisä rakenteet	Sitoutunut CO ₂ (kgCO ₂ /m ²)						
Käsittlemätön pinta	0,6	0,9	1,4	1,9	2,7	4,3	6,1
Nopeasti kuivuva lattiabetoni	0,2	0,2	0,4	0,5	0,7	1,2	1,7
Jokseenkin läpäisevä pinta (maali, tapetti yms.)	0,1	0,1	0,3	0,5	0,9	2,1	3,6
Läpäisemätön pinta (keraaminen laatta, parketti, yms.)	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	0,9
Maanvaraisen laatan alapinta							
Mineraalivillaeristettä vasten	0,4	0,6	0,9	1,3	1,8	2,9	4,1
Nopeasti kuivuva lattiabetoni	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0	1,4
EPS-eristettä vasten	0	0	0	0	0	0	0
Karkearakeista salaojakerrosta vasten	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
Hiekkaa tai soraa vasten	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,07	0,09
Ulkorakenteet							
Sateelle alttiit pinnat	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
Sateelta suojatut pinnat	0,3	0,4	0,6	0,9	1,3	2,0	2,8

Lähde: Nilsson, A new model for CO₂-absorption of concrete structures.

- Tiiviit, peittävät materiaalit, kuten keraaminen laatta, muovimatto, parketti tai lami-naatti hidastavat karbonatisoitumista noin 90–100 %.¹

Mittaustulosten pohjalta kalibroidun teoreettisen mallin mukaisia tyypillisiä takaisin sitoutuvia hiilidioksidimääriä on esitetty taulukossa 3.

Betonipinnan pinnoittamattomaksi määrittämisen tehokkuus karbonatisoitumisen kannalta on sikäli epävarmaa, että tilojen käyttäjä saattaa arkkitehdin määrityksistä riippumatta maalata pinnat itse. Karbonatisoitumisnopeus on kuitenkin korkeimmillaan prosessin alussa ja hidastuu sen edetessä, joten pinnoittamatta jättämisellä voi olla tuntuvaa hyötyä hiilen sitoutumisen kannalta. Yksi tapa lähestyä asiaa on verrata maalin hiilijalanjälkeä betonipinnan hiilikädenjälkipotentiaaliin. Suomen ympäristökeskus SYKEN ylläpitämän päästötietokannan maaleja koskevan taustaraportin² tietoihin perustuen voidaan tyypillisen sisäkäyttöön tarkoitetun vesiohenteisen akrylaattimaalin hiilijalanjäljeksi laskea noin 0,43 kgCO₂/m². Vertaamalla lukua taulukon 3 arvoihin nähdään, että käsittelemättä jätetty betoni sitoo maalattuun verrattuna neliötä kohden jo vuodessa (0,6 – 0,1 = 0,5 kgCO₂/m²) suuremman määrän hiiltä kuin

vastaavan pinta-alan vaatiman maalin tuotannossa syntyy päästöjä. Elinkaaritarkastelulle tyypillisellä 50 vuoden vertailuajalla pinnan käsittelemättä jättämisen kädenjälkipotentiaali (4,3 – 2,1 = 2,2 kgCO₂/m²) maalin hiilijalanjälkeen verrattuna on noin viisinkertainen.

Pinnoittamatta ja ”jokseenkin läpäisevän pinnan” kädenjälkipotentiaalin eroa voi verrata myös betonirakenteen kokonaishiilijalanjälkeen. Esimerkiksi 200 mm paksun huoneistojen välisen seinän hiilikädenjälki on ympäristöselosteen³ mukaan noin 74 kgCO₂/m², jolloin sen molemminpuolisen pinnoittamatta jättämisen kädenjälkipotentiaali 50 vuoden tarkastelujaksolla vastaa noin 6 % (2,2 kgCO₂/m² × 2 / 74 kgCO₂/m² × 100 % ≈ 6 %) rakenteen neliökoh- taisesta hiilijalanjäljestä. Laskelmiin on suhtauduttava kuitenkin varauksella, sillä käytetyt luvut tulevat eri lähteistä, ja niissä on käytetty eri oletuksia betonin suhteen. Betonipintojen kädenjälkiä laskeneessa tutkimuksessa myös varoitettiin mallin epävarmuudesta datan vähäisyyden vuoksi.

Paljaiden betonipintojen kanssa on tietysti syytä olla myös tarkkana, koska niillä on oma historiallinen taakkansa ja erityisesti julkisi-



Kuva 25. Bostadsrättsföreningen Viva, Göteborg, Malmström Edström Arkitekter Ingenjörer, 2019. Valokuva: Ulf Celander.

vuissa paljas betoni mielletään usein rumaksi. Hyvänä esimerkkinä Ruotsissa 2019 valmistuneen ympäristöystävällisen rakentamisen kärkihankkeen, asuinkerrostalokortteli BRF Vivan (kuva 25) moniin vähähiilisyttä tavoitteleviin ratkaisuihin lukeutuivat mm. 30 % tavanomaista vähähiilisemmän betonin käyttö, sekä paljaat betonipinnat karbonatisoitumisen mahdollistamiseksi — myös julkisivuissa⁴. Hankeelle on myönnetty mm. Ruotsin arkkiteh-

tiliiton korkein Kasper Salin -palkinto, Sweden Green Building Councilin vuoden ympäristörakennus -palkinto, sekä ehdokkuus EU:n Mies van der Rohe palkinnon saajaksi.

¹ Nilsson, *A new model for CO-absorption of concrete structures*, 21.

² Häkkinen, *Generic data for paints*, 7.

³ Salminen & al., *Betonituotteiden ympäristöselosteet*.

⁴ "Viva Housing Co-operative", EU Mies Award, viitattu 12.3.2022. <https://eumiesaward.com/work/4863>.

Eri maalityyppien joukosta jonnekin pinnoittamattomien pintojen ja jokseenkin läpäisevien pintojen välille voinee arvioida kuuluvan silikaattimaalit, joilla on korkea vesihöyryn ja hiilidioksidinläpäisevyys¹. Karbonatisoitumiselta suojaavilta pintakäsittelyiltä edellytetään hiilidioksidinläpäisevyyttä kuvaavaa S_D -lukua 50 m tai enemmän, kun silikaattimaaleilla arvo on tyypillisesti 0,5 m tai vähemmän² (mitä pienempi luku, sitä suurempi läpäisevyys). Tarkempaa tutkittua tietoa asiasta ei kuitenkaan näytä olevan. Tuotevertailusta tekee haastavaa se, että maalivalmistajat eivät yleensä ilmoita maalien hiilidioksidinläpäisevyyttä, koska testaaminen on suoritettava tuotekohtaisesti ja puolueettomilla tutkimuslaitoksilla, mikä on rajoittavan kallista³.

Tarkempi tieto olisi arvokasta, sillä määrittämällä rakenteen pinnoitettavaksi hiilidioksidia hyvin läpäisevällä maalilla arkkitehti voisi nostaa todennäköisyyttä, että karbonatisoituminen jatkuu ainakin ensimmäiseen pintaremonttiin asti häiriöttä. Myös silikaattimaalin tyypillinen hiilijalanjälki, SYKEN päästötietokannan tietojen mukaan $0,36 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, korvautuu karbonatisoitumisen kautta nopeasti.

Sisäpintojen merkitys kokonaisuudessa

Toisessa ruotsalaistutkimuksessa analysoitiin ruotsalaisten asuin- ja toimistorakennuksien uusiotuotannon betonipintojen määriä pinnoitustyypeittäin. Keskimäärin yhteen uusiotuotettuun kerrostaloasuntoon kuluu $67,42 \text{ m}^3$ betonia ja siitä syntyy 525 m^2 betonipintaa (kaikki asuntokoot, mukaan lukien ulkovaipan ja yhteistilojen osuudet, ja huomioiden myös rakennukset, joiden runko ei ole betonia). Betonipinnoista 82 % on sisätiloissa ja sisäpinnoista edelleen maalattuja on 58 % peitettyjä 20 % ja pinnoittamattomia 22 %. Toimistorakennuksiin puolestaan kuluu $0,29 \text{ m}^3$ betonia, ja syntyy 2,84

m^2 betonipintaa yhtä bruttoneliötä kohden, josta sisäpintoja 77 %. Sisäpinnoista maalattuja on 28 %, peitettyjä 34 % ja pinnoittamattomia 38 %.⁴

Myös Suomen rakennuskannasta on kartoitettu betonipintojen keskinäisiä osuuksia CO₂ncrete Solution -hankkeessa⁵. Tässä inventaariossa pinnat jaetaan sisäpintojen osalta karkeammin vain pinnoitettujen ja pinnoittamattomien, sekä ulkotilojen osalta säältä suojattuihin ja suojaamattomiin ulkotilojen pintoihin. Valtaosa, 73 % Suomen betonipinnoista on pinnoitettuja ja sisällä, 14 % on pinnoittamattomia ja sisällä, 11 % suojaamattomia ja ulkona, sekä 2 % suojattuja ulkopintoja.

Kaikista rakennusten betonipinnoista valtaosa on siis sisätiloissa, missä karbonatisoitumisella ei ole haittavaikutuksia ja hiiltä sitoutuu nykyiselläänkin neliötä kohden enemmän. Valtaosa sisäpinnoista kuitenkin maalataan tavalla, joka merkittävästi hidastaa karbonatisoitumista ja siten betonin hiilinielua. Sitä miten suuresta vähennyspotentiaalista on kyse kokonaisen rakennuksen tasolla pitäisi tutkia tarkemmin elinkaaritarkastelun keinoin. Kuitenkin paljaat betonipinnat, riippuen toki pinnan laatuvaatimuksista, lienee ainakin kustannustehokas päästövähennyksen keino.

¹ Reichel & al., *Plaster, Render, Paint and Coatings*, 66.

² Ibid., 62, 73.

³ Sakari Leimi, Tikkurila Oy:n tekninen kehityspäällikkö, puhelinhaastattelu, 28.2.2022.

⁴ Strippel, *Greenhouse gas strategies for cement containing products*, 98–100.

⁵ Kekkonen, "CO₂ncrete Solution -hankkeesta lisätietoa hiilidioksidin sitoutumisesta betoniin", 101.

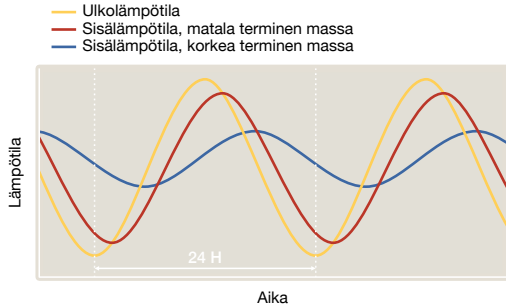
2.4 – Terminen massa ja aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen

Termisen massan toimintaperiaatteet

Yksi energiatehokkaan rakentamisen vähemmälle huomiolle jäävistä osa-alueista on termisen, eli lämpöä varaavan massan hyödyntäminen. Terminen massa kuvaa materiaalin kykyä varastoida lämpöä ja sitä kautta tasata rakennuksen sisäpuolista lämpövaihtelua. Termisen massan hyödyntämiseen vaikuttaa rakennusmateriaalilla kolme tekijää: *ominaislämpökapasiteetti*, *tiheys* ja *lämmönjohtavuus*.

Ominaislämpökapasiteetti kuvaa sitä, kuinka paljon lämpöenergiaa tarvitaan yhden kilogramman ainetta lämpötilan nostamiseksi yhdellä asteella. Kun se kerrotaan aineen *tiheydellä*, saadaan rakennussuunnittelun kannalta hyödyllisempi *tilavuudellinen lämpökapasiteetti*, joka kuvaa kuinka paljon lämpöenergiaa tarvitaan, jotta saadaan kuution rakennusmateriaalia lämpötilaa nostettua keskimäärin yhdellä asteella. Ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden merkitys termisen massan toimintaan on suoraanvainen: mitä korkeampi arvo, sen parempi.

Lämmönjohtavuus kuvaa sitä, kuinka nopeasti materiaali johtaa lämpöenergiaa (watteina, eli jouleina sekunnissa) metrin paksuisen ainekerroksen läpi yhtä astetta aineen ja ympäristön välistä lämpötilaeroa kohden. Lämmönjohtavuudesta riippuu kuinka kauan kestää, että ympäröivän lämpötilan noustessa lämpö kulkee materiaalin läpi ja kuutio (tai kilo, tai muu soveltuva yksikkö) materiaalia saavuttaa saman lämpötilan ympäristön kanssa. Toisin ilmaistuna lämmönjohtavuudesta riippuu kuinka kauan kestää, että esimerkiksi yhteen kuutioon materiaalia varastoituu tilavuudellista lämpökapasiteettia vastaava määrä lämpöenergiaa. Lämmönjohtavuuden on oltava sopiva, jotta



Kuvio 14. Termisen massan vaikutus sisälämpötilaan.

rakenne voi toisaalta ottaa vastaan lämpökuormat riittävän nopeasti, ettei sisätila ylikämpene, ja toisaalta luovuttaa lämpöä riittävän hitaasti, jotta sisä- ja ulkolämpötilojen huippujen välille pääsee muodostumaan sisälämpötiloja tasaava viive (kuvio 14). Esimerkiksi teräksellä on korkea tilavuudellinen lämpökapasiteetti, mutta erittäin korkean lämmönjohtavuuden takia lämpö varastoituu ja vapautuu niin nopeasti, ettei lämpötilahuippujen välille muodostu viivettä. Puulla on kohtalainen tilavuudellinen lämpökapasiteetti, mutta sen matala lämmönjohtavuus hidastaa lämmön varautumista.¹ Betonissa puolestaan korkea lämpökapasiteetti, ja lämmön vuorokauden aikaiselle varastoitumiselle ja uudelleen vapautumiselle soveltuva lämmönjohtavuus kohtaavat. Tiettyä optimaalista lämmönjohtavuusarvoa ei ole olemassa, koska lämpökuormien varautumisnopeus riippuu myös monista muista tekijöistä kuten varaavan massan pinta-alasta ja rakennepaksuuksista. Materiaalien termisiä ominaisuuksia on esitetty taulukossa 4.

Lämmityskaudella rakenteiden termisen massa parantaa rakennuksen lämpökuormien (kuten aurinko, ihmiset, sähkölaitteet yms.) hyödyntä-

Taulukko 4: Materiaalien termisiä ominaisuuksia.

	Tiheys kg/m ³	Ominais- lämpökapasiteetti J/(kg·K)	Tilavuudellinen lämpökapasiteetti kWh/(m ³ ·K)	Lämmönjohtavuus W/(m·K)
Vesi	1000	4190	1,16	0,6
Teräs	7800	450	0,98	50
Graniitti	2500...2700	1000	0,69...0,75	2,8
Betoni	2200	1000	0,61	1,65
Keraaminen laatta	2300	840	0,54	1,3
Lasi	2500	750	0,52	1
Poltettu tiili	1000...2400	1000	0,28...0,67	0,55...0,75 ^a
Kalkkikiekkatiili	900...2200	1000	0,25...0,61	0,60...0,70 ^a
Puu (sahatavara)	500	1600	0,22	0,13
Kipsilevy	700	1000	0,19	0,21
Mineraalivilla	10...200	1030	0,00...0,06	0,031...0,042 ^a
Ilma	1,23	1008	0,00	0,025
Lähteet: ensisijaisesti SFS-EN ISO 10456 + AC. Puuttuvat tiedot täydennetty: ^a) Vinha et al., Rakennusfysiikka 1			1 kWh = 3,6 · 10 ⁶ J	1 W = 1 J/s

mistä. Ennen kaikkea rakenteet varaavat passiivisesti osan päivällä auringosta säteilymuodossa saatavasta lämpöenergiasta ja auringon laskettua vapauttavat sitä takaisin huonetilaan hidastaen sisätilan viilenemistä.

Korkeat lämmöneristysvaatimukset aiheuttavat Suomessa kesäisin ylikuumenemista. Jäähdytyskaudella termistä massaa voidaan käyttää viilennyksessä yötuuletuksen avulla. Varaava massa toimii puskurina, kun lämpökuormien noustessa lämpö varautuu rakenteisiin ja sisälämpötilan nousu hidastuu. Varastoitunut lämpö pääsee purkautumaan yön aikana lämpökuormien lasiessa. Yötuuletus tehostaa lämmön purkautumista entisestään. Yöviilen-nyksen toimimiseksi ulkolämpötilan täytyy laskea vähintään 5 astetta sisäilman ylimmän hyväksyttävän lämpötilan alapuolelle, mikä toteutuu Suomessa lähes aina, sillä yölämpötilat pysyttelevät hellejaksojenkin aikana yleensä 15–20 °C välillä² ja määräysten mukainen enimmäislämpötila on lämmityskauden ulkopuolella 27 °C³.

Ideaalitilanne on, ettei rakenteiden lämpökapasiteetti ehdi tulemaan täyteen vuorokauden lämpimänä aikana.

Termisen massan energiataloudellinen merkitys

Termisen massan tehokkuudesta energiankulutuksen vähentämisessä on erilaisia arvioita ja simulaatiotuloksia, ja tulokset vaihtelevat suuresti riippuen rakennuksen muista parametreista kuten rakennuksen suuntaus ja ikkunoiden määrä ja suhde eri ilmansuunnissa.

Maailmalla tehtyjen tutkimusten mukaan lämmitysenergiankulutus korkean termisen massan omaavilla rakennuksilla kevyt-rakenteisiin verrattuna oli keskimäärin 5–15 % pienempi.⁴

Tampereen teknillisen yliopiston vetämän pohjoismaisen yhteistutkimushankkeen mukaan korkea terminen massa vähensi lämmitysenergiankulutusta 3–14 % ja viilennysenergiankulutusta noin 40 %.⁵ Toisen Tampereen yliopis-

¹ Bennett, *Sustainable Concrete Architecture*, 63.

² Pulakka & al., *Energiatutkimus asuinrakennus*, 131.

³ RT RakMK-21752, 4 §.

⁴ Hietamäki & al., *Rakennusten massiivisuus: keskeiset tutkimukset ja tulokset*, 43.

⁵ Kalema & al., *Nordic Thermal Mass – Effect on Energy and Indoor Climate*, 77

ton vetämän hankkeen simulaatiotuloksissa raskasrakenteisten rakennusten lämmitysenergian nettotarve oli noin 2,5–10 % ja viilennysenergian nettotarve 2–42 % pienempi kuin kevyt-rakenteisessa vertailukohteessa. Kokonaisenergiankulutuksen osalta, johon sisältyy lämmitys ja jäähdytysjärjestelmien kuluttaman energian lisäksi myös lämmin käyttövesi, valaistus, LVI-laitteet ja lämmin käyttövesi ja huonelaitteet, termisen massan hyöty vaihteli 0,5–3,5 % välillä.¹

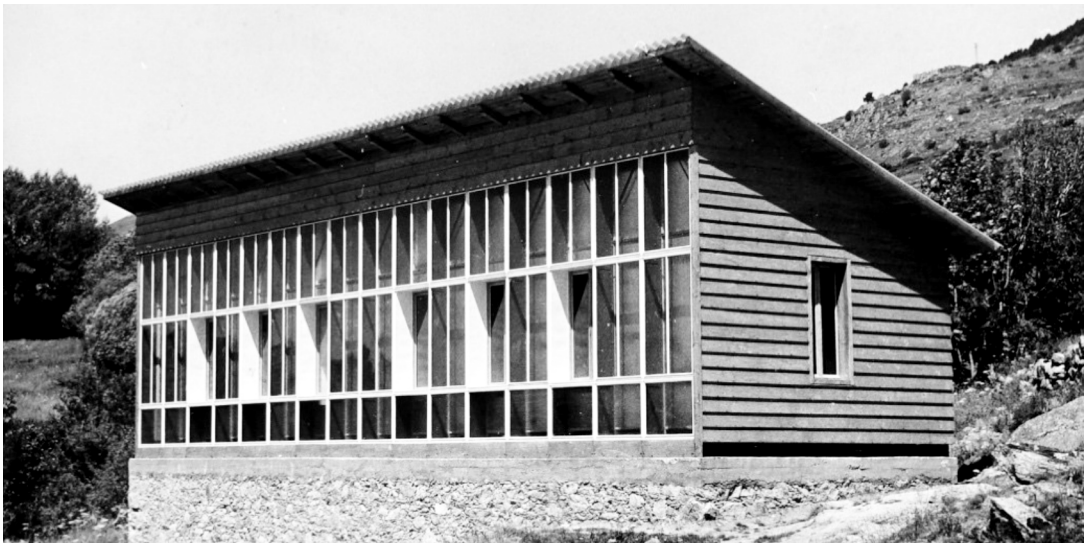
On kuitenkin huomioitava, että simuloinnissa käytetyt rakennukset eivät olleet suunnittelultaan optimoituja passiivisen aurinkoenergian hyödyntämistä ajatellen, ja ne oli suunnattu siten, että suurimman ikkunapinta-alan julkisivut olivat länteen päin auringon aiheuttaman viilennyskuorman maksimoimiseksi². Paremmalla termisen massan käytöllä voisikin oletettavasti saada vielä suurempaa hyötyä.

Riippumatta säästyvän energian tarkasta määrästä on kuitenkin selvää, että betonilla on

suuri lämpöä varaava massa ja betonista rakennettaessa on hölmöä jättää hyödyntämättä sen ilmaiseksi tarjoama hyöty. Nykyisillä, korkeilla energiatehokkuuden vaatimuksilla lämmitysenergian kulutus on aikaisempaa pienempi, siisä aurinkoenergiasta saatava hyöty on suhteessa suurempi.

Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen

Helpoin ja tyypillisin tapa aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen on käyttää itse rakennusta ja sen oleskelutiloja eräänlaisena aurinkokeräimenä, jossa suora auringonvalo lankeaa sisätilojen lattioihin ja seiniin, ja varastoituu lämpöenergiana. Toinen, vähemmän käytetty keino on epäsuorat järjestelmät, kuten keksijänsä Félix Tromben mukaan nimetty Trombe-seinä (kuva 26). Trombe-seinä on etelään suunnattu kaksinkertainen seinärakenne, jossa ulompana on lasinen verhoseinä, ja välittömästi sen sisäpuolella betonista tai muusta

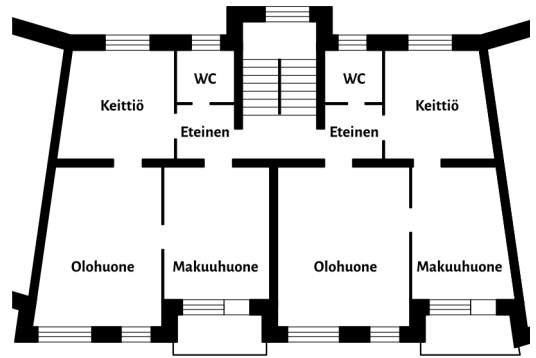


Kuva 26. Yksi ensimmäisistä "Trombe-seinistä". Lasijulkisivun takana oleva betoniseinä toimii termisenä massana, joka vastaanottaa auringon lämpösäteilyä. Odeillo, Ranska. Félix Trombe, 1962–3.

soveltuvasta materiaalista rakennettu massiivinen varaajaseinä, joka varastoi lämpöä tehokkaasti päivällä, ja luovuttaa sitä sisätilaan yön aikana.

Parhaat varastoivat massat ovat suoraan auringon säteilylle alttiit lattiat ja seinät. Lämmön varastoitumiseksi rakenne täytyy jättää paljaaksi, tai päällystää ainoastaan materiaaleilla, jotka johtavat lämmön tehokkaasti varastoivaan massaan. Esimerkiksi betonirakenteisten välipohjien yläpinnoissa keraaminen laatta on parempi vaihtoehto kuin käytännössä eristeenä toimiva parketti ja alapinnoissa alkattorakenteet voivat eristää termisen massan huonetilasta. Askelääneneristysvaatimusten vuoksi betonilaattojen pintaa ei yleensä kuitenkaan voi esimerkiksi kerrostaloissa jättää eristämättä, ellei käytetä kelluvaa laattaa. Lämmön varastoinnin kannalta massan pinta-ala on tärkeämpi tekijä kuin rakennepaksaus. Betonissa massassa lämpö ei tyypillisesti etene auringon paistaessa päivän aikana 100–150 mm syvemmälle. Haluttaessa ottaa kaikki hyöty auringon tarjoamasta ilmaisenenergiasta nyrkissäntönä voidaan noin 100 mm paksulle betoniselle massalle pitää, että suoraan auringolle altista pintaa tarvitaan kolminkertainen määrä ikkunapinta-alaan nähden, ja suoran säteilyn tavoittamatonta, kuitenkin huonetilasta eristämätöntä pintaa kuusinkertainen määrä ikkunapinta-alaan nähden.³

Ikkunapintaa kannattaa sijoittaa mahdollisimman paljon eteläjulkisivulle, josta passiivista aurinkoenergiaa on parhaiten saatavilla. Etelästä saatava aurinkoenergia on myös helpoiten hyödynnettävissä, sillä matalalta paistava talviaurinko pääsee paistamaan suoraan syvälle sisätiloihin, ja lämmityskauden ulkopuolella (kesä–elokuu) korkealta paistava aurinko on helposti torjuttavissa varjostavilla rakenteilla, kuten parvekevyöhykkeellä ylälämpenemisen estämiseksi. Idästä ja lännestä paistava aurinko



Kuva 27. Aurinkoenergian kannalta edullinen kerrostalolamelli, Männikkötie 5, Helsinki, Kaj Englund, 1953. 1:250.

on ylälämpenemistä ajatellen vaikeita torjua, koska aurinko paistaa matalalta. Länsiaurinko on erityisen haastava, koska sen paistaessa matalalta suoraan sisälle, sisätilojen lämpötilat ovat tyypillisesti jo päivän aikana nousseet ennestään korkealle. Koska suuri terminen massa hidastaa tilojen ylälämpenemistä, voidaankin ajatella että terminen massa myös mahdollistaa suuremmat ikkunat ja siten enemmän luonnonvaloa sisätiloihin. Koska valonsaannin kannalta pohjoisjulkisivun ikkunat vaativat suurempaa pinta-alaa ja niiden lämpöhäviö on suurempi, pohjoisjulkisivulle kannattaa mahdollisuuksien mukaan sijoittaa toissijaisia toimintoja, kuten keittiö, kylpyhuone, vaatehuone, yms. (kuva 27)⁴.

Rakennuksen energiatarkastelu tulisi tehdä aina hyvissä ajoin ja suunnitelmia muokata sen pohjalta. Tehtäessä energiasimulaatio vain osana rakennusluvan hakemisen byrokratiaa ollaan jo auttamatta myöhässä, sillä suurimmat energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät kuten massoitelu ja suuntaus on jo löyty lukkoon.

¹ Vinha & al., *Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristystyksen lisäyksen vaikutukset*, 302–8.

² Ibid., 293.

³ Kwok & Grondzik, *The Green Studio Handbook*, 131–5.

⁴ Ibid.

Lopuksi

Betonilla on rakennusaineena pitkät juuret, mikä johtuu varmasti siitä, että se on erittäin monipuolinen ja hyvä materiaali. Ilmastonmuutoksen aikakaudella on kuitenkin tehtävä töitä, että betonirakentaminen pysyy kiinni ajan asettamissa vaatimuksissa.

Betonin päästöjen vähentämisen eteen tehtävän tutkimuksen ja kehitystyön määrä on suuri. Rakennusten elinkaaren kannalta tutkimus liittyy kuitenkin pitkälti elinkaaren alun tuotevaiheeseen (A1-A3), käytännössä sementin tuotannon päästöjen vähentämiseen, ja toisaalta loppupäähän (C1-C4, D), ennen kaikkea betonin murskaamiseen ja siten karbonatisoitumisen edistämiseen. Rakentamisvaiheen (A4-A5) ja käyttövaiheen (B1-B7) aikaisten päästöjen vähentämiseen kohdistettu kehitystyö ja toimet ovat sen sijaan suhteessa vähäisiä, vaikka keinoja on kyllä olemassa. Rakentamisen materiaalitehokkuutta on mahdollista parantaa esimerkiksi pilari-laatta- ja pilari-palkki-laatta järjestelmien laajemmalla käytöllä myös asuntorakentamisessa. Rakennusten lyhyeksi jääviä käyttöikiä voitaisiin pidentää tuomalla muuntojoustavuus aidosti osaksi jokaisen rakennuksen suunnitteluprosessia. Lisäksi sekä rakentamisen rahalliset, että päästömuotoiset investoinnit voitaisiin myös taata lyhyeksi jääviä käyttöikiä vastaan suunnittelemalla rakennukset kiertotalouden periaatteiden mukaisesti helpommiksi purkaa ja siirtää uuteen sijaintiin esimerkiksi kaupunkirakenteen tehokkuusvaatimusten kiristytessä.

On hämmästyttävää, että kaikki yllä mainitut keinot ovat olleet Suomessakin ensimmäistä kertaa pöydällä jo 50 vuotta sitten. 70-luvulla kehitettyä PLS-80 -järjestelmää jopa koe-rakennettiin noin tuhannen asunnon verran, mikä tuskin olisi ollut mahdollista, ellei kehi-

tetty järjestelmä olisi ollut vähintäänkin käyttökelpoinen jo silloisessa maailman- ja markkina-tilanteessa.

70-luvun öljy- ja energiakriisin jälkeen on tehty tutkimusta myös esimerkiksi aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen liittyen, mutta tutkittujen keinojen – erityisesti nimenomaan arkkitehtien käytössä olevien keinojen – hyödyntäminen uudisrakentamisen käytännössä on edelleen varsin vähäistä. Ilmastonmuutos ja sen torjuminen ei ole arjen suunnittelutyössä riittävän korkea prioriteetti.

Karbonatisoitumisen aikaansaama hiilinielu on uusi tutkimuskohde. Siinäkin kuitenkin elinkaaren aikainen sitomiskyky on jäänyt pienelle huomiolle. Elinkaaren aikainen potentiaali on selvästi elinkaaren jälkeistä murskaamista pienempi, mutta kuitenkin päästöjen vähentämisen keinona yksinkertainen ja kustannustehokas. Uudisrakennusten kohdalla murskaaminen tulee ajankohtaiseksi — ainakin toivottavasti — vasta satojen vuosien kuluttua, jolloin akuutti ilmastokriisi on jo ratkennut. Karbonatisoitumisen mahdollistavia pintakäsittelyitä olisi siksi aiheellista tutkia lisää.

Betonin keskeisin etu kestävää rakentamista ajatellen on sen erinomainen säilyvyys, minkä vuoksi sillä on paljon tarjottavaa kiertotalouden periaatteita noudattavalle rakentamistavalle. Keskeinen ongelma muuntojouston ja yleisesti kiertotalouden periaatteiden vakiintumisessa osaksi rakentamista tuntuu olevan, ettei niiden edistäminen ole taloudellisesti kannattavaa rakentajataholle. Ratkaisut nostavat rakentamisen kustannuksia, mutta niillä vältettävät elinkaarikustannukset jäävät joka tapauksessa käyttäjän huoleksi. Rakennuslain mukaan *“rakennuksen tulee olla tarkoitustaan vastaava,*

*korjattavissa, huollettavissa ja muunneltavissa*¹, mutta esimerkiksi muunneltavuutta ei ole sen tarkemmin määritetty. Määrittely ja tavoite-tason asettaminen on vaikea tehtävä, mutta ilman sitä laki jää hampaattomaksi.

Arkkitehdin mahdollisuuksia vaikuttaa betoni-rakentamisen vähähiilisyys on tutkittu liian vähän ja tässäkin diplomityössä on vasta raa-paistu laajan aihealueen pintaa. Toivon, että diplomityöstä on apua muille betoni-rakennuksia suunnitteleville arkkitehdeille ja arkkitehtiopiskelijoille, ja että aiheeseen liitty-vän tutkimuksen varmasti jatkuessa myös ark-kitehtikunta aktivoituu osaltaan yhä enemmän uusien ratkaisujen etsimiseen.

¹ Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999, 117 §.

Kiitokset

Janne Pihlajaniemi, neuvoista, kannustuksesta
ja diplomityön ohjauksesta.

Jouni Punkki, betoniteknisistä kommenteista.

Milja Tuomivaara ja Julia Rytönen, arvokkaista
kommenteista ja oikolukuavusta.

Hanna Mattila, ihan kaikesta.

Lähteet

Kirjallisuus ja multimedia

ACI CT-13. *ACI Concrete Terminology*. ACI (American Concrete Institute), 2013.

Alatalo, Elina (toim.). *Hurmaava lähiö – Energiatohokas lähiö -hankkeen loppujulkaisu*. Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin laitos. 2012. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2798-2>.

Andrew, Robbie M. "Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018." *Earth System Science Data* 11, no. 4 (2019): 1675–710. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>.

Andrew, Robbie. *Global CO₂ emissions from cement production*. Version 210723 [Dataset]. *Zenodo*, 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5126601>.

Bennett, David. *Sustainable Concrete Architecture*. London: RIBA Publishing, 2010. ISBN 978-1-85946-352-9.

Berge, Bjørn. *The Ecology of Building Materials*. Second edition. Oxford: Architectural Press, 2009. ISBN 978-1-85617-537-1.

Betoniteollisuus. *Betoniteollisuuden yhteenvetotaulukko* 2019. Rakennusteollisuus/Betoniteollisuus, 2019. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/11/Betoniteollisuuden-yhteenvetotaulukko-2019.pdf>

Bleazard, Robert G. "The History of Calcareous Cements" in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th edition, edited by Peter C. Hewlett & Martin Liska, 1–23. Butterworth-Heinemann, 1998. ISBN 0-7506-6256-5.

Canadell, J. G., P. M. S. Monteiro, M. H. Costa, L. Cotrim da Cunha, P. M. Cox, A. V. Eliseev, S. Henson, & al. "Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks." Chap. 5 in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, & al. Cambridge University Press, 2021. In Press.

Cao, Zhi, Rupert J Myers, Richard C Lupton, Huabo Duan, Romain Sacchi, Nan Zhou, T Reed Miller, Jonathan M Cullen, Quansheng Ge, and Gang Liu. "The Sponge Effect and Carbon Emission Mitigation Potentials of the Global Cement Cycle." *Nature Communications* 11 (2020): 3777. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17583-w>.

Cimbéton. *Histoire du béton – Naissance et développement, 1818-1970*. Collection Technique Cimbéton, B90A. Cimbéton, 2009. <https://www.infociments.fr/betons/cycle-1-decouverte-histoire-du-beton-naissance-et-developpement-1818-1970>. Viitattu 7.1.2022.

CO₂ncrete solution – Report Q1/2020, Kirjallisuusreferaatti (kompakti). <https://concretesolution.fi/wp-content/uploads/2020/04/CO2NCRETE-SOLUTION-kirjallisuusraportti-6p-20200206.pdf>. Viitattu 12.3.2022.

Courland, Robert. *Concrete Planet: The Strange and Fascinating Story of the World's Most Common Man-Made Material*. New York: Prometheus Books, 2011. ISBN 978-1-61614-482-1.

Davidovits, Joseph. *State of the Geopolymer R&D* 2021. Keynote by Joseph Davidovits, 31.8.2021. Geopolymer Camp 2021, University of Picardie, Saint-Quentin, France. Video recording. <https://www.geopolymer.org/conference/gpcamp/gpcamp-2021/>. Viitattu 11.3.2022.

Finnsementti. *Sementtien ympäristöselosteet*. Finnsementti, 2021. <https://finnsementti.fi/palvelut/ymparisto/sementtien-ymparistoselosteet/>. Viitattu 17.11.2021.

Finnsementti. *Ympäristöraportti* 2021. Finnsementti, 2021. <https://finnsementti.fi/ymparistoraportti-2021/>. Viitattu 22.10.2021.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). *FAO Yearbook of Forest Products* 2018. Rome: FAO, 2020. <https://doi.org/10.4060/cbo513m>.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome: FAO, 2020. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.

Fridh, Katja & Björn Lagerblad. *Carbonation of indoor concrete: measurements of depths and degrees of carbonation*. Lund University. Faculty of Engineering (LTH). Division of Building Materials. Report TVBM 3169. 2013. <https://portal.research.lu.se/en/publications/2ce08f3a-2343-4a75-b884-b39dc403e-be4>.

Friedlingstein, Pierre, Matthew W. Jones, Michael O'Sullivan, Robbie M. Andrew, Dorothee C. Bakker, Judith Hauck, Corinne Le Quéré, & al. "Global Carbon Budget 2021." *Earth Syst. Sci. Data Discuss*. Preprint, in review, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-386>.

Frohn, Marc & Mario Rojas. "Wohnregal building." *ARQ* (Santiago), no. 105 (2020): 94–103. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-69962020000200094>.

GCCA (Global Cement and Concrete Association). Concrete Future – The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Documents-AW.pdf>. Viitattu 20.2.2022.

Giedion, Sigfried. *Space, Time and Architecture – the Growth of a new Tradition*, 5th ed. Massachusetts: Harvard University Press, 1967.

Gouding, W.H & W.D. Kingery. “The Beginnings of Pyrotechnology: Neolithic and Egyptian Lime Plaster.” *Journal of Field Archaeology* 2, no. 1–2 (1975): 133–150. <https://doi.org/10.1179/009346975791491277>.

Guo, Rui, Jiaoyue Wang, Longfei Bing, Dan Tong, Philippe Ciais, Steven J. Davis, Robbie M. Andrew, Fengming Xi and Zhu Liu. “Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019.” *Earth System Science Data* 13, no. 4 (2021): 1791–1805. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1791-2021>.

Hakanen, Pekka. “Sementti tuottaa paljon isommat ilmastopäästöt kuin lentäminen.” *Turun Sanomat*, ts.fi, julkaistu 30.12.2018. <https://www.ts.fi/uutiset/kotimaa/4430322/>. Viitattu 22.10.2021.

Hankonen, Johanna. “Asuinkerrostalojen kertakäyttöisyydestä 1960-luvun aatemaailmassa.” Julkaisussa *Ekologinen lähiöuudistus -seminaariraportti*. Helsinki: Suomen Arkkitehtiliitto – Finlands arkitektförbund, 1995. ISBN 951-95550-9-9.

Hankonen, Johanna. *Lähiöt ja tehokkuuden yhteiskunta – suunnittelujärjestelmän läpimurto suomalaisten asuntoalueiden rakentamisessa 1960-luvulla*. Otatieta, Gaudeamus ja Tampereen teknillisen korkeakoulu, Arkkitehtuurin osasto, 1994. ISBN 951-672-187-7.

Harper, Phineas. “Outrage: greenwashing risks giving dirt a filthy name.” *The Architectural Review*, julkaistu 11.2.2020. <https://www.architectural-review.com/essays/outrage/outrage-greenwashing-risks-giving-dirt-a-filthy-name>. Viitattu 7.3.2022.

Harrison, Arthur Michael. “Constitution and Specification of Portland Cement” in *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*, 4th edition, edited by Peter C. Hewlett & Martin Liska, 87–155. Butterworth-Heinemann, 1998. ISBN 0-7506-6256-5.

Hietamäki, Tuomas, Juha-Matti Kuoppala, Timo Kalema, Kirsi Taivalantti. *Rakennusten massiivisuus : keskeiset tutkimukset ja tulokset*. Tampereen teknillinen yliopisto. Energia- ja prosessitekniikka. Raportti 174. 2003.

Huuhka, Satu. “Demolished buildings: Empirical evidence on types, ages and construction materials.” In: *CESB16 – Central Europe towards Sustainable Building 2016*, Edited by Petr Hájek, Jan Tywoniak, Antonín Lupíšek, Kateřina Sojková, 1105–12. Prague: Czech Technical University, 2016. ISBN 978-80-271-0248-8.

Huuhka, Satu. *Kierrätys arkkitehtuurissa – Betonielementtien ja muiden rakennusosien uudelleenkäyttö uudisrakentamisessa ja lähiöiden energiatehokkaassa korjaus- ja täydennysrakentamisessa*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin koulutusohjelma. 2010. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:ty:201004161101>.

Huuhka, Satu & Jukka Lahdensivu. “Statistical and geographical study on demolished buildings.” *Building Research & Information* 44, no. 1 (2016): 73–96. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.980101>.

Huuhka, Satu, Terttu Vainio, Malin Moisio, Emmi Lampinen, Mikko Knuutinen, Samuel Bashmakov, Arto Köliö, Jukka Lahdensivu, Paula Ala-Kotila & Pertti Lahdenperä. *Purkaa vai korjata? – Hiilijalanjälkivaikutukset, elinkaarikustannukset ja ohjauskeinot*. Ympäristöministeriön julkaisuja 2021:9. Helsinki: Ympäristöministeriö, 2021. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-221-1>.

Hytönen, Yki & Matti Seppänen. *Tehdään elementeistä – Suomalaisen betonielementtirakentamisen historia*. SBK-säätiö ja Betonitieto, 2009. ISBN 978-952-92-5772-0. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/06/Tehdaan-Elementeista.pdf>.

Häkkinen, Tarja. *Generic data for paints*. Rakentamisen päästötietokannan taustaraportti. SYKE (Suomen ympäristökeskus), 2020. <https://co2data.fi/reports/Paint-paint-1.pdf>. Viitattu 8.3.2022.

Häkkinen, Tarja & Matti Kuittinen. *Kohti vähähiilistä rakentamista – Opas arviointiin ja suunnitteluun*. Helsinki: Rakennustieto, 2020. ISBN 978-952-267-344-2.

Häkkinen, Tarja, Raija Inkiläinen, Lauri Kivekäs, Olavi Korander, Pentti Lumme, Kurt Lundström, Teea Luotomäki & al. *Betonirakenteiden ympäristövaikutukset*. RTT ja Suomen Betonitieto, 1998. ISBN 952-5075-10-9.

Häkkinen, Tarja, Sirje Vares & Pekka Siltanen. *Tuotteiden käyttöikäinformaatio ja sen käyttö rakennushankkeissa*. VTT tiedotteita 2231. Espoo: VTT, 2004. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2231.pdf>

IEA (International Energy Agency). “Carbon capture in 2021: Off and running or another false start?” IEA, 2021. <https://www.iea.org/commentaries/carbon-capture-in-2021-off-and-running-or-another-false-start>. Viitattu 6.3.2022.

IEA (International Energy Agency). *Cement*. Tracking report. Paris: IEA, June 2020. <https://www.iea.org/reports/cement>. Viitattu 8.9.2021.

IEA (International Energy Agency). *Energy Technology Perspectives 2008*. Paris: IEA, 2008. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2008>.

IEA (International Energy Agency). "Energy Technology Perspectives 2020. Report extract. Technology needs for heavy industries." IEA, 2020. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020/technology-needs-for-heavy-industries>. Viitattu 2.3.2022.

IEA (International Energy Agency). *Energy Technology Perspectives 2020*. Revised version. Paris: IEA, 2021. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.

IEA (International Energy Agency). *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Paris: IEA, 2018. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.

Jokiniemi, Erkki & Nikolas Davies. *Kuvitettu rakennussanakirja*. Helsinki: Rakennustieto, 2012. ISBN 978-951-682-890-2.

Jätelaki 646/2011. Annettu Helsingissä 17.6.2011.

Kalema, Timo, Petri Pylsy, Per Hagengran, Gudni Jóhannesson, Miimu Airaksinen, Tor Helge Dokka, Mats Öberg, Mikko Pöysti, Kristian Rapp, Jarmo Keski-Opas. *Nordic Thermal Mass – Effect on Energy and Indoor Climate*. Tampere University of Technology. Institute of Energy and Process Engineering. 2006.

Kannisto, Otto, Paavo Kokkonen, Martti Korhonen, Elina Vuorio. "Myös yksiöiden rakennusbuumi hiipuu – mitä tilastot kertovat ilmiöstä?" *Tieto&trendit*, julkaistu 27.6.2019. <https://www.stat.fi:443/tietotrendit/artikkelit/2019/myos-yksioiden-rakennusbuumi-hiipuu-mita-tilastot-kertovat-ilmiosta/>. Viitattu 17.2.2022.

Kekkonen, Tommi. "CO₂ncrete Solution -hankkeesta lisätietoa hiilidioksidin sitoutumisesta betoniin – Betoni on hiili-nielu." *Betoni* 90, no. 4 (2020): 98–101. https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/12/BET2004_98-101.pdf.

Kiventerä, Jenni, Priyadarshini Perumal, Juho Yliniemi & Mirja Illikainen. "Mine tailings as a raw material in alkali activation: A review." *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 27, no. 8 (2020): 1009–1020. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2129-6>.

Koivu, Teuvo, Pentti Penttilä, Juhani Jaala (toim.). *PLS-80 – yleisen elementtijärjestelmän kehittämistutkimus*. Helsinki: Rakennustietosäätiö, 1972. ISBN 951-682-000-X.

Kwok, Alison G. & Walter Grondzik. *The Green Studio Handbook – Environmental Strategies for Schematic Design*. Third Edition. Routledge, 2018. ISBN 978-1-138-65229-3.

Lahdensivu, Jukka. *Durability Properties and Actual Deterioration of Finnish Concrete Facades and Balconies*. Tampere University of Technology. Publication 1028. 2012. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2823-1>.

Lahdensivu, Jukka, Satu Huuhka, Petri Annala, Jussa Pikkuvirta, Arto Koliö ja Toni Pakkala. *Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet*. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 162. 2015. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3461-4>.

Laine, Anna, Tuomas Raivio, Håkan Jonsson, Anna Heino, Markus Klimscheffskij ja Jenni Lehtimäki. *Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035. Osa 1. Rakennetun ympäristön hiilielinkaaren nykytila*. Gaia Consulting, 2020. https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vaha-hiili_seminaries/raportit_lopulliset/rt-raportti-1_rakennetun-ympariston-hiilielinkaaren-nykytila_final.pdf.

Laine, Anna, Satu Kilpinen, Magda Horváth, Heli Sihvonen, Pentti Linnamaa ja Tuomas Raivio. *Vähähiilisten rakennusmateriaalien hiilikädenjälki osana sääntelyä – haasteet ja mahdollisuudet*. Gaia Consulting, 2021. https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/kekri/vahahiilisten-rakennusmateriaalien-hiilikadenjalki-osana-saantelya_loppuraportti_clean.pdf.

Lappalainen, Elina. "Sementti on lentämistä suurempi ilmastopahis ja nyt sille on vaihtoehto." Helsingin Sanomat, HS.fi, julkaistu 18.3.2021. <https://www.hs.fi/visio/art-2000007866427.html>. Viitattu 22.10.2021.

Lehtonen, Katja. "Purkuhankkeen toteutus kiertotaloutta tukien." Teoksessa *Kiertotalous rakennetussa ympäristössä*, Toimittanut Eeva Huttunen, 124–33. Helsinki: Rakennustieto, 2021. ISBN 978-952-267-399-2.

Levelahti, Ulla. "Suuri askel sementtiteollisuudelle – ensimmäinen CO₂ talteenotto- ja varastointihanke etenee." *Betoni* 91, no. 1 (2021): 92–5. https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/03/BET2101_92-95.pdf.

Livesey, Paul. "The Rise, Fall and Revival of Natural Cements in the Developing Pattern of Binders." In *Yearbook 2013-14* (2013): 86–90. Blackwater, UK: The Institute of Concrete Technology. ISBN 978-1-904482-78-3.

Luukkonen, Tero, Zahra Abdollahnejad, Juho Yliniemi, Paavo Kinnunen & Mirja Illikainen. "One-part alkali-activated materials: A review." *Cement and Concrete Research* 103 (2018): 21–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>.

Maankäyttö ja rakennuslaki 132/1999. Annettu Helsingissä 5.2.1999.

Mattila, Vesa Ville. "Kolmossementti vie ympäristöloikkaan." *Betoni* 92, no. 1 (2022): 102. https://betoni.com/wp-content/uploads/2022/03/BET2201_101-105.pdf.

Mehta, P. Kumar & Paulo J. M. Monteiro. *Concrete – micro-structure, properties, and materials*. Fourth edition. McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0.

Mäkiö, Erkki, Maarit Malinen, Petri Neuvonen, Jyrki Sinkkilä, Anna-Maija Tuunanen, Jukka Saarenpää. *Kerrostalot 1940-1960*. 2. p. Helsinki: Rakennustieto, 2016. ISBN 978-952-267-117-2.

Mäkiö, Erkki, Maarit Malinen, Petri Neuvonen, Kari Vikström, Risto Mäenpää, Jukka Saarenpää, Esko Tähti. *Kerrostalot 1960-1975*. Helsinki: Rakennustieto, 1994. ISBN 951-682-279-2.

Mölsä, Seppo. "Pilari-laattarunko voisi vähentää betonirakennuksen ilmastopäästöjä – Kalasataman tornissa se myös nopeutti selvästi rakentamista." *Rakennuslehti*, julkaistu 22.4.2021. <https://www.rakennuslehti.fi/2021/04/pilari-laattarunko-voisi-vahentaa-betonirakennuksen-ilmasto-paastoja-kalasataman-tornissa-se-myo-nopeutti-selvasti-rakentamista>. Viitattu 10.2.2022.

Mölsä, Seppo. "Sementin ja teräksen ilmastopäästöt tulevat jo valmistusprosessista – teräs puhdistuu joskus 2030-luvulla vetypelkistykseksi." *Rakennuslehti*, julkaistu 22.4.2021. <https://www.rakennuslehti.fi/2021/04/sementin-ja-terak-sen-ilmastopaastot-tulevat-jo-valmistusprosessista-teras-puhdistuu-pian-vetypelkistyksella>. Viitattu 6.3.2022.

Neville, A. M. *Properties of Concrete*, 5th ed. Pearson, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.

Newman, John B. "The Evolution of Cement and Concrete." In *Yearbook 2012-13* (2012): 62–75. Blackwater, UK: The Institute of Concrete Technology. ISBN 978-1-904482-71-0.

Nilsson, Lars-Olof. *A new model for CO₂-absorption of concrete structures. CO₂-cycle in cement and concrete Part 7: Models for CO₂-absorption*. Lund University. Faculty of Engineering (LTH). Division of Building Materials. Report TVBM 3158. 2011. <https://portal.research.lu.se/en/publications/7booe44d-e4e7-4fc2-bdod-e508874488f9>.

Ouellet-Plamondon, Claudiane M. & Guillaume Habert, "Self-Compacted Clay based Concrete (sccc): proof-of-concept." *Journal of Cleaner Production* 117 (2016): 160–168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.048>.

Pedrazzini, Andrea. "Folded Plate Floor Slabs in Prestressed Concrete" in *Reinforced concrete structures – robust, resilient, resistant*, edited by Jakob Schoof, 28–33. München: Edition Detail, 2021. ISBN 978-3-95553-546-9.

Pelsmakers, Sofie. *The Environmental Design Pocketbook*. 2nd edition. London: RIBA Publishing, 2015. ISBN 978-1-85946-548-6.

Pelsmakers, Sofie, Sini Sarimaa & Mari Vaattovaara. "Avoiding Macro Mistakes: Micro-homes in Finland Today." *Nordic Journal of Architectural Research* 33, no. 3 (2021): 92–127. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202202161974>.

Peltola, Aarre, Antti Ihalainen, Elina Mäki-Simola, Tiina Sauvula-Seppälä, Jukka Torvelainen, Esa Uotila, Eeva Vaahtero ja Esa Ylitalo, toim. *Suomen metsätalot 2019*. Helsinki: Luonnonvarakeskus, 2019. https://stat.luke.fi/sites/default/files/suomen_metsatilastot_2019_verkko2.pdf.

Pulakka, Sakari, Kimmo Lylykangas, Juha Valjus, Erja Reinikainen, Pellervo Matilainen, Päivi Pulakka, Gunnar Åström. *Energiatohokas asuinrakennus – kohti lähes nollaenergiarakentamista*. RIL 249-2015. Helsinki: Suomen rakennusinsinööriliitto RIL, 2015. ISBN 978-951-758-602-3.

Punkki, Jouni. "Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu." *Betoni* 74, no. 4 (2004): 36–41. https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/11/BETO404_s36-41.pdf.

Punkki, Jouni. "Betonin sideaineet tulevaisuudessa". *Betoni* 91, no. 4 (2021): 74–83. https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/12/BET2104_74-83.pdf.

Punkki, Jouni, Tapio Aho, Vesa Anttila, Pasi Salmela, Risto Mannonen & Heikki Räisänen. *Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille* 2016. BY 68. Helsinki: BY-Koulutus, 2017. ISBN 978-952-68619-1-3.

Reichel, Alexander, Anette Hochberg, Christine Köpke. *Plaster, Render, Paint and Coatings – Details, Products, Case Studies*. Birkhäuser, Edition Detail, 2004. ISBN 3-7643-7110-2.

Risenfors, Kristian. "Guldhedenhusen snyggast – och fulast." Göteborg Direkt

RT 07-11195. *Rakennustarvikkeiden ainetiheyksiä ja tavarakuormia*. Helsinki: Rakennustieto, 2016.

RT 93-11231. *Muuntojousto asuntosuunnittelussa. Yleiset perusteet*. Helsinki: Rakennustieto, 2016.

RT 93-11232. *Muuntojousto asuntosuunnittelussa. Tila- ja pääsuunnittelu*. Helsinki: Rakennustieto, 2016.

Röck, Martin, Marcella Ruschi Mendes Saade, Maria Balouktsi, Freja Nygaard Rasmussen, Harpa Birgisdottir, Rolf Frischknecht, Guillaume Habert, Thomas Lützkendorf, Alexander Passer. "Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation." *Applied Energy* 258 (2020): 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>.

Salminen, Esa, Riikka Anttonen ja Liina Marttila. Betonituotteiden ympäristöselosteet. Betoniteollisuus ja Vahanan Environment, 2020. [https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-ymparisto/betonituotteiden-ymparistoselosteet/Viitattu 5.11.2021](https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-ymparisto/betonituotteiden-ymparistoselosteet/Viitattu%205.11.2021).

Scrivener, Karen, Fernando Martirena, Shashank Bishnoi, Soumen Maity. "Calcined clay limestone cements (LC3)." *Cement and Concrete Research* 114 (2018): 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>

Seppälä, Jyrki ja Markku Kanninen. "Metsien hakkuiden kasvattaminen ei ole ilmastoteko." *Talous & yhteiskunta* 47, no. 1 (2019): 20–27. <http://hdl.handle.net/10138/303843>.

Seppänen, Matti, Teuvo Koivu (toim.). *BES – Tutkimus avoimen elementtijärjestelmän kehittämiseksi*. Suomen betoniteollisuuden keskusjärjestö, 1970.

SFS-EN 15804:2012 + A2:2019. *Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS, 2020.

SFS-EN 197-1. *Sementti. Osa 1: tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS, 2012.

SFS-EN 206:2014 + A2:2021. *Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS, 2021.

SFS-EN ISO 10456 + AC. *Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS, 2011.

Siikanen, Unto. *Rakennusaineoppi*. 7. p. Helsinki: Rakennustieto, 2009. ISBN 978-951-682-942-8.

Skempton, A. W. "Portland Cements, 1843-1887." *Transactions of the Newcomen Society* 35, no. 1 (1962): 117–152. <https://doi.org/10.1179/tns.1962.008>.

Strippel, Håkan. *Greenhouse gas strategies for cement containing products. Part of the research project CO2 cycle in cement and concrete*. IVL Swedish Environmental Research Institute. Report B 2024. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ivl:diva-2530>.

Strippel, Håkan, Christer Ljungkrantz, Tomas Gustafsson & Ronny Andersson. *CO2 uptake in cement-containing products – Background and calculation models for implementation in national greenhouse gas emission inventories*. IVL Swedish Environmental Research Institute. Report B 2309. 2021

Suokko, Seppo. *Asuinkerrostalon taloudellinen käyttöaika*. Kansantaloustieteen lisensiaatintyö. Helsingin yliopisto. 1970.

Suomen Betoniyhdistys. *Betonirakenteiden säilyvyysohjeet ja käyttöikämitoitus* 1989. BY 32. Suomen Betonitieto, 1989. ISBN 951-9365-41-9.

Suomen Betoniyhdistys. *Betoninormit – RakMK B4 ja korkealujuuksisten betonien lisäohjeet* –1993. BY 15. 6. p. Suomen Betonitieto, 1993. ISBN 951-9365-63-X.

Suomen Betoniyhdistys. *Betoninormit* 2004. BY 50. Lisäp. Helsinki: Suomen Betonitieto, 2004. ISBN 952-5075-60-5.

Suomen Betoniyhdistys. *Betoninormit* 2016. BY 65. Helsinki: BY-Koulutus, 2016. ISBN 978-952-68068-4-6.

Suomen Betoniyhdistys. *Betonitekniikan oppikirja* 2018. BY 201. 8. p. Helsinki: BY-Koulutus, 2018. ISBN 978-952-68619-4-4.

Suomen Rakennusinsinöörin Liitto. *Betonielementtirakenteet*. RIL 115. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto, 1977. ISBN 951-758-009-6.

Suomen Rakennusinsinöörin Liitto. *Betoninormit* 1980. RIL 130-1980. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto, 1980. ISSN 0356-9403; 130.

Suomen Rakennusinsinöörin Liitto. *Rakenteiden ja rakennusten elinkaaren hallinta*. RIL 216-3013. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto, 2013. ISBN 978-951-758-556-9.

SYKE (Suomen ympäristökeskus). *Rakentamisen päästötietokanta*. <https://www.co2data.fi> Viitattu 28.7.2021.

Taipale, Taru. "Puhetta on paljon, mutta uusissa asunnoissa on vain vähän joustoa – Rakennusliikkeet eivät usko, että muuntojoustaville asunnoille on kysyntää." *Rakennuslehti*, julkaistu 3.11.2021. <https://www.rakennuslehti.fi/2021/11/uusissa-asunnoissa-on-vain-vahan-joustoa-rakennusliikkeet-eivat-usko-etta-muuntojoustaville-asunnoille-on-ky-syntaa/>. Viitattu 17.2.2022.

Tampereen yliopisto. "Käytetyt betonielementit kokonaisina osaksi uutta taloa – kansainvälinen suurhanke kehittämään ratkaisuja." *Tuni.fi*. Julkaistu 25.5.2021. <https://www.tuni.fi/fi/ajankohtaista/kaytetyt-betonielementit-kokonaisina-osaksi-uutta-taloa-kansainvalinen-suurhanke>. Viitattu 19.2.2022.

Tarpio, Jyrki. "Hierarkkiset joustavuustasot ja rakennusten kiertotalous" Teoksessa *Kiertotalous rakennetussa ympäristössä*, Toimittanut Eeva Huttunen, 62–71. Helsinki: Rakennustieto, 2021. ISBN 978-952-267-399-2.

Toivonen, Jukka. "Sementti on isompi ilmastopahis kuin lentokoneet, ja nyt se pitäisi korvata – mutta miten?" *Yle.fi*, julkaistu 6.11.2017. <https://yle.fi/uutiset/3-9901767>. Viitattu 22.10.2021.

Trout, Edwin A. R. "The History of Calcareous Cements" in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5th edition, edited by Peter C. Hewlett & Martin Liska, 1–29. Butterworth-Heinemann, 2019. ISBN 978-0-08-100773-0.

Ukkonen, Risto. "Oulun yliopistossa kehitetään sementtiä, joka sitoisi itseensä hiilidioksidia – nykyään sementin päästöt jopa suuremmat kuin lentoliikenteen." *Yle.fi*, julkaistu 21.2.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-11221338>. Viitattu 22.10.2021.

UN DESA (United Nations, Department of Economics and Social Affairs), Population Division. *World Population Prospects 2019*. Online Edition, Rev. 1. UN DESA, 2019. <https://population.un.org/wpp/>. Viitattu 22.10.2021.

UNDP (United Nations Development Programme). *Human Development Report 2020*. New York: UNDP, 2020. <http://hdr.undp.org/en/content/human-development-report-2020>.

USGS (United States Geological Survey), *Cement Statistics and Information*. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information>.

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 842/2017. Annettu Helsingissä 7.12.2017.

Valtion kiinteistölaitos ja Kestävä Kivitalo yritysryhmä. *Elin-kaariselvitys – rakennusrungon monikäyttöisyys ja muuntojousto*. 2000. ISBN 952-91-2527-5.

Van Damme, Henri & Hugo Houben. "Earth concrete. Stabilization revisited." *Cement and Concrete Research* 114 (2018): 90–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035>.

Vinha, Juha, Anssi Laukkarinen, Mikael Mäkitalo, Sakari Nurmi, Petteri Huttunen, Tomi Pakkanen, Paavo Kero & al. *Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa*. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 159. 2013. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2949-8>.

Vinha, Juha, Juhani Heljo, Kimmo Lähdesmäki, Matti Pentti, Jommi Suonketo, Gunnar Åström, toim. *Rakennusfysiikka 1 – Rakennusfysiikallinen suunnittelu ja tutkimukset*. RIL 255-1-2014. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL, 2014. ISBN 978-951-758-589-7.

Vitruvius (Marcus Vitruvius Pollio). *The Ten Books on Architecture*. Translated by Morris Hicky Morgan. New York: Dover Publications, 1960. ISBN 486-20645-9

Vuori, Mirva & Jouni Punkki. "BY-Vähähiilisyysluokitus käyttöön." *Betoni* 92, no. 1 (2022): 90–5. https://betoni.com/wp-content/uploads/2022/03/BET2201_90-95.pdf.

Wang, Jiaoyue, Longfei Bing, Dan Tong, Rui Guo, Fengming Xi. *Global CO₂ uptake of cement in 1930-2019*. Version 3 [Dataset]. *Zenodo*, 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4459729>.

Xi, Fengming, Steven J. Davis, Philippe Ciais, Douglas Crawford-Brown, Dabo Guan, Claus Pade, Tiemao Shi, et al. 2016. "Substantial Global Carbon Uptake by Cement Carbonation." *Nature Geoscience* 9 (12): 880–83. <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.

Yliniemi, Juho, Paivo Kinnunen, Pasi Karinranta & Mirja Illikainen. "Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor." *Materials* 9, no. 5 (2016): 312. <https://doi.org/10.3390/ma9050312>.

Ympäristöministeriö. "Rakennusalan odottama betonimurskeasetus lausuntokierrokselle." *Valtioneuvosto*, julkaistu 20.11.2020. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/rakennusalan-odottama-betonimurskeasetus-lausuntokierrokselle>. Viitattu 19.2.2022.

Zhu, Ying, Harriet Lonka, Katja Tähtinen, Markku Anttonen, Päivi Isokääntä, Anssi Knuutila, Jukka Lahdensivu & al. *Purkumateriaalien kelpoisuus eri käyttökohteisiin turvallisuuden ja terveellisuuden näkökulmasta*. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:15. Helsinki: Valtioneuvoston kanslia, 2022. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-253-4>.

Kuvat

1. *Querschnitt des Pantheons in Rom*. Teoksessa Wilhelm Lübke & Max Semrau, *Grundriß der Kunstgeschichte*, 14. Painos. Esslingen: Paul Neff Verlag, 1908. Via Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pantheon_drawing.jpg. Lisenssi: cco.

2. *The Eddystone Light-house*. Teoksessa George Henry Elliot, *European Light-House Systems; being a report of a tour of inspection made in 1873*, 179. Lontoo: Lockwood, 1875. Via Wikimedia Commons. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ELLIOT\(1875\)_p179_-_Plate_XVIII.The_Eddystone_Light-house.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ELLIOT(1875)_p179_-_Plate_XVIII.The_Eddystone_Light-house.jpg). Lisenssi: cco.

3. "victortsu". Nimetön. Valokuva. Flickr. 26. Toukokuuta 2014. <https://flic.kr/p/q6xutg>. Lisenssi: CC BY-NC 2.0.

4. Niko Kotkavuo. *Rue Franklin 25, peruserroksen pohjapiirustus 1:250*. 2021. Piirustus.

5. J.-B. Vialles. Nimetön. 2001. Valokuva. Région Île-de-France - Inventaire général. <https://journals.openedition.org/insitu/docannexe/image/4718/img-3.jpg>. Lisenssi: CC BY-NC-ND 4.0.

6. Tuntematon kuvaaja. *Ingall's Building, Cincinnati, Ohio*. 1900-1906. Valokuva. Library of Congress Prints and Photographs Division. <http://hdl.loc.gov/loc.pnp/det.4a13290>. Lisenssi: CCO.
7. *Los Angeles Herald*, 15. Marraskuuta 1908. Mikrofilmi. Chronicling America. <https://chroniclingamerica.loc.gov/lccn/sn85042462/1908-11-15/ed-1/seq-83/>. Lisenssi: CCO.
8. Philip Turner. *LOOKING EAST - Unity Temple*. 1967. Valokuva. Library of Congress Prints and Photographs Division. <http://hdl.loc.gov/loc.pnp/det.4a13290>. Lisenssi: CCO.
9. Carol M. Highsmith. *Phillips Exeter Library, Exeter, New Hampshire*. Valokuva. Library of Congress Prints and Photographs Division. <http://hdl.loc.gov/loc.pnp/highsm.15570>. Lisenssi: CCO.
10. Niko Kotkavuo. *Notre Dame du Haut*. 2016. Valokuva.
11. "Acroterion". Nimetön. Valokuva. Wikimedia Commons. 12. Tammikuuta 2015. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TWA_Flight_Center_2015_NY4.jpg. Lisenssi: CC BY-SA 3.0.
12. Diego Escolano. Nimetön. Valokuva. Alicante Vivo. 20. Tammikuuta 2014. <http://www.alicantevivo.org/2014/01/bo-fill-en-calpe-visto-por-dos-neofitos.html>. Lisenssi: CC BY-NC-SA 3.0. Perspektiivikorjattu ja rajattu uudelleen.
13. Niko Kotkavuo. *Valon kirkko, näkymä alttarille*. 2017. Valokuva.
14. Niko Kotkavuo. *Betonin kiinteitä osa-aineita*. Valokuva.
15. "Urphoto". Nimetön. Valokuva. Wikimedia Commons. 21. Syyskuuta 2021. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pisei.jpg>. Lisenssi: CC BY-SA 4.0. Perspektiivikorjattu ja rajattu uudelleen.
16. Niko Kotkavuo. *BES-järjestelmän kantavat seinät -runko*. 2022. Piirustus.
17. Niko Kotkavuo. *Runko-BES-järjestelmän pilari-palkki-runko*. 2022. Piirustus.
18. Niko Kotkavuo. *PLS-80-järjestelmän pilari-laatta-runko*. 2022. Piirustus.
19. Niko Kotkavuo. *Esimerkki PLS-80-järjestelmästä: kimppupilari ja "kuiva" pulttiliitos*. 2022. Piirustus.
20. Niko Kotkavuo. *Wohnregal -talon runkoperiaate*. 2022. Piirustus.
21. David von Becker. Nimetön. Valokuva. Käytetty tekijänoikeudenhaltijan luvalla. Rajattu uudelleen.
22. David von Becker. Nimetön. Valokuva. Käytetty tekijänoikeudenhaltijan luvalla. Rajattu uudelleen.
23. Niko Kotkavuo. *Paikallavalettu runko kevennetyllä taite-laatalla*. 2022. Piirustus.
24. Roger Frei. Nimetön. Valokuva. Käytetty tekijänoikeudenhaltijan luvalla. Rajattu uudelleen.
25. Ulf Celander. Nimetön. Valokuva. Käytetty tekijänoikeudenhaltijan luvalla. Rajattu uudelleen.
26. Tuntematon kuvaaja. *Experimental solar house, Odeillo, France, 1962-1963. South façade with Trombe wall*. Valokuva. Félix Tromben arkisto, Michèle Lhermitten yksityinen kokoelma, Pariisi. Julkaistu artikkelissa Paul Bouet, "A Silent Graph. Tracing the Algerian Past of French Solar Experiments", *ABE Journal*, no. 18 (2021). <https://doi.org/10.4000/abe.8913>. Lisenssi: CC BY-NC-ND 4.0.
27. Niko Kotkavuo. *Aurinkoenergian kannalta edullinen kerrostalolamelli, Männikkötie 5, Helsinki, Kaj Englund, 1953. 1:250*. 2022. Piirustus.

Liite 1. Sementtikemian lyhenteitä, kaavoja ja reaktioita

Alla on listattuna joitakin oleellisia sementtikemian kaavoja ja reaktioita. Listauksen ole tarkoitus olla kattava, vaan auttaa havainnollistamaan esimerkein mitä sementissä ja betonissa kemiallisesti tapahtuu sen eri vaiheissa. Siitä oli apua ainakin tätä työtä tehdessä.

Sementtikemian yhdisteitä, lyhenteitä ja auki kirjoitettuja kemiallisia kaavoja:

Sementtikemian perusyhdisteet ja niiden lyhenteet	lyhenne	kemiallinen kaava
kalsiumoksidi, kalkki (poltettu-, sammuttamaton kalkki)	C	CaO
piioksidi, silika (mineraalimuodossa kvartsi)	S	SiO ₂
alumiinioksidi	A	Al ₂ O ₃
rautaoksidi, ferrioksidi (mineraalimuodossa hematiitti)	F	Fe ₂ O ₃
vesi	H	H ₂ O
hiilidioksidi	C̄	CO ₂
sulfaatti (rikkitrioksidi)	S̄	SO ₃
Kalkin olomuodot		
kalsiumkarbonaatti, kalsiitti, kalkkikivi	C̄C̄	CaCO ₃
kalsiumoksidi, kalkki (poltettu-, sammuttamaton kalkki)	C	CaO
kalsiumhydroksidi, sammutettu kalkki, portlandiitti	CH	Ca(OH) ₂
Portlandsementin pääosayhdisteet		
aliitti, trikalsiumsilikaatti	C ₃ S	3CaO·SiO ₂
beliitti, dikalsiumsilikaatti	C ₂ S	2CaO·SiO ₂
aluminaatti, trikalsiumaluminaatti	C ₃ A	3CaO·Al ₂ O ₃
ferriitti, tetrakalsiumaluminaattiferriitti	C ₄ AF	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃
kipsi, kalsiumsulfaattihydraatti	C̄SH ₂	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Portlandsementin hydrataatiotuotteet		
kalsiumhydroksidi, sammutettu kalkki	CH	Ca(OH) ₂
C-S-H, kalsiumsilikaattihydraatti	(esim.) C ₃ S ₂ H ₃	(3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O)
ettringiitti	C ₆ ĀS ₃ H ₃₂	(3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O)
AFm, aluminaattiferriittimonosulfaatti	(esim.) C ₄ ĀSH ₁₂	(4CaO·Al ₂ O ₃ ·SO ₃ ·12H ₂ O)

Sementintuotannossa tapahtuvia reaktioita

kalkkikivi				kalkki		hiilidioksidi
CaCO ₃		→	CaO	+		CO ₂
kalkki	piioksidi		beliitti			
2CaO	+ SiO ₂	→	C ₂ S			
kalkki	beliitti		aliitti			
CaO	+ C ₂ S	→	C ₃ S			
kalkki	alumiinioksidi		aluminaatti			
3CaO	+ Al ₂ O ₃	→	C ₃ A			
kalkki	alumiinioksidi	rautaoksidi	ferriitti			
4CaO	+ Al ₂ O ₃	+ Fe ₂ O ₃	→ C ₄ AF			

Sementin tärkeimpiä kovettumisreaktioita

kalkki CaO	vesi $+ \text{H}_2\text{O}$		$\rightarrow$	kalsiumhydroksidi Ca(OH)_2	
beliitti $2 \text{C}_2\text{S}$	vesi $+ 4 \text{H}$		$\rightarrow$	C-S-H $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$	kalsiumhydroksidi $+ \text{CH}$
aliitti $2 \text{C}_3\text{S}$	vesi $+ 6 \text{H}$		$\rightarrow$	C-S-H $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$	kalsiumhydroksidi $+ 3 \text{CH}$
aluminaatti C_3A	kipsi $+ 3 \text{CSH}_2$	vesi $+ 26 \text{H}$	$\rightarrow$	ettringiitti $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$	
aluminaatti $2 \text{C}_3\text{A}$	ettringiitti $+ \text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$	vesi $+ 4 \text{H}$	$\rightarrow$	AFm $3 \text{C}_4\text{AS}_3\text{H}_{12}$	
$2 \text{C}_3\text{A}$	$+ \text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$	$+ 22 \text{H}$	$\rightarrow$	$3 \text{C}_4\text{AS}_3\text{H}_{18}$	
ferriitti C_4AF	kipsi $+ 3 \text{CSH}_2$	vesi $+ 3 \text{H}$	$\rightarrow$	AFm $6 (\text{A}, \text{F})\text{S}_3 + (\text{A}, \text{F})\text{H}_3$	kalsiumhydroksidi $+ \text{CH}$
ferriitti C_4AF	kalsiumhydroksidi $+ 2 \text{CH}$	vesi $+ 10 \text{H}$	$\rightarrow$	$\text{C}_6\text{AFH}_{12}$	

Tärkeimpiä karbonatisoitumisreaktioita

kalsiumhydroksidi Ca(OH)_2	hiilidioksidi $+ \text{CO}_2$		$\rightarrow$	kalkkikivi CaCO_3	vesi $+ \text{H}_2\text{O}$	yksinkertaistettu
hiilidioksidi CO_2	vesi $+ \text{H}_2\text{O}$		$\rightarrow$	hiilihappo H_2CO_3		} ylläoleva tarkemmin
kalsiumhydroksidi Ca(OH)_2	hiilihappo $+ \text{H}_2\text{CO}_3$		$\rightarrow$	kalkkikivi CaCO_3	vesi $+ 2 \text{H}_2\text{O}$	
C-S-H $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$	hiilidioksidi $+ 3 \text{CO}_2$		$\rightarrow$	kalkkikivi 3CaCO_3	piioksidi $+ 2 \text{SiO}_2$	vesi $+ 3 \text{H}_2\text{O}$
beliitti C_2S	hiilidioksidi $+ 2 \text{CO}_2$	vesi $+ n \text{H}_2\text{O}$	$\rightarrow$	kalkkikivi 2CaCO_3	hydratoitunut silika $+ (\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$	
aliitti C_3S	hiilidioksidi $+ 3 \text{CO}_2$	vesi $+ n \text{H}_2\text{O}$	$\rightarrow$	kalkkikivi 3CaCO_3	hydratoitunut silika $+ (\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$	

Pozzolaaninen reaktio (esimerkkinä puhdas silika)

kalsiumhydroksidi 3CH	piioksidi $+ 2 \text{S}$	vesi $+ \text{H}$	$\rightarrow$	C-S-H $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$	vesi $+ \text{H}$
3Ca(OH)_2	$+ 2 \text{SiO}_2$	$+ \text{H}_2\text{O}$	$\rightarrow$	$(3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$	$+ \text{H}_2\text{O}$

Liite 2. Kaavioissa käytetyt aluejaot

Maat HDI-ryhmän mukaan (Human Development Index, eli inhimillisen kehityksen indeksi).

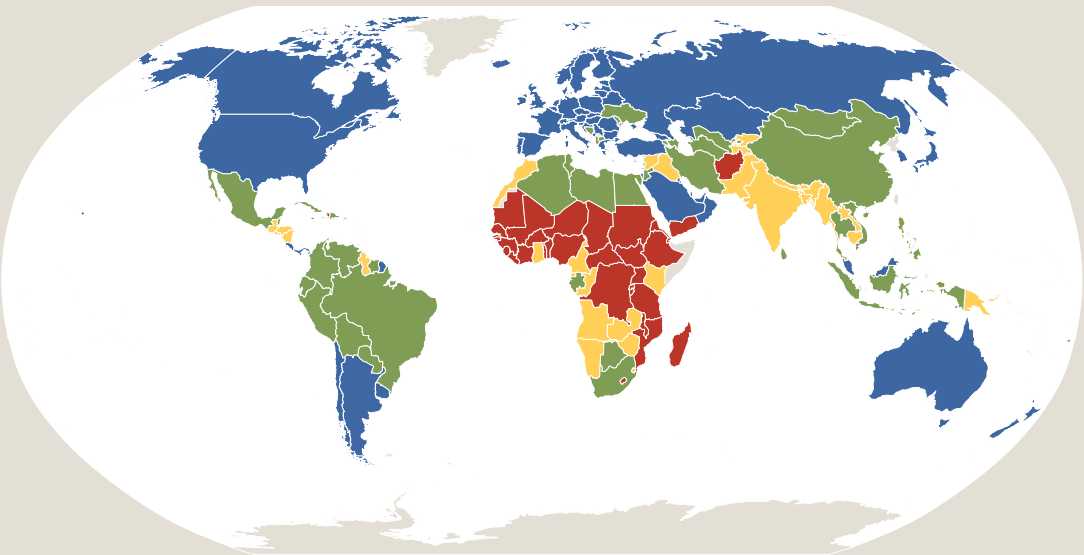
Erittäin korkea HDI: Alankomaat, Andorra, Argentiina, Australia, Bahama, Bahrain, Barbados, Belgia, Brunei, Bulgaria, Chile, Costa Rica, Espanja, Etelä-Korea, Georgia, Hongkong, Irlanti, Islanti, Israel, Italia, Itävalta, Japani, Kanada, Kazakstan, Kreikka, Kroatia, Kuwait, Kypros, Latvia, Liechtenstein, Liettua, Luxemburg, Malesia, Malta, Mauritius, Montenegro, Norja, Oman, Palau, Panama, Portugali, Puola, Qatar, Ranska, Romania, Ruotsi, Saksa, Saudi-Arabia, Serbia, Singapore, Slovakia, Slovenia, Suomi, Sveitsi, Tanska, Tšekki, Turkki, Unkari, Uruguay, Uusi-Seelanti, Valko-Venäjä, Venäjä, Viro, Yhdistyneet arabiemiirikunnat, Yhdistynyt kuningaskunta, Yhdysvallat

Korkea HDI: Albania, Algeria, Antigua ja Barbuda, Armenia, Azerbaidžan, Belize, Bolivia, Bosnia ja Hertsegovina, Botswana, Brasilia, Dominica, Dominikaaninen tasavalta, Ecuador, Egypti, Etelä-Afrikka, Fidži, Filippiinit, Gabon, Grenada, Indonesia, Iran, Jamaika, Jordania, Kiina, Kolumbia, Kuuba, Libanon, Libya, Malediivit, Marshallinsaaret, Meksiko, Moldova, Mongolia, Palestiina, Paraguay, Peru, Pohjois-Makedonia, Saint Kitts ja Nevis, Saint Lucia, Saint Vincent ja Grenadiinit, Samoa, Seychellit, Sri Lanka, Suriname, Thaimaa, Tonga, Trinidad ja Tobago, Tunisia, Turkmenistan, Ukraina, Uzbekistan, Venezuela, Vietnam

Keskikorkea HDI: Angola, Bangladesh, Bhutan, El Salvador, Ghana, Guatemala, Guyana, Honduras, Intia, Irak, Itä-Timor, Kambodža, Kamerun, Kap Verde, Kenia, Kirgisia, Kiribati, Komorit, Kongon tasavalta, Laos, Marokko, Mikronesia, Myanmar, Namibia, Nepal, Nicaragua, Päiväntasaajan Guinea, Pakistan, Papua-Uusi-Guinea, Salomonsaaret, Sambia, São Tomé ja Príncipe, Swazimaa, Syyria, Tadžikistan, Vanuatu, Zimbabwe

Matala HDI: Afganistan, Benin, Burkina Faso, Burundi, Djibouti, Eritrea, Etelä-Sudan, Etiopia, Gambia, Guinea, Guinea-Bissau, Haiti, Jemen, Keski-Afrikan tasavalta, Kongon demokraattinen tasavalta, Lesotho, Liberia, Madagaskar, Malawi, Mali, Mauritania, Mosambik, Niger, Nigeria, Norsunluurannikko, Ruanda, Senegal, Sierra Leone, Sudan, Tansania, Togo, Tsad, Uganda

■ Matala (<0,550) ■ Keskikorkea (0,550-0,699) ■ Korkea (0,700-0,799) ■ Erittäin korkea HDI (≥0,800)



Kuvioissa 4 ja 8 käytetty IEA:n tiekartan mukainen aluejako

Afrikka: Algeria, Angola, Benin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Djibouti, Egypti, Eritrea, Etelä-Afrikka, Etelä-Sudan, Etiopia, Gabon, Gambia, Ghana, Guinea, Guinea-Bissau, Kamerun, Kap Verde, Kenia, Keski-Afrikan tasavalta, Komorit, Kongon demokraattinen tasavalta, Kongon tasavalta, Lesotho, Liberia, Libya, Madagaskar, Malawi, Mali, Marokko, Mauritania, Mauritius, Mosambik, Namibia, Niger, Nigeria, Norsunluurannikko, Päiväntasaajan Guinea, Ruanda, Sambia, São Tomé ja Príncipe, Senegal, Seychellit, Sierra Leone, Somalia, Sudan, Swazimaa, Tansania, Togo, Tšad, Tunisia, Uganda

Amerikka: Antigua ja Barbuda, Argentiina, Aruba, Bahama, Barbados, Belize, Bermuda, Bolivia, Brasilia, Brittiläiset Neitsytsaaret, Chile, Costa Rica, Curaçao, Dominica, Dominikaaninen tasavalta, Ecuador, El Salvador, Grenada, Guatemala, Guyana, Haiti, Honduras, Jamaika, Kanada, Kolumbia, Kuuba, Meksiko, Montserrat, Nicaragua, Panama, Paraguay, Peru, Saint Kitts ja Nevis, Saint Lucia, Saint Vincent ja Grenadiinit, Saint-Pierre ja Miquelon, Sint Maarten, Suriname, Trinidad ja Tobago, Turks- ja Caicossaaret, Uruguay, Venezuela, Yhdysvallat

Euraasia: Armenia, Azerbaidžan, Georgia, Kazakstan, Kirgisia, Tadžikistan, Turkmenistan, Uzbekistan, Venäjä

Eurooppa: Alankomaat, Albania, Belgia, Bosnia ja Hertsegovina, Bulgaria, Espanja, Irlanti, Islanti, Israel, Italia, Itävalta, Kosovo, Kreikka, Kroatia, Kypros, Latvia, Liettua, Luxemburg, Malta, Moldova, Montenegro, Norja, Pohjois-Makedonia, Portugal, Puola, Ranska, Romania, Ruotsi, Saksa, Serbia, Slovakia, Slovenia, Suomi, Sveitsi, Tanska, Tšekki, Turkki, Ukraina, Unkari, Valko-Venäjä, Viro, Yhdistynyt kuningaskunta

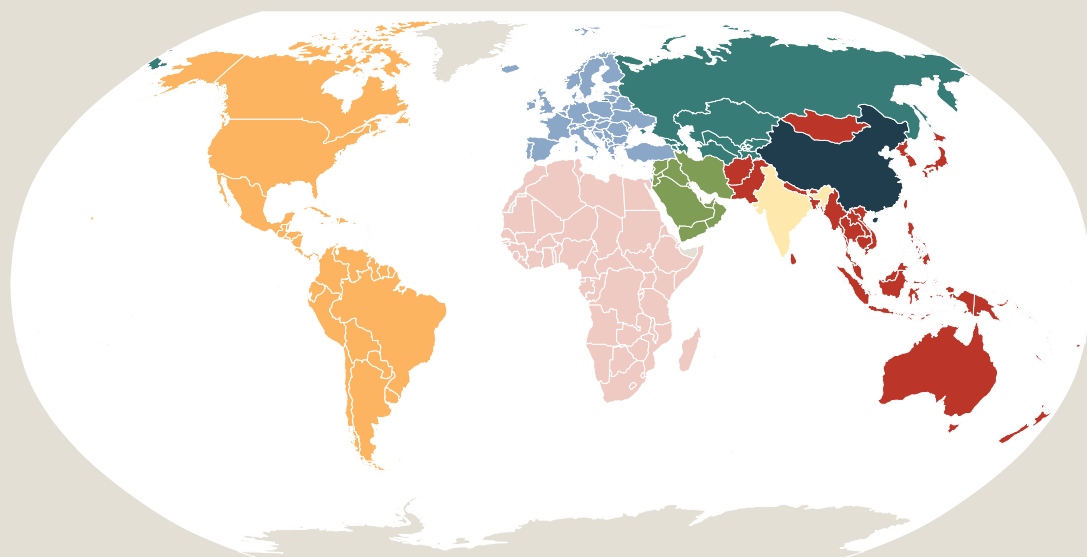
Intia: Intia

Kiina: Kiina

Lähi-itä: Bahrain, Irak, Iran, Jemen, Jordania, Kuwait, Libanon, Oman, Qatar, Saudi-Arabia, Syyria, Yhdistyneet arabiemiirikunnat

Muu Aasia ja Tyynenmeren alue: Afganistan, Australia, Bangladesh, Bhutan, Brunei, Cookinsaaret, Etelä-Korea, Fidži, Filippiinit, Hongkong, Indonesia, Itä-Timor, Japani, Kambodža, Kiribati, Laos, Macao, Malediivit, Malesia, Mongolia, Myanmar, Nepal, Pakistan, Papua-Uusi-Guinea, Pohjois-Korea, Ranskan Polynesia, Salomonsaaret, Samoa, Singapore, Sri Lanka, Taiwan, Thaimaa, Tonga, Uusi-Kaledonia, Uusi-Seelanti, Vanuatu, Vietnam

Afrikka Amerikka Euraasia Eurooppa Intia Kiina Lähi-Itä Muu Aasia ja Tyynenmeren alue



Liite 3. Betonituotteiden hiilijalanjälkiä

	Tiheys kg/m ³	Massaan perustuva GWP kgCO ₂ e/kg	Tilavuuteen perustuva GWP kgCO ₂ e/m ³
Sementit			
<i>Oiva-sementti, Lappeenranta</i>	3100 ^a	0,568 ^b	1760,8
<i>Oiva-sementti, Parainen</i>	3100 ^a	0,626 ^b	1940,6
<i>Pikasementti, Lappeenranta</i>	3100 ^a	0,704 ^b	2182,4
<i>Pikasementti, Parainen</i>	3100 ^a	0,776 ^b	2405,6
<i>Rapidsementti, Lappeenranta</i>	3100 ^a	0,660 ^b	2046
<i>Rapidsementti, Parainen</i>	3100 ^a	0,745 ^b	2309,5
<i>SR-sementti, Lappeenranta</i>	3100 ^a	0,711 ^b	2204,1
Valmisbetonit			
<i>Normaali rakennebetoni, C30/37</i>	2363	0,113	268,0
<i>Säänkestävä rakennebetoni, C30/37, XF1</i>	2297	0,126	290,0
<i>Normaali rakennebetoni, C25/30</i>	2353	0,103	243,0
<i>Vähähiilinen rakennebetoni, C25/30</i>	2366	0,074	176,0
Ontelolaatat			
200 mm	1235	0,152	188,2
265 mm	1321	0,152	201,0
320 mm	1194	0,152	180,9
370 mm	1300	0,152	197,2
400 mm	1115	0,152	169,4
500 mm	1158	0,152	176,0
Palkkielementit			
480x380 mm	2374	0,178	422,4
580x380 mm	2545	0,178	453,9
680x380 mm	2508	0,177	445,0
580x480 mm	2543	0,177	450,3
780x480 mm	2591	0,178	460,7
Pilarelementit			
280x280 mm	2474	0,186	460,8
380x380 mm	2486	0,186	463,3
480x480 mm	2483	0,186	461,7
580x580 mm	2426	0,186	451,4
Sandwich-elementit			
<i>Sisäkuori 150 mm, eriste 220 mm, ulkokuori 80 mm</i>	1231	0,208	255,6
<i>Sisäkuori 80 mm, eriste 220 mm, ulkokuori 80 mm</i>	1042	0,228	237,9
Sisäkuorielementit			
<i>Sisäkuori 150 mm, eriste 140 mm</i>	1272	0,179	227,6
<i>Sisäkuori 180 mm, eriste 140 mm</i>	1394	0,169	235,9
<i>Sisäkuori 200 mm, eriste 140 mm</i>	1471	0,164	241,5
Väliseinäelementit			
150 mm	2313	0,150	346,7
200 mm	2465	0,151	371,5
250 mm	2444	0,151	368,5
Massiivilaattaelementit			
220 mm	2423	0,159	386,4
260 mm	2415	0,159	384,6
280 mm	2407	0,159	382,1
Betoniharkot			
<i>Betonimuottiharkko 200 mm</i>	863	0,159	137,0
<i>Betonieristeharkko, U-arvo 0,17 W/m²K</i>	552	0,286	158,0
Kevytsojarahkot			
<i>Kevytsoaraharkko 200 mm</i>	644	0,273	176,0
<i>Kevytsoaraeristeharkko, U-arvo 0,17 W/m²K</i>	537	0,391	210,0

Lähteet: ensisijaisesti Salminen & al., Betonituotteiden ympäristöselosteet, ^{a)} RT 07-11195; ^{b)} Finnsementti, *Sementtien ympäristöselosteet*.

Huomioit: Tuotteet joille on tehty täysi elinkaarilaskenta on merkitty *kursiivilla*, muiden rivienv arvot ovat muuntokertoimien perustuvia johdannaisia.

Kaikki arvot on muunnettu massa ja tilavuusperusteisiin yksiköihin vertailukelpoisuuden vuoksi ja perustuvat elinkaaren tuotevaiheeseen (A1-A3). Sementtien tiheytenä käytetty kiintotiheyttä. Betonituotteiden tiheys laskettu kokonaistilavuuden mukaan, sisällyttäen esimerkiksi ontelolaattojen ontelot.

