

Infrarakentamisen betonin hiilijalanjäljen vähentäminen

Esiselvitys



Kaupunkiympäristön aineistoja 2022:2

Infrarakentamisen betonin hiilijalanjäljen vähentäminen

Esiselvitys



Kannen kuva | Susa Junnola
Julkaisija | Helsingin kaupunki / Kaupunkiympäristön toimiala
ISBN | 978-952-386-077-3
ISSN | 2489-4257

SISÄLLYSLUETTELO

Termit ja lyhenteet	1
1. Johdanto	2
1.1 Taustaa	2
1.2 Selvityksen tavoitteet	3
2. Betonin päästövähennysmahdollisuuksien kartoittaminen	4
2.1 Suunnitteluvaatimukset	4
2.2 Betoni materiaalina ja osana rakennetta	4
2.2.1 Yleistä	4
2.2.2 Betonin ominaisuudet	5
2.2.3 Standardit ja ohjeet	7
2.2.4 Betonirakentaminen	10
2.3 Betonin päästöt ja päästövähennyspotentiaali	11
2.3.1 Sementti ja muut sideaineet	13
2.3.2 Kiviaines	16
2.3.3 Betoniteräs	16
2.3.4 Ympäristö- ja infrarakentamisen betonituoteosat	17
2.3.5 Verhoilut	17
2.4 Päästövähennystoimenpiteiden vaikutus rakenteelliseen toimintaan	18
2.4.1 Sementti ja sideaineet	18
2.4.2 Kiviaines	20
2.4.3 Raudoite ja kuidut	20
2.5 CASE: Paalulaatta	20
3. Hankinta ja sen vaikutus betonin hiilijalanjälkeen	24
3.1 Yleistä hankinnasta	24
3.2 Hankintalaki ja vähähiiliset hankinnat	24
3.2.1 Kokonaisedullisuus	24
3.2.2 Innovatiivisuus	25
3.3 Vähähiilisen betonirakenteen hankinta	25
3.3.1 Vähähiilisen betonirakenteen hankintalista lyhyesti	25
3.4 Hankintakriteerit	26
3.5 CASE: Paalulaatta	26
3.5.1 Yleistä	26
3.5.2 Vähähiilisten suunnittelupalveluiden hankintakriteerisuositukset	26
3.5.3 Vähähiilisten paalulaatan rakennusurakan hankintakriteerit	28
3.5.4 Vähähiilisen paalulaatan rakentamisen materiaalihankinnat	29
4. Infrarakentamisen betonirakenteiden tunnistaminen	30
4.1 Betonirakenteet ja niiden käyttökohteet	30
4.1.1 Sillat	30
4.1.2 Tunnelit, kaukalarakenteet sekä suuaukkorakenteet	30
4.1.3 Tukimuurit	31
4.1.4 Vesi- ja merirakenteet	31

4.1.5	Meluseinät ja -kaiteet	32
4.1.6	Raitioteiden rakenteet	32
4.1.7	Kunnallistekniikka, puhdas vesi (esim. vesitornit, vesijohtorakenteet, huoltokaivot yms)	33
4.1.8	Kunnallistekniikka, jätevesi (esim. pumppaamot, purkukuilut, huoltokaivot yms)	33
4.1.8	Sähköiset liikenneympäristön varusteet (kunnallistekniikka)	34
4.1.9	Paalulaatat ja maasillat	34
4.1.10	Teräsbetonipaalu (tuoteosa)	35
4.1.11	Maanvaraiset peruslaatat yleisesti	35
4.1.12	Ympäristö- ja puistorakentaminen	35
5.	Yhteenveto	38
	Lähdeluettelo	40

Liitteet

LIITE A Betonilta vaaditut ominaisuudet eri käyttökohteissa

TERMIT JA LYHENTEET

AKR	Alkalikiviainesreaktio
Korvausosuus	$(\text{korvaavan aineen määrä}) / (\text{korvaavan ja korvattavan aineen yhteismäärä})$
Sideaine	Betonin osa-aineet, jotka vastaavat pääosasta sementtikiven muodostumista (klinkkerisementti, seosaineet)
Seosaine	Käytetään tässä esityksessä kuvaamaan betoniin lisättäviä <i>tyypin II seosaineita</i> tai sementtiin lisättäviä vastaavia sideaineita, jotka ovat pozzolaaneja tai piilevästi reaktiivisia.
Tyypin II seosaine	Standadin EN-206 mukaiset betonin valmistuksessa käytettävät reaktiiviset seosaineet, joilla voidaan korvata klinkkerisementtiä.

1. JOHDANTO

1.1 Taustaa

Maapallon päästöistä noin 7 % aiheutuu betonin ja sementin valmistuksesta. Suomessa vastaava osuus on RT:n mukaan 1,5 %. Suomen ainoan sementtivalmistajan Finnsementin mukaan pelkkä sementtiteollisuus aiheuttaa 1,8 prosenttia Suomen päästöistä (Finnsementti 2021). Sementti aiheuttaa valtaosan betonin päästöistä. Sementin likimääräinen massaosuus seostamattomasta betonista on 10...15 % ja päästöistä 70...80 %.

Helsingin kaupungin tavoitteena on olla hiilineutraali vuonna 2035. Kaupungin Hiilineutraali Helsinki 2035 -toimenpideohjelmassa mainitaan myös kiertotalouden edistäminen kaupungin toiminnassa merkittävänä hiilidioksidipäästöjen vähentäjänä. Helsingin kaupungin kierto- ja jakamistalouden tiekartassa rakentamisen kiertotaloustavoitteet on määritetty erikseen rakentamistoimialalle.

Kiertotaloudella tarkoitetaan toimintaa, jossa tuotteet ja materiaalit pysyvät talouden kiertokulussa arvonsa säilyttäen mahdollisimman pitkään. Käyttöään jälkeen ne voidaan palauttaa joko teknologisiin tai biologisiin kiertokulkuihin. Infrarakentamisen kannalta erityisen olennaiset kiertotalouden prioriteetit (mukaillen Ian Firth 2020):

1. Jätä tekemättä (refuse)
2. Tee paremmin (rethink)
3. Rakenteiden ja osien uudelleenkäyttö (re-use)
4. Käytä vähemmän ja vähähiilisempiä materiaaleja (reduce)
5. Käytä kierrätettyä ja kierrätettäviä materiaaleja (recycle)

Edellä esitetyistä tavoitteista asiantuntijoiden, niin viranhaltijoiden kuin konsulttienkin, suorat vaikutusmahdollisuudet ovat neljässä jälkimmäisessä. Julkisen hankkeen toteuttamatta jättämiseen tai tavoitteen saavuttamiseen toisella toteutustavalla asiantuntijoiden vaikutusmahdollisuudet ovat epäsuoremmat, ja vaikuttaminen tapahtuu esimerkiksi esiselvitysten kautta.

Paremmen tekemistä tai hankkeen uudelleenajattelua (*rethink*) voidaan lähestyä joko esiselvitys-, suunnittelu- tai rakennusvaiheen kautta. Suunnittelun ja rakentamisen lähtökohdat on julkisissa hankkeissa yleensä määritelty esiselvitysvaiheessa. Kuitenkin esimerkiksi allianssihankkeessa saavutetaan yleensä kustannussäästöjä ja aikataulun nopeutumista myös suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Allianssimallia voitaisiin hyödyntää myös päästöjen vähentämisessä. Sama koskee myös muita urakkamuotoja. Yleisesti ottaen päästövähennyksiä on mahdollista saada samoissa kohdissa kuin kustannussäästöjä. Kustannus- ja päästönäkökulmat voivat joskus olla vastakkaisia, jolloin tilaajan tahtotila ja realiteetit määräävät, miten edetään.

Rakenteiden ja rakennneosien uudelleenkäyttö (*re-use*) mielletään tässä selvityksessä kahdella tapaa: muuntojoustavuus ja uudelleenkäyttö uudessa paikassa. Muuntojoustavuudella tarkoitetaan esimerkiksi sillan tapauksessa, että liikennekuormituksen noustessa siltaa ei tarvitsisi uusia ainakaan ennen sen suunnittelukäyttönsä loppua. Uudelleenkäyttö uudessa paikassa taas voisi olla esimerkiksi tukimuurielementtien siirtämistä puistosta toiseen. Voidaan ottaa huomioon jälkikäteen (suunnitellaan rakennettavaksi uudelleenkäytettävistä) tai etukäteen (suunnitellaan uudelleenkäytettäväksi).

Materiaalien vähempi käyttö ja vähähiilisempien materiaalien käyttö (*reduce*) liittyvät läheisesti toisiinsa. Niiden ajoittuminen julkisessa rakennushankkeessa on kuitenkin osin eri. Kärjistettynä materiaalien määrää saadaan vähennettyä suunnitteluvaiheessa ja niiden hiili-intensiteettiä rakennusvaiheessa, kun ne hankitaan. Koska materiaalien valmistamisesta syntyy päästöjä, saavutetaan päästövähennyksiä käyttämällä materiaaleja mahdollisimman vähän. Suunnittelijalle tämä tarkoittaa mahdollisimman suuria käyttöasteita.

Esimerkiksi sillanrakennuksessa vallitsi 60-70-luvulla suunnittelusuuntaus, jossa teräkset optimoitiin momenttipintojen muodon mukaan. Myös kansien betonimäärä minimoitiin. Näin saavutettiin materiaalitehokkaita ja hoikkia rakenteita aikana, jolloin materiaalien suhteellinen osuus rakentamisen kustannuksista oli nykyistä suurempi. Kun tämän aikakauden silloille nyt tehdään kantavuustarkasteluja nousseiden liikennekuormien takia, ei muuntojoustavuutta juuri

ole. Rakenteita joudutaan vahvistamaan, mihin kuluu sekä työtä että materiaaleja, eli rahaa ja päästöjä.

Esimerkiksi kesällä 2021 Helsingissä uusittiin yksi metrosilta, joka oli tullut elinkaarensa loppuun. Samassa viikon liikennekatkossa neljään metrosiltaan tehtiin merkittäviä vahvennustoimenpiteitä. Kaikki alkuperäiset 1970-luvulla suunnitellut sillat olivat jännitettyjä betonikaukaloita. Kaukalon reunat olivat hyvin ohuita, mistä seurasi rajoituksia pysyville ja työnaikaisille kuormille. Metrosillat ovat myös erinomainen esimerkki rakenteesta, jonka kohdalla uusiminen ei aikataulusyistä ole aina mahdollista, vaan käyttöä pidennäviä toimia tehdään uusimisen sijasta.

1.2 Selvityksen tavoitteet

Tämän esiselvityksen tarkoituksena on tunnistaa Helsingin kaupungin infra- ja ympäristörakentamisessa yleisiä betonirakenteita ja arvioida niissä käytettävän betonin hiilidioksidipäästöjen pienentämistä. Esiselvitys on kirjallisuusselvitys ja kirjallisuudessa esitettyä tietoa on täydennetty Rambollin sisäisen ohjausryhmän asiantuntijoiden kommenttien perusteella. Kussakin luvussa käytettyä on esitetty tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

Mahdollisuuksia tutkitaan kolmen mittarin kautta: betoniin ja muihin materiaaleihin liittyvät vaatimukset, saavutettavissa olevat päästövähennykset sekä kaupungin mahdollisuudet toteuttaa kyseiset päästövähennystoimenpiteet (hankinta).

Helsingin kaupungin on tavoite olla hiilineutraali vuonna 2035. Esiselvityksen pääpaino onkin betonin päästöjen vähentäminen tilanteessa, jossa tietty rakenne on suunniteltu rakennettavan betonirakenteena. Myös rakenteiden ja rakenneosien uudelleenkäyttöä sekä muita kiertotaloustekijöitä käsitellään.

2. BETONIN PÄÄSTÖVÄHENNYSMAHDOLLISUUKSIEN KARTOITTAMINEN

2.1 Suunnitteluvaatimukset

Kantavat betonirakenteet suunnitellaan Suomessa Eurokoodien mukaan. Eurokoodista on tehty infrarakenteille suunnittelun sovellusohjeet, joissa määritetään tavoitellut käyttöiät eri rakenneosille. Useimmiten infran betonirakenteiden tavoitekäyttöikä on 100 tai 50 vuotta, poikkeuksellisen vaativilla kaupunkiympäristön taitorakenteilla jopa 200 vuotta. Rakenne suunnitellaan siten, että se suunnitellun käyttöikänsä ajan kestää kaikki kuormat ja vaikutukset, joita todennäköisesti esiintyy. Rakenteen tulee pysyä käyttökelpoisena koko sen käyttöiän ajan.

Helsingin kaupungin taitorakenteiden suunnittelussa sovellettavien määräysten ja ohjeiden pätemisjärjestys on seuraava (Taitorakenteiden suunnitteluohje 2021):

- Liikenteen turvallisuusviraston (TraFi) määräykset
- Helsingin kaupungin antamat hankekohtaiset suunnitteluperusteet
- Eurokoodit ja niiden kansalliset liitteet (LVM)
- Helsingin kaupungin rakenteiden suunnitteluohjeet
 - Helsingin kaupungin taitorakenteiden suunnitteluohje, suunnitteluohje
 - Taitorakenteiden tietomallinnusohje, suunnitteluohje
 - Sillan erikoistarkastus ja korjaussuunnittelu, suunnitteluohje (korjauskohteet)
- Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeet (NCCI-sarja)
- Muut ohjeet (Väylävirasto, RIL, Helsingin kaupunki, jne...)

Suunnitteluvaiheessa määritetään rakenteeseen kohdistuvat vaatimukset. Lujuuslaskelmia vaativille rakenteille määritetään kuormat ja selvitetään maaperän kantavuus. Näiden perusteella määritetään teräsbetonirakenteen tuenta ja mitat. Teräsbetonirakenteisiin voi rakenteellisten vaatimusten lisäksi kohdistua myös toiminnallisia, ulkonäöllisiä tai ylläpidolle asetettuja vaatimuksia.

Betonirakenteiden suunnittelussa ympäristöolosuhteet huomioidaan yleensä betonirakenteen käyttöikänsä vaikuttavana tekijänä. Ympäristöarastusten vaikutuksista betoniin lisää luvussa 2.2. Esimerkiksi kloridi- eli suolarasitusten vaikutuksia hallitaan yleensä kasvattamalla betonin lujuutta tai pakkasenkestävyyttä, suojaamalla pinnat impregnoimalla, pinnoittamalla tai verhoilemalla tai kasvattamalla suojabetonipeitteen määrää. Betonipeitteiden kasvattaminen käytännössä kasvattaa myös suoraan betonirakenteen tilavuutta, jolloin betonia kuluu enemmän.

Suunnitelmiin merkitään vaatimukset, jotka tuotteen tulee täyttää. Suunnitelmissa ei oteta kantaa siihen, tuleeko tuotteen olla uusi tai kokonaan tai osin kierrätetty.

Kaupungille helpoin tapa vähentää päästöjä suunnitteluvaiheessa ovat hankekohtaiset suunnitteluperusteet. Kun suunnitteluperusteet on todettu hankkeissa kokonaisedullisiksi, voidaan ne viedä kaupungin ohjeisiin. On hyvä huomioida, että myös Eurokoodit ja viranomaisien ohjeet todennäköisesti kehittyvät vähähiilisyyttä kohti. Näiden muuttaminen on kuitenkin vain korkeintaan välillisesti kaupungin käsissä.

2.2 Betoni materiaalina ja osana rakennetta

2.2.1 Yleistä

Betoni on keinotekoista kiveä, joka sisältää reagoivaa sideainetta (sementtiä ja seosaineita), vettä, hienoa ja karkeaa kiviainesta sekä lisäaineita. Betoni on tarkasti eurooppalaisissa standardeissa määritelty rakennusmateriaali, jota käytetään pääsääntöisesti joko yksistään tai yhdessä teräksen kanssa (teräsbetoni). Myös kuitubetonia voidaan käyttää, joko tankorautoituksen kanssa tai ilman.

Jo muinaiset roomalaiset valmistsivat betonirakenteita. He käyttivät sideaineena vulkaanista tuhkaa. Kun nykyisen kaltaisen betonin valmistus alkoi Euroopassa, valikoitui sideaineeksi poltetu kalkkikivi (klinkkeri), jota kutsutaan portlandsementiksi. Erilaisia teollisuuden sivuvirtoja kuten hiilenpoltosta syntyvää lentotuhkaa ja teräksen valmistuksessa syntyvää masuunikuonaa on

käytetty betonin seosaineina jo vuosikymmeniä. Etenkin massiivisissa paikallavalettavissa silloissa masuunikuonaa on hyödynnetty sen klinkkerisementtiä alhaisemman lämmönkehityksen vuoksi. (by 201 2018) Vastaavasti muita sideaineita on hyödynnetty betonin ominaisuuksien parantamiseksi jo ennen kuin niiden merkitys betonin päästöjen vähentämisessä on huomattu. Erilaisten vähähiilisten betonien kohdalla onkin syytä tarkastella, paljonko todellinen päästövähennys on aiemmista päästöistä. Hiilidioksidipäästöjä ei voida vähentää markkinoinnillisella tai laskennallisella kikkailulla.

Betonille ominaisia mekaanisia ominaisuuksia ovat hyvä puristuslujuus ja huono vetolujuus. Teräsbetonissa rakenteen huonoa vetokestävyyttä parannetaan teräksellä. Teräsbetonirakenteet ovatkin varsin kustannustehokkaita rakenteita (betonimassa ~halpaa, teräs ja työt ~kalliita). Nykyisellään sekä betoni että teräs mielletään kuitenkin varsin suuriksi päästölähteiksi ja niiden käyttö osana rakennettua ympäristö aiheuttaa merkittäviä päästöjä.

Betoni-käsitteen alle mahtuu laaja kirjo erilaisia betoneja: Joidenkin betonien puristuslujuus on 10 MPa, joidenkin reilusti yli 100 MPa. Toiset betonit kestävät sisäkäytössä hyvin, mutta ulkokäyttöön vaaditaan erilaisia betoneja. Näihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa betonin suhteituksella ja lisäaineiden käytöllä, eli reseptillä. Ominaisuuksiltaan vastaavankaltaisia betoneja on koottu eri betoniperheisiin, jolloin esimerkiksi betonitehtaan laadunvarmistusta ei tarvitse tehdä täysin reseptikohtaisesti. Betonin reseptiikkaan vaikuttaa myös valujankohdasta vallitsevat sääolosuhteet (lämpötila ja ilmakeuhuus).

Betonirakenteen käyttöikänsä vaikuttaa merkittävästi betonin pitkäaikaiskestävyys. Esimerkiksi betonin karbonatisoituminen tai halkeilu edesauttavat raudotteiden korrodoitumista. Haastavat kemialliset olosuhteet esimerkiksi maaperässä tai meri- tai pohjavedessä vaikuttavat myös betonin lujuuteen ja koossapysyvyyteen.

2.2.2 Betonin ominaisuudet

Betonin seos- ja lisäaineet vaikuttavat muun muassa massan notkeuteen ja työstettävyyteen, lujuudenkehitykseen ja lämmönkehitykseen. Lujittuneessa betonissa seosaineilla on vaikutusta esimerkiksi lujuuteen, vesitiivyyteen, akr-reaktion alkamisajankohdyksiin sekä kestävyteen pakkas-sulamis-, sulfidi- ja kloridirasituksia vastaan.

Monet betonin vaurioitumismekanismit vaativat vähintään riittävän kosteuspitoisuuden alkaakseen, minkä vuoksi niiden merkitys korostuu ulkorakenteilla.

Tuoreen betonin työstettävyys ja koossapysyvyys Notkeus

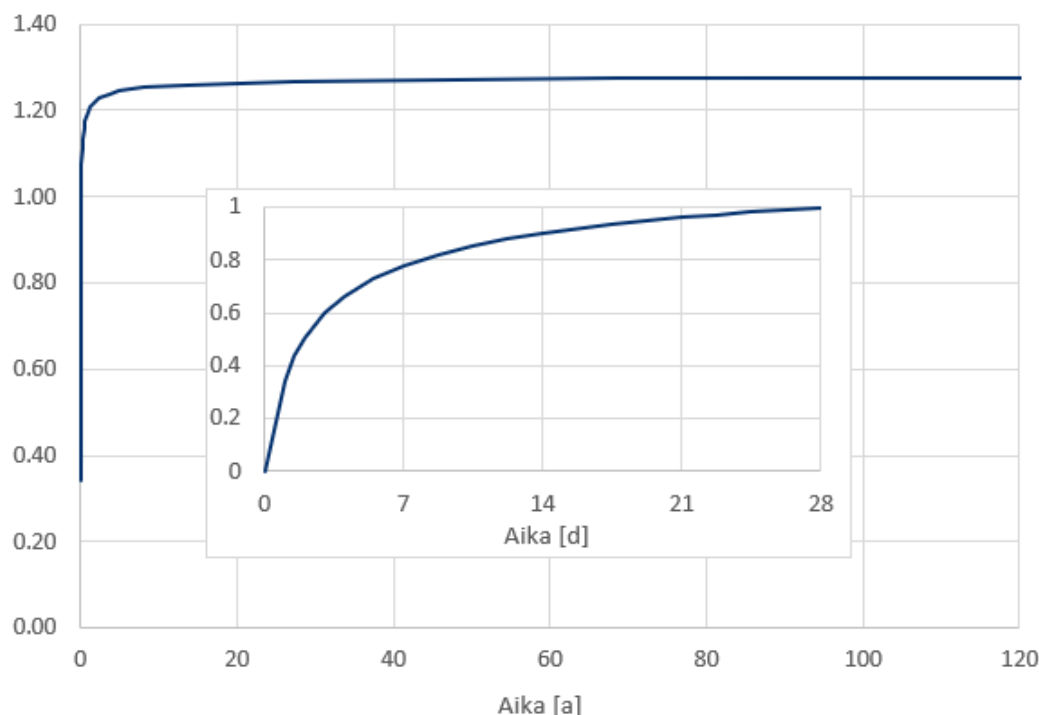
Betoni pyrkii erottumaan kahdella eri tapaa: vedenerottuminen betonin pintaan ja karkean kiviaineksen erottuminen sementtiliimasta. (by 201 2018)

Sitoutumisajan alku

Ajanjaksoa, jonka aikana sementti hydratoituu ja betonimassa muuttuu kiinteäksi keinokiveksi, kutsutaan sitoutumiseksi. Sitoutumisajan alkaa tyypillisesti muutaman tunnin kuluessa betonin sekoittamisesta. Sitoutumisajan alulla on merkitystä mm. mahdolliseen kuljetusetaisyyteen sekä betonin tiivistämiseen ja jälkihoidon aloittamiseen. Betonin sitoutumisaikaa voidaan hallita seos- ja lisäaineilla.

Lujuudenkehitys

Betonirakenteen ja -rakentamisen kannalta voidaan betonin iästä nostaa kaksi merkittävää hetkeä: varhaislujuus (<14 d) ja standardilujuus (1,0f_{cd}, 28 d). Esitetyt iät saavutetaan N-luokan CEM I tai CEM II -sementeistä valmistetuilla seostamattomilla betoneilla. Betonin minimilujuus jäätymishetkellä (lämmittämisen lopettaminen) on 5,0 MPa, millä on vaikutusta lämmitysenergian kulutukseen ja kustannuksiin. Muotit puretaan yleensä, kun betonin lujuus on ~0,6f_{cd}. Muotinpurkulujuuden ajankohta vaikuttaa työmaan aikatauluun. Jännebetonirakenteissa betonin lujuuden on oltava jännittämishetkellä yleensä vähintään 0,8f_{cd}, mikä myös vaikuttaa työmaan kokonaisaikatauluun.



Kuva 2.1. Betonin skemaattinen lujuudenkehitys (sementtityyppi N)

Lujuudenkehitystä voidaan nopeuttaa tosiasiallisesti käyttämällä reaktiivisempia sideaineita (esim. rapid-sementtiä) tai lisäaineita, tai suhteellisesti käyttämällä korkeamman lujuusluokan betonia (esimerkiksi laakerien alusvaluissa). Jos lujuudenkehitys taas on hitaampaa (esim. suuri masuunikuonan osuus), on betonin lujuus mainituilla hetkillä pienempi. Esimerkiksi kahden kuukauden kohdalla saattaa tällaisen betonin lujuus olla kuitenkin huomattavasti ”tavallista” suurempi. Mainittakoon, että betoni jatkaa lujittumistaan loputtomiin, . Kuten kuvasta 2.3 voidaan huomata. Vuoden ikäisen betonin lujuus on luokkaa $1,2f_{cd}$ (sementtityyppi N).

Lämmönkehitys

Sementin hydratoitumisreaktio on eksoterminen, eli siitä syntyy lämpöä. Rakenteen mittasuhteista ja ympäristön lämpötilasta riippuen rakenteen ulkopinnan ja keskiosan väliin saattaa syntyä merkittäviäkin lämpötilaeroja, joiden vuoksi betoni halkeilee. Massiivisissa valuissa, kuten siltojen betonikansissa, pyritäänkin betonin lämmönkehitystä rajoittamaan. Lämpö syntyy myös muissa betonin sitoutumisvaiheen reaktioissa, esimerkiksi korvaavien sideaineiden pozzolaanisissa reaktioissa. Monien sideaineiden reaktiot tuottavat kuitenkin vähemmän lämpöä kuin hydratoituminen. (by 201 2018)

Pakkas-sulamisrasitus

Betoni kestää pakkasta melko hyvin. Kuitenkin huokosissa jäätyvä vesi paisuu ja rikkoo näin ollen betonikiveä. Tätä rasitusta pyritään ehkäisemään betonin huokosrakenteen optimoinnilla. Pienet suojahuokokset eivät itsessään täyty vedellä, mutta mahdollistavat jäätyvän veden laajenemisen betonin rikkoutumatta. (by 201 2018)

Kloridirasitus

Betoni suojaa raudotteita. Jos betonirakenne sijaitsee esimerkiksi suolatun tien lähellä, kohdistuu sen pintaan klorideita. Kloridit voivat kulkeutua betonin ilmahuokosten kautta raudotteisiin, jotka alkavat niiden johdosta korrodoitua. Kloroidien kulkeutuminen betonissa riippuu vahvasti betonin huokosrakenteesta. (by 201 2018)

Alkalikiviainesreaktio

Alkalikiviainesreaktio (AKR, engl. AAR) vaatii syntyäkseen reagoivan kiviaineen, riittävän suuren alkalipitoisuuden ja riittävän lämpötilan. Myös osa Suomessa käytettävistä kiviaineksista ovat reagoivia. Matalien lämpötilojen vuoksi AKR:n alkaa Suomessa yleensä vasta 20...40 vuoden ikäisillä rakenteilla.

Aggressiivinen kemiallinen rasitus

Emäksinen betoni ei kestä kovin hyvin happoja, sillä ne muuttavat sementtikiven kalsiumyhdisteet vastaaviksi kalsiumsuoloiksi, jotka voivat poistua betonista liukenemalla. Lähes kaikki epäorgaaniset hapot syövyttävät betonia. Heikot liuokset syövyttävät pääasiassa kalsiumhydroksidia $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mutta vahvat liuokset syövyttävät koko sementtikiveä. Aggressiivisia happoja vastaan betoni on suojattava haponkestävällä pinnoitteella. Pienempiä happomääriä vastaan riittävät myös SR-sementit. (by 201 2018)

Rikkihappo aiheuttaa betoniin joutuessaan lisäksi betonin paisumisvaurioita, sillä sen reaktiotuotteet ovat sulfaatteja. Pohja-, pinta- tai teollisuusvedet voivat myös itsessään sisältää sulfideja. Meriveden kloridit voivat suurimmaksi osaksi ehkäistä sen sisältämien sulfaattien vauriot. Sulfaatit kulkeutuvat betonin sisälle huokosrakennetta pitkin ja reagoivat sen sisältämän trikalsiumaluminaatin C_3A ja muiden reaktiotuotteiden kanssa. Reaktiot aiheuttavat massan paisumista, mikä johtaa betonin rapautumiseen. (by 201 2018)

Sementtikiven huokosrakenne vaikuttaa sekä happojen että sulfaattien kulkeutumiseen. Periaatteessa aineiden kulkeutuminen on sitä vähäisempää, mitä tiiviimpää betoni on. Ajan kanssa haitalliset aineet kuitenkin yleensä pääsevät betonin sisälle. Sulfaatit reagoivat erityisesti C_3A :n kanssa, joten niiden aiheuttamia haittoja voidaan ehkäistä rajoittamalla niiden pitoisuutta sementissä. Myös eri seosaineiden käytöllä on vaikutuksia betonin sulfaatinkestävyyteen.

Vesitiiveys

Betonirakenteelta vaaditaan vesitiiveyttä esimerkiksi padoissa ja kaivoissa. Vesitiiveyden saavuttamiseksi betonimassan on oltava riittävän tiivistä ja rakenne on täytettävä ja jälkikäsiteltävä huolellisesti.

Karbonatisoituminen

Emäksinen betoni suojaa raudotteita korroosiota vastaan. Jos betoni kuitenkin karbonatisoituu, häviää raudotteita suojaava vaikutus. Karbonatisoituminen on hydratoitumiselle käänteinen reaktio, jossa hiilidioksidi kiinnittyy sementtikiven kalsiumtuotteisiin. Karbonatisoituminen lujentaa betonia. Betonin karbonatisoitumisen aiheuttavaa hiilidioksidin sitoutumista pyritään myös hyödyntämään betonin päästöjen vähentämisessä sekä paperilla (esim. olemassa olevan rakennuskannan hiilensidontaa laskemalla) että tosiasiallisesti (esimerkiksi jauhamalla betonimurska pienemmäksi ja jättämällä se kosketuksiin ilman kanssa ennen sen väylänpohjina).

2.2.3 Standardit ja ohjeet

Seuraavaksi esitetään betonin osa-aineisiin sekä betonin valmistukseen liittyvät EN-standardit. Betonin **lisäaineita** käsitellään standardissa *SFS-EN 934-2 Betonin, laastin ja injektointilaastin lisäaineet. Osa 2: Betonin lisäaineet. Määritelmät, vaatimukset, vaatimustenmukaisuus ja merkintä*. Betonissa käytettävän **veden** vaatimukset esitetään standardissa *SFS-EN 1008 Betonin valmistukseen käytettävä vesi. Näytteenotto, testaus ja veden soveltuvuuden arviointi betonin valmistukseen, mukaan lukien betoniteollisuuden prosesseista talteen otettu vesi*. Betoniin lisättäviä **teras- ja polymeerikuituja** käsitellään standardeissa *SFS-EN 14889-1 Fibres for concrete. Part 1: Steel fibres. Definitions, specifications and conformity* ja *14889-2 Fibres for concrete. Part 2: Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity*.

Sementtiä käsittelevässä standardissa *SFS-EN 197-1 Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus* esitetyt tavalliset sementit on jaettu sementin koostumuksen perusteella viiteen luokkaan CEM I ... CEM V. CEM I -sementissä klinkkerin osuus on 95...100 %. Finnsementin CEM I -sementissä on 95 % klinkkeriä ja 5 % kipsiä. Niitä käytetään nykyään käytännössä vain elementtiteollisuudessa ja sulfaatinkestävyyttä vaativissa paikallavalukohteissa. Suomessa valmistetaan tällä hetkellä CEM I ja CEM II -sementtejä. Myös CEM III -sementtien valmistus on aloitettu, mutta täysi tuotantokapasiteetti vasta kesällä 2022 (Finnsementti 2021a). Maahantuotua CEM III -sementtiä on jo alettu käyttää osana vähähiilisten betonien valmistamista myös Suomessa.

CEM II/A -sementeissä sideaineesta 6...20 % on korvattu masuunikuonalla, silikalla, pozzolaaneilla, lentotuhkalla tai kalkkikivellä. CEM II/B -sementissä vastaava korvausosuus on 21...35 %. Silikan osuus on rajoitettu kaikilla CEM-sementeillä 10 prosenttiin.

CEM III -sementeissä masuunikuonan korvausosuus on 36...100 %. CEM IV -sementissä 11...55 % on korvattu silikan, pozzolaanien tai lentotuhkien yhdistelmällä. CEM V -seossementeissä masuunikuonalla ja pozzolaaneilla tai silikaattipitoisilla lentotuhilla korvataan 36...60 % klinkkeristä.

Sementit on jaettu kolmeen standardilujuusluokkaan niiden 28 päivän iässä määritetyn puristuslujuuden [MPa] mukaan: 32,5, 42,5 ja 52,5. Nämä luokat on edelleen jaettu kolmeen varhaislujuusluokkaan: normaali varhaislujuus N, korkea varhaislujuus R ja alhainen varhaislujuus L. Luokka L koskee ainoastaan CEM III -sementtejä. Sitoutumisajan alun alarajan määrää sementin standardilujuusluokka.

Sementin sulfaatinkestävyys on ilmoitettava sementin nimessä SR-merkinnällä. SR-sementit voivat olla tyyppiä CEM I, CEM III tai CEM IV. Seostamattomia sulfaatinkestäviä sementtejä on kolme, CEM I-SR 0/3/5, jossa arabialainen numero ilmoittaa klinkkerin suurimman sallitun trikaesiumaluminaattipitoisuuden prosentteina. Käytettäessä lentotuhkaa tai luonnon pozzolaaneja sisältäviä CEM IV/A-SR ja IV/B-SR -sementtejä on klinkkerin suurin sallittu C₃A-pitoisuus 9 prosenttia. Sulfaatinkestävillä masuuni-kuonasementteillä CEM III/B-SR ja III/C-SR ei ole erillistä vaatimusta klinkkerin C₃A-pitoisuudelle.

Betonin **kiviaineksia** käsitellään standardissa *SFS-EN 12620 Betonikiviainekset*. Standardissa erotellaan erikseen luonnonkiviaineet (kaivetut sekä murskatut) ja uusiokiviainekset. Uusiokiviaineksia voidaan käyttää korvaamaan karkeaa kiviainesta. Karkea kiviaines (yli 2/4 mm) muodostaa yleensä suurimman osan kiviaineksen ja betonin massasta. Kiviaineksen yksikköpäästö sekä osuus betonin kokonaispäästöistä on kuitenkin varsin pieni. Uusiokiviaineksen käytöllä voidaan vaikuttaa ennemmin uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymiseen ja luonnon monimuotoisuuden säilymiseen kuin betonin päästöihin.

Standardissa SFS-EN 12620 käytettäväksi hyväksyttyjä uusiokiviaineksien osa-aineita ovat:

- betoni, betonituotteet, laasti, betoniharkot (Rc)
- sitomaton kiviaines, luonnonkivi, hydraulisesti sidottu kiviaines (Ru)
- poltetut tiilet, kalkkiahiekkatiilet ja -harkot, kellumaton vaahbetoni (Rb)
- bitumiset materiaalit (Ra)
- koheesiomaat ja sekalaiset materiaalit kuten metallit, muovi, kumi (X)
- lasi (Rg)

Betoni määritellään standardissa *SFS-EN 206 Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus*. Standardia sovelletaan Suomessa standardin *SFS 7022 Betoni. SFS-EN 206 käyttö Suomessa* mukaisesti.

Betonin valmistuksessa on perinteisesti käytetty sementin lisäksi seosaineita parantamaan niin tuoreen kuin kovettuneenkin betonin ominaisuuksia. Seosaineet ovat hienojakoisia epäorgaanisia materiaaleja, ja ne on jaettu standardissa SFS-EN 206 kahteen luokkaan. Tyypin I seosaineet ovat reagoimattomia tai lähes reagoimattomia aineita. Tyypin II seosaineet ovat pozzolaanisia tai piilevästi hydraulisesti aktiivisia aineita. Määriteltyjen yleisesti soveltuvien seosaineiden lisäksi on mahdollista käyttää myös muita soveltuvaksi osoitettuja aineita. Soveltuvuus voidaan osoittaa joko eurooppalaisella standardilla tai tuotehyväksynnällä, tai paikallisten säännösten mukaisesti. (SFS-EN 206)

Standardissa SFS-EN 206 esitettyjä tyypin II seosaineita tai muita sementtiä korvaavia sideaineita voidaan käyttää joko korvaamaan päästöintensiivistä klinkkeriä suoraan sementissä tai sementtiä betoniseoksessa. Tällöin voidaan puhua esimerkiksi muita sideaineita (*supplementary cementitious materials, SCM*) sisältävästä betonista erotuksena tavalliseen betoniin (kansainvälisessä kirjallisuudessa usein *ordinary portland cement concrete, OPC*). Tässä esityksessä näistä aineista käytetään nimitystä seosaine.

Standardissa SFS-EN 206 esitetään myös betonin olosuhdeluokat, joiden avulla välitetään rakennuspaikan olosuhdevaatimukset suunnitelmista betoniasemalle. X0-luokassa korroosion tai kemiallisen rasituksen riski on olematon. Luokka koskee käytännössä vain hyvin kuivissa sisätiloissa olevia rakenteita, joten ko. luokan betonia ei lähtökohtaisesti voi käyttää infrarakenteissa.

Kosteuden ja kosteudenvaihtelun rasittamat rakenteet voivat alkaa karbonatisoitua, jolloin betonin emäksisyys vähenee, eikä se enää suojaa teräksiä. Kosteusrasitukset on standardissa jaettu neljään XC-luokkaan.

Kloridien päätyminen raudoitteisiin aloittaa niiden korrodoitumisen. Kloridirasitukset on jaettu meriveden aiheuttamiin XS1...XS3 ja muun kuin meriveden aiheuttamiin XD1...XD3.

Kostean betonin jäätymissulamisasitus nostaa riskiä betonin halkeilulle, jolloin raudoitteet saattavat olla ilmakosketuksessa. Kohtuullisen kosteat, jäätymissulamisasitusvaihtelun alaiset rakenteet luokitellaan joko luokkiin XF1 tai XF2, riippuen käytetäänkö jäänestoaineita. Vastaavasti erittäin kosteat rakenteet jaetaan luokkiin XF3 ja XF4.

Sulfidit ja muut rakennetta ympäröivän maan tai pohjaveden kemialliset rasitukset vaikuttavat betonin pitkäaikaiskestävyyteen. Maan aggressiivisuuden suhteen betonit jaetaan kolmeen luokkaan: vähäisesti aggressiiviset XA1, kohtuullisen aggressiiviset XA2 ja hyvin aggressiiviset XA3. Riittävä sulfaatinkestävyys voidaan saavuttaa korvaamalla vähintään 70 % sideaineesta masuunikuonalla.

Sementin valintaan vaikuttavat tekijät: (SFS-EN 206)

- betonityön toteuttaminen
- betonin suunniteltu käyttö
- jälkihoito-olosuhteet (esim. lämpökäsittely)
- lämmönkehitys (rakenteen mitat)
- ympäristörasitukset
- kiviaineksen mahdollinen reagointi osa-aineiden alkalisten aineiden kanssa

Taulukko 2.1. Enimmäismäärät, joilla normaalipainoiset karkeat luonnokiviainekset voidaan korvata (painoprosenttiyksikköä). (SFS-EN 206)

Taulukko E.2 Enimmäismäärät, joilla normaalipainoiset karkeat luonnokiviainekset voidaan korvata (painoprosenttiyksikköä)

Kierrätyskiviainestyyppi	Rasitusluokat			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Kaikki muut rasitusluokat ^a
Tyyppi A: (Rc90, Rcu95, Rb10-, Ra1-, FL2-, XRG1-)	50 %	30 %	30 %	0 %
Tyyppi B ^b : (Rc50, Rcu70, Rb30-, Ra5-, FL2-, XRG2-)	50 %	20 %	0 %	0 %

^a Tunnetusta lähteestä peräisin olevia tyyppi A kierrätyskiviaineita voidaan käyttää samoissa rasitusluokissa, joihin alkuperäinen betoni on suunniteltu, kun karkeita luonnokiviaineita korvataan enintään 30 prosenttiyksiköllä.

^b Tyyppi B kierrätyskiviaineita ei saa käyttää betoneissa, joiden lujuusluokka on > C30/37.

HUOM. Kierrätyskiviainesten alkali-piidioksidireaktion riski, ks. standardin EN 12620:2002+A1:2008 kohta G.3.2.

Nykystandardeilla ulkorakenteiden betonin karkeasta kiviaineksesta voidaan enintään 30 % korvata uusiokiviaineksella (taulukko 2.1).

Betonin suhteituksessa eri seosaineiden reaktiivisuus otetaan huomioon seosainekertoimella eli k-arvolla. Suhteituksessa k-kerrointa hyödynnetään sideaineen kokonaismäärän määrittelyssä niin, että sideaineen laskennallinen massa on $\sum (k_i \cdot m_i)$, missä k_i on materiaalin i seosainekerroin ja m_i sen massa. CEM-sementtien sideainekerroin on 1,0.

Standardissa SFS-EN 206 esitetään kolme yleisesti soveltuvaa tyyppi II seosainetta: lentotuhka (hiilen polton), silika (piin valmistuksen) ja masuunikuona (teräksen valmistuksen). Edellä mainitut ovat teollisuuden sivuvirtoja, joten niiden päästöt ovat merkittävästi klinkkerisementin päästöjä pienemmät. Esimerkiksi masuunikuonan päästö on noin 55 CO₂ekv-kg/tonni, joka johtuu pääasiassa masuunikuonan hienommaksi jauhamisesta ja kuljetuksista. Tässä työssä tällaisia seosaineita kutsutaan *seosaineiksi*, riippumatta sekoitetaanko ne betoniin vai sementtiin.

SFS-EN 206 liitteessä D esitetään lisävaatimukset seuraavissa pohjarakenteissa käytettäville betoneille (suluissa rakennetta koskeva standardi):

- kaivettavat paalut (SFS-EN 1536)
- kaivantoseinät (SFS-EN 1538)

- maata syrjäyttävät paalut (SFS-EN 12699)
- pienpaalut (SFS-EN 14199)

Edellä mainittuja pohjarakenteita ei käsitellä tämän työn puitteissa.

Väyläviraston *Infrabetonien valmistus* -ohjeessa (2020) on kuvattu taitorakenteiden infrabetoneilta vaadittavat ominaisuudet ja esitetty rajoituksia ja ehtoja eri osa-aineille. Ohje tuli voimaan 1.1.2021 ja sen soveltamisessa on vuoden siirtymäaika. 1.1.2021 alkaen kaiken Väyläviraston hankkeisiin toimitettavan betonin on oltava uuden ohjeen mukaista. Ohjetta on noudatettava niin valmisbetoniasemilla kuin elementtitehtailla. Ohjeessa esitetään kuusi suositeltua infrabetonilaatua:

C30/37 P0 ja P30

C35/45 P0, P30 ja P50

C45/55 P50.

Väylän ohjeen mukaan sementin kalkkikivipitoisuus saa olla enintään 20 % ja kalkkikivifillerin seosainekerroin sekä sementissä että seosaineena on 0,0. Lentotuhkaa ei saa käyttää C45/55 tai korkeampi lujuuksisen betonin osa-aineena. Suomessa valtaosa betonirakenteista toteutetaan tätä pienemmän lujuuden omaavilla betoneilla. Esimerkiksi tiukassa aikataulussa rakennettavassa jännitetyssä rakenteessa tai laakerienvaihdon yhteydessä laakerialustassa saatetaan kuitenkin käyttää lujempaa betonia, jotta vaadittu lujuus saavutetaan ennen rakenteen rasittamista. Elementtirakenteissa on yleistä käyttää C45/55 tai lujempaa betonia.

Käytettävän kiviaineksen on oltava SFS-EN 12620 mukaista ja sen tulee olla CE-merkittyä. CE-merkitsemätöntä omaa kiviainesta saa käyttää, jos laadunvarmistus on vastaavan tasoinen. Uusiokiviaineksen käyttöä ei ole erikseen kielletty.

Väyläviraston Infrabetonien valmistus -ohjeen mukaan sideaineen kokonaismäärän on oltava vähintään 300 kg/m³. Mikäli betoniasemalla lisätään masuunikuonaa yli 35% sideaineen kokonaismäärästä, on kokonaismäärän oltava vähintään 350 kg/m³.

Sulfaattirasitetuissa kohteissa CEM I SR 0 tai SR 3 -sementtiin lisätään tiiviyn parantamiseksi silikaa 3...5 % kokonaismäärästä. Silikaa saa olla yhteensä enintään 5%. Jos vesi-sideainesuhde (v/s-suhde) <0,35, saa silikaa olla 7% sideaineen kokonaismäärästä. Käytettäessä CEM II/A-D -sementtiä on huomioitava em. raja tai lisättävä CEM I -sementtiä niin paljon, että ehto toteutuu.

Lentotuhkaa saa olla betonissa ja sementissä yhteensä korkeintaan 25 % sideaineen kokonaismäärästä.

Masuunikuonaa saa huokostetuilla olla korkeintaan 50 % ja huokostamattomilla korkeintaan 70 % sideaineen kokonaismäärästä. Jos myös muita kuin masuunikuonaa, vähennetään masuunikuonaa muiden seosaineiden määrällä.

Infrabetoneissa tulee käyttää vain erittäin epätodennäköisesti alkali-kiviainesreaktioivia luokan I (by 74) kiviaineksia.

2.2.4 Betonirakentaminen

Betonirakenteet valmistetaan joko työmaalla suoraan paikalleen (paikallavalu) tai tehtaissa (elementti). Paikallavalurakenteet ovat yleensä massiivisia, esimerkiksi siltoja tai tukimuureja. Elementtirakenteet taas käsittävät yleisesti ottaen pienempiä rakenteita, pihakivistä betonikaiteisiin. Myös betonisiltoja ja -tukimuureja voidaan tehdä elementtirakenteisina. Lisäksi osa betonirakenteista valmistetaan työmaalla, mutta siirretään paikalleen vasta valmiina, esim. ratasillat ja merirakenteet.

Paikallavalurakenteilla esimerkiksi betonin lujuudenkehityksellä on merkitystä työmaan aikataulutukseen. Paikallavaletun betonirakenteen jälkihoito toteutetaan joko muovilla peittämällä tai ruiskuttamalla betonin pintaan jälkihoitoainetta. Huomioon otettavia asioita ovat myös paikallavalurakenteiden muottien rakentaminen töineen ja tarvikkeineen. Muotit rakennetaan yleensä sahatavarasta tai puulevyistä. Muotissa käytetty sahatavara on käytännössä aina rakennusjätettä muottien purun jälkeen. Levyjä saatetaan käyttää uudestaan. Muottien tukirakenteissa käytetään joko sahatavaraa tai uudelleenkäytettäviä terästelaineita.

Paikallavalurakenteet ovat yleensä tanko- tai verkkoraudoitettuja, mutta esimerkiksi suurempia siltoja myös jälkijännitetään.

Elementtitehtaalla jälkihoito ja olosuhteet ovat paikallavalua helpommin hallittavissa. Jälkihoito toteutetaan yleensä joko lisäaineilla tai lämpökäsittelyllä. Toisaalta elementtitehtailla pyritään mahdollisimman nopeaan muottikiertoon, jolloin hitaammin lujittuvia betoneita käytettäessä tuotteen hinta saattaa nousta. Elementtien muotit käytetään pääosin useaan kertaan. Elementit ovat yleensä tanko-, kierre- tai jänneraudoitettuja. Myös pienempien elementtien jännittäminen on kustannustehokasta elementtitehtaalla, koska jännityskalustoa ei tarvitse siirtää rakennuspaikalle.

Paikallavalurakenteissa betoni ja käytettävä rauditus kuljetetaan paikanpäälle erikseen, mistä aiheutuu päästöjä. Myös elementtien kuljettamisesta ja asentamisesta aiheutuu päästöjä. Logistiikasta aiheutuvien päästöjen eroista eri rakentamistavoilla ei ole Suomessa tehty selvitystä. Eri kuljetusvälineille on kuitenkin julkaistu päästöarvoja (esim. LIPASTO). Teräsbetonirakenteen massasta pääosa on kuitenkin betonia. Betoniasemien määrä on huomattavasti elementtitehtaiden määrää suurempi, ja asemia on tehtaita tiheämmässä. Toisaalta työmaa-aikataulua on mahdollista lyhentää elementtejä käyttämällä, jolloin kustannus- ja päästösäästöjä voidaan saavuttaa esimerkiksi vaihtoehtoisten liikennejärjestelyjen ajallisen vaikuttavuuden vähentyessä. Aikataululla on vaikutusta myös työmaan yleiskustannuksiin ja jossain määrin niihin liittyviin päästöihin.

Betonirakenteen valuolosuhteet on otettava huomioon. Esimerkiksi talvella paikallavalettavia rakenteita voidaan joutua lämmittämään sähköllä tai öljyllä, jolloin elementtien käyttäminen voi olla mielekästä sekä kustannusten että päästöjen kannalta. Kesähelteillä valu voi viivästyä, jotta vältytään liian suurilta hydratoitumislämpötiloilta. Myös sateet voivat vaikuttaa työmaan valuaikatauluihin. Toisaalta suurten ja raskaasti kuormitettujen betonirakenteiden rakentaminen elementeistä tuo mukanaan esimerkiksi vedeneristykseen ja taipumaeroihin liittyviä ongelmia.

2.3 Betonin päästöt ja päästövähennyspotentiali

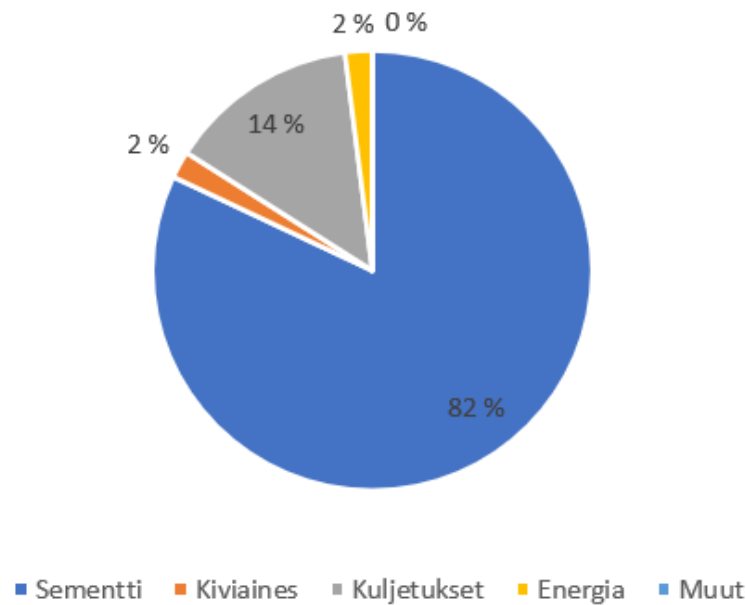
Tässä luvussa esitetyt päästöt sisältävät elinkaariarvioinnin informaatiomoduuleiden A1...A3 päästöt ("kehdosta tehtaan portille"), ellei muuta ole mainittu.

Maapallon päästöistä noin 7 % aiheutuu betonin ja sementin valmistuksesta. Suomessa vastaava osuus on RT:n mukaan 1,5 %. Suomen ainoan sementtivalmistajan Finnsementin mukaan pelkkä sementtiteollisuus aiheuttaa 1,8 prosenttia Suomen päästöistä (Finnsementti 2021). Kun tämä luku jaetaan sementin suuripiirteisellä osuudella betonin päästöistä saadaan $1,8 \% / 80 \% = 2,25 \%$. Voidaan siis olettaa, että noin kaksi prosenttia Suomen ilmastopäästöistä aiheutuu betonin ja sen osa-aineiden valmistuksesta. Luvun merkityksestä voidaan kiistellä (esim. betonirakenteiden osuus rakennetun ympäristön päästöistä), mutta nykytilanteessa on kuitenkin syytä vähentää päästöjä kaikkialla.

Betonin päästöt A1...A3 ("kehdosta tehtaan portille") ovat Suomessa luokkaa 100...160 CO₂ekv/kg/tonni. Valtaosa betonin päästöistä (kuva 2.1) aiheutuu sideaineista (82 %). Lisäksi betonin osa-aineista kiviaineksella on pienempi merkitys päästöihin (n. 2 %). Kiviaineksen korvaaminen uusiokiviaineksella vaikuttaa päästöjen lisäksi uusiutumattomien luonnonvarojen kulumiseen (*abiotic depletion potential, ADP*).

Betonissa käytettävien lisäaineiden ja veden osuus päästöistä on käytännössä katsoen olematon. Vaikka yleisten lisäaineiden yksikköpäästöt voivatkin olla klinkkerin päästöjä suurempia, käytetään lisäaineita betonissa vain noin yksi massaprosentti. Suomessa vedellä ei katsota olevan merkitseviä ilmastopäästöjä.

Betonin C30/37 päästöt A1...A3



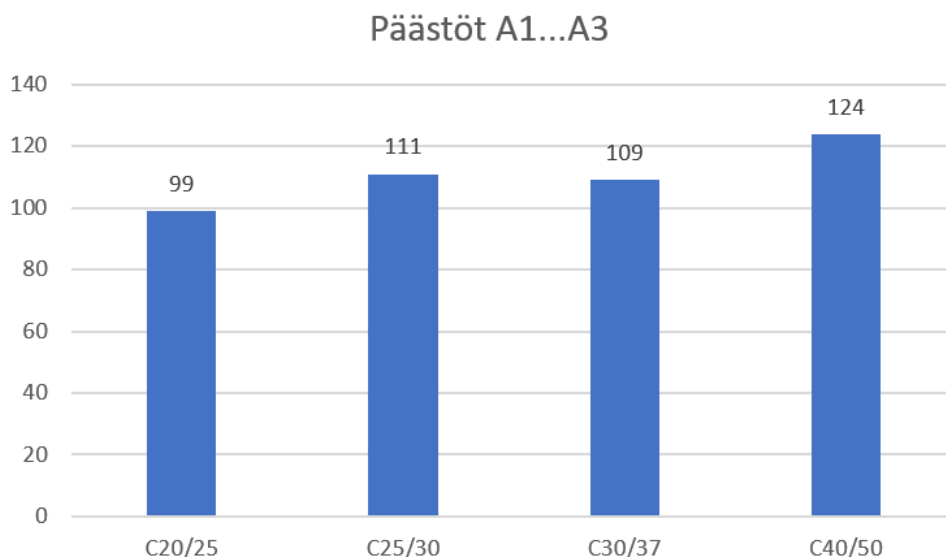
Kuva 2.2. Betonin C30/37 päästöjen jakautuminen osa-aineiden mukaan (yleinen ympäristöseloste, Betoniteollisuus 2021)

Betonin lisäksi teräsbetonirakenteissa käytettävä teräs on päästöintensiivinen materiaali. Esimerkiksi laattasillassa terästä on luokkaa 120 kg betonikuutiota kohden. Tästä aiheutuu lisäpäästöjä noin 70 CO₂ekv-kg/betonikuutio, eli 27 CO₂ekv-kg/betonitonni.

Käyttöikänsä lopussa betonirakenne puretaan. Talteen saatava teräs päätyy kiertoon korvaamaan malmipohjaista terästä. Betoni yleensä murskataan ja käytetään infrarakentamisessa uusiokiviaineena esimerkiksi täytöissä ja tien pohjissa. Vaihtoehtoisesti hyväkuntoinen betonirakenne tai sen osia voidaan tai voitaisiin käyttää uudelleen toisessa kohteessa sellaisenaan tai muokattuna.

YM:n päästötietokannasta (www.co2data.fi) löytyy tällä hetkellä viiden normaalilujuusbetonin yleiset päästöarvot. Arvot pohjautuvat Betoniteollisuuden tekemiin talonrakennuksessa yleisesti käytettävien valmisbetonien yleisiin ympäristöselosteisiin. Varsinaisille infrabetoneille ei ole vielä tehty vastaavia tarkasteluja. Betoniyhdistyksellä on työn alla betonien vähähiilisyyden luokitteluohje, jonka yhteydessä arvioidaan luultavasti myös joitain infrabetoneja. Työn ensimmäiset tulokset on tarkoitus julkaista loppuvuodesta 2021.

Betonin kiviaineen lujuus on Suomessa huomattavasti sementtikiven lujuutta suurempaa. Betonin lujuuteen vaikuttavat käytetyt sideaineet, v/s-suhde, betonin tiivistys sekä jälkihoito. Periaatteessa lujempi betoni aiheuttaa suuremmat päästöt, kun sideaine pysyy samana. Etenkin yleisessä ympäristöselosteessa ilmoitettu arvo voi poiketa tästä periaatteesta, kuten kuvassa 2.2 esitetyistä co2data.fi:n arvoista voidaan huomata. On syytä huomata, että betonin päästöissä on myös valmistajakohtaisia eroja.



Kuva 2.3. Lujuusluokan vaikutus betonin valmistuspäästöihin, yksikkö CO₂ekv/kg/tonni (co2data.fi)

Betonin karbonatisoituaessa ilman hiilidioksidi reagoi sementtikiven kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia. Reaktio vaatii riittävän kosteuden, joka yleensä toteutuu ulkorakenteilla Suomessa. Karbonatisoitunut betoni ei enää suojaa raudotteita korroosiolta. Karbonatisaation kautta betoniin on mahdollista sitoutua jopa yli puolet sen klinkkerisementin valmistuksen aiheuttamista päästöistä (ns. prosessipäästöjen osuus). Sidotun hiilidioksidin määrään ja sitoutumisnopeuteen vaikuttavat betonimurskan hienous (=pinta-ala) ja aika, jonka betoni on kosketuksissa ilman kanssa. Esimerkiksi suoraan maataytöksi päätyvä murska ei välttämättä ehdi sitoa mainittavia määriä hiilidioksidia.

2.3.1 Sementti ja muut sideaineet

Sementti aiheuttaa valtaosan betonin päästöistä. Sementin likimääräinen massaosuus seostamattomasta betonista on 10...15 % ja päästöistä 70...80 %. Eurooppalaisten sementtivalmistajien järjestön CEMBUREAU:n mukaan sen jäsenten sementtien keskimääräinen päästö vuonna 2017 oli 667 CO₂ekv/kg/tonni. Sementin keskimääräinen päästö on myös Suomessa luokkaa 600...700 CO₂ekv/kg/tonni.

Klinkkerin valmistuksessa noin kaksi viidesosaa aiheutuu polttouunin lämmittämisestä (nykyään pääosin fossiilisilla polttoaineilla) ja loput kolme viidesosaa päästöistä on ns. *prosessipäästöjä*. Prosessipäästöillä tarkoitetaan päästöjä, jotka syntyvät kalkkikiven kalsinoituessa. Tässä karbonatisoitumiselle käänteisessä reaktiossa vapautuu hiilidioksidia. Prosessin lopputuloksena klinkkeri saavuttaa siltä toivotut hydratoitumisominaisuudet. (Finnsementti 2020; CEMBUREAU 2020)

Suomessa valmistettavien CEM I ja CEM II -sementtien päästöjen vaihteluväli on noin 626...1100 CO₂ekv/kg/tonni (Finnsementti 2021). CEM III -sementin päästö on luokkaa 250 CO₂ekv/kg/tonni.

Euroopan sementtituottajien järjestö CEMBUREAU pyrkii sementin koko arvoketjussa hiilineutraaliuteen vuoteen 2050 mennessä. Välitavoitteena on 40 % päästövähennys arvoketjussa vuoden 1990 sementin päästöistä vuoteen 2030 mennessä. Arvoketju alkaa klinkkerin poltosta ja päättyy valmiin rakenteen purkamiseen ja materiaalien kierrätykseen. Esitetyn tiekartan viisi pääkohtaa ovat klinkkeri, sementti, betoni, rakentaminen ja karbonatisoituminen (engl. 5C).

CEMBUREAU:n alaisten toimijoiden sementin suhteelliset päästöt olivat 783 CO₂ekv/kg/t vuonna 1990. Koko arvoketjussa mitattavat tavoitteet ovat 472 CO₂ekv/kg/t vuoteen 2030 ja 0 CO₂ekv/kg/t vuoteen 2050 mennessä. Vuosina 1990-2017 arvoketjun suhteelliset päästöt ovat vähentyneet 116 CO₂ekv/kg/t. Järjestön täysjäseniä ovat melkein kaikkien EU-maiden sekä Britannian, Norjan, Sveitsin ja Turkin sementtiteollisuus.

Klinkkerin valmistusprosessissa päästöjä pyritään vähentämään 440 CO₂ekv-kg/t vuoden 2017 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Merkittävä 280 CO₂ekv-kg/t osuus vähennyksestä on tarkoitus saavuttaa hiilidioksidin talteenotolla, säilytyksellä ja hyödyntämisellä. (CEMBUREAU 2020)

Koska klinkkerisementti on varsin energia- ja päästöintensiivinen sideaine, voidaan betonin päästöjä vähentää käyttämällä seosaineita. Masuunikuonan päästöt ovat noin 55 ja lentotuhkien alle kymmenen CO₂ekv-kg/tonni.

Hiilenpolton sivuvirtana muodostuvia **lentotuhkia** on 1960-luvulta käytetty laajasti betonin sideaineena ja fillerinä. Niiden käyttö on perustunut ennenkaikkea niiden lujuutta ja tuoreen betonimassan työstettävyyttä parantaviin ominaisuuksiin. Lentotuhkat ovat hiilen poltossa savukaasujen mukana nousevia hienoja partikkeleita. Aiemmin niiden annettiin päätyä ilmakehään, mistä aiheutui sakeaa savusumua teollisuusalueille. Nykyään lentotuhkat on suodatettava ja kerättävä kaasuista.

Käytettävät lentotuhkat sisältävät huomattavia määriä silikaatteja tai kalkkia. Yleisesti ottaen jalommat hiilet (hiilipitoisuus noin tai yli puolet) tuottavat silikaattipitoisia (V) ja vähäpitoisemmat hiilet kalkkipitoisia (W) lentotuhkia. Lentotuhkat ovat pozzolaanisia, eivätkä ne siis aktivoidu betonissa ilman sementin hydrataatiotuotteita. Kalkkipitoiset tuhkat voivat lisäksi olla piilevästi hydratoituvia. Lentotuhkan sisältämän palamattoman hiilen liiallinen määrä voi vaikuttaa joidenkin lisäaineiden, kuten huokostimien, toimintaan. Lentotuhka jaetaan luokkiin A...C niiden hehkutushäviön (5,0...9,0 p-%) mukaan.

Edellinen jaottelu vastaa standardin SFS-EN 197 jaottelua sementtiin lisättävistä lentotuhkista. Sementin seosaineena on mahdollista käyttää sekä V että W tuhkia, mutta kaikkien sementtiin lisättävien lentotuhkien on oltava peräisin vain hiilen poltosta. (SFS-EN 197-1)

Nykyisellään betoniin lisättävänä seosaineena voidaan käyttää vain silikaattipitoisia lentotuhkia (SFS-EN 206). Betonin seosaineena käytettävää lentotuhkaa voidaan kerätä joko prosessista, jossa poltetaan hiiltä yksinään tai yhdessä oheispolttoaineiden kanssa. (de Belie et al. 2018) Oheispolttoaineita käytettäessä tulee tuottajan osoittaa lentotuhkan käyttökelpoisuus. Euroopassa hyväksyttyjä oheispolttoainelajeja on kuusi: (SFS-EN 450-1)

1. Kiinteät biopolttoaineet, pl. jätepuu
2. Eläinten liha- tai luujauho
3. Yhdyskuntajätevesiliete
4. Paperiliete
5. Petrolikoksi
6. Näennäisesti tuhkattomat neste- ja kaasupolttoaineet

Hiilivoimaloiden vähentyessä etenkin Länsi-Euroopassa lentotuhkan tuotantomäärät eivät vastaa betoniteollisuuden kysyntää. (de Belie et al. 2018) On esitetty, että puunpolton yhteydessä suodatettavia puutuhkia voitaisiin käyttää korvaamaan lentotuhkaa. Yhdyskunta- tai teollisuusjätteitä ei saa käyttää seosaineena käytettävän lentotuhkan osapolttoaineina (SFS-EN 450-1). Nämä jätteet sisältävät vaihtelevissa määrin raskasmetalleja, joiden liukeneminen betonista ei ole hyvä asia betonin säilyvyyden eikä ympäristön kannalta.

Masuunikuonaa valmistetaan raudan valmistuksen alkuvaiheessa masuuniin muodostuneesta sulatteesta jäädyttämällä ja jauhamalla. Masuunikuonaa on käytetty sementin sidosaineena 1860-luvulta alkaen. Jauhettu masuunikuona notkistaa betonia ja sen avulla voidaan myös vähentää betonin lämmönkehitystä. Kuona vähentää betonimassan ilmapitoisuutta ja lisää kovettuneen betonin pitkäaikaisia muodonmuutoksia.

Masuunikuona on piilevästi aktiivinen seosaine, joka sisältää kalkkia, piidioksidia, alumiinioksidia sekä magnesiumoksidia. Kuonan kemialliseen koostumukseen vaikuttavat masuunissa käytetyt raaka- ja polttoaineet. Samasta masuunista peräisin olevien masuunikuonien koostumukset ovat kuitenkin keskenään samanlaisia, sillä pääprosessissa pyritään mahdollisimman tasalaatuisen raakaraudan valmistukseen.

Päätyessään tekemisiin veden kanssa masuunikuona hydratoituu rajallisesti, kunnes syntyy sitä suojaava, reaktiota hidastava vähäkalkkinen kalvo. Jos seoksessa on mukana myös aktivaattori ja sen pH on riittävän korkea, hydratoituminen kiihtyy. Betonin tapauksessa aktivaattori on

portlandinsementti, mutta myös muita emäksisiä aktivaattoreita voidaan käyttää. Kuonaa käytetään yleensä 20...80 prosenttia sideaineen kokonaismäärästä. Sitä voidaan käyttää korvaamaan klinkkeriä sementissä ja sementtiä betonissa. (de Belie et al. 2018)

Suomessa masuunikuonaa syntyy terästeollisuuden sivuvirroista tarpeeksi kotimaiseen betonituotantoon, mutta esimerkiksi Keski-Euroopassa sen määrä ei lähitulevaisuudessa välttämättä enää vastaa kasvavaa kysyntää. Onkin siis mahdollista, että kuonan markkinahinnat nousevat kysynnän kasvaessa. Myös terästeollisuuden sähköistyminen saattaa vaikuttaa kuonien saatavuuteen.

Piin valmistuksen sivuvirtana syntyvää **silikaa** käytetään betonin seosaineena ja hienona fillerinä. Sen suuren ominaispinta-alan ansiosta se lisää betonin lujuutta ja tiiveyttä. Silikaa on aiemmin käytetty esimerkiksi Norjassa runsaastikin korvaamaan sementtiä, mutta sen betonin ominaisuuksia parantavien vaikutusten vuoksi sen hinta on kohonnut viime vuosikymmeninä. Nykyisin silikaa käytetään haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi mahdollisimman pieniä määriä.

Monet suomalaiset betonivalmistajat ovat tuoneet markkinoille vähähiilisiä betoneja, joiden päästöjen mainostetaan olevan tavalliseen betoniin verrattuna 20...50 prosenttia pienemmät. Tavallista betonia ei varsinaisesti määritellä, mutta koska päästövähennys saavutetaan yleensä teollisuuden sivuvirtoja käyttämällä, on markkinoinnissa käytettävä verrokkibetoni todennäköisesti CEM I -sementtiin pohjautuva. Edelleen markkinoinnissa sanotaan, ettei 20 prosentin päästövähennys vaikuta merkittävästi betonin ominaisuuksiin.

Myös muita kuin standardissa esitettyjä seosaineita voidaan käyttää betonin valmistuksessa. Esimerkiksi kaoliniittipitoisista maa-aineksista valmistettavia **metakaoliineja** käytetään jo nykyisellään Ranskassa (de Belie et al 2018). Betoniyhdistyksen metakaoliini-työryhmä tutkii metakaoliinien käyttöön ottamista Suomessa. Metakaoliinin päästöt ovat varovaisesti arvioituna 200...700 CO₂ekv-kg/tonni. Uusiutuvaa energiaa käyttämällä ja hyvän hyötysuhteen polttouunilla voi olla mahdollista päästä jopa 100 CO₂ekv-kg/tonni. Ranskassa metakaoliinin suhteituksessa käytettävä k-arvo on 1, kun sitä on korkeintaan 15 % sementin massasta. Metakaoliineja voidaan valmistaa myös kaoliniittipitoisista sivuvirroista, esimerkiksi paperilietteestä (*paper sludge*).

Tällä hetkellä Suomessa valmistettavien vähähiilisten betonien päästöjä vähennetään pääasiassa käyttämällä masuunikuonaa runsaasti sisältäviä CEM III -sementtejä tai käyttämällä masuunikuonaa seosaineena betoniasemalla. Masuunikuonaa sisältävän betonin tavallista hitaampaa lämmönkehitystä on hyödynnetty jo vuosikymmeniä massiivisissa valukohteissa, kuten silloissa ja isoissa tukimuureissa. Kehitteillä on myös seosaineita, joilla masuunikuonabetonin lujuudenkehitystä saisi parannettua.

Myös useamman seosaineen yhdistelmää voidaan käyttää. Seosta, jossa käytetään klinkkerisementtiä ja kahta seosainetta, kutsutaan kirjallisuudessa termillä *ternary blend*. Vastaavasti sementtiä ja kolmea seosainetta sisältävää seosta kutsutaan termillä *quaternary blend*. Esimerkiksi Cyr et al. (2012) ovat tutkineet poltetun yhdyskunta- ja viemärijätteen sitomista betoniin metakaoliinin avulla. Tutkimuksessa onnistuttiin sitomaan pieni määrä (2,5 p-%) ongelmallista jätettä betoniin niin, ettei suotoliukenemista tapahtunut. Tutkijoiden mukaan tällaista betonia voitaisiin nykyään käyttää ei-kantavissa rakenteissa.

Täysin sementittömistä, betonin kaltaisista materiaaleista käytetään yleisnimitystä **geopolymeerit**. Niissä sideaineet ovat yleensä kokonaan tai pääosin muun teollisuuden sivuvirtoja, joten niillä voidaan saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä betoniin verrattuna. Esimerkiksi alkaliaktivoitu masuunikuona on geopolymeeri. Geopolymeerirakenteiden suunnitteluun ei ole Suomessa standardeja tai ohjeita. Geopolymeereja voitaisiin tällä hetkellä käyttää ei-kantavissa rakenteissa, kuten laattakiveyksissä.

Betonimurskeeseen on sen luonnollisen karbonatisoitumisen tehostamiseksi mahdollista sitoa hiilidioksidia myös erillisellä laitteistolla, jolloin voidaan puhua kiihdytetystä karbonatisoitumisesta. Myös betonin jälkihoitoa hiilidioksidilla on tutkittu (VTT 2019)

2.3.2 Kiviaines

Kaivetun luonnon kiviaineksen päästöt A1...A3 ovat luokkaa 4 CO₂ekv-kg/tonni ja murskatun 6 CO₂ekv-kg/tonni (CO₂data.fi). Uusiokiviaineksella vastaava päästö on luokkaa 0...1 CO₂ekv-kg/tonni. Kiviaineksen merkitys betonin päästöihin on todella pieni, vain noin 2 prosenttia. Uusiokiviainesbetoni onkin enemmän luonnonvara-/kiertotalousasia.

Helsingin kaupunki on jo organisoinut rakennushankkeiden kiviainesmassojen kulkua hankkeelta toiselle. Tästä kierrosta ylijäävien kiviainesmassojen hyödyntäminen betonin osa-aineena on mahdollista.

Myös betonimurskaa tai siitä puhdistamalla talteen otettua kiviainesta voidaan käyttää betonin osa-aineena. Myös betoniasemien betonijäämiä voidaan hyödyntää uusiokiviaineksena. Infrabetoneissa ja muissa SFS-EN 206 mukaisissa betoneissa voidaan karkeasta kiviaineksesta 30 % korvata uusiokiviaineksella, jonka alkuperä tiedetään. Ei-standardin mukaisissa käyttökohteissa, joissa betonilta ei vaadita merkittäviä lujuus- yms. ominaisuuksia, korvausosuus voi tutkimustiedon valossa olla suurempikin.

2.3.3 Betoniteräs

Hiiliteräksen päästö A1...A3 on 560 CO₂ekv-kg/tonni, kun ruostumattoman teräksen vastaava on 6,8 kertainen 3800 CO₂ekv-kg/tonni (co2data.fi). Toisaalta ruostumattoman teräksen tyypillinen lujuus on 600 MPa, mikä on 20 % tavallisen lujuutta 500 MPa enemmän. Kun lujuus huomioidaan, on ruostumattoman teräksen päästö noin 5,7 kertainen tavalliseen verrattuna. Lisäksi ruostumatonta terästä on saatavilla vain pienemmissä tankoko'oissa. Myös hintaero hiili- ja ruostumattoman teräksen välillä on merkittävä.

Celsa Steel Servicen Suomessa valmistamien hiiliteräsraudoitteiden päästö on 456 CO₂ekv-kg/tonni (Almemark 2020).

Teräskuidulla vastaava päästö on 771 CO₂ekv-kg/tonni (EPDNorge 2017, ITB 2017). Teräskuidun käyttöala on huomattavan rajoittunut. Teräskuiturakenteet suunnitellaan Suomessa ohjeen by 66 mukaan. Ohjeet työmaalle esitetään julkaisussa by 66a. Talonrakentamisessa pilarilaatoilla tarvitaan Eurokoodin mukainen jatkuvaa sortumista estävä kaistaraudoitus pilarilinoilla. Infrarakenteissa, esimerkiksi paalulaatoissa, ei kuitenkaan tarvita välttämättä ollenkaan raudoitetankoja.

Suomalainen teräskuiturakenteiden suunnitteluohje by 66 perustuu pitkälti ruotsalaiseen suunnitteluohjeeseen. Molemmat ohjeet ovat nykytiedon valossa huomattavasti varman puolella, mistä aiheutuu ylimääräisten kustannusten lisäksi myös ylimääräisiä päästöjä. Esimerkiksi kuitubetonilaattojen tapauksessa tulee rakenteen halkeilumomenttikapasiteetti rajoittaa 80 prosenttiin.

Kuitubetonirakenteen suunnitelmissa esitetään betonin tietojen perässä suunnittelussa käytetty kuitubetonin taivutusvetolujuus ja luokka. Jotta taivutusvetolujuus olisi 4/4,4 Mpa, täytyy kuituterästen annostus olla noin 40 kg/m³. Taivutusvetolujuudella 5/5,5 Mpa valmistajan ohjeistus on 50 kg/m³ annostus, jota ei enää tulisi massan työstettävyyden nimissä nostaa. Kuituvalmistaja ArcelorMittalin mukaan edellä mainitut annostukset ovat riittäviä, mutta betoniasemalla annostusta saatetaan kasvattaa jopa +10 kg/m³. Vastuu taivutusvetolujuuden saavuttamisesta on tietysti betonitoimittajalla, joten Suomessa vielä melko harvinaisen kuitubetonin yhteydessä ylivarmuus on jossain määrin ymmärrettävissä.

Yli 50 kg/m³ annostus vaatii reseptin optimointia, jotta tuoreen betonin työstettävyyds pysyy siedettävänä. Esimerkiksi syvää paalulaattaa valettaessa on huomioitava myös kuitujen erottumisriski. Huolellisella työtavan suunnittelulla tämäkin on mahdollista.

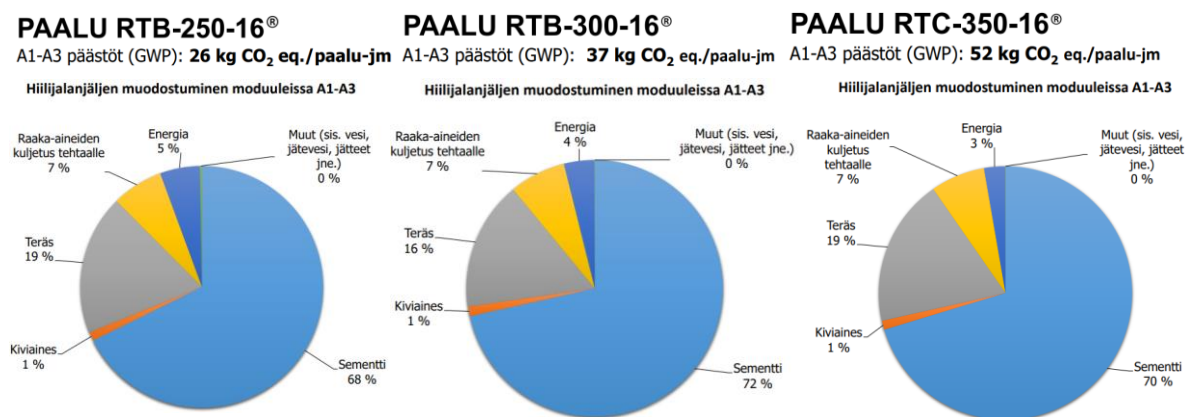
Muiden kuitujen, esimerkiksi polymeerikuitujen käytöstä ei ole Suomessa kokemusta. Periaatteessa niillä olisi mahdollista vähentää kuidun päästöjä, mutta niiden virumiskäyttäytyminen rajoittaa käyttökohteita.

Myös kuitutankoja on mahdollista käyttää betonirakenteen raudoituksena. Suomessa ei ole julkaistu ohjeita tai määräyksiä tällaisten rakenteiden suunnitteluun. Eräs olennainen ero kuitu- ja terästankojen välillä on niiden murtokäyttäytymisessä: siinä missä teräs myötää ja aiheuttaa näkyvää halkeilua rakenteeseen ennen murtoa, voivat kuitutangot aiheuttaa rakenteen hauraan murtumisen. Tutkimusten mukaan kuitusauvoja voitaisiin käyttää myös merirakenteissa (Altamas et al. 2015; Dong et al. 2016; Robert ja Benmokrane 2013). Päästöjen kannalta eräs mielenkiintoinen kuitutankojen sovelluskohde voivatkin olla kaupungin merirakenteet, joissa täytyy nykyisellään käyttää pinnan raudoituksena tavallista raudoiteterästä päästöintensiivisempää ruostumatonta terästä.

Myös kuljetusten vaikutus tulisi huomioida, kun harkitaan eri raudoitusvaihtoehtoja. Esimerkiksi Celsan hiiliteräsrudoitteet valmistetaan Pohjoismaissa (mm. Suomessa), kun taas Outokummun ruostumattomat raudoitettangot valmistetaan Yhdistyneessä kuningaskunnassa. Helsingin kaupungin tapauksessa raudoitteiden toimitusmatkat ovat käytännössä vakioita hankkeesta riippumatta.

2.3.4 Ympäristö- ja infrarakentamisen betonituoteosat

Betoniteollisuus (2021) on teettänyt yleiset elinkaariarviot kolmelle neljästä RT Betonipaalusta. Paalujen päästöt vaihtelevat välillä 26...52 CO₂ekv-kg/juoksumetri. Päästöjen muodostuminen on esitetty kuvassa 2.N.



Kuva 2.4. RT Betonipaalujen päästöt ja niiden muodostuminen (Betoniteollisuus 2021)

Betonikivien ja -laattojen päästöt 135 CO₂ekv-kg/tonni. Muuri- ja reunakivet 123 CO₂ekv-kg/tonni. Kaivonrenkaiden ja raudoittamattomien betoniputkien luokkaa 150 CO₂ekv-kg/tonni. Raudoitettujen betoniputkien päästöt ovat 154...165 CO₂ekv-kg/tonni. Sementin osuus näiden tuoteosien päästöistä on noin 70 prosenttia. (Betoniteollisuus 2021)

2.3.5 Verhoilut

Tukimuureja tai muita laajoja betonipintoja saatetaan etenkin vilkkaasti liikennöidyissä paikoissa verhoilla. Paikallavalurakenteet voidaan verhoilla joko luonnonkivi- tai betonielementeillä, jotka kiinnitetään rakenteeseen teräsosin. Kilosta teräskiinnikkeitä aiheutuu päästöjä noin 2 CO₂ekv-kg (co2data.fi).

Julkisivuverhouksissa käytettävien luonnonkivien päästö on liuskekivelle 29 ja yleisesti 310 CO₂ekv-kg/tonni (co2data.fi). Tyypillisillä 30 mm ohutkiviverhouksella päästöt ovat siis 2,1...23,3 CO₂ekv-kg/m², kun ei huomioida kiinnittimiä. Betonikivien ja -laattojen päästöt ovat Betoniteollisuuden mukaan luokkaa 130 CO₂ekv-kg/tonni, eli 30 mm laatalta vastaavat päästöt ovat noin 9,4 CO₂ekv-kg/m².

Elementtirakenteissa voidaan hyödyntää myös graafista betonia. Graafisessa betonissa betonipintaan luodaan kuvio käyttämällä pintahidastinta niin, että kovettumaton kuvio saadaan poistettua painepesurilla. Myös väriaineita voidaan käyttää. Päästömielessä graafisen betonin etuna erilliseen verhoukseen voi olla saavutettu materiaalisäästö verhouksessa ja kiinnikkeissä. Toisaalta hidastimet ovat varsin päästöintensiivisiä (<1310 CO₂ekv-kg/tonni). Litralla

pintahidastinta saadaan käsiteltyä noin 5...14 neliömetriä ja niiden tiheydet ovat noin 800...1400 kg/m³. Neliötä kohden päästöjä syntyy siis noin 0,075...0,370 CO₂ekv.-kg.

Eri verhoilutapoja olisi syytä tutkia päästöjen ja pitkäaikaiskestävyyden näkökulmista, mikäli kaupunki verhoilee betonipintoja paljon.

2.4 Päästövähennystoimenpiteiden vaikutus rakenteelliseen toimintaan

2.4.1 Sementti ja sideaineet

Sementin korvaaminen muilla sideaineilla vaikuttaa moniin tuoreen ja lujittuneen betonin ominaisuuksiin. Perinteisesti seosaineita onkin käytetty betonin ominaisuuksien muokkaamiseksi. Kun sideaineiden avulla pyritään vähentämään betonin päästöjä, seosaineiden käytön vaikutusten hallitseminen vielä kehitteillä olevilla lisäaineilla on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Käytettäessä standardissa SFS-EN 206 mainittuja seosaineita sallituissa määrin, eivät vaikutukset yleensä ole merkittävästi huonompia. Sideaineet vaikuttavat muun muassa massan notkuteen ja työstettävyyteen, lujuudenkehitykseen ja lämmönkehitykseen. Lujittuneessa betonissa seosaineilla on vaikutusta esimerkiksi lujuuteen, vesitiivyyteen, kestäväyyteen pakkas-sulamis-, sulfidi- ja kloridirasituksia vastaan sekä akr-reaktion alkamisedellytyksiin.

Metakaoliinien vaikutuksista ei F. Wang et al. (2018) mukaan ole monilta osin vielä riittävästi tietoa. Siksi metakaoliinien käytön mahdollisia vaikutuksia betonin ominaisuuksiin ei ole koostettu tähän lukuun. Vastaavasti kalliin silikan osalta esitetään vain sen merkittävimmät vaikutukset. Silika parantaa useita betonin ominaisuuksia niin, että muita seosaineita voidaan käyttää enemmän, kuin ilman silikan käyttöä.

Tuoreen betonin työstettävyyden ja erottuminen

Lentotuhkien käytöllä voidaan notkistaa betonimassaa tai vastaavasti pienentää vesi/sementti-suhdetta. Nämä vaikutukset riippuvat voimakkaasti lentotuhkan hienoudesta ja kemiallisesta koostumuksesta. Kalkkipitoiset (W) lentotuhkat saattavat lisätä veden tarvetta, koska ne voivat olla osin reaktiivisia ja käyttää vettä samanaikaisesti sementin kanssa. Lentotuhka vähentää vedenerottumista pienen ja pyöreän muotonsa ansiosta. (Sideris et al. 2018)

Jauhetulla masuunikuonalla saavutetaan selvästi parempi työstettävyyden, kun kuonan osuus on vähintään noin puolet sideaineen kokonaismäärästä. Vedenerottumisen välttämiseksi kuonaa käytettäessä tulee joko veden tai tehonotkistimen määrää säätää. Suurilla korvausosuuksilla masuunikuona parantaa massan koossapysyvyyttä niin, ettei se kuitenkaan haittaa betonin valettavuutta tai tiivistämistä. Kuonan käyttö ei lähtökohtaisesti vaikuta merkittävästi lisäaineiden toimintaan. Hidastimet saattavat kuitenkin toimia tehokkaammin kuonaa käytettäessä. Masuunikuonan suuri korvausosuus kuitenkin yleensä vaatii suurempaa huokostimen määrää huokoistetuissa betoneissa. (Matthes et al. 2018)

Sitoutumisajan alku

Silikaattipitoiset lentotuhkat myöhästävät betonin sitoutumista, kun taas kalkkipitoiset tuhkut saattavat (eivät siis aina) jopa aikaistaa sitä. (Sideris et al. 2018)

Masuunikuonan käyttö pääsääntöisesti kasvattaa sitoutumisaikaa. Vaikutus on suurin matalilla betonin lämpötiloilla tai masuunikuonan korvausosuuden ollessa yli puolet sideaineen kokonaismäärästä. Betonin lämpötilan ollessa 20 °C tai enemmän sitoutumisajassa on enemmän hajontaa: vaikutuksia on joidenkin tutkimusten mukaan vain vähän tai ei ollenkaan ja joidenkin tutkimusten mukaan tietyissä lämpötiloissa kuonan käyttö saattaa jopa pienentää sitoutumisaikaa. (Matthes et al. 2018)

Lujuudenkehitys

Lentotuhka pienentää betonin varhaislujuutta mutta pääsääntöisesti loppulujuus on suurempi sitä käytettäessä. (Sideris et al. 2018)

Masuunikuonalla lujuuden kehitykseen vaikuttavat kuonan CaO/SiO₂-suhde sekä hienous. Mitä hienompaa kuona on, sitä vähemmän lujuudenkehitys hidastuu suhteessa tavalliseen sementtiin. Suuri kalsium-, alumiini- ja magnesiumoksidi pitoisuus kehittävä lujuudenkehitystä alkuvaiheessa. Masuunikuonaa käytettäessä lujuudenkehitys yleensä kuitenkin hidastuu. (Matthes et al. 2018)

Jos siis hankeaikataulu ja budjetti sallivat ylimääräisen odottelun ennen betonirakenteen kuormittamista, voidaan käyttää suuria seosaineiden korvausosuuksia.

Lämmönkehitys

Lentotuhkan käyttö vähentää betonin lämmönkehitystä ja erityisesti pienentää ensimmäisen noin kahden viikon sisällä kehittyvää lämpöpiikkiä. (Sideris et al. 2018)

Masuunikuonaa sisältävän betonin lämmöntuotto pienenee korvausosuuden kasvaessa. Lentotuhkan tavoin se pienentää lämpöpiikin suuruutta. Merkittävä vaikutus saavutetaan korkeilla, noin 70 prosentin korvausosuuksilla. Masuunikuonaa ei kuitenkaan tutkimusten valossa tulisi koskaan käyttää pelkästään lämmönkehityksen ohjaamiseksi: masuunikuonan suuri korvausosuus pienentää betonin venymiskapasiteettia, mikä voi massiivisissa valuissa kumota pienemmällä lämmönkehityksellä saavutetun edun lämpökutistumisessa. (Matthes et al. 2018)

Valun korkeuden kasvaessa masuunikuonaa sisältävien betonien lämmön nousun suhteellinen ero pienenee. Ero pienenee erityisesti 2,5 metriä ja sitä korkeammassa valuissa. Valun korkeuden ollessa 4,5 metriä noin 70 % sementin korvaus masuunikuonalla vastaa kymmenen asteen alenemaa lämpöpiikissä. Sama tulos saavutetaan korvaamalla 30 % sementistä piidioksidipitoisella lentotuhkalla. (Matthes et al. 2018)

Pakkas-sulamisrasitus

Betonin kestävyys pakkas-sulamisrasituksia vastaan riippuu etusijassa sen ilmamäärästä ja tarkemmin pienten suojahuokosten määrästä. Kun betonin ilmapitoisuus on vakioitu, ei lentotuhkalla ole merkitystä betonin pakkaskestävyyteen. Lentotuhkaan jäänyt palamaton hiili saattaa kuitenkin vaikuttaa huokostinten toimintaan negatiivisesti. (Sideris et al. 2018)

Kloridirasitus

Lentotuhkalla voi olla vähäisiä vaikutuksia kloridien tunkeutumiseen nuorena betonissa (esim. 28 d), mutta ajan myötä kehittyvän tiiviin huokosrakenteen vuoksi lentotuhkan lisääminen parantaa yli vuoden ikäisen betonin kloridikestävyyttä jopa kertaluokan verran. (Sideris et al. 2018)

Alkalikiviainesreaktio

Betoniyhdistyksen *Päivittyvä ohje betonin alkali-kiviainesreaktion hallitsemiseksi* (2021) mukaan luokan I kiviaineiden kanssa ei betonille aseteta alkaalisuusrajaa. Luokissa II ja kolme asetetaan rajoiksi 3,0 ja 2,5 kg/m³. Suomessa ei valmisteta alhaisalkaliklinkkeriä, mutta betonin alhainen alkaalisuus pitoisuus voidaan saavuttaa myös taulukon 5.2 mukaisilla seosaineannostuksilla.

Taulukko 5.2. Suositellut seosaineiden vähimmäismäärät kiviaineksen reaktiivisuuden mukaan (by 2021)

Kiviaineksen reaktiivisuus	Lentotuhka [p-%]	Masuunikuona [p-%]	Silika [p-%]
Luokka I	ei vaatimusta	ei vaatimusta	ei vaatimusta
Luokka II	25	40	8
Luokka III	40	50	-

Silika reagoi betonimassan vapaiden alkalien kanssa muodostaen alkalisilikaatteja. Sementtikiveen sidotut alkalit eivät näin ollen pääse reagoimaan kiviaineksen kanssa. Lisäksi silika tiivistää betonin rakennetta, jolloin AKR:n vaatimaa vettä on vähemmän. (Lewis 2018)

Aggressiivinen kemiallinen rasitus

SR-sementit voivat olla tyyppiä CEM I, CEM III tai CEM IV. CEM I-SR 0/3/5, jossa arabialainen numero ilmoittaa klinkkerin suurimman sallitun trikalsiumaluminaattipitoisuuden prosentteina.

Käytettäessä lentotuhkaa tai luonnon pozzolaaneja sisältäviä CEM IV/A-SR ja IV/B-SR -sementtejä on klinkkerin suurin sallittu C₃A-pitoisuus 9 prosenttia. Pozzolaaniselementtejä ei käytetä Suomessa. Lentotuhkan vaikutus betonin sulfaatinkestävyyteen riippuu olennaisesti sen kalsiumoksidi-pitoisuudesta: silikaattipitoisilla lentotuhkilla saavutetaan parempi sulfaatinkestävyys, kun taas voimakkaasti kalkkipitoisilla tuhkillä betonin sulfaatinkestävyys jopa heikkenee.

Sulfaatinkestävillä masuuni-kuonaselementeillä CEM III/B-SR ja III/C-SR ei ole erillistä vaatimusta klinkkerin C₃A-pitoisuudelle.

Vesitiiveys

Hienorakeisen lentotuhkan käyttö johtaa hitaammin kehittyvään, mutta lopulta suurempaan betonin vedenpitävyyteen (Sideris et al. 2018). Hienojakoinen silika parantaa betonin vesitiiveyttä jo melko pienillä määrillä, joten sitä voidaan lisätä yhdessä toisen seosaineen kanssa (Lewis 2018).

2.4.2 Kiviaines

Betonin kiviaineksesta karkea kiviaines voidaan nykyohjeilla korvata osin uusiokiviaineksella. Kiviaineksen laadulla on vaikutusta betonin pitkäaikaiskestävyyteen, esimerkiksi alkalikiviainesreaktion syntymiseen. Fillerikiviaines voidaan korvata myös seosaineilla.

Seuraavan sukupolven betoni-Eurokoodin **luonnoksessa** (2021) on esitetty menettelytapa, jolla uusiokiviaineksen käyttö betonin osa-aineena voidaan ottaa huomioon rakenteen mitoituksessa. Myös SFS-EN 206 ilmoitettua suurempia korvausosuuksia voidaan käyttää. Luonnoksessa on esitetty, ettei alle 20 % korvausosuus kokonaiskiviainemäärästä aiheuta mitään muutoksia rakenteen toimintaan. Alle 40 % korvausosuuksilla taas voidaan vaikutukset suunnitteluun ottaa huomioon esitetyillä korvaussuhteeseen perustuvilla kaavoilla. Tätä suuremmilla korvausosuuksilla ominaisuudet on todennettava ennakkokokein. Edelliset koskevat teräsbetonirakenteita, joissa käytetään tyyppin A kierrätyskiviaineita. Tyyppin B kierrätyskiviaineita käytettäessä mainitut korvausosuusrajat tulee puolittaa.

Alkalikiviainesreaktio vaatii syntyäkseen reagoivan kiviaineksen.

2.4.3 Raudoite ja kuidut

Celsa Steel Servicen Suomessa valmistamien hiiliteräsrudoitteiden päästö on 456 CO₂ekv/kg/tonni (Almemark 2020). Tangot valmistetaan kierrätysteräksestä valokaariuunissa, eli voidaan sanoa, että Suomessa käytettävä betoniteräs on kansainvälisesti vertailtuna vähähiilistä. Valmistajan tavoitteena on päästöjen puolittaminen vuoteen 2030 mennessä ja nollapäästöt on tarkoitus saavuttaa vuonna 2050.

Teräskuiduilla raudoitettun rakenteen osalta nousee usein kaksi pitkäaikaiskestävyyteen liittyvää kysymystä, joihin esitetään seuraavassa vastaukset.

Kun teräskuidut ovat betonimassassa, ei niiden suuntaukseen voida vaikuttaa. Mitoitustapojen on kuitenkin niin kokeellisesti kuin käytännön rakenteissa todettu olevan varman puolella. Lisäksi kuitubetonilaatan halkeilumomenttikestävyys rajoitetaan 80 prosenttiin, mikä on melko tiukka vaatimus. Tästäkin huolimatta betoniasemalla saatetaan käyttää noin kymmenen prosenttia kuituvalmistajan ilmoittamaa määrää suurempaa kuituannosta.

Koska teräskuidut on sekoitettu betonimassaan, ei teräskuiturakenteeseen muodostu suojabetonikerrosta rakenteen pintoihin, jolloin kuidut pääsevät korrodoitumaan. Yksittäinen kuitu on kuitenkin erittäin pieni, jolloin korrosio tai sen vaikutukset eivät pääse leviämään rakenteessa. Kuidut eivät myöskään välttämättä edes erotu rakenteen pinnasta paljain silmin.

Seuraavan sukupolven betoni-Eurokoodin luonnoksessa (2021) on esitetty ohjeet teräskuitubetonirakenteiden betonirakenteen suunnitteluun. Myös ohjeet lasi- ja hiilikuitutangoilla "raudoitettun" rakenteen suunnitteluun esitetään.

Sopivan tasapainon löytäminen eri raudoitusvaihtoehtojen päästöjen ja pitkäaikaiskestävyyden suhteen vaatii vielä jatkotutkimuksia.

2.5 CASE: Paalulaatta

Esimerkkinä käsitellään paalulaattaa, joka on varsin yleinen infrarakenne Helsingissä. Paalulaattaa käytetään yleisesti esimerkiksi liikenneväylien, vesijohtojen ja sähkökaapeleiden alla estämään niiden painumista. Paalulaatta koostuu nimensä mukaisesti paaluista sekä ne yhdistävästä laatasta. Teräsbetonipaalu on hyvä esimerkki tuoteosasta, jonka määrään voidaan vaikuttaa suunnitteluratkaisulla ja päästöominaisuuksiin hankintavaiheessa. Itse rakenne muodostuu, kun paalujen päälle valetaan teräsbetonilaatta. Laatasta voidaan suunnitteluvaiheessa vaikuttaa raudoituksen määrään ja tyyppiin (tanko tai kuitu) sekä käytettävän betonin määrään ja lujuuteen.

Paalulaatat suunnitellaan yleensä LO 5/2014 *Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelu* -ohjeen mukaisesti. Paalulaatat ovat yleensä suojassa pakkaselta, suolalta ja monilta muilta olosuhderasituksilta.

Paalulaatan kuormitukseen vaikuttaa sen syvyys maassa. Alle 1,4 metrin syvyydellä olevat paalulaatat suunnitellaan siltarakenteina. Liikennekuormien tiheys pienenee, mitä syvemmällä paalulaatta sijaitsee. Paalulaatan suunnittelukäyttöikä on yleensä 100 vuotta. Suhteellisen pienen kuormituksen ja laajan käytön vuoksi paalulaatta on kuitenkin mielenkiintoinen kohde erilaisten päästövähennys-toimenpiteiden kokeilemiseen.

Paalulaatan yläpuolisen täytön paksuudesta riippuen kuituraudoitus tulee mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi, kun paalulaattaan kohdistuvan liikennekuormituksen suhteellinen osuus pienenee. Hankkeesta riippuen myös hitaammin lujuttaan kehittävien betonien käyttö on realistinen mahdollisuus paalulaattojen kohdalla, sillä paalulaatan valun ja lopullisen kuormituksen alkamisen välillä voi kulua useampikin kuukausi.

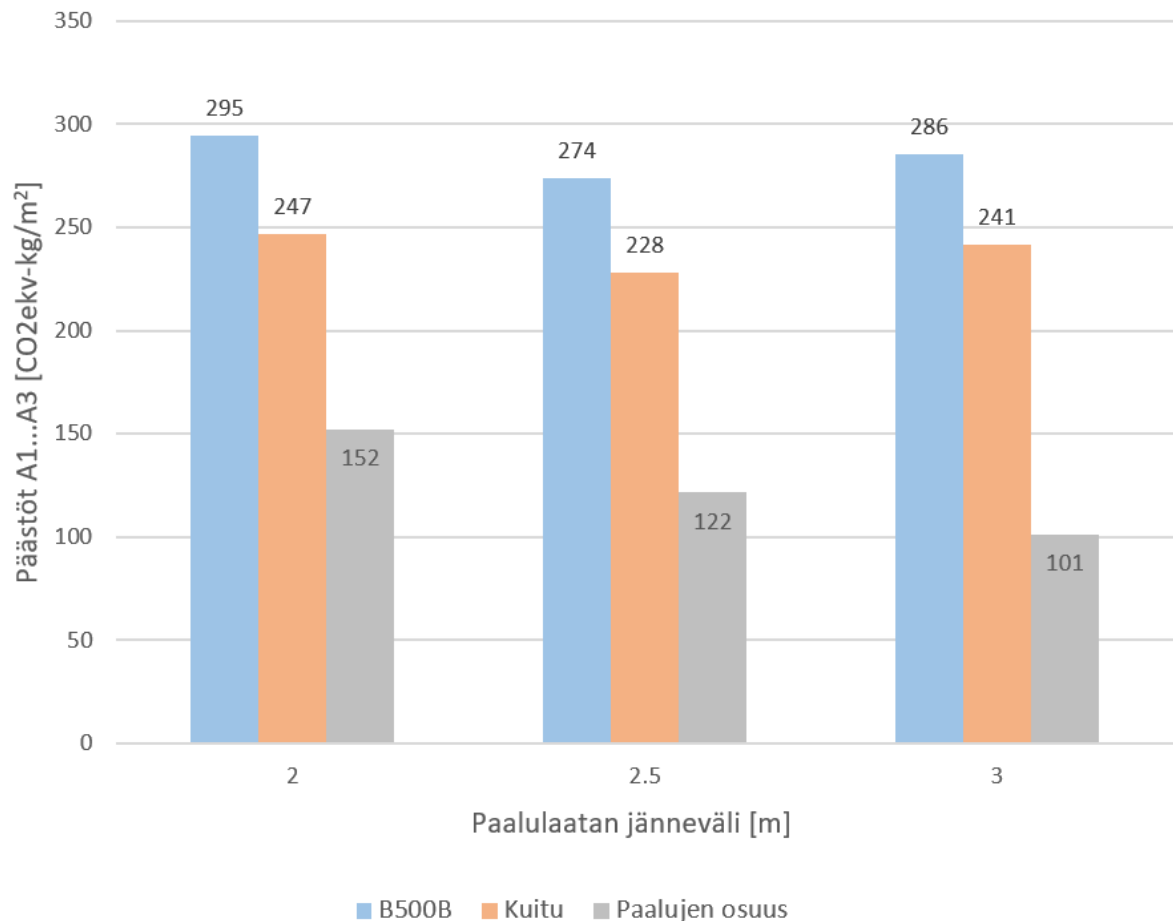
Paalujako vaikuttaa niin paalujen määrään kuin laatalta vaadittavaan taivutuskapasiteettiin. Paalujen kohdalla laatan lävistyskestävyys on tarkasteltava. Laatan paksuus määräytyy osaltaan myös raudotteiden suojabetonivaatimuksista.

Esimerkin määrät perustuvat julkaisemattomaan Rambollissa tehtyyn kustannusvertailuun joko tangoilla tai teräskuiduilla raudoitettusta paalulaatasta. Paalulaatan leveys oli 2,4 metriä. Paalut olivat kaikissa tapauksissa RTB 300-16, niiden pituudeksi oletettiin 10 m ja niitä oli kaksi vierekkäin. Raudoituksen lisäksi vertailussa varioitiin paalulaatan jänneväliä, joka oli 2, 2,5 tai 3 metriä.

Tankoraudoitetuilla laatoilla paksuus pysyi vakiona (450 mm), mutta betonin lujuusluokka oli jännevälin mukaan C25/30, C30/37 tai C35/45. Kuituraudoitetuilla laatoilla taas varioitiin sekä laatan paksuutta (320, 350, 450 mm) että kuitujen jäännöstaivutusvetolujuutta.

Päästökertoimet ovat pääosin YM:n päästötietokannasta (co2data.fi). Teräskuitujen päästöintensiteetit ovat peräisin kahden valmistajan ympäristöselosteista (ArcelorMittal 2017, Mapei 2017). Lisäksi RTB-paalujen päästöt ovat peräisin Betoniteollisuuden yleisestä ympäristöselosteesta (2021), ja ovat noin kymmenen prosenttia suuremmat kuin YM:n tietokannan (2020) vastaavat.

Kuvassa 2.4 on esitetty vertailun tulokset päästöinä per neliometri paalulaattaa raudoituksen ollessa kokonaan terästankoja (B500B) tai teräskuituja (Kuitu). Kaikki arvot sisältävät paalujen osuuden päästöistä, joka on myös esitetty omana palkkina (Paalujen osuus).



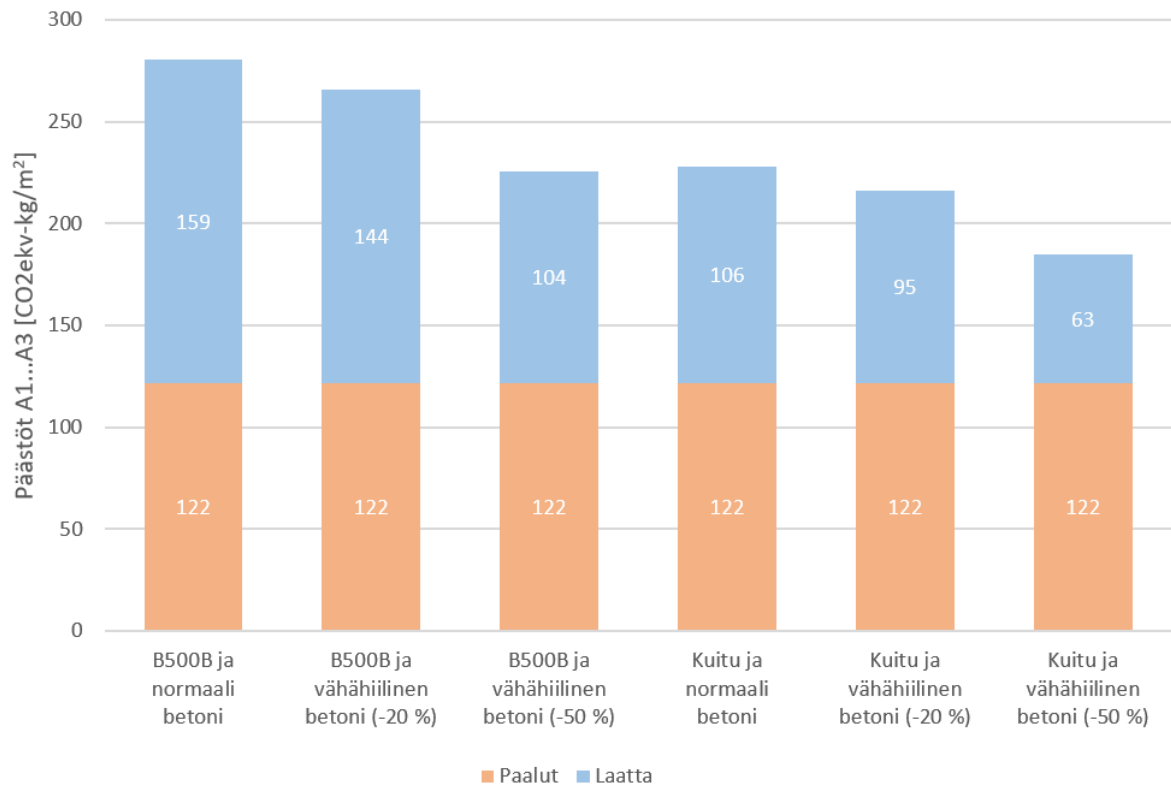
Kuva 2.5. Esimerkkipaalulaatan materiaalien valmistuspäästöt eri paaluväleillä. Kaikki arvot sisältävät paalujen päästöt.

Esimerkin mukaan kuitubetonilla on mahdollista saavuttaa paalulaatalla noin 16 prosentin säästöt materiaalien päästöissä. Alkuperäisen kustannusvertailun perusteella kuitubetonin käytöllä paalulaatassa voi säästää myös kustannuksissa. Epävarmuuksia liittyi kuitubetonin valmistuksen lisäkustannuksiin betoniasemalla. Periaatteessa kuitubetonia on kuitenkin mahdollista sekoittaa kaikilla betoniasemilla, joissa on vapaa siilo kuiduille.

Kuvassa 2.5 on esitetty 20 tai 50 prosenttia vähähiilisemmän betonin vaikutus päästöihin paalulaatalla, jonka jänneväli on 2,5 metriä. Normaalin betonin päästöarvoina on esimerkissä käytetty YM:n tietokannan päästökertoimia, jotka ovat C30/37-betonille 109 ja C35/45-betonille 124 CO₂ekv.-kg/tonni.

Koska vähähiilisten betonien päästövähennys on ilmoitettu suhteessa ”tavalliseen” betoniin, on sen arvo määritelty erikseen. ”Tavallisen” betonin päästöarvo on saatu kertomalla* tietokannan päästöarvo luvulla 1,1, jolloin arvoksi on saatu C30/37-betonille 120 ja C35/45-betonille 136 CO₂ekv.-kg/tonni. Vähähiilisen betonin päästökertoimeksi on oletettu 80 tai 50 prosenttia tästä arvosta. Muut käytetyt arvot ovat samat kuin aiemmin on esitetty.

**Kertoimen 1,1 käyttäminen on teollisuudelle ”reilu” oletus, sillä päästötietokannassa esitetty arvo on määritetty Betoniteollisuuden tuottamien yleisen EPD:n mukaan, jolloin siinä on jo huomioitu kertaalleen nykyinen korvaavien sideaineiden käyttö. Vaikka, ja koska, tietokannan arvo on konservatiivinen, on vertailukelpoisuuden vuoksi hyvä ottaa tämä huomioon ”tavallisen” verrokkibetonin päästöä määriteltäessä.*



Kuva 2.6. Betonin vähähiilisyyden vaikutus paalulaatan materiaalien valmistuspäästöihin 2,5 metrin jännevälillä.

Betonin päästöjen vähentäminen 20 prosentilla vastaa noin viiden prosentin päästövähennystä koko paalulaatalla ja kymmenen prosentin vähennystä laatan osuudessa. Vastaavasti betonin päästöjen vähentäminen 50 prosentilla vastaa 16...19 prosentin päästövähennystä koko rakenteella ja 28...40 prosentin vähennystä laatan osuudessa. Kokonaisuutena nykykeinoin esimerkin paalulaatalla on siis mahdollista saavuttaa (kuvan 2.6 mukaisesti) 34 prosentin päästöjen alenema.

3. HANKINTA JA SEN VAIKUTUS BETONIN HIILIJALANJÄLKEEN

Lähteet:

YMPÄRISTÖOPAS 2017, Vihreä julkinen rakentaminen. Hankintaopas. Matti Kuittinen, Simon le Roux
YMPÄRISTÖOPAS 2017, Vähähiilisen rakentamisen hankintakriteerit. Matti Kuittinen, Simon le Roux

3.1 Yleistä hankinnasta

Hankintaorganisaatiolla tai sen omistajalla voi olla strategioita, jotka vaikuttavat ympäristöä säästäviin julkisiin hankintoihin tai vihreään julkiseen rakentamiseen. Strategioiden ja ohjelmien kautta muodostuu ylätasoinen strateginen mandaatti, jota tässä tapauksessa vähähiilisen julkisen rakentamisen tavoitteet toteuttavat.

Helsingin kaupungilla tällaisia ovat esim. Helsingin kaupunkistrategia 2017–2021 ja Hiilineutraali Helsinki 2035 toimenpideohjelma ("4.2 Rakentaminen ja rakennusten käyttö"; "Kiertotalous rakentamisessa" ja "4.2.7 Rakennusten hiilijalanjäljen pienentäminen").

Vähähiilisen betonin käyttö lisää materiaalikustannuksia n. 10 % verrattuna normaalibetoniin nähden. Lisäksi vähähiilisen betonin hitaammasta lujuudenkehityksestä johtuen saattaa tulla vaikutuksia hitaammasta muottikierrosta yms. johtuen. Infrapuoella lujuudenkehityksen vaikutus hintaa nostavasti on kuitenkin yleensä ottaen vähäinen ja merkittävästi pienempi verrattuna talonrakennuksen vastaavaan (esim. muottikierto).

3.2 Hankintalaki ja vähähiiliset hankinnat

Hankintalaki on neutraali ympäristövelvoitteita kohtaan ja sikäli hankintaorganisaatio voi asettaa velvoitteita ja tavoitteita. Hankintalaissa mainitut elinkaariajattelu ja kokonaistaloudellinen edullisuus mahdollistavat hankinnoissa pyrkimyksen mm. vähähiilisyyteen.

Hankintalaki tarjoaa monia mahdollisuuksia vaikuttaa hankinnan vähähiilisyys- ja ympäristövaikutuksiin.

- Ympäristömerkkien käyttö hankinnan kohteen kuvauksessa (72 §) sekä
- Ympäristöasioiden hallinta- ja laadunvarmistustoimenpiteet (90 §).
- Elinkaarikustannusten arviointiin voidaan liittää ns. ulkoisista haitoista aiheutuvat kustannukset, jos niiden rahallinen arvo voidaan määrittää ja tarkistaa (95 §).
 - Ulkoisia haittoja ovat esimerkiksi ympäristövaikutukset.

Hankintalainsäädäntö ei salli asettaa tietyn, hankinnan kannalta perustellun, tarjoajan kokemusta tai osaamista koskevan vaatimuksen (ks. 86.1 §, 88.7 §). Hankintayksikön tulee kriteerien valinnassa aina tapauskohtaisesti varmistaa, että tosiasiaa tullaan asettamaan vain sellaisia henkilöä tai yritystä koskevia kokemusvaatimuksia, joilla on merkitystä tehtävän hankinnan laatu- ja ympäristövaatimuksien kannalta.

3.2.1 Kokonaisedullisuus

Lain mukaan hankkijan on valittava kokonaistaloudellisesti edullisin tarjous (93 §).

Tarjous voi olla hinnaltaan halvin, kustannuksiltaan edullisin tai hinta-laatusuhteeltaan paras. Hinta-laatusuhteen käyttö valintaperusteena antaa hankintayksikölle vaikutusmahdollisuudet hankintojen vastuullisuuden, vähähiilisyyden ja ympäristöystävällisyyden parantamiseksi. Hinta-laatusuhteen vertailutapa on syytä etukäteen testata, jotta tulevien tarjousten hinta- ja laatuasteet ohjaavat hankintaa tavoiteltuun suuntaan.

Halvinta hintaa tai edullisimpia kustannuksia voidaan käyttää valintaperusteena tinkimättä strategisista tavoitteista, kun vähähiilisyys- ja ympäristötavoitteet määritellään selkeästi hankinnan kohteen kuvaukseen ja parhaassa tapauksessa se voi myös yksinkertaistaa tarjousten vertailua.

Halvinta hintaa pelkästään kokonaistaloudellisesti edullisimpana valintaperusteena käytettäessä ja toisaalta hankinnan kuvauksesta pois jätetyt vähähiilisyys- ja ympäristötavoitteet saattavat johtaa

hankinnan ulkoisten hättavaikutuksien huomioimatta jättämiseen (esim. ympäristöhaitat tuotteiden arvoketjussa tai rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa).

3.2.2 Innovatiivisuus

Tarkkoja hankintakriteerejä on syytä käyttää maltillisesti, koska tarkat tavoitevaatimukset voivat rajoittaa toimijoiden mahdollisuuksia tarjota ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi kehitettyjä uusia ja innovatiivisia ratkaisuja.

Kriteerien ohella voidaan neuvotella tiettyihin hankevaiheisiin ja toimijoihin kohdistuvista hankekohtaisista tavoitteista. Toimintatapa vaatii hankintaorganisaatiolta enemmän työtä eli huolellista hankevalmistelua ja ennakoivaa hankearviointia.

Jos hankintayksikkö on määritellyt tavoite- ja suoritustasot, tarjoaja voi ehdottaa miten tavoitteet saavutetaan kustannusoptimaalisesti.

Hankinnan kohteeseen erityisesti soveltuvat vähähiiliset- ja ympäristöystävälliset ratkaisut voidaan hahmottaa vasta hankintaa edeltävällä markkinakartoituksella tai hankinnan aikana markkinavuoropuhelun kautta silloin kun hankintatapana on neuvottelumenettely.

YMPÄRISTÖMERKIT:

Hankintalain 72 §:n mukaan ”hankintayksikkö voi hankinnan kohteen kuvauksessa, tarjouspyynnössä esitettyjen kokonaistaloudellisen edullisuuden perusteissa tai sopimuksen toteuttamisen ehdoissa vaatia tiettyä merkkiä näytöksi siitä, että hankinnan kohde vastaa vaadittuja ympäristöominaisuuksia, sosiaalisia ominaisuuksia tai muita ominaisuuksia”.

Hankinnoissa voidaan edellyttää, että tarjoajalla on käytössään laadunhallintatoimenpiteitä, joilla parannetaan hankinnan ympäristövaikutuksia (hankintalaki, 90 §). Näillä tarkoitetaan yleensä sertifioituja ympäristöhallintajärjestelmiä, kuten ISO 14001, EMAS tai Ekokompassi (15). Hankintayksikkö voi viitata näihin osana tarjoajien soveltuvuusvaatimuksia. Vaatimukset ympäristöasioiden laadunhallintatoimenpiteistä eivät saa rikkoa hankintalain suhteellisuusperiaatetta.

Rakennustuotteiden osalta on huomioitava, että ympäristömerkkien käytön on jatkossakin perustuttava vapaaehtoisuuteen niiden tuotteiden osalta, jotka on EU:n rakennustuoteasetuksen mukaan CE-merkittävä.

3.3 Vähähiilisen betonirakenteen hankinta

3.3.1 Vähähiilisen betonirakenteen hankintalista lyhyesti

- 1) Rakennushankkeen elinkaaren ympäristövaikutukset
 - Hankinnan valmisteluvaiheessa arvioidaan rakennuskohteen koko elinkaaren ympäristövaikutukset.
 - Tehdään elinkaarikustannusten alustava arviointi hankkeen budjetoinnin yhteydessä.
- 2) Tavoitteet vähähiilisyydelle
 - Kartoitetaan markkinoilla olevia ratkaisuja sekä niiden kustannusoptimaalisuus ja vaikuttavuus (=>Vähähiilisyyden tavoitteet + Toiminnalliset ja tekniset vaatimukset)
- 3) Hankinnan kohteet ja tavoitteet niille
 - Suunnittelupalvelut
 - Materiaali- ja laitehankinnat
 - Rakennusurakat
 - Määritellään:
 - Hankintamenettely
 - Hankinnan kohteen kuvaus
 - Soveltuvuusvaatimukset
 - Vähimmäisvaatimukset
 - Valintakriteerit
 - Tarjousten vertailutapa

- 4) Tarjouspyynnöt ja tarjousvertailut
 - Sisällytetään tavoitteet ja arviointitavat hankintailmoitukseen.
 - Hankinnan otsikko voi sisältää "vähähiilisyiden", jolloin tarjoajan on helppo mieltää hankkijan tavoite.
 - Tarjouksessa voidaan viitata "YMPÄRISTÖOPAS 2017 Vähähiilisen rakentamisen hankintakriteerit"-oppaan kriteerisuosituksiin ja liittää ne tarjouspyyntöön.
- 5) Vähähiilisyiden tavoitteet sopimukseen
 - Harkitaan sopivien kannusteiden / sanktioiden käyttöä.
 - Seurataan tavoitteiden toteutumista sopimuksen aikana (menettelytapa).
- 6) Hyödynnetään kokemukset
 - Dokumentoidaan tulokset jatkoa ajatellen, olivatpa ne mitä tahansa.
 - Kokemukset toimivista tai toimimattomista käytännöistä ovat opiksi kaikille, ja siten arvokkaita muille hankintayksiköille ja tarjoajille.

3.4 Hankintakriteerit

Hankintakriteerit tulee esittää erikseen kullekin hankinnan kohteelle ja vaiheelle.

- Suunnittelupalvelut
- Rakennusurakat
- Materiaalien ja laitteiden hankinnat
- Kokonaisvastuurakentaminen (suunnittelu, urakat ja materiaalit)
- Elinkaarimalli (ylläpito tietyksi aikaa).
- Markkinavuoropuhelu kriteeristön laatimiseksi ko. kohteeseen.

Suosittelut kriteerit

- Soveltuvuus
- Energia
- Materiaalit
- Innovaatiot
- Kustannukset

3.5 CASE: Paalulaatta

3.5.1 Yleistä

Tekniset vaatimukset

Teknisten vaatimusten osalta paalulaattojen suunnittelussa noudatetaan "Liikenneviraston ohjeita 5/2014 9. Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelu"-ohjetta ja lisäksi paalulaatta- ja paaluhatturakennekohteiden pohjatutkimusten suunnittelussa ohjeita Sillan geotekninen suunnittelu ja Geotekniset tutkimukset ja mittaukset. Täydentäviä ohjeita esitetään myös Paalutusohjeessa 2011.

InfraRYL 2006 Osa 3 sisältää laatan betonirakenteita koskevat materiaalivaatimukset on esitetty luvuissa 42020 ja 42210. Betonielementtirakenteissa noudatetaan lisäksi luvun 42030 vaatimuksia ja ohjeita.

Paalujen materiaalien ja varusteiden vaatimukset on esitetty ohjeen Paalutusohje 2011 osan 1 kohdassa 2.5 ja materiaalien sekä varusteiden laatuvaatimukset osan 2 kohdassa 3. Paalujen ja varusteiden materiaalivaatimukset on esitetty myös InfraRYL 2010 Osa 1 luvussa 13200 Paaluperustukset.

3.5.2 Vähähiilisten suunnittelupalveluiden hankintakriteerisuositukset

1a. Vähähiilisen paalulaattarakenteen suunnittelu - ehdotelma

Soveltuvuus

Soveltuvuusvaatimukset

- Tarjoajalla tulee olla hankintayksikön edellyttämä määrä referenssejä vähähiilisten infrarakenteiden suunnittelusta.
 - XXX
- Suunnitteluryhmässä tulee olla energiatehokkaan vähähiilisten rakenteiden suunnittelun ja hiilijalanjälkilaskennan osaamista esimerkiksi seuraavista asioista
 - Materiaalitietous
 - Ilmast selvitys / Elinkaarilaskenta
 - Hiilikädenjälki
 - Hiilijalanjälki
- Todentaminen:
 - Tarjoajan referenssiluettelo hankkijan ilmoittamalta aikajaksolta huomioiden suhteellisuuden ja syrjimättömyyden periaatteet

Hankinnan kohteen vähimmäisvaatimukset

Energia

- XXX

Materiaalit

- Paalulaatan ja siihen liittyvät rakenteet ja täytöt suunnitellaan siten, että niiden painosta vähintään 10 % muodostuu vähähiilisistä kierrätetyistä tai uusiutuvista materiaaleista (oppaan) luvussa 5 olevan ohjeen mukaan arvioituna.
 - Betonin määrä: pv-rakenteet /paalujen koko ja määrä
 - Routaeristeet: -uusi vai kiertotaloustuote
 - Rauditus: - perinteinen vai kuitu?
- Suunnittelu sisältää paalulaatan rakennevaihtoehtojen ja päärakennetyyppien hiilijalanjäljen laskennan sekä näiden tietojen yhdistämisen. Elinkaaren hiilijalanjäljen osatekijät raportoidaan tilaajalle kustannusoptimaalisen vaihtoehdon valintaa varten.
 - Resurssiviisaus? Betonin käytön minimointi yleensä. Vähähiilisen betonin käytön maksimointi soveltuviin betonirakenneosiin.
 - Betonirakenteen käyttöikä ja huollettavuus/korjattavuus, uhrautuvat tai suojaavat osat?
- Laskenta tehdään standardin EN 15978 mukaan koko elinkaaren ajalta (oppaan) luvussa 5 olevien ohjeiden mukaan.
 - XXX

Valintakriteerit, joista annetaan lisäpisteitä hankintayksikön määrittelemällä tavalla

Innovaatiot ja lisäpisteet

- Tarjoaja voi ehdottaa innovatiivisia suunnittelumenetelmiä, joilla paalulaatan hiilijalanjälki saadaan mahdollisimman alhaiseksi ja kustannusoptimaaliseksi.
 - Kuidut, paalujen lävistysraudoitteet tms.
 - Elementointi?
- Innovaation avulla saavutettava pienempi hiilijalanjälki arvioidaan (oppaan) luvussa 5 olevan laskentaohjeen mukaan.
- Lisäpisteitä annetaan, jos suunnittelija päivittää paalulaatan luovutuksen yhteydessä elinkaaren hiilijalanjälkilaskelman vastaamaan toteutunutta.

Muut tarjoajan edellyttämät laatutekijät

Tarjoushinta

3.5.3 Vähähiilisten paalulaatan rakennusurakan hankintakriteerit

2a. Vähähiilisen paalulaatan urakka - ehdotelma

Soveltuvuus

Soveltuvuusvaatimukset

- EU-kynnysarvon ylittävissä hankinnassa tarjoavalla yrityksellä tulee ympäristöjärjestelmä.
 - Ympäristöjärjestelmän soveltuvuus hankintaan?
- Tarjoajalla tulee olla hankintayksikön edellyttämä määrä referenssejä vähähiilisten infrarakenteiden toteuttamisesta.
- Todentaminen:
 - Tarjoajan referenssiluettelo hankkijan ilmoittamalta huomioiden suhteellisuuden ja syrjimättömyyden periaatteet.

Hankinnan kohteen vähimmäisvaatimukset

Energia

- Työmaan sähkön kulutus sekä EU-kynnysarvon ylittävissä hankinnoissa työmaan koneiden ja laitteiden polttoaineiden kulutus mitataan ja hiilijalanjälki raportoidaan luvun 5 ohjeiden mukaan.
 - Rakennusajakohdalla on vaikutusta paalulaattahankinnan energian kulutukseen, esim. lumityöt, maaperän sulana pito ja mahdollinen betonin lämmitys? sen sitoutumisvaiheessa.
 - Toisaalta työmaan keston ympäristövaikutukset?
- Työmaalla järjestetään energiatehokkuuteen liittyvä koulutus hyödyntäen esimerkiksi BUILD UP Skills-aineistoa tai vastaavaa.
 - XXX

Materiaalit

- Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden hankinnassa noudatetaan vähähiilisten rakennustuotteiden hankintakriteerejä (kriteeri 3).
 - XXX
- Suunnitelmissa esitetyt uusiutuvien tai kierrätettyjen materiaalien kokonaismäärät sisällytetään materiaalihankintoihin. Rakennuksen valmistuttua kierrätettyjen tai uusiutuvien materiaalien toteutuneet määrät raportoidaan esimerkiksi seuraavin tavoin
 - Materiaalikirjanpito
 - Siirtoasia- ja kuormakirjat

Valintakriteerit, joista annetaan lisäpisteitä hankintayksikön määrittelemällä tavalla

Innovaatiot ja lisäpisteet

- Tarjoaja voi ehdottaa innovatiivisia toteutusmenetelmiä, joilla pienennetään rakennuksen työmaan tai elinkaaren hiilijalanjälkeä. Lisäpisteitä annetaan hiilijalanjäljen pienentämisestä suhteessa vertailutasoon (oppaan) luvussa 5 olevien ohjeiden mukaan.
 -
- Lisäpisteitä voidaan antaa suunnitelmissa esitettyä suuremmasta kierrätettyjen tai uusiutuvien materiaalien prosenttiosuudesta, jos tällä voidaan pienentää rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä.
 -

Muut tarjoajan edellyttämät laatutekijät

Tarjoushinta

3.5.4 Vähähiilisen paalulaatan rakentamisen materiaalihankinnat

3. Vähähiilisen paalulaatan rakentamisen materiaalihankinnat - ehdotelma

Soveltuvuus

Soveltuvuusvaatimukset

- Materiaalien ja laitteiden hankinnoissa ei suositella käytettäväksi soveltuvuusvaatimuksia.

Hankinnan kohteen vähimmäisvaatimukset

Energia

- XXX

Materiaalit

- Suunnitelmissa esitetyt uusiutuvien tai kierrätettyjen materiaalien kokonaismäärät sisällytetään materiaalihankintoihin. Rakenteen valmistuttua uusiutuvien ja kierrätettyjen materiaalien hankitut määrät raportoidaan.
 - Materiaalikirjanpito?
 - Siirtoasia- ja kuormakirjat?
- Hankinnan kaikkien rakennus- ja täyttömateriaalien yhteenlasketusta painosta vähintään 10 % muodostuu kierrätetyistä tai uusiutuvista materiaaleista (oppaan) luvussa 5 olevan ohjeen mukaan arvioituna.
- Todentaminen tehdään urakkavaiheen määräluettelon pohjalta.

Materiaalien hankintakriteerit

- Paalulaatan paikalla valetun laatan valuun käytettävän betonin päästöraja < XXX CO₂ekv-kg/tonni.
- Paalujen (paikalla taia esi-) valmistukseen käytettävän betonin päästöraja < XXX CO₂ekv-kg/tonni.
- Maatäyttöihin käytettävien materiaalien päästöraja < XXX CO₂ekv-kg/tonni.
- Routaeristykseen käytettävien materiaalien päästöraja < XXX CO₂ekv-kg/tonni.
- Kevennyksiin käytettävien materiaalien päästöraja < XXX CO₂ekv-kg/tonni.
- Muiden liittyvien rakenteiden materiaalien päästörajat < XXX CO₂ekv-kg/tonni.

Hankintakriteerien määrittely tulee yhtenäistymään ja samalla helpottumaan By:n asiaa koskevien luokitteluohjeiden valmistuttua.

Valintakriteerit, joista annetaan lisäpisteitä hankintayksikön määrittelemällä tavalla

Energia ja materiaalit

- Takuu-aika:
 - Lisäpisteitä myönnetään suhteessa takuuajan pituuteen.
- Lisäpisteitä voidaan antaa suunnitelmia suuremmasta uusiutuvien tai kierrätettyjen materiaalien prosenttiosuudesta.

Innovaatiot ja lisäpisteet

- Tarjoaja voi ehdottaa innovatiivisia ratkaisuja, joilla pienennetään rakennuksen, laitteiden tai materiaalien elinkaaren hiilijalanjälkeä. Lisäpisteitä annetaan hiilijalanjäljen pienentämisestä suhteessa vertailutasoon (oppaan) luvussa 5 olevien ohjeiden mukaan.

Muut tarjoajan edellyttämät laatutekijät

Tarjoushinta

4. INFRARAKENTAMISEN BETONIRAKENTEIDEN TUNNISTAMINEN

Tässä luvussa arvioidaan sanallisesti eri rakenteisiin liittyviä merkittävämpiä vaatimuksia ja päästömahdollisuuksia. Luvun eräänlaisena yhteenvetona toimii liite A, jossa tässä esitetyt asiat on koottu taulukkoon.

4.1 Betonirakenteet ja niiden käyttökohteet

4.1.1 Sillat

Silta on rakenne, jota pitkin liikenne kulkee esteen yli tai ali. Sillat jaetaan useisiin eri alatyyppeihin, mm. vesistösiltoihin, risteysiltoihin, rautatiesiltoihin ja kevyen liikenteen siltoihin. Sillat ovat taitorakenteita, joiden rakentamista varten tulee laatia Eurokoodeihin perustuvat lujuuslaskelmat ja tarkat rakennussuunnitelmat, joita tulee rakentamisessa noudattaa. Kaikilla siltatyypeillä ja -paikoilla on omat erityispiirteensä, minkä takia siltasuunnitelmat on laadittava joka kohteelle erikseen.

Tyypillinen siltarakenne on paikallavalettu betonisilta. Myös elementtirakenteisissa silloissa elementit suunnitellaan ja valmistetaan kyseistä siltapaikkaa varten massatuotannon sijasta. Keskenään samanlaisia elementtejä ei välttämättä tule. Mikäli rakenteita tai sillan rakenneosia joudutaan uusimaan, siitä aiheutuu materiaalipäästöjen lisäksi kiertoteistä aiheutuvat päästöt.

Vaatimuksia:

- Rakenteelliset vaatimukset: isot dynaamiset kuormat
- Käyttöikä
- Toiminnalliset vaatimukset (mm. liikenneturvallisuus, käytettävyys, esteettömyys, väylän luokitus)
- Ulkonäölliset vaatimukset (riippuen siltapaikkaluokasta)
- Infrabetonivaatimukset
- AKR-vaatimukset
- Olosuhteiden aiheuttamat vaatimukset rakenteille (liittyy käyttöikään)

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Infrabetonivaatimukset määrittävät laatuvaatimukset silloissa käytettävälle betonille. Vaatimusten mukaisesti 30% kiviaineksesta voidaan korvata uusiokiviaineksella. Massiivisissa siltabetonivaluissa on jo vuosien hyvillä kokemuksilla käytetty esimerkiksi masuunikuonaa, joka on yksi sementtiä korvaavista sideaineista, joilla voidaan pienentää betonin hiilijalanjälkeä. Masuunikuonaa lisätään uusiin siltabetonirakenteisiin myös alkali-kiviainesreaktion (AKR) ehkäisemiseksi. Lisäpäästövähennyksiä voi siis olla muita rakenteita vaikeampi saavuttaa silloissa. Ottaen huomioon myös merkittävät rakenteelliset vaatimukset, ei kokeellisten päästövähennysten käyttämistä kannata aloittaa betonisilloista.

Muita keinoja vähentää siltabetonien hiilijalanjälkeä ovat rakenteen ns. optimointi eli pyrkiminen mahdollisimman vähän materiaalin käyttöön. Siltamateriaalien optimointia harkitessa on muistettava, että tiukille mitoitettu rakenne on herkempi rakentamisen ja ylläpidon virheille sekä sitä kautta kantavuuspuutteille. Silloissa vähähiilisyyys toteutuu myös sillastoa oikein hoitamalla ja korjaamalla siten, että suunniteltu käyttöikä saavutetaan. Myöhästyneet, järeämmät korjaukset lisäävät elinkaaren hiilijalanjälkeä.

4.1.2 Tunnelit, kaukalarakenteet sekä suuaukkorakenteet

Tunneli on väylä, jota pitkin liikenne kulkee kallion tai muun maa-aineksen läpi. Kaukalarakenne toimii muuten samoin kuin tunneli, mutta on päältä avoin. Kallion läpi kulkevan tunnelin reunat on usein lujitettu ruiskubetonoimalla tai betonielementeillä. Ruiskubetonointi eroaa tavanomaisesta betonoinnista siten, että se nimensä mukaisesti ruiskutetaan rakenteeseen suuttimen läpi. Myös ruiskubetonille asetetaan lujuusluokkavaatimus. Osa kuormista, kuten esimerkiksi veden noste, aiheuttaa sen, että rakenteesta on tehtävä riittävän massiivinen, ettei se lähde liikkeelle.

Vaatimuksia:

- Käyttöikä

- Toiminnalliset vaatimukset (mm. liikenneturvallisuus, käytettävyyden esteettömyys, väylän luokitus, tulipalo)
- Infrabetonivaatimukset
- Olosuhteiden aiheuttamat vaatimukset rakenteille
- Vesitiiveys
- Maanpaine
- Räjähdykset

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Kalliotunneleissa on mahdollista korvata sementtiä vähähiilisillä seosaineilla. Ruiskubetonissa sementin määrä on valmisbetoniin verrattuna varsin suuri. Kaukalo- ja suuaukkorakenteet ovat tyypillisesti saderasitukselle alttiita, joten niissä masuunikuonaa lisätään betoniin myös infrabetoniohjeen mukaisesti alkali-kiviainereaktion ehkäisemiseksi. Tunneli- ja kaukalorakenteet ovat vaativia rakenteita joiden korjaaminen tai uusiminen on haastavaa ja aiheuttaa kiertoteiden tarvetta. Tästä syystä myös käyttöiän saavuttaminen vähentää rakenteen elinkaaripäästöjä merkittävästi.

4.1.3 Tukimuurit

Tukimuuri on rakenne, jota tarvitaan paikoissa, joissa ympäristössä on suuria korkeuseroja ja vain vähän tilaa. Tukimuureja tarvitaan liikenneympäristössä esimerkiksi rampeilla tai kun kaksi toisistaan erillistä väylää kulkee lähekkäin, mutta eri tasossa. Tukimuureja käytetään myös esimerkiksi puistorakentamisessa. Tukimuuri on usein paikallavalettu betonirakenne, sillä se mahdollistaa korkeiden ja korkeudeltaan muuttuvien tukimuurien rakentamisen. Tukimuurit voidaan rakentaa myös kokonaan tai osittain elementtirakenteisena, mikäli tukimuurin muoto ja korkeus sen sallivat. Infrabetonivaatimukset määrittävät laatuvaatimukset käytettävälle betonille, mikäli tukimuuri sijaitsee liikenneväylällä. Puistoympäristössä tukimuuriin kohdistuu tyypillisesti vähemmän rasituksia, joten rakenteen mitat voivat olla pienemmät.

Vaatimuksia:

- Rakenteelliset vaatimukset (maanpaine, liikennekuormat)
- Käyttöikä
- Toiminnalliset ja ulkonäölliset vaatimukset
- Infrabetonivaatimukset
- Olosuhteiden aiheuttamat vaatimukset rakenteille (suolaus, kosteus ym)

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Betonissa voidaan käyttää sementtiä korvaavia sideaineita ja uuden kiviaineksen sijasta on mahdollista käyttää uusiokiviaineksia. Varsinkin pienemmät tukimuurielementit voidaan toteuttaa muualta puretuilla ja kierrätetyillä tuotteilla, mikäli tukimuurin kuorma pysyy laskennallisesti samana tai alenee. Isommissa, haastavissa olosuhteissa vähähiilisyys toteutuu parhaiten käyttöiän saavuttamalla, eli rakenteiden oikea-aikaisella huoltamisella ja korjaamisella. Lisäksi voisi tutkia esimerkiksi kohtuukuntoisen purettavan tukimuurin palojen hyödyntämistä esimerkiksi pohjalaattoina.

4.1.4 Vesi- ja merirakenteet

Lautta- ja rantalaiturit, rantamuurit, sulut ja kanavarakenteet

Otsikon rakenteet sijaitsevat kosketuksissa meriveteen, minkä lisäksi ne sijaitsevat rannalla siten, että niille voi kohdistua luonnonkuormien lisäksi maa-alueen liikennekuormia sekä merialuksista aiheutuvia kuormia. Helsingin kaupungin suunnitteluohjeiden mukaan betonirakenteiden pinnassa on käytettävä ruostumatonta terästä tai pinta on vaihtoehtoisesti suojattava esim. verhouksilla. Lisäksi betonin lujuudelle on Helsingin kaupungin suunnitteluohjeissa annettu minimivaatimukset (väh. C55/67, P50).

Vaatimuksia:

- Rakenteelliset vaatimukset (aluskuormat, liikennekuormat, vedenpaine ja -noste, maanpaine, jääkuormat)
- Käyttöikä
- Toiminnalliset ja ulkonäölliset vaatimukset
- Olosuhteiden aiheuttamat lisävaatimukset rakenteille (veden vaihteluvälillä rasitettuimmat rakenteet)

Muut merirakenteet (laiva- ja uittojohteet, kasuunit, satamalaiturit)

Muihin merirakenteisiin on kirjattu rakenteet, jotka voivat sijaita itsessään merialueella, eikä niille kohdistu maanpäällisiä dynaamisia liikennekuormia. Näillä rakenteilla suunniteltu käyttöikävaatimus on alhaisempi kuin rannan merirakenteilla ja niiden uusiminen on helpompaa ilman liikennehäiriöitä.

Vaatimuksia:

- Rakenteelliset vaatimukset (aluskuormat, vedenpaine ja -noste, jääkuormat)
- Käyttöikä
- Toiminnalliset ja ulkonäölliset vaatimukset
- Olosuhteiden aiheuttamat lisävaatimukset rakenteille (veden vaihteluvälillä rasitettuimmat rakenteet)

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Vesi- ja merirakenteissa mahdollinen hiilijalanjäljen vähentäminen saavutetaan parhaiten suunnitellun käyttöiän saavuttamisella, johon sisältyvät rakenteiden oikea-aikainen huolto ja korjaukset. Seosaineiden suurta korvausosuutta ei merirakenteissa voi klordin kulkeutumisen vuoksi suositella. Suomenlahden vesi on kuitenkin melko vähäsuolaista, eikä suoraan vertaudu kansainvälisessä kirjallisuudessa esitettyihin merivesirasituksiin. Kaupungin suunnitteluohjeessaan (2021) vaatimien ruostumattomien teräsraudoitteiden korvaamista kuitutangoilla olisi hyvä tutkia päästöjen ja pitkäaikaiskestävyyden näkökulmista.

4.1.5 Meluseinät ja -kaiteet

Meluseiniä ja melukaiteita käytetään paikoissa, joissa tarvitaan melun vaimennusta, mutta tilaa on liian vähän esimerkiksi vallien rakentamiseen. Meluseinät ovat usein vähintään 2 metriä korkeita ja melukaiteet noin 1,0 ... 1,2 metriä tien reunan tasosta. Betoniset melukaiteet toteutetaan usein elementtirakenteisina, jolloin vaatimuksenmukaisuudesta vastaa elementtivalmistaja. Meluseinän materiaalivalinnassa betoniin saatetaan päätyä ulkonäkösyistä (esim. graafinen betoni).

Vaatimuksia:

- Maaperän/alustan kantavuus
- Törmäyskestävyys ja -turvallisuus
- Rakenteelliset vaatimukset (vaakakuormat: aurasuorma, tuulikuorma, törmäys)
- Olosuhteet

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Meluseinät on periaatteessa mahdollista rakentaa kokonaan tai osittain puretuista rakennusosista. Betonissa voidaan käyttää sementtiä korvaavia sideaineita ja uuden kiviaineksen sijasta on mahdollista käyttää ainakin osittain uusiokiviaineksia. Rakenteiden muotoa on mahdollista optimoida varsinkin paikoissa, joissa meluseinä ei ole väylän välittömässä läheisyydessä. Käyttöikää voi pidentää korjaamalla rakenteita.

Meluseinien rakennekaksuus ei yleensä määräydy murto- tai käyttörajatilamitoituksen mukaan. Betonin lujuudella tai sen kehittymisellä ei siis ole niin suurta merkitystä. Jos on päädytty rakentamaan meluseinä betonista, on periaatteessa mahdollista kokeilla vaihtoehtoisia seosaineita jopa elementtivalintoehdossa. Elementin pintaan on mahdollista tehdä kuviointi graafisella betonilla. Sama koskee myös muista materiaaleista rakennetun muurin betonisia perustuksia.

4.1.6 Raitioteiden rakenteet

Kiintoraiteen aluslaatat ja maanvaraiset peruslaatat

Raitiotien alla käytetään betonilaattaa maaperän kantavuuden ja vakavuuden varmistamiseksi sekä kiskoja jäykkään kiinnitykseen. Raitiotien pohjalaatta on yhtenäinen betonilaatta, joka rakennetaan yleisimmin kuitubetonista. HKL:n raitioteiden suunnitteluohjeen mukaan raitioteiden pohjarakenteiden kantavuus mitoitetaan samoin kuin tierakenteen kantavuus. Suunnittelussa on huomioitava routivuustavoite sekä raitioradan kuivatus.

Vaatimuksia:

- Maaperän/alustan kantavuus
- HKL:n vaatimukset

- Rakenteelliset vaatimukset (dynaamiset kuormat)
- Olosuhdevaatimukset
- Käyttöikä

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Betonissa on mahdollista käyttää sementtiä korvaavia, vähähiilisiä seosaineita. Esimerkiksi raitiotien kiintolaatta voisi sekä taloudellisesta että päästönäkökulmasta olla erinomainen kohde kuitubetonin käytölle. Kustannuksia ja työmaa-aikaa säästettäisiin esimerkiksi raudoitustöissä. Kuitubetonin päästövähennyspotentiaaliin liittyy joitakin epävarmuuksia, mutta betoniaseman, suunnittelijan ja kaupungin välisellä aktiivisella yhteistyöllä vähennyksiä voidaan saavuttaa.

Ajojohtimien ja yhteiskäyttöpylväiden perustukset

Ajojohtimien ja yhteiskäyttöpylväiden perustukset valmistetaan betonielementteinä, joihin pylväs kiinnitetään. Pylväiden perustusten mitoitus tehdään taulukkomitoituksena, jolloin laskettujen kuormien mukaan valitaan taulukosta soveltuvin perustuselementtityyppi.

Vaatimuksia:

- Rakenteelliset vaatimukset
- Olosuhdevaatimukset
- Käyttöikä

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Betonissa voidaan käyttää sementtiä korvaavia sideaineita ja uuden kiviaineksen sijasta on mahdollista käyttää ainakin osittain uusiokiviaineita. Hankintakriteerien asettelulla on mahdollista asettaa vaatimuksia tuoteosan vähähiilisuudelle elementtirakenteissa tuotteissa. Uudet kohteet voidaan tehdä muualta puretuilla ja kierrätetyillä tuotteilla, mikäli suunnittelukuormat pysyvät samoina ja pylväs on irrotettavissa jalustasta.

4.1.7 Kunnallistekniikka, puhdas vesi (esim. vesitornit, vesijohtorakenteet, huoltokaivot yms)

Vesihuoltorakenteita on maan alla Helsingissä lähes kaikkialla. Varsinkin runkolinjat ovat usein massiivisen kokoisia ja vaatimukset niiden häiriöttömyydelle ovat merkittävät. Varsinkin kaupunkiympäristössä rakennus- tai korjaustyöt sekä niiden pitkittyminen aiheuttavat merkittävää haittaa muulle alueenkäytölle. Rakenteet ovat usein maanalaisia rakenteita, joten niiden ulkonäölle ei ole asetettu vaatimuksia. Osa erilaisista vesihuollon rakenteista on paikallavalurakenteita (esim. pumppaamot) ja osa elementtirakenteista (vesijohtorakenteet). Paikallavaletut rakenneosat ovat yleensä massiivisen kokoisia, joten kierrätettyjen rakenteiden hyödyntäminen sellaisenaan uutena rakenteena tai sellaisen osana ei ole kannattavaa. Elementtirakenteiden osien uudelleenkäyttö on tuotteiden luonteen vuoksi haastavaa.

Vaatimuksia:

- Maaperän/alustan kantavuus
- Vesitiiveys
- Pakkasenkesto
- Maaperän aggressiivisuus
- Käyttöikä

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Hankintakriteerien asettelulla on mahdollista asettaa vaatimuksia tuoteosan vähähiilisuudelle elementtirakenteissa tuotteissa. Paikallavaletuissa tuotteissa on mahdollista käyttää vähähiilisiä seosaineita sementin sijasta.

4.1.8 Kunnallistekniikka, jätevesi (esim. pumppaamot, purkukuilut, huoltokaivot yms)

Puhtaan veden rakenteista poiketen jätevesirakenteissa on usein aggressiivisia kemikaaleja, mikä voi vaatia jopa betonin pinnoittamista erillisellä suoja-aineella

Vaatimuksia:

- Maaperän/alustan kantavuus
- Vesitiiveys

- Pakkasenkesto
- Syövyttävien aineiden kesto/maaperän aggressiivisuus
- Käyttöikä

Hiilijalanjäljen vähentäminen:

Hankintakriteerien asettelulla on mahdollista asettaa vaatimuksia tuoteosan vähähiilisyydelle elementtirakenteisissa tuotteissa. Paikallavaletuissa tuotteissa on mahdollista käyttää vähähiilisiä seosaineita sementin sijasta. Monet hienot sideaineet parantavat betonin tiiveyttä, ja erityisesti jos päädytään betonin pinnoittamiseen, voidaan niitä käyttää melko huoletta. Niillä voi olla hidastavaa vaikutusta lujudenkehittymiseen, mikä vaikuttaa työmaa-aikatauluun tai elementtikiertoon.

4.1.8 Sähköiset liikenneympäristön varusteet (kunnallistekniikka)

Voimajohtopylväiden perustukset

Betoniperustuksia tarvitaan erilaisille voimajohtopylväille usein stabiliteettivaatimusten takia. Mitoitus tehdään standardien ja Eurokoodien mukaan.

Vaatimuksia:

- Maaperän/alustan kantavuus
- Rakenteelliset vaatimukset

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Betonissa on mahdollista käyttää sementtiä korvaavia, vähähiilisiä seosaineita. Hankintakriteerien asettelulla on mahdollista asettaa vaatimuksia tuoteosan vähähiilisyydelle.

Valaisinpylväiden ja -mastojen perustukset, liikennevalojen ja puomien perustukset

Valaisinpylvään perustusten mitoitus tehdään taulukkomitoituksena, jolloin laskettujen kuormien mukaan valitaan taulukosta soveltuvin perustuselementtityyppi. Betoniperustuksia tarvitaan erilaisille valaisinpylväille ja -mastoille yleensä stabiliteettivaatimusten takia.

Vaatimuksia:

- Maaperän/alustan kantavuus
- Rakenteelliset vaatimukset
- Helsingin kaupungin vaatimukset

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Betonissa voidaan käyttää sementtiä korvaavia sideaineita ja uuden kiviaineksen sijasta on mahdollista käyttää uusiokiviaineksia. Uudet kohteet voidaan tehdä muualta puretuilla ja kierrätetyillä tuotteilla, mikäli suunnittelukuormat pysyvät samoina ja valaisin tai liikennevaruste on irrotettavissa jalustasta. Hankintakriteerien asettelulla on mahdollista asettaa vaatimuksia tuoteosan vähähiilisyydelle.

Kaapelikanavat, sähköjohtojen tukilaatat ym

Tietoliikenne ja -sähkökaapelit voivat kulkea katualueella niitä varten rakennetussa betonisessa kaapelikanavassa maan alla. Kanavien koot vaihtelevat muutamien kymmenien senttien levyisistä yli metrin levyisiin. Valmistetaan pääasiassa elementteinä. Kaapelikanavien kannelle kohdistuu usein katualueen kuormia.

Vaatimuksia:

- Rakenteellinen kestävyys katualueella (Teiden ja katujen liikennekuormat (RIL))
- Olosuhdevaatimukset

Hiilijalanjäljen vähentäminen

Betonissa on mahdollista käyttää sementtiä korvaavia, vähähiilisiä seosaineita. Myös betonin kiviainesta voidaan korvata kierrätysaineella. Uudet kohteet voidaan tehdä muualta puretuilla ja kierrätetyillä tuotteilla, mikäli uuden kohteen suunnittelukuorma on edellistä vastaava. Hankintakriteerien asettelulla on mahdollista asettaa vaatimuksia tuoteosan vähähiilisyydelle.

4.1.9 Paalulaatat ja maasillat

Paalulaatta on paalujen varaan rakennettu teräsbetoninen laatta, jonka päällä on pysyvä kuormana maapenger. Maapenkereen lisäksi paalulaatan päällä kulkee yleensä väyliä tai muita rakenteita, jotka vaativat paalurakenteiset perustukset. Paalulaattaa käytetään, kun perustusolosuhteet ovat vaikeita eivätkä vaihtoehtoiset perustusmenetelmät ole riittäviä tai ne ovat taloudellisesti liian kalliita. Paalulaattojen pääasiallinen rakennetyyppi on usein paikallavalettu betonirakenne. Paalulaatat rakennetaan paikallavaalurakenteina. Ne on myös mahdollista rakentaa elementtivalmisteinä.

Vaatimuksia:

- Rakenteelliset vaatimukset, isot kuormat
- Käyttöikä
- Infrabetoni
- Olosuhteet

Hiilijalanjäljen vähentäminen:

Paalulaatoissa on mahdollista käyttää sementtiä korvaavia sideaineita. Paalulaatoissa on teräskuitujen käytöstä saatu hyviä kokemuksia betoniterästankojen korvaajana, jolloin kokonaisuudessaan terästä kuluu vähemmän. Päästövähennyspotentiaali ei ole varma, sillä esimerkiksi kuitujen annostuksesta vastaa viime kädessä betonitoimittaja.

4.1.10 Teräsbetonipaalu (tuoteosa)

Teräsbetonipaaluja käytetään infrarakenteiden perustamiseen heikosti kantavilla pohjamailla. Paalu on tuoteosa, eli se tuodaan työmaalle asennusvalmiina. Yleensä paalut jätetään maahan käyttöikänsä päätteeksi, eli ei hyödynnettävissä uudestaan.

Vaatimuksia:

- Eurokoodit
- Paalutusohje
- Ympäristörasitukset

Hiilijalanjäljen vähentäminen:

Hankintakriteerien asettelulla on mahdollista asettaa vaatimuksia vähähiilisyydelle, jos betoni on rakenneteknisesti mahdollista korvata vähähiilisemmällä vaihtoehdolla, jota ei nykyisellään käytetä esimerkiksi kustannusten takia.

4.1.11 Maanvaraiset peruslaatat yleisesti

Peruslaattoja käytetään infran alla geosuunnittelijan ohjeiden mukaisesti. Betoniperustuksia tarvitaan erilaisille infrarakenteille yleensä silloin, kun epätasaista painumaa ei sallita. Näillä maanvaraisilla perustuksilla ei ole merkittäviä rakenteellisia vaatimuksia, vaan niiden tehtävänä on toimia alustana joka tukee niiden päällä sijaitsevia rakenteita.

Vaatimuksia:

- Maaperän/alustan kantavuus
- Helsingin kaupungin vaatimukset

Hiilijalanjäljen vähentäminen:

Rakenteiden mitoituksessa on mahdollista optimointipotentiaalia. Rakenne on maan alla, joten sillä ei ole ulkonäkövaatimuksia. Betonissa voidaan käyttää sementtiä korvaavia sideaineita ja uuden kiviaineksen sijasta on mahdollista käyttää uusiokiviaineksia. Kuitubetonin käyttöpotentiaalia on syytä tutkia.

Peruslaatta on myös mahdollista rakentaa vanhoista, ehjänä puretuista betonirakenteista, joita käytetään peruslaattaelementteinä.

4.1.12 Ympäristö- ja puistorakentaminen

Helsingin kaupunkiympäristössä käytettävien betonituotteiden on täytettävä kaupungin ennalta määrittämät laatuvaatimukset.

Portaat ja luiskat

Betoniportaita ja -luiskia käytetään ympäristörakentamisessa kulkuväylillä, joilla on suuria korkeuseroja. Portaat ja luiskat voidaan valmistaa joko paikalleen maastoon, tai valmistaa ennalta elementeistä. Rakenteet tehdään kuitenkin paikan vaatimaan nousuun ja mittaan ja ne riippuvat ympäristöstä. Portailla ja kevyen liikenteen käyttöön suunnitelluilla luiskilla ei ole merkittäviä rakenteellisia vaatimuksia.

Vaatimuksia:

- Ulkonäkö
- Maaperän/alustan kantavuus
- Helsingin kaupungin vaatimukset

Hiilijalanjäljen vähentäminen:

Betonissa voidaan käyttää sementtiä korvaavia sideaineita ja kiviaineksena on mahdollista käyttää uusiokiviaineksia.

Vesialtaat, istutusaltaat

Betoniset vesi- ja istutusaltaat tehdään usein puistoympäristöön katseltaviksi. Betonin vaatimukset rakenteelle muodostuvat pääasiassa vedenpitävyyden tai voimakkaan kosteusrasituksen kautta. Altaissa voidaan käyttää paikallavalu- tai elementtirakenteita koosta ja muodosta riippuen.

Vaatimuksia:

- Ulkonäkö
- Maaperän/alustan kantavuus
- Helsingin kaupungin vaatimukset
- Olosuhteet

Hiilijalanjäljen vähentäminen:

Betonissa voidaan käyttää sementtiä korvaavia sideaineita ja kiviaineksena on mahdollista käyttää uusiokiviaineksia.

Puistokalusteet, leikki- ja kuntovälineet perustukset, pengerkaiteet ja aidat, liikennemerkkien perustukset

Perustuksia käytetään puistokalusteiden alla kalustetoimittajan ja geoteknikon ohjeiden mukaisesti. Betoniperustuksia tarvitaan erilaisille leikki- tai kuntoiluvälineille yleensä stabiliteettivaatimusten takia, jolloin kaluste pysyy paikoillaan tukevasti. Puistokalusteiden perustuksilla ei ole merkittäviä rakenteellisia vaatimuksia, vaan niiden tehtävänä on toimia alustana, johon kalusteet ja välineet kiinnitetään.

Vaatimuksia:

- Maaperän/alustan kantavuus
- Helsingin kaupungin vaatimukset

Hiilijalanjäljen vähentäminen:

Sementtiä korvaavilla sideaineilla voidaan vähentää rakenteen hiilidioksidipäästöjä. Rakenteiden mitoituksessa on mahdollista optimointipotentiaalia. Rakenteessa on mahdollista käyttää kierrätettyä kiviainesta. Rakenne on maan alla, joten sillä ei ulkonäkövaatimuksia. Mahdollista käyttää muualta purettuja rakenteita.

Betonikiveykset ja -laatat (ei kantavat)

Betonilaattoja ja -kiviä käytetään väylien päällysteenä vaihtoehtona luonnonkivisille tai asfalttipäällysteille. Niitä käytetään myös esimerkiksi siltojen luiskissa.

Vaatimuksia:

- Riittävä lujuus kyseeseen tulevalle väylälle
- Pakkasenkesto

Hiilijalanjäljen vähentäminen:

Betonilaatoilla tai -kivillä ei ole merkittäviä rakenteellisia vaatimuksia, joten betonin koostumuksen valinnassa on laajalti mahdollisuuksia. Ne saattaisivat olla hyvä ensikohde esimerkiksi geopolymeerien kokeilemiseen infrarakentamisessa.

Betonilaatat ja -kivet voidaan rakenteiden purkamisen jälkeen käyttää uudestaan vastaavassa kohteessa, mikäli ne säilyvät purkamisesta ja kuljetuksesta ehjänä. Uudet kohteet voidaan tehdä muualta puretuilla ja kierrätetyillä tuotteilla.

Liikenne-esteet

Liikenne-esteitä (ns. betoniporsaita tai -norsuja) käytetään nimensä mukaisesti estämään liikenne tietyille alueille. Voivat olla maalattu puna-keltaisella huomiovärillä. Liikenne-esteet valmistetaan pääsääntöisesti elementteinä, ja niiden vaatimukset liittyvät kaupunkialueelle sopivuuteen, esim ei teräviä särmiä ja riittävä paino.

Vaatimuksia:

- Ei erityisvaatimuksia

Hiilijalanjäljen vähentäminen: Uudelleenkäytettävissä useita kertoja. Sementtiä korvaavia sideaineita on mahdollista käyttää. Käyttöä pidentäminen korjaamalla ja suunnitteluvaatimuksilla uusille hankittaville tuotteille.

Maakostea betoni

Maakostea betonia käytetään päällystekivien ja -laattojen alustana, kun kasvillisuutta kivien tai laattojen väleissä ei sallita. Kiertotalouden kannalta on syytä huomata, että hydratoitumaton maakostea betoni voi tukkia viemäreitä, mikäli sitä kulkeutuu sinne vesivirrassa.

Vaatimuksia:

- Ei erityisvaatimuksia

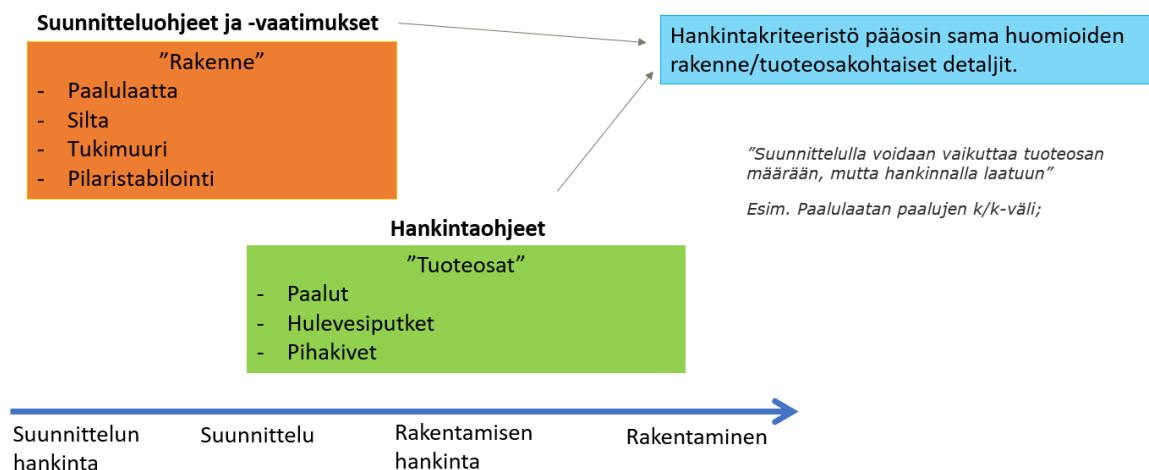
Hiilijalanjäljen vähentäminen: Maakostealle betonille voidaan esittää sideainemäärävaatimus (kg/m^3), mutta sideaineita itsessään ei ole määritetty, jolloin betonin koostumus ja sideaineiden valinta on joustavaa.

.

5. YHTEENVETO

Maapallon päästöistä noin 7 % aiheutuu betonin ja sementin valmistuksesta. Suomessa vastaava osuus on RT:n mukaan 1,5 %. Suomen ainoan sementtivalmistajan Finnsementin mukaan pelkkä sementtiteollisuus aiheuttaa 1,8 prosenttia Suomen päästöistä (Finnsementti 2021). Sementti aiheuttaa valtaosan betonin päästöistä. Sementin likimääräinen massaosuus seostamattomasta betonista on 10...15 % ja päästöistä 70...80 %.

Hankintalaki tarjoaa monia mahdollisuuksia vaikuttaa hankinnan vähähiilisyys- ja ympäristövaikutuksiin. Hankintakriteerit tulee esittää erikseen kullekin hankinnan kohteelle ja vaiheelle. Hankintakriteerien asettelulla on mahdollista asettaa vaatimuksia muiden kriteerien rinnalla myös vähähiilisuudelle, mikäli betoni on rakenneteknisesti mahdollista korvata vähähiilisemmällä vaihtoehdolla. Kuvassa 5.1 on esitetty yksinkertaistettu ajatus vähähiilisyyteen vaikuttamisesta.

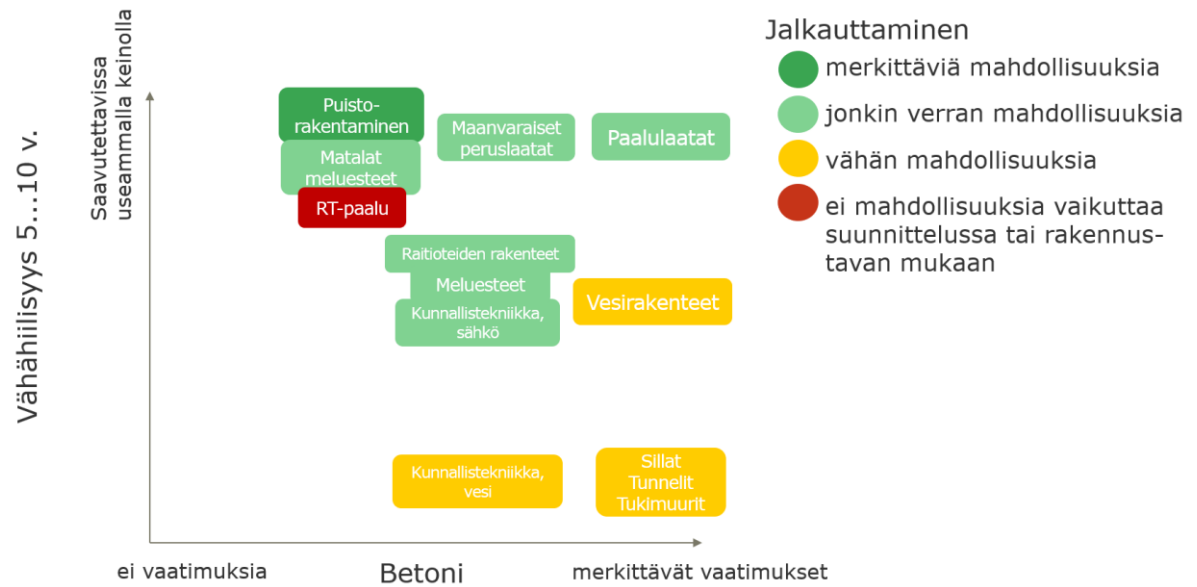


Kuva 5.1. Yksinkertaistettu perusajatus vähähiilisyyteen vaikuttamisesta.

Hankintaorganisaatiolla tai sen omistajalla voi olla strategioita, jotka vaikuttavat ympäristöä säästäviin julkisiin hankintoihin tai vihreään julkiseen rakentamiseen. Strategioiden ja ohjelmien kautta muodostuu ylätason strateginen mandaatti, jota tässä tapauksessa vähähiilisen julkisen rakentamisen tavoitteet toteuttavat.

Kaupungille paras tapa vähentää päästöjä suunnitteluvaiheessa ovat hankekohtaiset suunnitteluperusteet sekä urakan valmisteluvaiheessa hankintakriteerit. On hyvä huomioida, että myös Eurokoodit ja viranomaisten ohjeet todennäköisesti kehittyvät tulevaisuudessa vähähiilisyyttä kohti. Näiden muuttaminen on kuitenkin vain korkeintaan välillisesti kaupungin käsissä. Lähivuosina ilmestyvissä toisen sukupolven Eurokoodeissa ja erityisesti niiden liitteissä esitetään suunnitteluohjeita useiden potentiaalisesti päästöjä säästävien toimenpiteiden toteuttamiseen (kuidut, kuitutangot, kierrätyskiviaines). Lisäksi myös muita standardeja ollaan mahdollisesti revisioimassa päästöjenkin näkökulmasta. Kaupungin onkin syytä olla aktiivinen, jotta nämä positiiviset muutokset saataisiin myös kansallisen liitteen piiriin infrarakentamisessa.

Kuvaan 5.2 on koostettu yhteenveto rakenteista, joissa on arvioitu betonin hiilijalanjäljen vähentämisen potentiaalia betonin ja suunnittelun näkökulmasta. Yhteenveto perustuu selvitystyön kappaleissa läpikäytyihin tietoihin eri rakenteista, niihin liittyvistä suunnitteluvaatimuksista sekä vähähiilisempien ratkaisujen vaikutuksesta rakenteen hiilijalanjälkeen. Tiedot kerättiin kuvan lisäksi myös taulukkomuotoiseen versioon, joka löytyy liitteestä A. Suurin muutosmahdollisuus on selvitystyön perusteella puistorakenteilla sekä matalilla melusteilla. Toisaalta taas paalulaatan käyttömäärän uskotaan olevan korkea, mikä tukee rakenteen hiilijalanjäljen pienentämisvaikutusten hyödyntämistä infrarakentamisessa. Kaupungin raitiotierakentamisen kasvussa nähdään myös mahdollisuuksia vähähiilisempään rakentamiseen käytetyn betonin osalta.



Kuva 5.2. Selvityksen tulokset (kts. taulukko LIITE A)

LÄHDELUETTELO

KPL 1

KPL 2

Almemark, M. (2020). *Ympäristöseloste. Betoniterästuotteet - Celsa Steel Service OY:n tuotanto Suomessa*. EPD S-P-00307. IVL Swedish Environmental Research Institute.

by 201 (2018). *Betonitekniikan oppikirja 2018*. Kuudes päivitetty painos. Oppikirjat, 201. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

by 66 (2018). *Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje 2018*.

by (2021). *Päivittyvä ohje betonin alkali-kiviainesreaktion hallitsemiseksi*.

CEMBUREAU (2020). *Cementing the European Green Deal*. The European Cement Association.

Cyr, M., Idir, R. ja Escadeillas, G. (2012). Use of metakaolin to stabilize sewage sludge ash and municipal solid waste incineration fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials* 243, s. 193–203. ISSN: 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.019>.

De Belie, N., Soutsos, M. ja Gruyaert, E., toim. (2018). *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4*. English. Vol. 25. RILEM State-of-the-Art Reports. Springer. ISBN: 9783319706054. DOI:10.1007/978-3-319-70606-1. Luvut:

1. GGBFS (W. Matthes et al. 2018)
2. Fly Ash (R. Doug Hooton et al. 2018)
3. Silica Fume (R. C. Lewis 2018)
4. Limestone Powder (L. Courard et al. 2018)
5. Metakaolin (F. Wang et al. 2018)

EPD-Norge (2017). *Steelfibre (DE 35/0,55 DE 50/0,75 og DE 50/1,0)*. Mapei AS. EPD.

Finnsementti (2021a). <https://finnsementti.fi/nosto/uusi-vahapaastoinen-cem-iii-sementti-saatavilla-syyskuusta-alkaen/>

- (2020a). *Ympäristöraportti 2020*. Finnsementti.

- (2021b). *Ympäristöraportti 2021*. Finnsementti.

- (2020b). *Ympäristöseloste. KJ400*. EPD. Finnsementti.

- (2021c). *Ympäristöselosteet Oiva, Pika ja Rapid / Parainen ja Lappeenanta*. Saatavilla: <https://finnsementti.fi/palvelut/ymparisto/sementtien-ymparistoselosteet/>

Häkkinen, T. (2020a). *Generic data for metal products / steel products (excluding stainless)*. Suomen ympäristökeskus.

- (2020b). *Generic data for metals - stainless steel*. Suomen ympäristökeskus.

ITB (2017). *Steel fibres for concrete reinforcement*. ArcelorMittal.

Mäntyranta, M. (2018). *Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje 2018*. BY. Tekniset ohjeet, 66. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

Punkki, J. (2017). *Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu - opas suunnittelijoille*. BY. Tekniset ohjeet, 68. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

SFS-EN 206 *Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus*

SFS-EN 12620 (2008). *Betonikiviainekset*. SFS-EN 12620 + A1. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 197-1 (2012). *Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus*. SFS-EN 197-1. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 934-2 (2013). *Betonin, laastin ja injektointilaastin lisäaineet. Osa 2: Betonin lisäaineet. Määritelmät, vaatimukset, vaatimustenmukaisuus ja merkintä*. SFS-EN 934-2 + A1:2012.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Vainio-Kaila, T. (2020a). *Generic data for crushed aggregates*. Suomen ympäristökeskus.
– (2020b). *Generic data for sand and gravel*. Suomen ympäristökeskus.
Vares, S. (2021). *Generic data for ready mix concrete*. Suomen ympäristökeskus.
VTT (2019). <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/muutetaan-betonin-ongelmat-ratkaisuiksi>
Väylävirasto (2020). *Infrabetonien valmistus*. Väyläviraston ohjeita 41/2020. Väylävirasto.

KPL 3

YMPÄRISTÖOPAS 2017, Vihreä julkinen rakentaminen. Hankintaopas. Matti Kuittinen, Simon le Roux

YMPÄRISTÖOPAS 2017, Vähähiilisen rakentamisen hankintakriteerit. Matti Kuittinen, Simon le Roux

KPL 4

https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-31_ncci2_web.pdf
https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-27_radan_matalan_web.pdf,
https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_21_2015_tien_meluesteiden_suunnittelu_010715_web.pdf
https://www.hel.fi/static/hkr/ohjeita_suunnittelijoille/taitorakenteiden_suunnitteluohje_20210308.pdf
https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-34_tietunnelin_rakennetekniset_web.pdf
<https://www.hel.fi/hel2/hkr/julkaisut/ohjeet/maanallerakentamisohje.pdf>
<https://www.hel.fi/kaupunkiymparisto/fi/julkaisut-ja-aineistot/ohjeita-suunnittelijoille/kaupunkikalusteohje>
https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2014-05_paalulaattojen_paaluhatturakenteiden_web.pdf
https://www.hel.fi/hel2/hkr/julkaisut/kaluste/2018/tuotekortit_18/materiaali_laatu.pdf
https://www.e-julkaisu.fi/hkl/raitioteiden_suunnitteluohje/mobile.html#pid=44
https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2019-11_tyyppihyväksytyt_sahkoratapylyvasperustukset_web.pdf

Kuvailulehti

Tekijä(t)	Taavi Dettenborn, Laura Kainulainen, Kasper Pirttikoski, Katariina Martikkala ja Esa Huurinainen (Ramboll Oy)
Nimike	Infrarakentamisen betonin hiilijalanjäljen vähentäminen
Sarjan nimike	Helsingin kaupungin kaupunkiympäristön aineistoja
Sarjanumero	2022:2
Julkaisuaika	02:2022
Sivuja	41
Liitteitä	1
ISBN	978-952-386-077-3
ISSN	2489-4257 (verkojulkaisu)
Kieli, koko teos	Suomi
Kieli, yhteenveto	Suomi

Tiivistelmä:

Maapallon päästöistä noin seitsemän prosenttia aiheutuu betonin ja sementin valmistuksesta. Suomessa pelkkä sementtiteollisuus aiheuttaa 1,8 prosenttia Suomen päästöistä. Hankintalaki tarjoaa monia mahdollisuuksia vaikuttaa hankinnan vähähiilisyys- ja ympäristövaikutuksiin. Kaupungille paras tapa vähentää päästöjä suunnitteluvaiheessa ovat hankekohtaiset suunnitteluperusteet sekä urakan valmisteluvaiheessa hankintakriteerit.

Avainsanat :

Vähähiilisyys, hiilineutraalius, hiilijalanjälki, ilmasto, infrarakentaminen, rakentaminen, HNH, betoni, sementti, betonirakenteet, hankintalaki



Helsinki

Kaupunkiympäristön toimiala huolehtii Helsingin kaupunkiympäristön suunnittelusta, rakentamisesta ja ylläpidosta, rakennusvalvonnasta sekä ympäristöön liittyvistä palveluista.