

Betonirakenteiden ympäristövaikutukset ja kierrätysmahdollisuudet

Ahonen Aapo

Opinnäytetyö

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan insinööri

2024

Tekijä	Aapo Ahonen	Vuosi	2024
Ohjaaja(t)	Matti Moilanen		
Toimeksiantaja	Lapin Ammattikorkeakoulu		
Työn nimi	Betonirakenteiden ympäristövaikutukset ja kierrätysmahdollisuudet		
Sivumäärä	33 + 3		

Työ perustui kokonaan kirjallisuuteen ja internetissä tarjolla olevaan materiaaliin. Tässä opinnäytetyössä kerroin betonin valmistusprosessista työmaan, sekä osittain tehtaan näkökulmasta. Osaan antaa aiheeseen myös omaa näkemystäni oman työhistoriani kautta. Kerron ja samalla perehdyn itse betonin ja sementin valmistuksen historiaan. Tavoitteena ensisijaisesti oli keksiä itselle opinnäytetyöhön mielenkiintoinen aihe, mutta lopputulemana oli herääminen todellisuuteen siitä, kuinka paljon lisää potentiaalia ympäristövaikutusten näkökulmasta betonilla olisi.

Betoni tarvitsee sitoutuakseen sementtiä ja se onkin betonin tärkein raaka-aine. Käsittelin sementin valmistusta, sen ympäristövaikutuksia ja päästöjä, sekä koko betoniteollisuuden päästöjä niin Suomessa kuin globaalisti. Esitin myös hieman omia laskelmia betoniteollisuuden päästöistä suhteessa koko maan ja maailmanlaajuisiin päästöihin.

Yritin etsiä mahdollisimman paljon Suomen kielistä kirjallisuutta ja tutkimusta koskien betonin kykyä toimia hiilinieluna, mutta aiheesta on hyvin rajallisesti tietoa saatavilla. Havainto on melko tuore, eikä tutkimusta ole juurikaan tähän liittyen saatavilla vaikkakin karbonatisaatio on jo pitkään tunnettu käsite. Kirjoitin aiheesta kuitenkin niin paljon, kuin olemassa oleva aineisto antoi myöden. Lisäksi kerroin hieman kierrätysbetonin käytöstä uusiobetonin raaka-aineena, sekä tehdyistä tutkimuksista tämän suhteen. Koska aiheesta oli vähän Suomessa tehtyä tutkimusdataa, että kirjallisuutta saatavilla, jouduin käyttämään lähteenä myös muita opinnäyte-, että kandidaatintöitä. Opinnäytetyön tuloksena on pohdintaa siitä, kuinka päästökaupalla ja poliittisilla linjauksilla voisi ohjata betoni- ja rakennusteollisuutta enemmän kiertotalouden suuntaan.

Avainsanat	Runkoaines Uusiobetoni Karbonatisaatio Betonimurske Puristuslujuus Valmisbetoni
-------------------	--

Author	Aapo Ahonen	2024
Supervisor(s)	Matti Moilanen	
Commissioned by	Lapin Ammattikorkeakoulu	
Title	Environmental impact and recycling potential of concrete structures	
Number of pages	33 + 3	

The work was based entirely on literature and material available on the internet. In this thesis, I described the concrete manufacturing process from the point of view of the construction site and partly from the point of view of the factory. I can also give my own view on the subject through my own work history. I will tell and at the same time familiarise myself with the history of concrete and cement production. The aim was primarily to come up with an interesting topic for my own thesis, but the end result was an awakening to the reality of how much more potential concrete has from an environmental point of view.

Concrete needs cement to bind and cement is the main raw material for concrete. I looked at the production of cement, its environmental impact and emissions, and the emissions of the concrete industry as a whole, both in Finland and globally. I also presented some of my own calculations of emissions from the concrete industry in relation to the national and global emissions.

I tried to find as much Finnish-language literature and research as possible on concrete's ability to act as a carbon sink, but there is very limited information available on the subject. The observation is quite recent and there is little research available on the subject, although carbonation is a long-established concept. However, I wrote as much as the existing data allowed. I also gave some information on the use of recycled concrete as a raw material for new concrete, and on the research that has been carried out in this respect. As there was little research data and literature available on the subject in Finland, I had to use other theses and bachelor's theses as sources. The result of the thesis is a reflection on how emissions trading and political policies could steer the concrete and construction industry towards a more circular economy.

Keywords	Bulk materials Neoconcrete Carbonation Concrete rubble Compressive strength Precast concrete
-----------------	---

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 BETONIN HISTORIAA	7
2.1 Betonin historiaa	7
3 BETONIN VALMISTUS, OMINAISUUDET JA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET .	9
3.1 Betonin lujuuskehitys	9
3.2 Sementin valmistus ja ympäristövaikutukset.....	12
3.3 Betonin valmistus.....	13
3.4 Betonin huokostus	17
3.5 Infrabetonin valmistus ja huokostus	18
4 BETONIN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	21
4.1 Sementin ja betonin valmistuksen ympäristövaikutukset	21
4.2 Betonirakenteiden ympäristövaikutukset ja potentiaali hiilinieluna	22
4.3 Tutkimusta betonimurskeen hiilensidonnasta	25
5 BETONIN RUNKOAINEENA KIERRÄTYSBETONI.....	28
6 YHTEENVETO	31
LÄHTEET	33

1 JOHDANTO

Betonin kierrätysmahdollisuudet ovat betonin valmistamisen hiilijalanjäljen vuoksi koko ajan ajankohtaisempi kysymys. Betonin kierrätys murskaksi kiertotalouteen on jo hyvällä tasolla. Betonimurskasta irtoaa kuitenkin eri haitta-aineita, jotka estävät sen käytön esimerkiksi Pohjavesialueilla. Betonimurskan ominaisuudet ja tutkimus ovat jo niin hyvällä tasolla, että sen käytöstä löytyy esimerkiksi Marasetus, joka helpottaa murskeen käyttöä. Väylävirastolta löytyy myös ohje betonijätteen käsittelyyn ja käyttöön (Väylävirasto 2022, 6).

Betoni toimii hiilinieluna, mutta myös merkittävänä päästöjen aiheuttajana niin Suomessa kuin globaalisti. Pohdin opinnäytetyössä varsinkin betonin karbonatisoitumista ja potentiaalia tulevaisuudessa parempana hiilinieluna. Tutkimusta aiheesta on rajallisesti, vaikka potentiaali on mielestäni valtava. Betonin merkitystä hiilinieluna on alettu tutkia tarkemmin vasta 2010 –luvulla, joten pitkän aikavälin tutkimusta aiheesta ei oikeastaan ole. Kuitenkin tutkimuksissa voidaan mallintaa ja laskea esimerkiksi Karbonatisoitumisen edistymistä betonirakenteissa. On myös tutkittu betonin karbonatisoitumisen edistymistä betonimurskeasoissa ja hienoaineksen vaikutusta karbonatisoitumiseen näissä kasoissa.

Valmisbetonille erityisen tärkeää on nopea lujuuskehitys rakenteen nopeaa käyttöönottoa ajatellen. Myös tavoite- ja jäätymslujuuden nopea saavuttaminen ilman kiehumista on valmisbetonille tärkeä ominaisuus. Alessandro P. Fantilli (Hansen, 1992, 58) tutkimuksen mukaan, jopa 30 % valmisbetonin runkoaineesta voi olla kierrätysbetonia, ennen kuin se alkaa vaikuttaa selvästi betonin lujuuteen. Kierrätysbetonin käyttöä valmisbetonin runkoaineena uusiutumattomien luonnonvarojen sijaan tulisikin tutkia enemmän, sillä purettavien betonirakenteiden määrä talokannassa on 2,5 kertaistunut kymmenessä vuodessa. (Betoniteollisuus ry)

Ajatus opinnäytetyön takana oli keksiä itselle mieluisa ja kiinnostava aihe, sekä tutustua betonin kierrätysmahdollisuuksiin, ympäristövaikutuksiin ja mahdollisuuksiin hiilinieluna. Lisäksi koen, että betonista kertominen sen elinkaarensa alusta loppuun parantaa omaa käsitystä betonirakentamisesta kokonaisuutena.

2 BETONIN HISTORIAA

2.1 Betonin historiaa

Portland-sementti keksittiin 1800-luvulla, mutta betoni on sitäkin vanhempi keksintö. Betonirakenteiden vanhimpiin kuuluvia, kuuluisia rakenteita on Rooman Pantheon. Tämän aikaisen betonin sideaineena toimi potsolaani, joka on "silikaa sisältävää vulkaanista tuhkaa" (Betonin ympäristövaikutukset kirja 2007). Betonin suosittuja käyttökohteita 1800-luvun lopussa ja 1900-luvun alussa olivat patsaat ja pienet veistokset. Pieni kivi ja helppo työstettävyys nostatti betonin suosiota veistoksien ja patsaiden teon parissa. (Betoniteollisuus ry, Betonin historia; Betonikeskus ry, 2007, 9-11)

Raudoitusteräksien käyttö betonirakenteissa keksittiin 1800-luvun puolivälissä, mutta lopullinen läpimurto betonin käytölle rakennuskohteissa tapahtui Pariisin maailmannäyttelyssä vuonna 1900. (kirja 2007). Tästä alkoi betonin niin sanottu Vallankumous rakentamisessa, joka jatkuu edelleen tänä päivänä. Kuuluisa arkkitehti, joka hyödynsi modernia betoniteknologiaa suunnittelussaan, oli Alvar Aalto. Ensimmäinen Suomessa tehty teräsbetonisilta on Tönnön silta Orimattilassa, joka rakennettiin vuonna 1911 ja se on edelleen käytössä. (Betoniteollisuus ry, Betonin historia; Betonikeskus ry, 2007, 9-11)

Samalla kun Suomi teollistui 1920-luvulta alkaen, kasvoi betonirakentamisen määrä räjähdysmäisesti. Varsinkin 1930-luvulta alkaen betonirakentaminen on kasvanut kasvamistaan. Tähän aikakauteen sijoittuvia, kuuluisia rakennuskokonaisuuksia ovat muun muassa Töölö asuinalueineen sekä Töölön stadion. Lisäksi betonin käyttö massiivirakenteissa yleistyi vuosi vuodelta ja keksittiin alkaa rakentaa betonista yhä enemmän siltoja, sekä patoja ja vesitorneja. Myös kaupunkien viemärikokonaisuudet keksittiin alkaa rakentaa betonista 1930-luvulla. (Betonin historia; Betonikeskus ry, 2007, 9-11)

Elementtirakentaminen keksittiin 1950-luvulla. Elementtirakentaminen helpotti sotien jälleenrakennusvuosia, jolloin erityisesti kaupunkien vetovoima, sekä jatkuva teollistuminen ja asumisen keskittyminen nosti asuntojen tarvetta lähiöissä. Vuonna 1970 SBK julkaisi betonielementtijärjestelmän, jonka tehtävänä oli vakioida elementtityypit ja näiden liitokset ja näin ollen helpottaa elementtirakentamista. Elementtirakentaminen on kasvattanut suosiotaan siitä päivästä lähtien talonrakentamisessa, mutta infrassa valmiselementtirakenteet ovat harvemmassa johtuen mobilisointikustannuksista, sekä haastavista rakennuskohteista. Tyypillisimpiä talonrakennuksessa käytettäviä elementtejä ovat ontelolaattaelementit. (Betoniteollisuus ry, Betonin historia; Betonikeskus ry, 2007, 9-11)

3 BETONIN VALMISTUS, OMINAISUUDET JA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

3.1 Betonin lujuuskehitys

Betoni jaotellaan Suomessa lujuusluokittain. Alin Suomessa käytettävä lujuusluokka on C8/10 ja korkein C100/115. Lujuusluokassa lukema, jonka edessä on "C" on betonin lieriölujuus ja toinen lukema betonin kuutiolujuus eli K. Kuutiolujuuden lujuuden yksikkönä käytetään MN/m² ja lieriölujuuden lujuuden yksikkö on MPa. C20/25 on betonirakennuksessa niin sanottua perusmassaa ja C70-C100 ovat korkealujuusbetonia. Lujuudet ovat betonin puristuslujuuksia. Yleisin infrarakennuksessa käytetty betonimassan lujuusluokka on C35/45. (Lujuudenkehityksen varmistaminen)

Mitä korkeampi betonimassan nimellislujuus, sitä enemmän lämpöä, ainakin oman kokemuksen mukaan. Varsinkin massiivirakenteiden kanssa pitää olla tarkkana, ettei betonirakenne pääse kiehumään, eli kehittämään liikaa lämpöä. Jotkin lähteet sanovat, että lujuuskatoa aiheuttava lämpötila on 70°C, jotkin 60°C. Kuitenkin turvallisena rajana voidaan pitää 60°C. Betonin lujuuskehitykseen vaikuttaa kaikista eniten juuri betonin lämpötila. (Lujuudenkehityksen varmistaminen)

Ympäristön lämpötila altistaa vasta valettua betonirakennetta niin jäätymiselle, kuin kiehumiselle. Varsinkin maata vasten valettavat esim. Laituri- tai perustusrakenteet ovat alttiita jäätymään talviolosuhteissa. Loogisesti mitä enemmän pinta-alaa valetusta rakenteesta on kosketuksessa jo valmiiksi jäätyneeseen maaperään, sitä alttiimpi se on sitä kautta jäätymiselle. Vastavuoroisesti kuumana kesäpäivänä viileä maaperä voi toimia betonirakenteelle suotuisana jäädyttämismekanismina.

Betonin nopea lämpötilan vaihtelu altistaa betonia halkeilulle. Massiivirakenteissa lämpötila betonirakenteen sisällä voi helposti olla jopa +80°C. Jos tällaisissa rakenteissa päästää pinnan jäätymään tai jäähtymään, on rakenteen halkeaminen todennäköistä. Halkeilu on betonin karbonatisoitumisen kannalta erittäin haital-

lista, sillä halkeamat paljastavat betonirakenteen sisäpintaa karbonatisoitumiselle ja sitä myötä rakenneteräksiä korroosiolle. Lisäksi liian nopea pinnan kuivuminen altistaa betonia hiushalkeamille. Siksi onkin eriarvoisen tärkeää jälkihoitaa betoni oikeaoppisesti. Betonin oikeaoppinen jälkihoito tarkoittaa lyhennettynä betonin sulkemista muoviin, muotteihin tai veden alle niin, että se on ilmakehän kanssa mahdollisimman vähän kosketuksissa ja näin turvata betonin hydrataatio. Hydrataatio tarkoittaa betonissa olevan veden sitoutumista sementtiin. Puhekielellä betonin hydrataatio tarkoittaa betonin kovettumista. (Betonin lujuudenkehitys)

Betonin lujuuskehitystä Suomessa yleisesti kuvataan Sadgroven kaavalla:

(1)

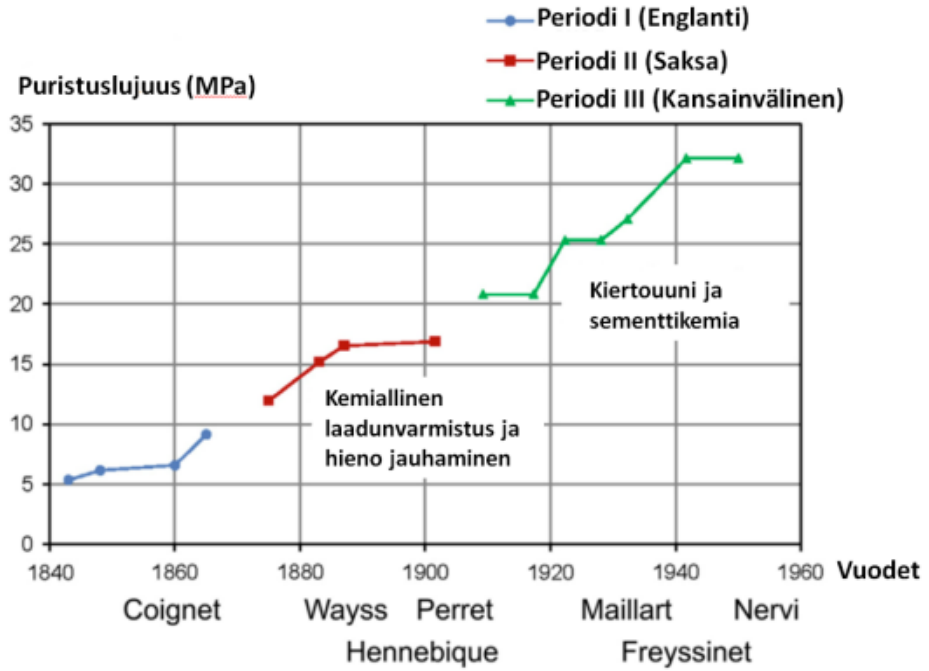
$$t_{20} = \sum_i^n \left(\frac{T + 16^{\circ}C}{36^{\circ}C} \right)^2$$

missä

t = kovettumisaika vuorokausissa

T = lämpötila aikavälillä t

(Betonin lujuudenkehitys)



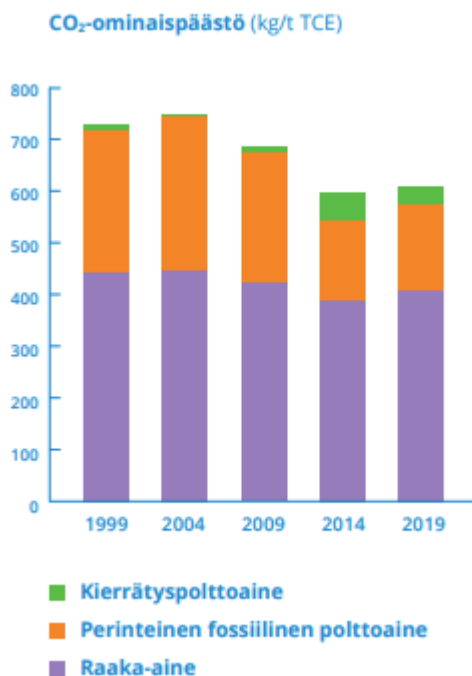
Kuva 1. Vuosina 1840–1950 betoniteknologian kehitysten seurauksena betonin puristuslujuus kasvoi arvosta 5 MPa arvoon 32 MPa. Betonien lujuudet mitattiin 28 vuorokauden iässä ja betonien seossuhde oli yleisesti 1:3 (sideaine : kiviaines) (Hellebois ym. 2013, 150 suomennettu).

Kuvio 1. Kuvaus betonin puristuslujuuden kehityksestä historian saatossa (Pulko, V. 2019, 8)

3.2 Sementin valmistus ja ympäristövaikutukset

Betonista on puhuttu ympäristöpaholaisena sen vaatimien uusiutumattomien luonnonvarojen tarpeen vuoksi. Betonin pääraaka-aineet ovat sementti ja kalliota tai luonnonmurske tai hiekka. Sementti poltetaan kalkkikivestä käyttämällä kivihiiltä tai muita fossiilisia polttoaineita, joten sementin hiilijalanjälki on huomattava. Sementin valmistamiseen vaaditaan korkea lämpötila, noin 1400-1450°C ja tämän lämpötilan saavuttamiseen ei ole vielä keksitty tehokkaita uusiutuvia energianlähteitä. (Betonin valmistus; Betonikeskus ry, 2007, 25-27)

Sementti valmistetaan polttamalla ensin kalkkikivi, joka hajoaa hiilidioksidiksi ja kalsiumoksidiksi. Kalsiumoksidi reagoi pii-, alumiini- ja rautaoksidien kanssa ja näin syntyy Portland- klinkkeri. Klinkkeri on sementin tärkein raaka-aine. Sementin saamiseksi lisätään klinkkerin joukkoon kipsiä ja jauhetaan seos, jolloin syntyy sementtiä. Suomessa sementtiä jatketaan vielä lisäämällä joukkoon kalkkikiveä ja masuunikuonaa, sekä joissain tapauksissa savea. (Betonin valmistus; Betonikeskus ry, 2007, 25-27)



Kuvio 2. Sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöjen jakauma (Finnsementti, 2020, 10)

3.3 Betonin valmistus

Suomessa rakennusteollisuudessa käytettävä betoni on pitkälti valmisbetonia, eli betonitehtaalta toimitettavaa tavaraa. Betoni valmistetaan tehtaalla betonin raaka-aineista, eli sementistä, runkoaineesta, eli kiviaineksesta ja vedestä. Lisäksi betoniin lisätään erilaisia kemikaaleja, kun betonilta vaaditaan eri ominaisuuksia. Yleisimpiä betonilta vaadittavia ominaisuuksia on betonin pakkassuolarasitus, jäätymis- ja sulamisrasitus, sekä betonin lujuus, jonka määrittää karkeasti sementin määrä suhteessa runkoainekseen. Alla Ruduksen aineistosta rasitusluokkien jako. (Rudus, 2019, 3)

Rasitusluokkien jako

XO	ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä
XC1...XC4	karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio
XD1...XD3	kloridien aiheuttama korroosio
XS1...XS3	merivedessä olevien kloridien aiheuttama korroosio
XF1...XF4	jäätymis- / sulamisrasitus
XA1...XA3	kemiallinen rasitus



Kuva 1. Betonin rasitusluokkajako (Rudus, 2019, 4)

BY-normit määrittävät Suomessa melkein kaiken, mitä betonista voi työmaaolosuhteissa mieleen tulla. Lisäksi Väylän, eli valtion teiden kohteissa noudatetaan Väylän asettamia ohjeita ja määräyksiä. Tällaisia ovat esim. Väylän infrabetonin valmistusohje ja SILKO, eli Siltojen korjausohjeet. Nämä ohjeet määrittävät vaatimukset betonimassan ennakkokokeista infrarakennuskohteen betonirakenteen jälkihoitoon, sekä mahdollisiin korjauksiin.

Ennen betonin toimittamista työmaalle, tulee massasta olla tehtynä ennakkokokeet ja toimitettuna suhteitustiedot urakoitsijalle ja joissain tapauksissa myös tilaajalle. *“Suhteituksella tarkoitetaan betonin osa-aineiden yhdistämistä niin, että sekä tuore betonimassa että kovettunut betoni saavuttavat vaaditut ominaisuudet.”* (Suomen betoniyhdistys ry) *“Ennakkokokeilla valitaan betonin koostumus ja valmistusprosessi kokonaisuudessaan sellaiseksi, että betonin halutut ominaisuudet saavutetaan.”* (Suomen betoniyhdistys ry) Kun nämä vaatimukset on täytetty, tulee betoniaseman toimittaa massan kuljetuksen yhteydessä betonista rahtikirja, josta käy ilmi betonin runkoaineuksen maksimirakoko, betonin P-luku, notkeus, eli S-luokka ja toimitetun betonin määrä kuutioissa, pumpun koko ja mahdolliset massassa käytetyt lisäaineet. Lisäksi betonista otetaan työmaalla purun yhteydessä olosuhdekoekappaleet, joiden määrän määrittää joko suunnittelija tai tilaaja. Ilmamäärä mitataan myös suunnittelijan tai tilaajan määrittämistä kuormamääristä. Joissain tapauksissa betonille tehdään myös painuma- tai leviämäkokeet. Urakoitsijan tehtäväksi jää yleensä betonin lämpötilan mittaus, jolla varmistetaan betonirakenteessa olevan betonin lujuuskehitys, sekä olosuhdekoekappaleiden jälkihoito ja toimitus laboratorioon. Ennen vuoden 2021 infrabetonin uusia linjauksia, tuli myös infrassa käytettävästä betonista tehdä huokosjakokappaleet ja suolapakkasrasituskoekappaleet työmaalla. Nykyinen, vuonna 2021 tullut infrabetonin valmistusohje onneksi purki koekappalevaatimuksia niin, että suolapakkasrasituskoeken voi tehdä ennakkokokeiden yhteydessä. (Betonin koostumuksen määrittäminen, Ennakkokoe, 2020, 24, 25)



Kuva 2. Betonin ilmamäärän mittauslaite (Betonin valmistukseen liittyvät tuotteet)



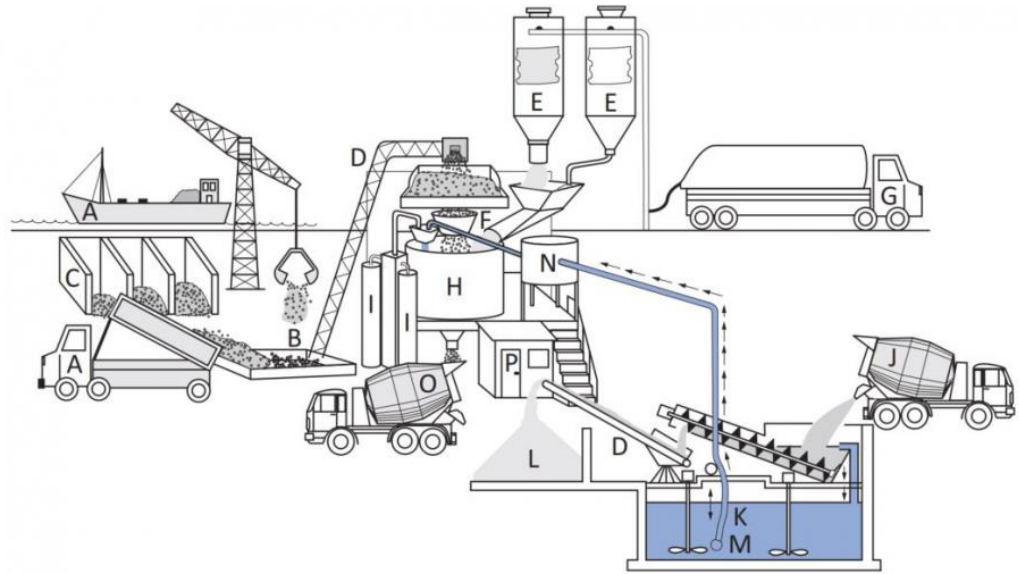
Kuva 3. Puristuskoekuutioita (Betonin lujuus)



Kuva 4. Lieriökoekappaleita (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy, Puristuslujuuden määrittäminen)



Kuva 5. Leviämäkoe (itsetiivistyvä betoni, 3) Kuva 6. Painumakoe (Mattila, J. Betoniseminaari, 2017, 16)



- | | |
|--|---|
| A Kiviaineksen toimitus (laiva, auto) | J Työmaalta palautuneen ylijäämäbetonin purku kierrätykseen |
| B Kiviaineksen vastaanotto tehtaalle | K Kierrätysvesi |
| C Kiviaineksen varastointi tehtaalla (siilot, maataskut) | L Kierrätysrunkoaine |
| D Hihnakuljetin | M Kierrätysveden pumppu |
| E Sementtisiilot | N Veden varastointi |
| F Osa-aineiden punnitus | O Betonin kuormaus betoninkuljetusautoon |
| G Sementin toimitus tehtaalle | P Prosessin ohjaus |
| H Sekoitin | |
| I Lisäaineet | |

Kuva 7. Betonin valmistusprosessi (Betonin valmistus)

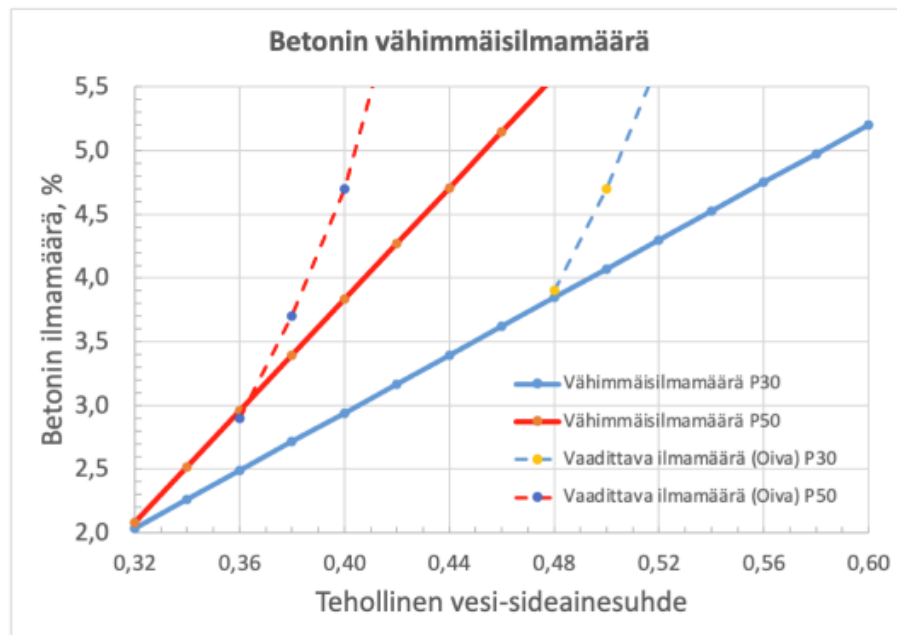
3.4 Betonin huokostus

Betonin luonnollinen ilmamäärä liikkuu 1–2 % välillä. Mitä suurempi lujuusluokka, sitä vähemmän betonissa on ilmaa. Tässä on suora syy-yhteys, sillä mitä enemmän sementtiä, eli hienoa ainesta, sitä vähemmän ilmaa. Sementti hienoaineksenä täyttää runkoaineksen, eli murskeen, kuonan yms. Jättämät välit tuoreessa valmisbetonissa. (Lisäaineet)

Kun rakennetaan pakkaselle alttiita rakenteita, kuten siltoja, erityisesti siltojen reunapalkkeja Lapin alueella tai talojen ulkoseiniä, tulee betoni huokostaa ja nykytekniikalla se tapahtuu kemikaaleilla. Kemiallisesti luotujen ilmahuokosten tehtävänä on ottaa vastaan veden jäätymispaine betonirakenteen sisällä ja näin estää betonin halkeilu. (Lisäaineet)

3.5 Infrabetonin valmistus ja huokostus

Infrabetonin valmistusta valvotaan BY65 Betoninormit 3 mukaisesti. Väylän suosittelemat infrabetonilaadut ovat lujuudeltaan K37-K55. Pakkaskestävyys infrabetonilaaduissa on joko P30 tai P50. Ennen betonin valmistusta työmaalle, tulee tehtaalla tehdä jokaiselle työmaalla käytettävälle betonilaadulle ennakkokokeet, sekä toimittaa urakoitsijalle suhteutustiedot. Lisäksi infrabetonin laatua valvotaan kohteessa silmämääräisesti, sekä ottamalla olosuhdekoekappaleet puristuslujuutta varten. Huokostetusta betonista tehdään ilmamäärän mittaukset. Väylän ohjeen mukaan Väylän kohteissa käytettävässä infrabetonissa enimmäis- ja vähimmäisilmamäärän lukemaksi huokostuksessa on annettu 5,5 % työmaaolosuhteissa. Huokostetusta betonista tulee myös todentaa pakkassuolakestävyys. Pakkassuolakestävyys todetaan neljällä 150 mm:n kuutiokoekappaleella. Pakkassuolakestävyys Väylän kohteissa tulee tehdä kaikille P30 tai P50 infrabetonilaaduille. (Infrabetonien valmistus, 2020, 7, 15)



Kuva 1. Tuoreen betonin vähimmäisilmamäärä P-luvuilla P30 ja P50, kun kiviaineksen ylänimellisraja ≥ 12 mm. Kuvassa on myös esitetty katkoviivoilla käytännössä vaadittava ilmamäärä tehollisen vesi-sementtisuhteen funktiona. Vaadittava ilmamäärä on suuntaa antava ja se riippuu mm. sideaineen koostumuksesta, tässä esimerkissä on käytetty Oiva-sementtiä. Vaadittava ilmamäärä on tarkistettava tapauskohtaisesti P-lukulaskelmalla.

Vähimmäisilmamäärä a lasketaan kaavalla 1.

$$a = (0,529 \cdot P - 4,560) \cdot \left(\frac{Q_{vesi}}{Q_{sid}} \right) - 0,167 \cdot P + 3,427 \quad (1)$$

jossa P on pakkasenkestävyysluku. Esim. P30 \rightarrow P = 30
 $\frac{Q_{vesi}}{Q_{sid}}$ on tehollinen vesi-sideainesuhde

Kaavaa 1 voidaan käyttää, kun tehollinen vesi-sideainesuhde on korkeintaan 0,6.

Vähimmäisilmamäärä voi olla korkeintaan 5,5%.

Kuvio 3. Infrabetonin ilmamäärä (Infrabetonien valmistus, 2020, 15)

Betonin vähimmäisilmamäärä, sekä laskukaava vähimmäisilmamäärälle. Tulee huomata, että myös enimmäisilmamäärä on sama kuin kuvassa oleva vähimmäisilmamäärä. Todellinen työmaaolosuhde betonin ilmamäärälle oman kokemuksen mukaan, on 4–5 %. Työmaalla erityisen tärkeää ennen betonin pumppaamista muottiin, on ottaa vähintään kolmesta ensimmäisestä kuormasta ilmamää-

rät ja todentaa betonituote-erän ilmamäärän kelpoisuus. Tulee myös ottaa huomioon, että betonissa ilmamäärä, eli betonin huokostaminen alentaa betonin lujuutta. Noin 1 % ilmaa betonissa vastaa 5 % lujuuden heikkenemistä. Tämä johtaa siihen, että huokostettuun betonimassaan on laitettava enemmän sementtiä, kuin huokostamattomaan betonimassaan. Betonin huokostus tehdään kemikaaleilla, mutta betonin ilmamäärän huomattiin kasvavan myös, kun valmisbetonin runkona käytettiin kierrätysbetonin hienoainesta, sekä kierrätysbetonimursketta. Tulisikin tutkia millaista huokosjakoa kierrätysbetonin käyttö valmisbetonin runkoaineena aiheuttaa ja olisiko kierrätysbetonin käyttö huokostimena pakkasenkestävyyden kannalta toimiva ratkaisu. (Viitamäki, 2023, 50-52; Infrabetonien valmistus, 2020, 15; Lisäaineet)

4 BETONIN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

4.1 Sementin ja betonin valmistuksen ympäristövaikutukset

Kalkkikiveä poltettaessa ja klinkkeriä valmistettaessa poltetaan fossiilisia polttoaineita, sekä kalkkikiven palamisreaktiossa vapautuu lisäksi huomattava määrä hiilidioksidia. Joidenkin lähteiden mukaan, jopa 5-10% koko maailman hiilidioksidipäästöistä vapautuu sementin valmistuksesta. Tämän lisäksi valmisbetoni kuljetetaan käyttämällä fossiilisia polttoaineita, sekä valmisbetonissa käytettävä kiviaines louhitaan ja kuljetetaan käyttämällä fossiilisia polttoaineita. Näistä syistä sementin ja betonin valmistusprosesseja pidetään niin haitallisena ympäristölle. (Sementin valmistus on suurin ihmisen aiheuttamien CO₂-päästöjen lähde – Teollisuuden jätteistä voidaan valmistaa betonia, joka ei sisällä ollenkaan sementtiä, 2022)

Betonin karbonatisoitumista on pidetty ja edelleen pidetään betonin teknillisestä näkökulmasta haitallisena reaktiona. Betonin karbonatisoituminen tarkoittaa lyhennettynä sitä, että saavutettuaan rakenneteräkset, aiheuttaa karbonatisoituminen rakenneteräksien korroosiota betonin emäksisyyden laskemisen johdosta. Karkeasti rakenneteräksiä suojaavan betonirakenteen pH on 12-14 ja karbonatisoituneen betonirakenteen pH on 8-9. Koska pH asteikko on logaritminen, tarkoittaa 4 pH yksikön lasku emäksisyydessä 10000 kertaista emäksisyyden laskua. Betonin emäksisyyden tuoma rakenneterästen suoja häviää, kun betonin pH on 9 tai alle. (Karbonatisoitumissyvyyden määristys; Karbonatisoituminen)

Betonin karbonatisoituminen on myös hyvä asia. Kun betoni karbonatisoituu, sitoo se ilmakehästä hiilidioksidia. Tämä taas tarkoittaa sitä, että betonirakenne toimii aluksi päästöjen aiheuttajana, mutta mitä pidemmällä betonirakenne on elinkaartaan, sitä enemmän se on sitonut hiiltä, eli toimii hiilinieluna. Hyvin tiivistetty betonirakenne ei kuitenkaan päästä betonia neutraloitumaan kovinkaan nopeasti. Betonin karbonatisoituminen hidastuu sitä mukaa, mitä syvemmälle rakennetta mennään, joten hiilinieluna toimimisen näkökulmasta, hyvin ja määräysten mukaan rakennetut betonirakenteet eivät toimi tehokkaina hiilinieluinä. (Karbonatisoitumissyvyyden määristys; Karbonatisoituminen)

4.2 Betonirakenteiden ympäristövaikutukset ja potentiaali hiilinieluna

Kun betonirakenne puretaan, tulee siitä betonijätettä, mutta samalla siitä tulee nykytutkimusten valossa erittäin hyvä hiilinielu. Mitä enemmän ja pienemmiksi osiksi betonia murskataan, sitä enemmän karbonatisoitumatonta pinta-alaa paljastuu sitomaan hiiltä ilmakehästä. Tehokkaimmillaan betonijäte hiilinieluna on levitettyä kentälle mahdollisimman ohuina kerroksina. Näin varmistetaan suora kosketus ilmakehään mahdollisimman suurelta pinta-alalta.

Foreconin teettämässä tutkimuksessa selvitettiin talokannasta poistuneita betonikuutioita, Suomen betonikannan kehitystä kuutioissa, sekä betonikannan potentiaalia tai kapasiteettia hiilinieluna. Tutkimus tehtiin vuonna 2018 ja se perustuu kirjallisuuteen, kuten tämä opinnäytetyö (Suomen betonirakanta sitoo n. 3,8 miljoonaa tonnia hiilidioksidia)

Tutkimuksessa on mallinnettu betonikannan karbonatisoitumista, eikä siinä ole otettu huomioon kierrätysbetonia. Tutkimuksessa havaittiin, että Suomen betonikanta sitoo 7 % vuosittaisista sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöistä. Määrä on mielestäni mitätön, mikäli haluttaisiin puhua betonista hiilineutraalina rakennusmuotona, sillä betonikanta Suomessa kasvaa koko ajan, paitsi nyt, kun rakennusteollisuus on lamassa ja rakennebetonikuutiot kautta maan ovat jyrkässä laskussa varsinkin talopuolella. Tutkimus on kuitenkin ajankohtainen ja sitä tulisi mielestäni tutkia lisää, varsinkin kierrätysbetonin näkökulmasta. Lisäksi mielestäni tulisi tutkia sitä, kuinka hienoksi betonijäte tulisi murskata, kuinka pitkäksi aikaa se tulisi varastoida ja miten, että se toimisi mahdollisimman tehokkaana hiilinieluna. Lisäksi betonimurskeen käyttöä teiden rakennekerroksissa tulisi miettiä hiilinieluna toimimisen kannalta niin, että betonimurskeelle löydettäisiin optimisyvyys ja -paksuus rakennekerroksissa sen karbonatisoitumisen suhteen. (Suomen betonirakanta sitoo n. 3,8 miljoonaa tonnia hiilidioksidia)

Kun lasketaan tutkimuksen lukemien mukaan betonirakenteiden hiilineutraalius, voidaan todeta, että betoniteollisuus pelkästään sementin valmistuksen suhteen on 93 % alijäämäinen vuositasona. Tutkimuksessa ei myöskään ole otettu huo-

mioon sementin pakkaus- ja kuljetuspäästöjä. Lisäksi tutkimuksessa on huomioimatta valmisbetoniin tarvittavan runkoaineen murskaus- ja lastauspäästöt. Tutkimuksessa on myös huomioimatta valmisbetonin vaatimat kemikaalit ja niiden tuomat päästöt, sekä valmisbetonin kuljetuksesta ja pumppaamisesta aiheutuvat päästöt. Vuonna 2018 tutkimuksen tultua julki, betonia mainostettiin rakennusteollisuuden lehtien mukaan paikoitellen jopa ympäristön ja ilmakehän pelastajana, sekä todellisuutta tehokkaampana hiilinieluna. (Suomen betonirakenta sitoo n. 3,8 miljoonaa tonnia hiilidioksidia)

Useat tutkimukset ovat jo osoittaneet, että betonimurskauksessa olennaista hiilinielun kannalta on valmiin tuotteen rakeisuus. Varsinkin hienoksi jauhettu betonimurska vapauttaa karbonatisoitumattoman sementin alttiiksi hiilidioksidille. Lisäksi betonin suhteellinen kosteus vaikuttaa betonin kykyyn karbonatisoitua. Tutkimusten ja (CO₂ncrete solution – Report Q1/2020, kirjallisuusreferaatti (kompakti), 2020) kirjallisuusraportin mukaan, optimi suhteellinen kosteus betonirakenteelle karbonatisoitumisen kannalta on 60-80 %. Esim. Väylän hankkeissa siltojen suhteellinen kosteus tulee olla < 5 %, ennen kuin sillan saa eristää ja päällystää. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että paljaan betonirakenteen pinnan ja karbonatisaatiolle alttiin pinta-alan suhteellinen kosteus on todellisuudessa korkeampi, sillä rakenne on säänvaihtelulle altis. (CO₂ncrete solution – Report Q1/2020, kirjallisuusreferaatti (kompakti), 2020, 2-4)

Tutkimukset osoittavat, että kaikki hiilidioksidi, mitä klinkkerin valmistuksessa kalkkikivestä vapautuu, on mahdollista neutraloitua takaisin. Rakenteet sitovat Anderson & al tekemän tutkimuksen mukaan 27 % sementtiteollisuuden, eli klinkkerin valmistuksen päästöistä ja vain 17 % valmisbetonirakenteiden kokonaispäästöistä sitoutuu takaisin betonirakenteisiin. Kun tarkastellaan kokonaisuutena sementtiteollisuuden ja betonirakenteiden aiheuttamia päästöjä niiden suhteessa toimintaan hiilinieluna, voidaan todeta, että betoni, jossa sideaineena on sementti, on ympäristölle myös nykytutkimusten valossa haitallinen rakenne, vaikka otetaan huomioon betonirakenteiden toimiminen hiilinieluna. Ympäristön kannalta eri sideaineiden kehittäminen ja varsinkin purettavien betonirakenteiden oikeanlainen kierrättäminen ovat tulevaisuudessa tärkeitä tutkimuskohteita. Kun

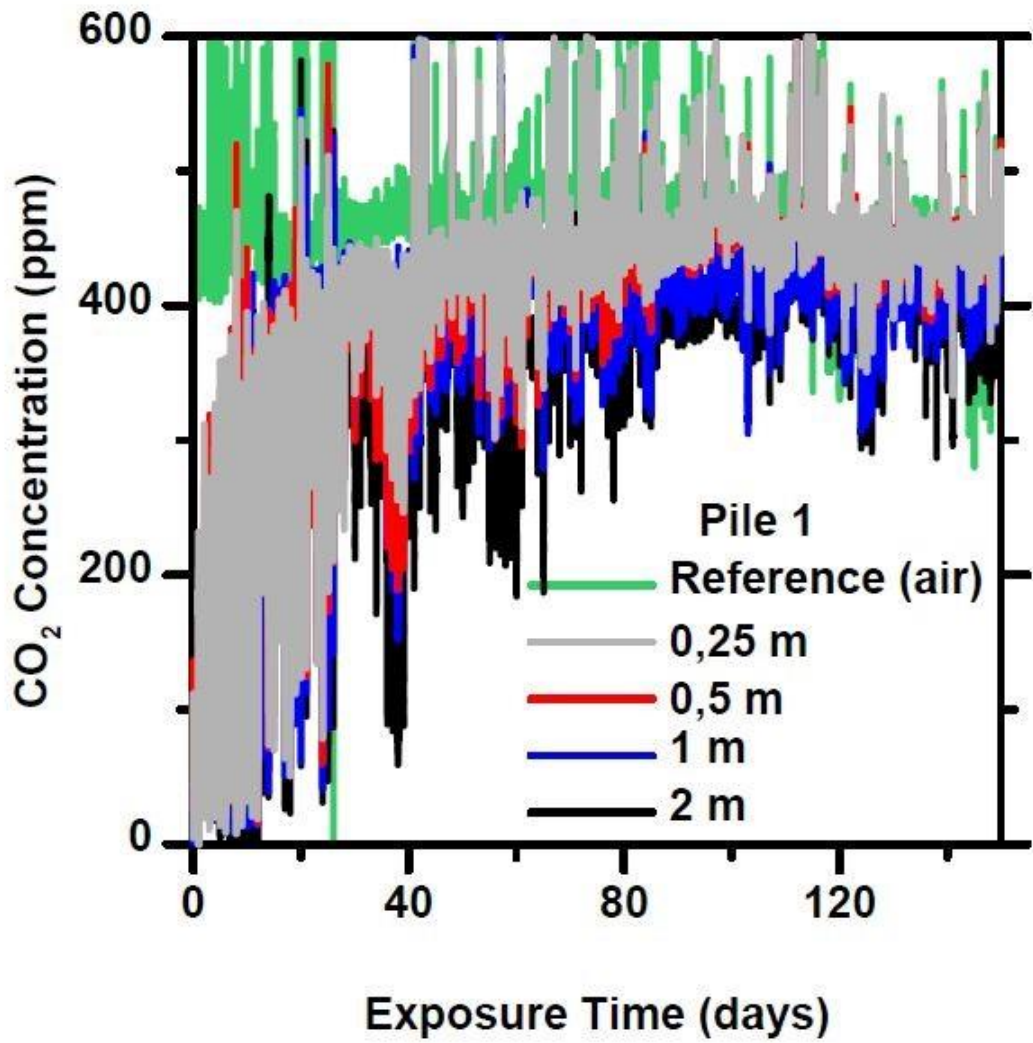
otetaan huomioon, että koko maailman kasvihuonepäästöistä 5-7 % johtuu sementin valmistuksesta ja sementin valmistus on 50 –70 % koko betoniteollisuuden päästöistä, voidaan todeta, että betoniteollisuuden päästöt liikkuvat akselilla 8,5 – 14 % kaikista globaaleista kasvihuonepäästöistä. Kun lasketaan jo aikaisemmin viittaamassani tutkimuksessa, että valmiit betonirakenteet nielevät noin 7 % sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöistä vuositasolla, tulee tuloksista seuraavanlaisia. Kun sementtiteollisuuden päästöt ovat globaalisti 5 %, nielee valmiit betonirakenteet 0,35 % kaikista vuosittaisista hiilidioksidipäästöistä. Jos sementtiteollisuuden päästöprosentti on 7 globaalisti, tarkoittaisi se 0,49 % hiilinielua vuositasolla. Eli kun suhteutetaan betonirakenteita hiilinieluna kokonaisuuteen, liikkuu se löytämilläni tutkimustuloksilla välillä 0,35 % - 0,5 %. Oikeanlaisella kiertäyksellä ja karbonatisoitumiselle altistamisella voisi prosenttia korottaa huomattavasti. (Suomen betonikanta sitoo n. 3,8 miljoonaa tonnia hiilidioksidia; CO2ncrete solution – Report Q1/2020, kirjallisuusreferaatti (kompakti)., 2020, 2-4)

4.3 Tutkimusta betonimurskeen hiilensidonnasta

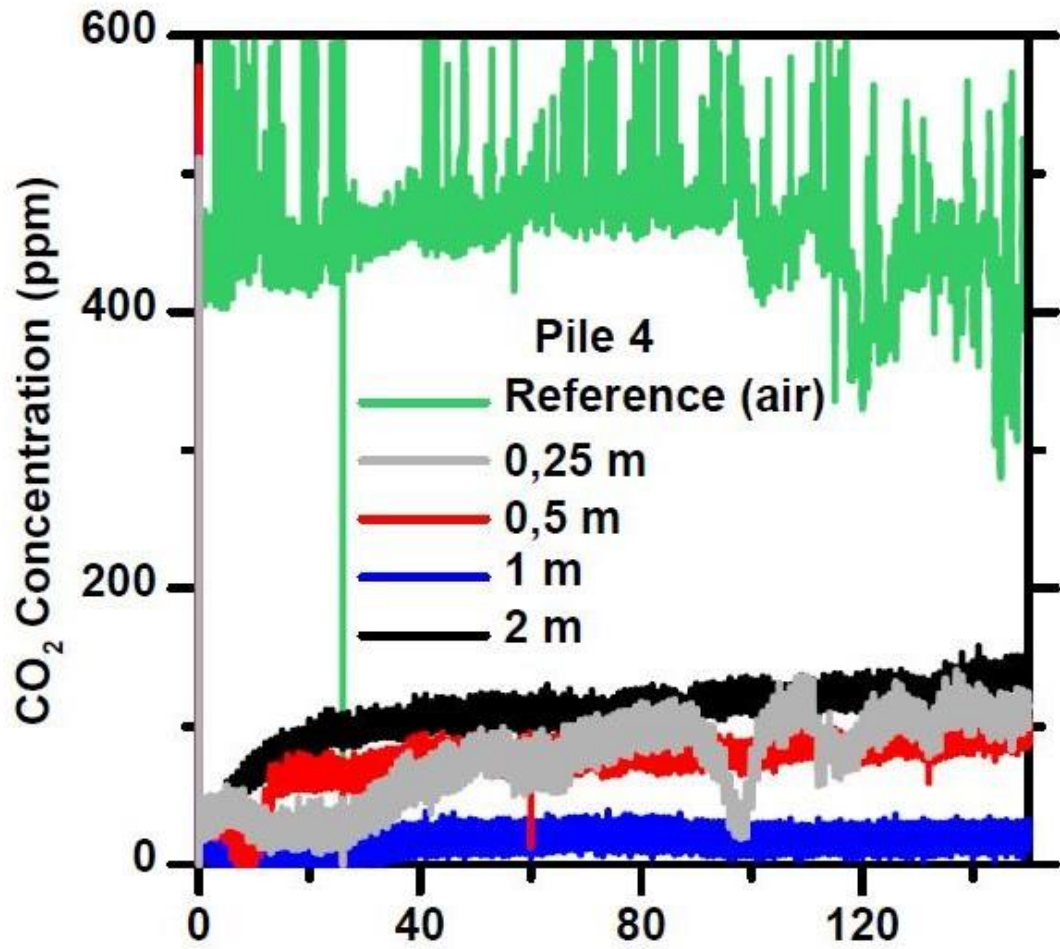
Hiilensidontaa kierrätysbetonista ei ole aikaisemmin liiemmin tutkittu, mutta concretesolutions teki vuosina 2021-2022 vuoden mittaisen tutkimuksen kierrätysbetonin hiilensidontakyvystä kierrätysbetonimurskekasosissa. Hanke kulki nimellä "Mother pilot". Tutkimuksessa saatiin selville se, että kierrätysmurskekasosissa erityisesti hiilensidonnasta tasalaatuisuuteen vaikutti se, oliko murske seulottua. Säasuojalla ei ollut murskekasojen hiilensidontakykyyn kovinkaan suurta merkitystä. Lisäksi hankkeessa kosteusmittaus todettiin virheelliseksi, joten luotettavaa suhteellisen kosteuden dataa hankkeesta ei ole saatavilla. (Hiilensidontaolosuhteet betonimurskemassassa, 1-3)

Hankkeessa huomattiin, että karbonatisaatiolle otollisimmat olosuhteet ovat kasatulle murskeelle 20-90 mm raekoon kasoissa kasojen tuulettumisen johdosta. Seulomattoman murskekasosin karbonatisaatiovauhti on karkeasti 20 % seulotun murskeen karbonatisaatiokyvystä. Lisäksi tuotannolliselta kannalta merkittävä tieto tutkimuksessa on se, että 20-90 mm mursketta ei tarvitsisi varastoida kuin kuukausi, jolloin se on käyttänyt suurimman osan karbonatisaatiopotentiaalistaan. Asia, mitä jäin tutkimuksessa kaipaamaan, oli ehdottomasti betonimurskeiden lähtö- ja lopputilanteen pH -arvot. (Hiilensidontaolosuhteet betonimurskemassassa, 1-3)

Tutkimusdataa analysoidessa tulisin siihen lopputulokseen, että seuraavanlainen kierrätysbetonin käyttö olisi ehkä tuotannollisesti kannattavaa ja ympäristön kannalta merkityksellistä. Eli kierrätysbetoni murskattaisiin ja seulottaisiin kokoon 20 – 90 mm. Tähän kokoon seulotun kierrätysbetonin varastointiaika olisi kentällä 40 päivää, jolloin suurin osa murskan hiilensidontakyvystä on käytetty. Tämän jälkeen murske ajettaisiin joko rakennekerrokseen tai päällysrakenteeseen, johon se luonnollisesti jyrätään kiinni. Jyrätessä betonimurske luonnollisesti hajoaa luonnonkiveä herkemmin. Jyrätessä vapautuisi siis lisää pinta-alaa karbonisoitumiselle. Alla tutkimuksesta lainattuja kuvaajia betonimurskeen karbonisoitumisesta seulotusta ja seulomattomasta murskekasasta. (Hiilensidontaolosuhteet betonimurskemassassa, 1-3)



Kuvio 4. Seulottu murskekasa ja sen hiilensidonta. (Hiilensidontaolosuhteet betonimurskemassassa, 2)



Kuvio 5. Seulomaton murskekasa ja sen hiilensidonta (Hiilensidontaolosuhteet betonimurskemassassa, 2)

5 BETONIN RUNKOAINEENA KIERRÄTYSBETONI

Betonimurskan käyttöä valmisbetonin seassa on tutkittu ainakin Japanissa ja Ranskassa. Hansen T.C loi kootun tutkimuksen betonin kierrätyksestä valmisbetonin seassa vuonna 1990. Suomessa vastaavia tutkimuksia on tehty vain opin- näytetyötasolla, mutta tulokset ovat jokseenkin saman suuntaisia, kun verrataan oppin- näytetöitä ja tätä laajempaa tutkimusta.

On todettu, että jopa 30 % valmisbetonin runkoaineesta voidaan korvata kierrätysbetonimurskeella sen suuremmin vaikuttamatta betonin mekaanisiin ominaisuuksiin. Kuitenkin, kun betonin runkoaine korvataan kokonaan kierrätysbetonilla, vaikuttaa se betonin puristuslujuuteen merkittävästi. Betonin puristuslujuuden heikentyminen, runkoaineena kierrätysbetoni, liikkui Hansen T.C tutkimuksessa välillä 10 - 30 %. Kuitenkin yleisin havainto tutkimuksissa on, että betonin puristuslujuus, runkoaineena kierrätysbetoni, on puristuslujuudeltaan noin 10% heikompaa kuin samalla vesi-sementtisuhteella tehty betoni, jossa runkoaineena on käytetty hiekkaa tai luonnonkiveä. Erityisesti hienoainesta sisältävän kierrätysbetonin on todettu heikentävän mekaanisia ominaisuuksia joskus jopa merkittävästi. Myös betonin homogeenisyyden on todettu kärsivän enemmän, mikäli kierrätysbetoni on sisältänyt hienoainesta. Pohdin, että voisiko kierrätysbetonin hienon aineksen epäedulliset ominaisuudet johtua juuri karbonatisaatiosta. Eli hienoaines olisi sementtiä, jolla ei ole kykyä hydratoitua. (Hansen, 1992, 58-62)

Heidi Viitamäen oppin- näytetyössä vuonna 2023 havaittiin myös noin 10% lujuuskatoa, kun käytettiin betonin runkoaineena niin likaista, kuin puhdasta kierrätysbetonia. Oppin- näytetyössä on esitetty, että 10 % lujuuskato johtuisi kierrätysbetonin sitomasta vesimäärästä. Testitulostaulukosta voidaan kuitenkin havaita, että kierrätysbetonista tehdyn betonin ilmamäärä on 0,5 – 0,9 % vertailukoekappaletta korkeampi. Lujuuskato voikin osittain johtua kierrätysbetonin sitomasta vedestä, että ylimääräisestä ilmasta tuoreessa betonimassassa. (Viitamäki, 2023, 32, 33)

Minna Hurmalaisen opinnäytetyössä tutkittiin Ruduksen tuotteen, Betorocin, käyttöä betonin runkoaineena. Tulokset olivat hyvinkin samanlaiset kuin Heidi Viitamäen opinnäytetyössä. Kierrätysbetonia sisältävät koekappaleet olivat 28 päivän puristuslujuuskokeissa noin 10 % rakennebetonia heikompia. Sama ilmiö, eli ilmamäärän nousu oli havaittavissa Betorocista valmistettavassa betonimassassa. (Hurmala, 2022, 20)

Näiden kolmen tutkimuksen pohjalta voidaan tehdä seuraava johtopäätös. Kierrätysbetonin käyttö valmisbetonin runkoaineena nostaa valmisbetonin ilmamäärää noin 1 – 2 % ja aiheuttaa karkeasti noin 10 % lujuuskatoa. Ilmamäärän nousua ei toistaiseksi tiedetä, mutta ilmamäärän ja betonissa, varsinkin kovettu-neessa betonissa olevien huokosten jakaumaa ja kokoa tulisikin tutkia. Vaikka valmisbetonissa käytettävän huokostimen määrä onkin vain 0,01 – 0,03 % side-aineen määrästä, voitaisiin huokostin korvata kierrätysbetonilla, mikäli huokokset ovat sopivan kokoisia ja sopivasti jakautuneita. Tämän kaltainen koe tulisi myös suorittaa siten, miten normaalia huokostettua betonia tehdään, eli lisäämällä sementtiä sen mukaan, miten oletetusti lujuus heikkenee ilmamäärän johdosta, sekä vertailla lujuutta normaaliin huokostettuun betoniin. Lisäksi tulisi tutkia vai-kuttaako mahdollinen betonin karbonatisoituminen betonin puristuslujuuteen käy-tettäessä runkoaineena kierrätysbetonimursketta. Sementti neutraloituu Concre-tesolutionin tekemän tutkimuksen mukaan takaisin kalkkikiveksi varsinkin suuri-rakeisissa murskekasoissa jopa 40 päivässä. Tulisikin tutkia tuoremurskatun be-tonijätteen käyttöä laajamittaisesti valmisbetonin runkoaineena. Tiedetään myös, että karbonatisoitumaton ja rakenteiden sisällä oleva sementti saattaa lähteä uu-destaan reagoimaan. Hypoteettisesti, käyttämällä tuoremurskattua betonijätettä runkoaineena, voitaisiin saada jopa parempia puristustuloksia kuin tavanomaisen runkoaineen valmisbetonista.

Koska infra- ja talonrakentamisessa käytettävän betonin laatuvaatimukset ovat niin korkeat, voisi uusiobetonia alkaa käyttää matalan lujuusluokituksen betoni-työkohteissa. On myös havaittu, että karkeaa betonimursketta sisältävä uusiobe-toni on hankalasti työstettävää. Tämä vaatii betonimassan lisänotkistusta, joka taas lisää betonin erottuvuutta oman kokemuksen mukaan. Erottuvuutta lisää kul-jetus ja huokostus. Matalan vesi-sementtisuhteen omaava huokostettu korkean

lujuusluokan betoni on oman kokemuksen mukaan todella herkästi erottuvaa. Lisäksi korkean sementtimäärän johdosta valmisbetonimassa on hyvin herkästi reagoivaa ja se lähtee kehittämään joissain tapauksissa lämpöä jo noin puolen tunnin kuljetusmatkalla. Näin ollen olen sitä mieltä, että betonimurske ei ainakaan lähiaikoina sovellu korkean lujuusluokan huokostetun infrabetonin runkoaineeksi.

Koska karkeaa betonimursketta sisältävä uusiobetoni on hankalasti työstettävää, voitaisiin olettaa, että karkea betonimurske on suhteelliselta kosteudeltaan hyvin kuivaa ja tämä johtaa betonimassan jäykistymiseen. Hienoa betonimursketta sisältävä uusiobetoni taas jäykistyy, mutta tuntemattomasta syystä kehittyvä ilma betonimassan seassa helpottaa betonin työstettävyyttä huomattavasti.

Harmittavasti uusiobetonin käyttöä ja sen puristuslujuuksia ei ole Suomessa tutkittu laajamittaisesti esimerkiksi suurilla betonimyllyillä ja suurissa tuotantoerissä. Suomessa uusiobetonია ei ole tutkittu puristuslujuuden tai huokospartikkeleiden näkökulmasta AMK opinnäytetyötä korkeammalla koulutustasolla. AMK opinnäytetöissä osa puristuslujuuksista on kuitenkin lupaavia varsinkin silloin, kun uusiobetonissa käytettävä kierrätyskiviaines ei sisällä hienojakoista materiaalia. Kuitenkin koekappaleiden lukumäärät ja tuotantoerät näissä opinnäytetöissä ovat niin pieniä, että vaikka tulokset ovat lupaavia, eivät ne ole kovin luotettavia.

6 YHTEENVETO

Uusiobetonia ja sen käyttöä eri työkohteissa on mielestäni tutkittu aivan liian vähän. Ihmetyttää myös, miksi näin suuri hiilensidontapotentiaali, kun puhutaan betonin karbonatisaatiosta, jätetään käyttämättä. Suurimpana tekijänä tällaisissa asioissa on varmasti raha, mutta voisihan tällaisiin hankkeisiin saada rahoitusta, missä betonin karbonatisaatio käytetään ensin hyväksi, ennen kuin se ajetaan rakenteeseen tai käytetään uusiobetonissa.

Betonia on tutkittu paljon. Linjauksia tulee ja uusia tutkimuksia, opinnäyte- ja diplomitöitä tulee jatkuvasti. Betonin karbonisointumista itsessään on tutkittu paljon, sekä opinnäytetöitä löytyy todella paljon aiheeseen liittyen. Kuitenkaan ympäristön näkökulmasta asiaa ei ole tutkittu siinä mielessä, kuinka paljon hiilensidontapotentiaalia tässä on. Betonirakentamisen päästöistä sen sijaan olemme jo tietoisia.

MARA-asetus betonimurskeen käytölle on saatu loppuvuodesta 2022. Tämä helpotti huomattavasti kiertotaloudessa toimivien yritysten toimintaa betonimurskeen suhteen, sillä betonimurskeen käyttö ei enää ollut pelkästään ympäristöluvanvaraista. Näin ollen kustannukset pysyvät maltillisempina. Kuitenkin betonimurskeen käyttö vaatii tiheää näytteenottoa ja näin kasvattaa siinä mielessä kustannuksia verrattuna kallio- tai luonnonmurskeeseen.

Luonnonkivi valmisbetonin runkoaineena on edelleen halvempaa, mutta kannusteita kierrätyskiviaineksen käytölle tulisi mielestäni lisätä niin, että se olisi luonnonkiveä halvempaa. Kierrätysbetonin käytölle valmisbetonin runkoaineelle on sen verran jo näyttöä, sekä muissa maissa tehtyä tutkimusta, että suhteelliset ohjenuorat toiminnan edellytykseksi ovat. Yritykset vain kaipaavat kannusteita kehittää toimintaa niin, että siitä tulisi kannattavaa.

Pohdin myös sitä, voisiko tässä EU:n päästökaupassa luoda sen tyyliä kannustimia juuri kierrätysbetonin käytölle, että betonin valmistaminen olisi kierrätyskiviainesta käyttämällä halvempaa, kuin luonnonkiveä käyttäen. Sama juttu betonin

karbonatisoimiselle. Oikealla tavalla varastoitu, karbonatisaation ja siitä saavutettavan hyödyn maksimoimalla olisi betonimurskeen käyttö halvempaa kuin muiden kiviainesten.

Opinnäytetyöprosessi oli hyvin silmiä avaava varsinkin betonin karbonatisaation osalta. Samalla surettaa suuri hukkaan heitetty potentiaali. Toivottavasti tulevaisuudessa kierrätysbetonin käytölle löytyy aina enemmän taloudellisia perusteita. Lisäksi tieto siitä, että luonnonhiekkä ja sen ehtyminen on ainakin Suomessa jo käsillä oleva ongelma, luo minusta kannustimia kehittää myös kierrätysbetonista saatavalle hienoainekselle joku rooli. Kiertotalous, sekä sen merkitys kasvaa koko ajan. Luonnonvarat ehtyy ja se pakottaa etsimään ratkaisuja jo käsillä oleviin, sekä tuleviin ongelmiin.

EU:n päästökauppa kuritti betonirakentamista karusti vuonna 2022. Ei kuitenkaan tarpeeksi, sillä valmisbetoni uusiutumattomista luonnonvaroista on edelleen suosituin rakennusmateriaali. En ota kantaa onko päästökauppa enemmän rahastustoimi vaiko keino kannustaa uusiin innovaatioihin. Kuitenkin oman kokemukseni mukaan rakennusalalla on hyvin epäkunnioittava kulttuuri niin luonnonvaroja, kuin luontoa kohtaan. Onneksi tuloillaan on uusi sukupolvi, joka ehkä osaa kunnioittaa luontoa ja ehtyviä luonnonvaroja enemmän kuin vanha.

LÄHTEET

- Betonijätteen käsittely ja käyttö väylähankkeissa 2022. Ohje 43/2022. Väylävirasto. Viitattu 23.4.2024 https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-43_Betonijate_web.pdf
- Betonin koostumuksen määrittäminen. Suomen Betoniyhdistys ry. Viitattu 23.4.2024 <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-koostumuksen-maarittaminen.html>
- Betonin lujuus. Finnsementti. Viitattu 23.4.2024 <https://finnsementti.fi/sementti/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaalle/betonin-lujuus/>
- Betonin lujuuskehitys. Suomen betoniyhdistys ry. Viitattu 23.4.2024 <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-lujuudenkehitys.html>
- Betonin valmistukseen liittyvät tuotteet. Semtu. Viitattu 23.4.2024 <https://www.semtu.fi/fi/tuotteet/tutkimus-ja-laadunvalvontatuotteet/betonin-valmistukseen-liittyvat-tuotteet>
- Betonin valmistus. Suomen Betoniyhdistys ry. Viitattu 23.4.2024 [HTTPS://WWW.BETONITIETO.FI/OPPIMINEN/OPETUKSEN-TUKIMATERIAALI/BETONIN-VALMISTUS.HTML](https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus.html)
- Betonirakenteiden ympäristöominaisuudet. Betonikeskus ry. 2007. Turku. Itä-Uudenmaan Paino Oy.
- Concretresolution 2020. CO2ncrete solution – Report Q1/2020, kirjallisuusreferaatti (kompakti). Viitattu 23.4.2024 <https://concretresolution.fi/wp-content/uploads/2020/04/CO2NCRETE-SOLUTION-kirjallisuusraportti-6p-20200206.pdf>
- Ennakkokoe. Suomen Betoniyhdistys ry. Viitattu 23.4.2024 <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/ennakkokoe.html>
- Hansen, T.C. 1992. Recycling of demolished concrete and masonry. Lontoo. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482267075/recycling-demolished-concrete-masonry-hansen>

- Hiilensidontaolosuhteet betonimurskemassassa. Betoniteollisuus ry. Viitattu 23.4.2024 <https://concretesolution.fi/hiilensidontaolosuhteet-betonimurskemassassa/>
- Hurmalainen, M. 2022. Kierrätysbetonista valmistettu hienoaines valmisbetonin raaka-aineena. Insinööriyö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Viitattu 23.4.2024 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/784774/Hurmalainen_Minna.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Infrabetonien valmistus. Ohje 41/2020. Väylävirasto. Viitattu 23.4.2024 https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2020-41_infrabetonien_valmistus_web.pdf
- Itsetiivistyvä betoni. Rudus. Viitattu 23.4.2024 <https://www.rudus.fi/Download/23825/Itsetiivistyv%C3%A4%20betoni%20ITB.pdf>
- Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy. Betonin ja betonituotteiden testauspalvelut. Viitattu 23.4.2024 <https://www.xamk.fi/tutkimus-ja-kehitystoiminta/betonintestaus/>
- Karbonatisoituminen. Suomen Betoniyhdistys ry. Viitattu 23.4.2024 <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/karbonatisoituminen.html>
- Karbonatisoitumissyvyyden määrittäminen Labroc. Viitattu 23.4.2024 <https://labroc.fi/karbonatisoitumissyvyyden-maaritys/>
- Lisäaineet. Suomen Betoniyhdistys ry. Viitattu 23.4.2024 <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/lisaaineet.html#huokostimet>
- Lujuudenkehityksen varmistaminen. Suomen betoniyhdistys ry. Viitattu 23.4.2024 <https://www.betonitieto.fi/tyomaat/betonitoiden-johtaminen-talonrakentaminen/betonityot/lujuudenkehityksen-varmistaminen.html>
- Lujuusluokka. Suomen Betoniyhdistys ry. Viitattu 23.4.2024 <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/lujuusluokka.html#:~:text=Betonin%20puristuslujuusluokat%20ilmaistaan%20eurokoodin%20mukaan,m2%20tai%20vaihtoehtoisesti%20MPa.>
- Mattila J. Betoni ja rakentaminen – yleiskatsaus, 2017. Viitattu 23.4.2024 https://www.ril.fi/media/2017/2017-jasenyys/1_jussimattila.pdf

- Miten betoni tuli Suomeen. Betoniteollisuus ry. Viitattu 23.4.2024 <https://betoni.com/tietoa-betonista/betonin-historia/miten-betoni-tuli-suomeen/>
- Oulun Yliopisto 2022. Sementin valmistus on suurin ihmisen aiheuttamien CO₂-päästöjen lähde – Teollisuuden jätteistä voidaan valmistaa betonia, joka ei sisällä ollenkaan sementtiä. Viitattu 23.4.2024 <https://www oulu.fi/fi/uutiset/sementin-valmistus-suurin-ihmisen-aiheuttamien-co2-paastojen-lahde-teollisuuden-jatteista-voidaan>
- Pulko, V. 2019. Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonien ominaisuudet ja korjausmenetelmät. Diplomityö. Aalto yliopisto. Viitattu 23.4.2024 <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201912226648>
- Rasitusluokat. Rudus Betoniakatemia. 2019. Viitattu 23.4.2024 <https://www.rudus.fi/Download/27940/Betoniakatemia%20Rasitusluokat.pdf>
- Siltojen korjausohjeet (SILKO). Ohje 15.4.2024. Väylävirasto. Viitattu 23.4.2024 <https://vayla.fi/palveluntuottajat/sillat/silko>
- Suomen betonikanta sitoo n. 3,8 miljoonaa tonnia hiilidioksidia Betoniteollisuus ry. Viitattu 23.4.2024 <https://concretesolution.fi/suomen-betonikanta-sitoo-n-38-miljoonaa-tonnia-hiilidioksidia/>
- Valtioneuvoston asetus betonimurskeen jätteeksi luokittelun päättymisen arviointiperusteista 16.6.2022/466. Viitattu 23.4.2024 <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2022/20220466>
- Viitamäki H. 2023. Murskatun betonin käyttö valmisbetonin runkoaineena. Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu. Viitattu 23.4.2024 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/796218/Viitamaki_Heidi.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Vuotari, J. Punkki, J. Mantila, A. Uusi infrabetonien valmistusohje tuli voimaan 1.1.2021. Viitattu 23.4.2024 https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/03/BET2101_66-71.pdf
- Ympäristöraportti 2020. Finnsementti Oy. Viitattu 23.4.2024 https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti_ymparistoraportti_2020.pdf