



Niko Kotkavuo, arkkitehti
niko.kotkavuo@gmail.com

Tämä artikkeli perustuu Oulun yliopiston Arkkitehtuurin koulutusohjelmassa tehtyyn diplomityöhön "Betonioptimismi: Betonin kestävydestä ja arkkitehdin vaikutusmahdollisuuksista ilmastomuutoksen aikakaudella". Diplomityön on tehnyt Niko Kotkavuo ja sen pääohjaajana toimi professori Janne Pihlajaniemi.

Artikkeliin on poimittu työstä tiivistetysti käsiteltäväksi valikoituja, kirjoittajan näkemyksen mukaan julkisen keskustelun kannalta keskeisimpiä osia betonin ilmastonäkökulmiin liittyen. Diplomityö on kokonaisuudessaan ladattavissa osoitteessa <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202204081520>.

Keskustelussa kestävästä rakentamisesta betoni mielletään usein ongelmana ja asenteet sitä kohtaan ovat yleisesti ottaen kielteisiä – näin tuntuisi olevan ainakin arkkitehtikunnan keskuudessa ja laajemmin rakennusalan ulkopuolella. Keskustelussa nousee usein pinnalle vastakkainasettelu vähähiilisenä pidetyn puurakentamisen kanssa, ja betoni on viime vuosina selvästi jäänyt vähintäänkin imagonsa puolesta tappiolle. Betonin hiilijalanjälki on sen valtavan kulutuksen vuoksi maailmanlaajuisesti korkea, mutta ennen jyrkien johtopäätösten muodostamista on hyvä kuitenkin ymmärtää, että erittäin merkittävä osa betonin ja sementin maailmanlaajuisista päästöistä liittyy juuri kehittyvien valtioiden hyvin ymmärrettäviin kehityspyrkimyksiin. Iso kysymys onkin, kuinka kehittyviä maita voidaan auttaa ohittamaan se hiili-intensiivinen kehityskulku, jonka kehittyneimmät maat ovat käyneet ja jota tällä hetkellä vauhdikkaimmin kehittyvät maat ovat käymässä läpi. Betonin liiallinen demonisointi madaltaa kiinnostusta materiaalia ja siihen liittyvää tutkimusta kohtaan ja voi jopa vaikuttaa negatiivisesti sen hiilijalanjalan vähentämisessä.

Puurakentaminen mielletään nykyään keskeisimmäksi keinoksi rakentamisen vähähiilistämiseen, erityisesti juuri korkeapäästöisenä pidetyn betonin korvaajana. Kun vertaa betonin ja sementtiperäisten tuotteiden valtavaa kulutusta, 14 miljardia kuutiometriä vuo-

dessä^[1], YK:n elintarvike- ja maatalousjärjestö FAO:n tilastoihin maailmanlaajuisista metsien hakkuista, 4 miljardia kuutiota vuodessa^[2], on kuitenkin selvää, että puu betonin korvaajana on parhaimmillaankin vain yksi monista tarvittavista keinoista tavoiteltaessa vähähiilistä rakentamista. Lisää keskustelua tarvittaisiin betonin korvaamisen lisäksi myös siitä, kuinka betonirakentamista itsessään voisi toteuttaa vähähiilisemmin.

Betoni-lehdessäkin on julkaistu useita artikkeleita, jotka osoittavat kuinka paljon työtä betonin vähähiilistämiseksi jo tehdään. Markkinoille on tuotu viime vuosina vähähiilisempiä betoneita ja sementtejä perustuen sementin korvaamiseen seosaineilla, kuten masuunikuonalla. Oulun yliopistossa tutkitaan portlandsementille vaihtoehtoisia sideaineita, kuten geopolymeerejä. Hiilidioksidin talteenottoon liittyvät teknologiat vaikuttaisivat viimein olevan tulossa laajemmin markkinoille. IPCC on tunnustanut betonin globaalisti merkittäväksi hiilinieluksi, ja hiilinieluefektin edistämistä tutkitaan aktiivisesti. Lakimuutos betonin jäteluokituksen päättymisen kriteereistä, joka mahdollistaisi betonimurskeen käytön nykyistä laajemmin, on työn alla. Alalla siis tapahtuu paljon. Betonin vähähiilistämisyhtymyksissä rakennussuunnitteluun liittyvät keinot ovat kuitenkin jääneet verrattain vähälle huomiolle.

Hiilijalanjälki isossa kuvassa

Tyypillisen suomalaisen valmisbetonin (C30/37) päästöistä yli 80 % liittyy sementin tuotantoon^[3] ja sementin tuotannon hiilipäästöjen arvioidaan olevan maailmanlaajuisesti noin 7 %^[4]. Päästöistä suurin osa syntyy kalsinoinnissa, eli kuumennettaessa kalkkikiveä noin 900 °C lämpötilaan, jolloin kalkkikivi hajoaa hiilidioksidiksi ja kalsiumoksidiksi, joka on portlandsementin pääraaka-aine. Näin syntyvien prosessipäästöjen vähentäminen on erittäin vaikeaa, sillä kemiallinen reaktio, jossa hiilidioksidi vapautuu, on tuotannolle välttämätön. Käytännössä ainoa keino vähentää prosessipäästöjä on tuotannon yhteydessä syntyvän hiilidioksidin talteenotto. Sementin ja siihen liittyvien hiilidioksidipäästöjen kierto vuonna 2014 on esitetty tarkemmin eriteltynä kuvassa 2.

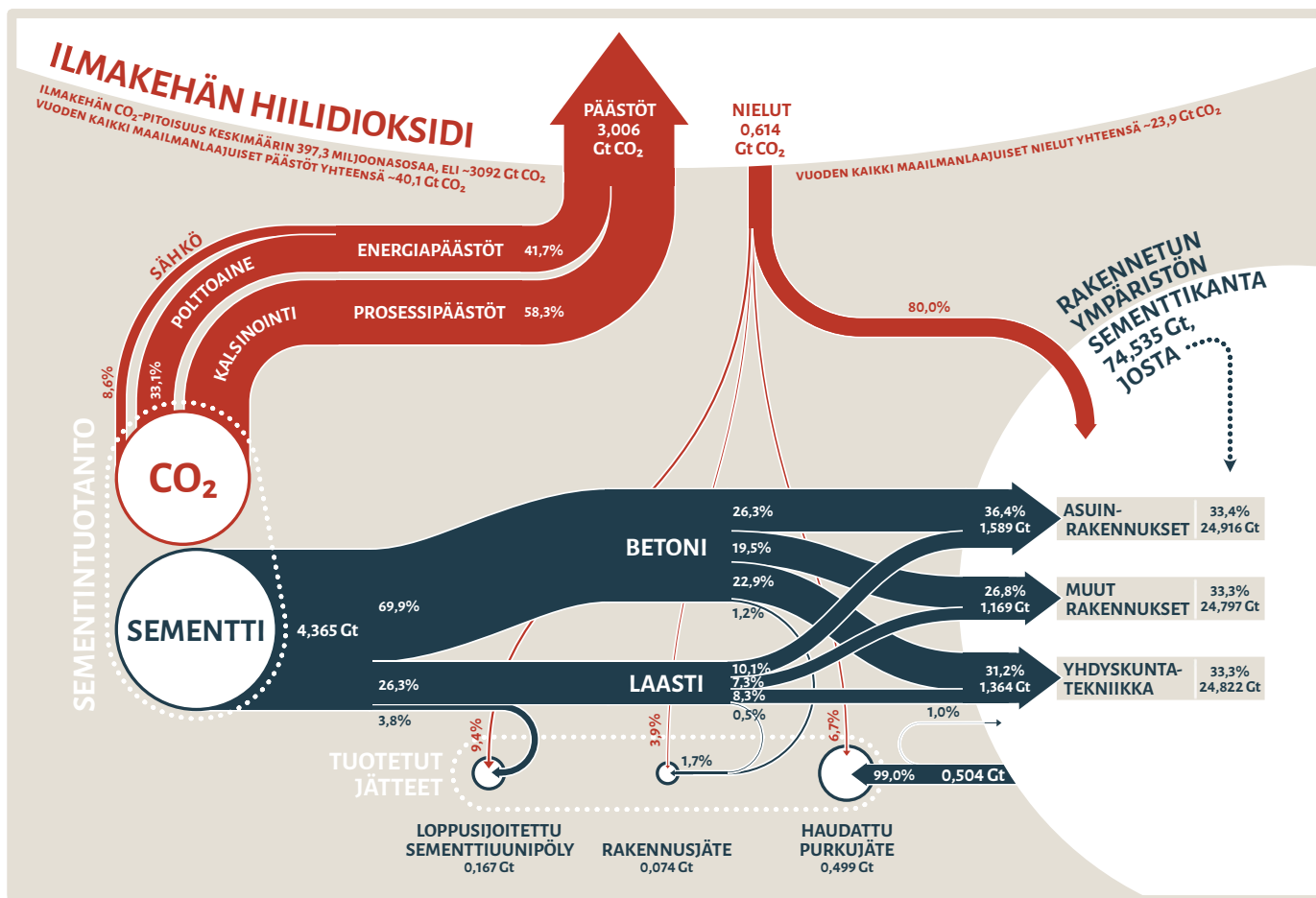
Puhuttaessa betonin kestävydestä huomio kohdistuu yleensä juuri sementin globaalilla tasolla korkeaan hiilijalanjalanjälkeen. On kuitenkin

1 Japanin Tohokun Yliopiston arkkitehtuurikoulun pääarakennus. – Täällä idea diplomityöhöni syntyi, kertoo Niko Kotkavuo.



Sementin ja siihen liittyvän hiilidioksidin maailmanlaajuinen kierto vuonna 2014.

Kaavio pohjautuu Caon ja kollegoiden mallinnukseen^[5]. Piirretty uudelleen.



kin oleellista tarkastella myös mihin betonia käytetään. Betoni poikkeaa yleisestä kulutuksen kaavasta, missä kehittyneimmissä maissa kulutetaan lähes kaikkea korkeamman varallisuuden myötä enemmän kuin vähemmän kehittyneissä maissa. Pääsääntöisesti betonia kulutetaan eniten nimenomaan kehittyvissä maissa, jotka kaupungistuvat vauhdilla ja joissa tarvitaan infrastruktuuria kehityksen edellytyksenä. Kehittyneimmissä maissa infrastruktuuri ja kaupunkirakenne ovat jo olemassa ja betonia käytetään tyypillisesti pienempiä määriä olemassa olevan rakenteen korjaamiseen ja kehittämiseen.

Inhimillisen kehityksen indeksi (eli Human Development Index, HDI) on YK:n kehitysohjelman kehittämä mittari maiden kehitystasolle, joka huomioi keskimääräisen tulotason lisäksi myös keskimääräisen koulutustason sekä eliniänodotteen. Kuvassa 3 on jaettu maailman maat neljään ryhmään niiden inhimillisen kehityksen indeksin mukaan, noudattaen YK:n kehitysohjelman mukaisia raja-arvoja. Kun verrataan maiden HDI-arvoja asukaskohtaisiin sementintuotantoon

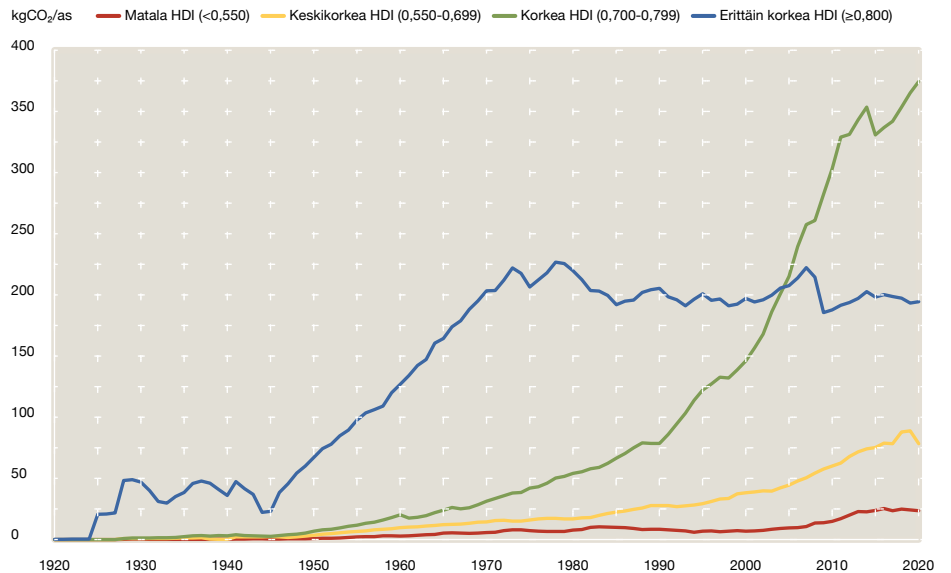
liittyviin hiilidioksidipäästöihin, paljastuu että korkeimman HDI-ryhmän päästöjen kasvu on pysähtynyt jo 70-luvun öljykriisiin. Sen jälkeen päästöt ovat pysyneet tasaisina ja kääntyneet jopa loivaan laskuun. Esimerkiksi Suomessa sementin päästöjen osuus kokonaispäästöistä on huomattavasti maailmanlaajuista lukua matalampi, noin 1,8 %^[6]. Toiseksi korkeimman HDI:n ryhmä on ohittanut asukaskohtaisissa päästöissään korkeimman HDI:n ryhmän 2000-luvun alkuvuosina ja myös kolmas ryhmä seuraa pitkälti toisen ryhmän käyrää noin 30 vuoden viiveellä. Onkin odotettavissa, että tulevina vuosikymmeninä sementin kulutus tulee yhä nousemaan. Kuvassa 4 on esitetty tarkemmin maittain eriteltynä asukaskohtaiset sementintuotannon päästöt suhteessa inhimillisen kehityksen indeksin.

Betonilla on suuren kulutuksensa vuoksi korkeat päästöt, mutta toisaalta myös erinomaiset säilyvyysominaisuudet. Mahdollisuus erittäin pitkään käyttöikänsä antaa betonille hyvät edellytykset vähähiiliseen rakentamiseen, mutta Suomessa matalan keskimääräisen purkuiän vuoksi säilyvyysominaisuuksista ei

nykyisellään saada täyttä hyötyä irti. Yleisin ilmoitettu syy rakennusten purkamiselle Suomessa on uudisrakentaminen, ja purkaminen painottuu kaupunkialueille, joiden tehokkuusvaatimukset kiristyvät kaupungistumisen edetessä^[7]. Rakennuskannan keskimäärin lyhyt käyttöikä on merkittävä ongelma rakentamisen hiilipäästöjen vähentämisen näkökulmasta. Tampereen yliopistolla on tehty tutkimusta nykyisen betonirakennuskannan uudelleenkäyttöpotentiaalista lupauksin tuloksiin. Paikallavalurakenteet voidaan pääasiassa kierrättää vain murskaamalla, mutta elementtirakenteiset betonirakennukset ovat ainakin teknisestä näkökulmasta uudelleenkäyttöön hyvin soveltuvia. Juotosvaluiin liitetyt rakenteet kuitenkin vaativat piikkaamista tai timanttisahaamista ja ovat siksi työläitä purettavia. Purettavuuden kannalta parhaita liitoksia ovat mm. teollisuusrakennusten pilarien ja palkkien liitoksissa käytetyt pulttiliitokset.^[8] Olemassa olevaa rakennuskantaa siis voidaan todennäköisesti ainakin jossain määrin hyödyntää myös uudisrakentamisen materiaalipankkina. Kiertotalouden periaat-

3

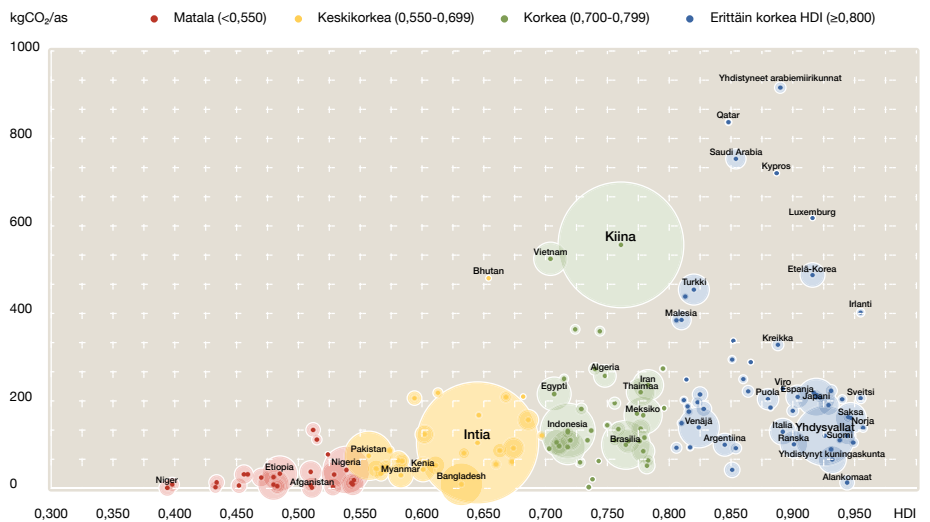
Sementintuotannon
asukaskohtaiset
prosessipäästöt
valtioiden inhimillisen
kehityksen
indeksiryhmän mukaan.



4

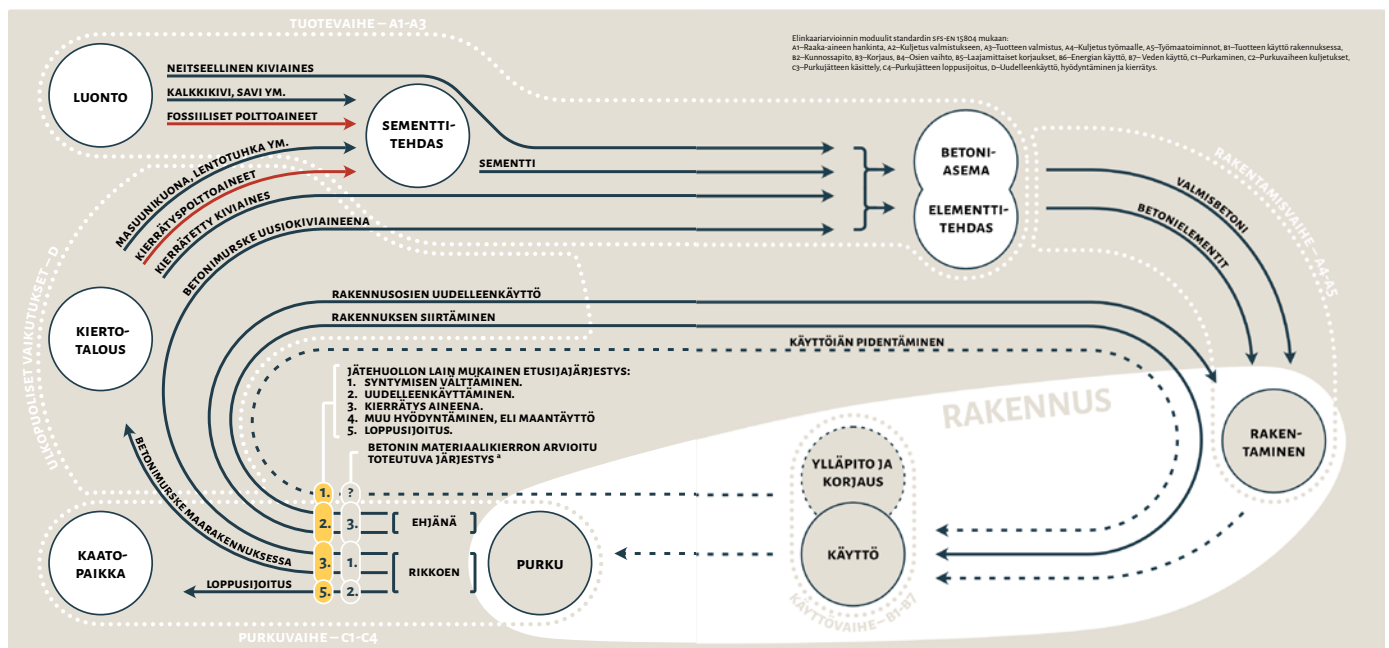
Valtioiden inhimillisen
kehityksen indeksin
suhde sementin
asukaskohtaiseen
prosessipäästöihin.

Kiertotalous ja sen edistäminen suunnitte-
lussa



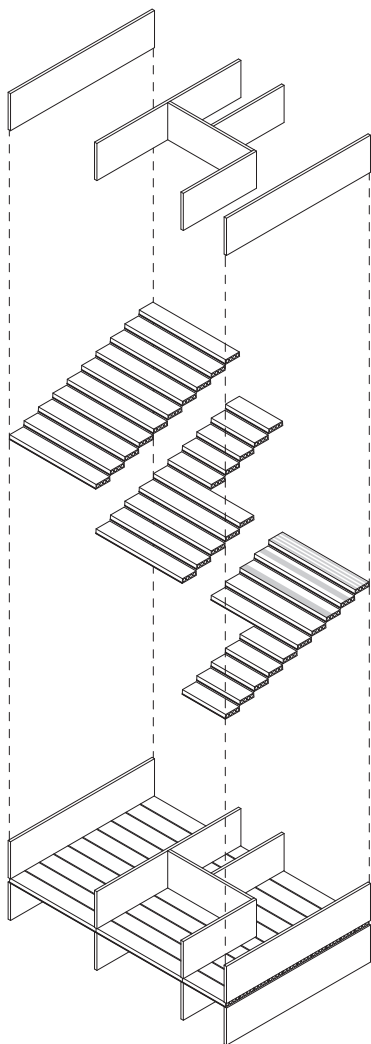
5

Betonin materiaalikiertokulku ja elinkaaren vaiheet.

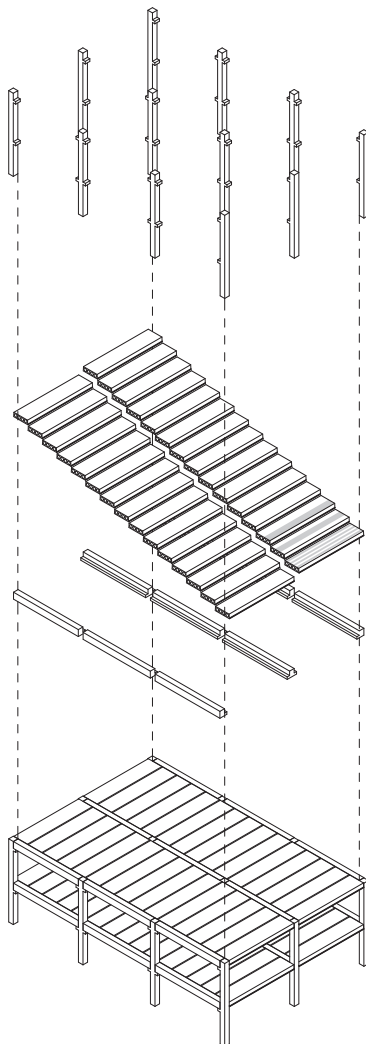


Suomessa käytettyjä betonielementtijärjestelmiä.

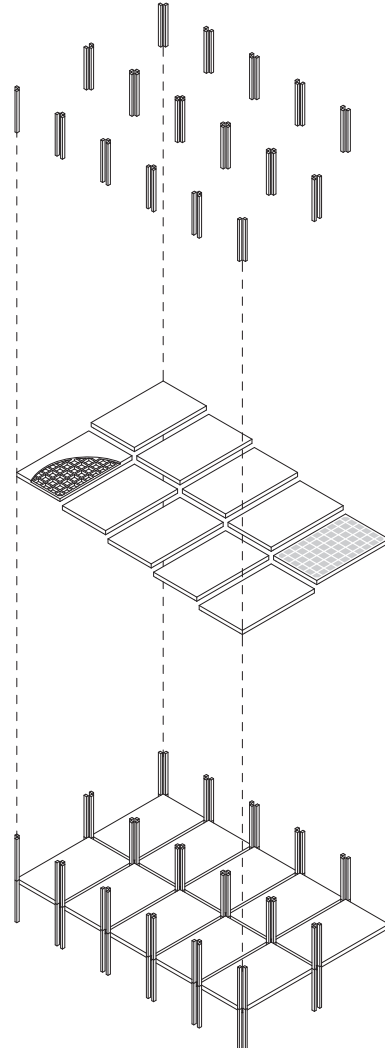
BES-järjestelmän kantavat seinät-runko.



Runko-BES-järjestelmän pilari-palkki-runko.



PLS-80-järjestelmän pilari-laatta-runko.



teisiin nojaten olisi kuitenkin kannattavaa myös suunnitella uudisrakennukset huomioiden entistä paremmin niiden purettavuus tai siirrettävyys elinkaarensa päässä.

Nykyään käytössä olevaan BES-järjestelmään johtaneessa tutkimuksessa vertailtiin asuntotuotannon avoimeksi järjestelmäksi neljää rakennusrungon periaatetta, jotka olivat kantavat seinät -järjestelmä (A-malli), pilari-palkki-järjestelmä (B-malli), pilari-laatta-järjestelmä (C-malli) ja tilaelementtijärjestelmä (D-malli). Alustavassa vertailussa suljettiin pois arvotuksessa selvästi viimeiseksi jäänyt D-malli ja ”paremmin muun tyyppiseen rakentamiseen” soveltuva B-malli, jonka kehitetty versio tuli markkinoille myöhemmin mm. toimitila- ja teollisuusrakentamisessa käytetyn Runko-BESin muodossa. Valituksi tullut A-malli ja pilari-laatta-rakenteinen C-malli puolestaan olivat arvotuksessa hyvin lähellä toisiaan. Aikalaiskertomusten mukaan C-malli olisi jopa alkujaan voittanut ratkaisujen väli-

sen vertailun, mutta pisteytyksen painotuksia päätettiin muuttaa, jotta teollisuudelle mieluisampi A-malli saataisiin valituksi^[9].

BES-tutkimuksen loppuraportissa A-mallin valintaa perusteltiin sen paremmalla soveltuvuudella nopeaan käyttöönottoon, arvioidulla noin 2,5 % rakennuskustannussäästöillä, sekä C-mallissa avoimeksi jääneillä rakennus- ja kustannusteknisillä kysymyksillä. Loppuraportissa kuitenkin peräänkuulutettiin pilari-laatta-mallin jatkotutkimusta avointen kysymysten selvittämiseksi^[10].

Paremmin muuntojoustavana pidetty pilari-laatta-järjestelmä kehitettiin jatkotutkimuksissa kaupalliseen valmiuteen asti PLS-80-tutkimuksen muodossa. Niin BES- kuin PLS-80-tutkimuksessakin pidettiin tärkeänä tavoitteena muuntojoustavuutta ja jopa mahdollisuutta purkaa rakennus ja pystyttää se uudelleen toisaalle elinkaarensa päässä. PLS-80 järjestelmässä rakentamisen jälkeinen muunneltavuus ja siirrettävyys oli

kuitenkin selvästi keskeisemmässä asemassa. Joustavuutta edesauttavia ajatuksia olivat mm. kuvassa 8 esitetyt, ensisijaisena ratkaisuna suositellut ”kuivat” mekaaniset liitokset, suuri vapaus laattojen aukotusmahdollisuuksissa, taloteknisiä asennuksia sisältävät kimpupilarit ja laattojen väliset neutraalivyöhykkeet, joihin pystyi sijoittamaan myös osan talotekniikan vaakavedoista^[11].

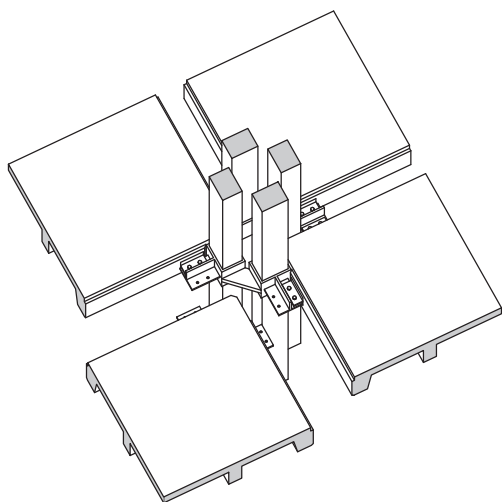
Tutkimuksen julkaisun jälkeen järjestelmä paitsi koerakennettiin, rakentamista myös jatkettiin noin tuhannen asunnon verran 1980-luvun alkuun mennessä, jolloin järjestelmää käyttänyt Lujabetonikin siirtyi pilarilaatoista markkinoille aikaisemmin ehtineen ja ne tehokkaasti vallanneen BES-järjestelmän mukaisten ontelolaattojen valmistukseen^[12]. Tuhannen asunnon rakentaminen kuitenkin osoittaa, että järjestelmä oli ainakin 70-luvulla myös markkinakelpoinen.

Olisikin kenties aiheellista pohtia uudelleen nyt jo puoli vuosisataa vanhaa BES-järjestel-



7

7 Arkkitehtitoimisto FAR: Frohn & Rojas:in suunnittelema asuinkerrostalo Wohnregal Berliinissä on esimerkki uudesta pilari-palkki -rakenteisesta rakennuksesta, joka on paitsi muuntojoustava ja soveltuu myös hyvin uudelleenkäyttöön käyttöikänsä päässä. Wohnregal on laajemmin esitelty *Betoni* 3-2021 lehdessä sivuilla 46-55.



8 Esimerkki PLS-80-järjestelmästä: kimppupilari ja "kuiva" pulttiliitos.

mää, sen päivittämistä tai jopa PLS-80-järjestelmän kaivamista naftaliineista, sillä kiertotalouden ja jätelainin mukaisen materiaalikulun etusijajärjestyksen toteutumisen kannalta paremman muuntojoustavuuden ja purettavuuden suunnittelu tulevat olemaan kriittinen osa uudisrakennusten suunnittelua.

Kaikki irti karbonatisoitumisesta

Karbonatisoituminen on tunnettu kauan betonin vauriomekanismina, mutta hiilinielumeکانismina siihen on herätty vasta hiljattain. Esimerkiksi hallitustenvälinen ilmastopaneeli IPCC tunnusti karbonatisoitumisen merkittäväksi hiilinieluksi ensimmäistä kertaa syksyllä julkaisemassaan ilmastoraportissa^[13]. Erityisesti elinkaarensa päässä murskatulla betonilla on erittäin merkittävä potentiaali hiilinielun lisäämiseksi.

Toistaiseksi vähemmälle huomiolle on jäänyt betonin hiilinielun edistäminen jo rakennuksen elinkaaren aikana. Hyöty on

elinkaarenjälkeiseen potentiaaliin verrattuna melko vähäinen, koska murskattaessa betonin karbonatisoitumiselle altis pinta-ala voi jopa tuhatkertaistua. Elinkaaren aikainen hiilinielu ja sen edistäminen on kuitenkin huomion arvoinen uudisrakennusten kohdalla, joiden rakennusosat toivon mukaan poistuvat materiaalikierrosta ja murskataan vasta satojen vuosien kuluttua. Esimerkiksi kuivissa sisätiloissa, jotka karbonatisoituvat siinä missä julkisivutkin, ei ole riskiä raudotteiden korroosiosta ja siitä seuraavasta rapautumisesta, eli karbonatisoituminen on ainoastaan positiivinen ilmiö. Betonirakenteen pintakäsittelyllä on suuri vaikutus karbonatisoitumisen nopeuteen. Ruotsalaisesta rakennuskannasta tehtyjen mittausten perusteella on arvioitu, että jokseenkin kosteutta ja hiilidioksidia läpäisevät materiaalit, kuten maali ja tapetti, hidastavat karbonatisoitumista noin 50 % ja täysin tiiviit materiaalit kuten muovimatto tai parketti noin 90-100 %. Mittaustuloksen pohjalta on laadittu



9

laskennallinen malli hiilensidonnän arviointia varten^[14], jonka mukaisia arvoja eri olosuhteille ja pintavaihtoehdoille on esitetty taulukossa 1.

Termisen massan hyödyntäminen

Betonilla on korkea massa ja lämpökapasiteetti, minkä vuoksi se tasaa tehokkaasti rakennuksen vuorokauden sisäisiä lämpötilavaihteluita ja varastoi auringosta ikkunoiden kautta saatavaa ilmaisen energiaa. Rakennuksen, jolla on korkea terminen massa, on tutkittu voivan säätää lämmitysenergiaa noin 3–14 % ja viilennysenergiaa jopa 40 % kevytrakenteisiin rakennuksiin verrattuna^[15]. Paras sijainti lämpöä varaavalle massalle on suoraa auringonsäteilyä vastaanottavat lattiapinnat. Jotta esimerkiksi betoninen lattiapinta varaisi auringon lämpöä tehokkaasti, sitä ei saa kuitenkaan eristää lämpöä huonommin johtavilla pintamateriaaleilla kuten parketti, muovimatto tai laminaatti. Sen sijaan esimerkiksi keraaminen laatta, jolla on samankaltaiset termiset ominaisuudet kuin betonilla, soveltuu hyvin. Paljas betonilattia ei välttämättä kuitenkaan tule aina kysymykseen esimerkiksi askelääneneristysvaatimusten tai puhtaasti esteettisten valintojen vuoksi. Toi-

seksi paras sijainti varaavalle massalle ovat yhtä lailla suoraan mutta pienempiä määriä auringon säteilyä vastaanottavat seinäpinnat. Betonirunkoisissa rakennuksissa on lähtökohtaisesti niin paljon massaa ja auringolle altista betonipintaa, ettei niitä erityisemmin tarvitse optimoida, mutta esimerkiksi puurakennuksissa kesäaikainen yllämpenemisen riski on korkeampi ja kelluva betonilaatta tai muu termistä massaa tarjoava ratkaisu voi olla energiataloudellisesti kannattava.

Mitä seuraavaksi

Kenties suurin tarve ja potentiaali tutkimukselle ja kehitystyölle olisi runkojärjestelmien kehittämisessä. Nykyään käytössä oleva BES-järjestelmä on pysynyt pääpiirteissään muuttumattomana jo yli puoli vuosisataa eikä sitä alkuperäisen tutkimuksen tavoiteasetanasta huolimatta ole kehitetty kiertotaloutta, rakennusten siirtämistä ja rakennusosien mahdollista uudelleenkäyttöä ajatellen. Yksi rakennusosien uudelleenkäytön merkittävä hidaste on vaikeus muokata betonisia rakennusosia elinkaarien välissä. Esimerkiksi betonipalkit vaativat päissään leikkausraudoitukset, jonka-

vuoksi lyhentäminen ennen uudelleenkäyttöä ei ole mahdollista. Tämän vuoksi pitäisi tutkia myös tarkkaan mahdollisimman monipuolista toiminnallista mitoittamista, jolla uudelleenkäytön edellytyksiä voitaisiin parantaa.

Lisää tietoa tarvittaisiin myös pintamateriaalien hiilidioksidinläpäisevyydestä, jotta voitaisiin mahdollisuuksien mukaan edesauttaa betonirakenteiden hiilensitomiskykyä sisätiloissa. Hiilinielun kannalta paras pinta on paljas betoni, mutta karbonatisoitumisen tehokkaasti mahdollistavien pintavaihtoehtojen palettia voisi mahdollisesti laajentaa kehittämällä esimerkiksi tehokkaasti hiilidioksidia ja kosteutta läpäiseviä maaleja.

Myös lainsäädännössä ja erilaisissa hyväksyntämenettelyissä on kehitettävää, jotta kiertotalous saadaan toimimaan ja purettavien rakennusten elementtejä voidaan käyttää uudelleen sekä kierrätysmateriaaleja, kuten betonimursketta, hyödyntää laajemmin.

Taulukko 1

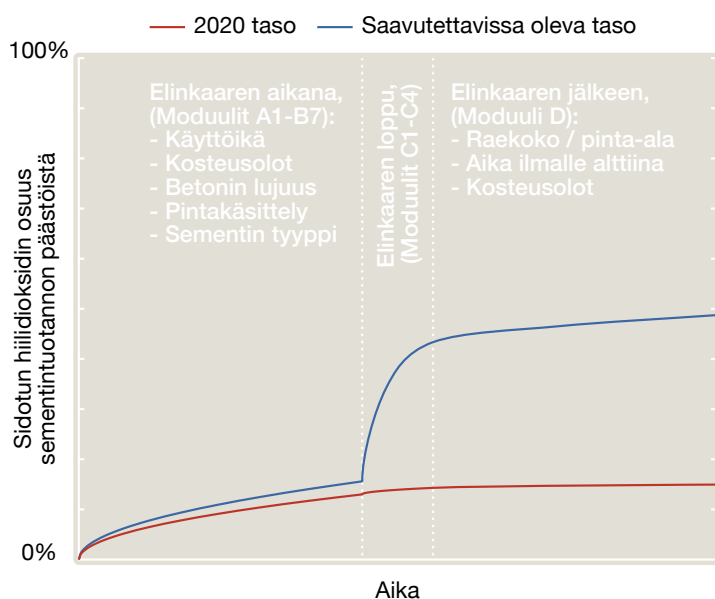
Tyypillinen betoniin sitoutuva hiilidioksidimäärä eri olosuhteissa ja tarkastelujaksoilla

	Aika (vuotta)						
	1	2	5	10	20	50	100
Sisärakenteet	Sitoutunut CO₂ (kgCO₂/m²)						
Käsittämätön 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							
Mineraalivillaaeristettä 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.

9 Arkkitehti Le Corbusierin suunnittelema Ronchampin kappeli. Ronchampin kappelia, lähellä Belfortin kaupunkia itäisessä Ranskassa. Chapelle Notre Dame du Haut, pidetään yhtenä ranskalais-sveitsiläisen arkkitehti Le Corbusier'n parhaista töistä ja yhtenä 1900-luvun kirkkoarkkitehtuurin merkittävimmistä teoksista. Vuonna 1954 valmistunut kappeli sijaitsee korkealla kukkulalla ja se rakennettiin toisessa maailmansodassa täysin tuhoutuneen, 300-luvulta peräisin olleen pyhiinvaelluskappelin tilalle. Kohde on esitetty diplomityössä esimerkkinä 1900-luvun betoniklassikoista.

10 Periaatekuva sementin hiilikädenjäljestä



11 Lähikuva taivutuskokeen läpikäyneestä ultrakorkealujuusbetonin koe-kappaleesta. Geneerinen lähikuva betonista. Kuva on Kotkavuon Japanin opiskelijavaihdolta.



12

Lähteet:

- 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-Document-AW.pdf>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). *FAO Yearbook of Forest Products 2018*. Rome: FAO, 2020. <https://doi.org/10.4060/cb0513m>.
- Salminen, Esa, Riikka Anttonen ja Liina Marttila. Betonituotteiden ympäristöselosteet. Betoniteollisuus ja Vahainen Environment, 2020. <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-ymparisto/betonituotteiden-ymparistoselosteet/>
- IEA (International Energy Agency). *Energy Technology Perspectives 2020*. Revised version. Paris: IEA, 2021. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
- 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>.
- Finnsementti. *Ympäristöraportti 2021*. Finnsementti, 2021. <https://finnsementti.fi/ymparisto-raportti-2021/>.
- 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>.
- 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>.
- 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-ilmastopaasto-ja-kalasataman-tornissa-se-myo-nopeutti-selvasti-rakentamista>.
- Seppänen, Matti, Teuvo Koivu (toim.). *BES – Tutkimus avoimen elementtijärjestelmän kehittämiseksi*. Suomen betoniteollisuuden keskusjärjestö, 1970.
- Koivu, Teuvo, Pentti Penttilä, Juhani Jaala (toim.). *PLS-80 – yleisen elementtijärjestelmän kehittämistutkimus*. Helsinki: Rakennustietosäätiö, 1972. ISBN 951-682-000-X.
- Hytönen, Yki & Matti Seppänen. *Tehdään elementteistä – 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>.
- 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.
- 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/7b00e44d-e4e7-4fc2-bd0d-e508874488f9>.
- 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.



13



14

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

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.

More information:
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202204081520>

12 Tokion kaupunkirakennetta. Kuva kertoo betonin käyttömäärästä materiaalina ja korvaamattomuudesta.

13 Arkkitehti Tadao Andon suunnittelema Valon kirkko Japanin Osakassa. Kirkko on esitelty myös diplomityössä esimerkkinä 1900-luvun betoniklassikoista.

14 Lähikuva Tadao Andon valmiin puhdasvalupinnan betonista ja muottisiteiden viimeistellystä detaljista Osakan Valon kirkossa.