



# Sementin vähentämisen vaikutus ontelolaattaprosessiin ja sen hiilidioksidipäästöihin

Emma Mäki

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2023

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

**Mäki, Emma**

## **Sementin vähentämisen vaikutus ontelolaattaprosessiin ja sen hiilidioksidipäästöihin**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2023, 68 sivua

Tekniikan ala. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### **Tiivistelmä**

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, ja se on myös suurin yksittäinen hiilidioksidipäästöjen lähde. Betonin saastuttavin osuus on sementin valmistus. Ilmastomuutoksen hillitsemiseksi betoniteollisuuden tavoitteena on pyrkiä vähentämään betonin päästöjä merkittävästi.

Tutkimuksen toimeksiantajana toimi Parma Oy Uurainen. Parma Oy:n ympäristötavoitteena on betonisten valmisosien mahdollisimman ekologinen valmistus ja hiilidioksidipäästöjen vuosittainen 5 % vähentäminen. Parman Uuraisten tehtaalla on tavoitteena vähentää ontelolaattojen valmistukseen käytettävän sementin määrää 4,4 % ja pienentää samalla ontelolaatan valmistuksessa syntyviä hiilidioksidipäästöjä ja valmistuskustannuksia.

Kehittämistutkimuksen tarkoituksena oli kehittää uusi vähähiilisempi betoniresepti, joka testataan käytännössä ja tutkitaan, vaikuttaako reseptin optimointi ontelolaatan valmistusprosessiin, kuten betonimassan koostumukseen, valukoneen toimintaan ja valutyön suoritukseen sekä valmiiden ontelolaattojen laatuun sekä valmistuksesta aiheutuviin hiilidioksidipäästöjen määrään.

Uusi ontelolaattabetoniresepti kehitettiin hyödyntämällä betonin kiviainesten väliin jäävän tyhjätilan määrittämistä. Uudella reseptillä suoritettiin testivalu, jonka laatua havainnoitiin ja mitattiin standardien mukaisilla laadunvalvontamenetelmillä. Betonista otettiin myös koekappaleet, joille suoritettiin puristuslujuuden testaus.

Laadunvalvonnan mittauksien tulokset olivat uudella reseptillä paremmat mitä vanhalla, mutta puristuslujuus oli uudella reseptillä vanhaa heikempi. Testivalun raporteista ilmeni, että sementin määrää ei saatu vähennettyä uudella reseptillä, koska tutkimuksen alkutiedot olivat puutteelliset.

Tutkimuksessa ei päästy kaikkiin sille asetettuihin tavoitteisiin. Tutkimuksesta ilmeni kuitenkin, että reseptiä optimoimalla voidaan laskennallisesti sementin määrää vähentää alkuperäistä tavoitetta enemmän ilman merkittäviä investointeja. Korjattu resepti pitää kuitenkin testata käytännössä ennen kuin sen toimivuus voidaan taata.

### **Avainsanat (asiasanat)**

ontelolaatta, suhteitus, sementti, hiilidioksidipäästöt, kehittämistutkimus

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

Liite 4 on salassa pidettävä ja se on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17 ja 20, yksityisen, valtion, kunnan tai muun julkisyhteisön, yhteisön, laitoksen tai säätiön liike- tai ammatillisalaisuudet, sekä kohta 21, teknologista taikka muuta kehittämistyötä ja niiden arviointia koskevat tiedot. Salassapitoaika on viisi (5) vuotta, salassapito päättyy 28.5.2028.

**Mäki, Emma**

**The Effect of Cement Reduction on Hollow Core Slab Process and Carbon Dioxide Emissions of It**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2023, 68 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Construction and Civil Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

**Abstract**

Concrete is the world's most used building material, and it is also the single largest source of carbon dioxide emissions. The most polluting part of concrete is production of cement. In order to curb climate change, the goal of the concrete industry is to reduce the emissions of concrete significantly.

The mandator of this research is Parma Oy Uurainen. Parma Oy's environmental goal is to produce concrete precast parts as ecologically as possible and to reduce carbon dioxide emissions by 5% annually. The factory of Parma in Uurainen aims to reduce the amount of cement used in the manufacture of hollow core slabs by 4,4 %, which at the same time decrease the carbon dioxide emissions and manufacturing costs generated in the manufacture of hollow core slabs.

The purpose of the design research was to develop a new, lower-carbon concrete recipe, which will be tested in practice and to investigate whether the optimization of the recipe affects the hollow core slab manufacturing process, such as the composition of the concrete mass, the function of the casting machine and the performance of the casting work, as well as the quality of the finished hollow core slab and the amount of carbon dioxide emissions of the manufacture.

The new hollow core slab concrete recipe was developed by utilizing the determination of the voids volume left between the aggregates of the concrete. A test casting was performed with the new recipe and the quality was observed and measured by the quality control methods complied with the standard. Test specimens were also taken from the concrete, which were tested for compressive strength.

The results of the quality control measurements were better with the new recipe than with the old one, but the compressive strength was weaker with the new recipe than the old one. From the reports of the test casting, it appeared that the amount of cement could not be reduced with the new recipe, because the initial data of the research were incomplete.

The research did not reach all the goals set for it. However, the research showed that by optimizing the recipe, by calculation the amount of cement can be reduced more than the original goal without significant investments. However, the corrected recipe must be tested in practice before its functionality can be guaranteed.

**Keywords/tags (subjects)**

Hollow core slab, proportioning, cement, carbon dioxide emissions, design research

**Miscellaneous (Confidential information)**

Appendix 4 is confidential and it have been removed from the public thesis. The basis for secrecy is section 24 (17, 20 and 21) of the Act on the Openness of Government Activities (621/1999), a company's business or trade secret and information on technological or other development work and their evaluation. The period of secrecy is five (5) years, the secrecy will end on 28 May 2028.

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Kehittämistyön toimeksiantaja, tausta, tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset</b> ....	<b>8</b>
2.1	Parma Oy .....	8
2.2	Parma Oy Uurainen .....	9
2.3	Kehittämistyön tausta .....	9
2.4	Kehittämistyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset .....	11
2.5	Kehittämistyön rajaukset .....	12
<b>3</b>	<b>Ontelolaattojen valmistusprosessi ja laadunvalvonta</b> .....	<b>12</b>
3.1	Ontelolaatta .....	12
3.2	Ontelolaattojen valmistusprosessi.....	15
3.3	Ontelolaatan lujuudenkehitykseen vaikuttavat tekijät.....	17
3.4	Ontelolaattabetonin koostumuksen vaikutus valmistukseen .....	19
3.5	Ontelolaattabetonin suhteitus.....	21
3.6	Ontelolaattojen valmistusprosessin laadunvalvonta ja laatupoikkeamat.....	23
3.6.1	Mahdolliset laatupoikkeamat .....	23
3.6.2	Valun aikana tehtävät laadunvalvonta .....	25
3.6.3	Valmiille tuotteelle tehtävät laadunvalvontatoimenpiteet.....	27
3.6.4	Puristuslujuuden testaaminen.....	28
<b>4</b>	<b>Betonin ja sementin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen</b> .....	<b>30</b>
4.1	Betonin ja sementin hiilidioksidipäästöt.....	30
4.2	Hiilidioksidin talteenotto.....	33
4.3	Seosaineiden käyttö .....	34
4.4	Karbonatisoituminen ja betonin kierrätys .....	37
<b>5</b>	<b>Toteutus</b> .....	<b>40</b>
5.1	Kehittämistyön menetelmä ja toteutus .....	40
5.2	Kehittämistyön aineisto ja sen keruu ja analyysi .....	43
5.3	Eettisyys.....	44
<b>6</b>	<b>Tulokset</b> .....	<b>45</b>
6.1	Valun aikaisten ja valmiille laatoille tehtyjen laadunvarmistustoimenpiteiden tulokset	45
6.2	Mikroaaltokuivatuksen tulokset .....	47
6.3	Annosraporttien ja tilastojen analyysin tulokset .....	47
6.4	Reseptin kehitystyön tulokset.....	48
6.5	Puristuslujuuskokeiden tulokset .....	49

6.6	Betonireseptin optimoinnin vaikutus hiilidioksidipäästöihin .....	50
<b>7</b>	<b>Pohdinta</b> .....	<b>51</b>
7.1	Johtopäätökset.....	51
7.2	Luotettavuus .....	52
7.3	Keskeisten tulosten tarkastelu suhteessa alkuosan teoreettiseen viitekehykseen .....	53
7.4	Kehittämisehdotukset .....	54
	<b>Lähteet</b> .....	<b>56</b>
	<b>Liitteet</b> .....	<b>60</b>
	Liite 1. Ontelolaattojen valmistustoleranssit .....	60
	Liite 2. Tyypilliset ontelolaattojen laatu puutteet ja niiden käsittely halkeamatapauksissa....	61
	Liite 3. Testivalun valuohjelma/laadunvalvontapöytäkirja .....	64
	Liite 4. Uuraisten kiviainesten kiviainepakkaantuvuus ja testattujen reseptien kiviainesjakauma (salassa pidettävä).....	66
	Liite 5. Laattojen poikkileikkausmittausten tulokset .....	66
	<b>Kuviot</b>	
	Kuvio 1. Ontelolaattojen onteloiden määrä, korkeus ja muoto vaihtelevat laatan korkeuden ja käytettävän valukoneen mukaan (Honkala 2008, 10). .....	14
	Kuvio 2. Valukone ei pystynyt muodostamaan ehjää laattaa.....	20
	Kuvio 3. IC-testerillä voidaan mitata kiviainespakkaantuvuutta ja betonireseptin työstettävyyttä ja tiivistettävyyttä. ....	22
	Kuvio 5. Laatan pinnan aaltoilu ylittää sille määritetyt toleranssit. ....	25
	Kuvio 6. Lohjennut nostoura estää laatan turvallisen nostamisen kyseisestä kohdasta. ....	25
	Kuvio 7. Sementin päästöt aiheuttavat 82 % normaalin rakennebetonin hiilidioksidipäästöistä (Valmisbetonit n.d.). ....	31
	Kuvio 8. 79 % ontelolaattaelementin synnyttämistä hiilidioksidipäästöistä aiheutuu sementin päästöistä. ....	31
	Kuvio 9. Euroopan sementtiteollisuuden kattojärjestön CEMBUREAU:n 2050 -tiekartta, josta näkyy eri toimenpiteillä saavutettavat päästövähennykset lukuina (Ympäristöraportti 2022, 13). ....	33
	Kuvio 10. Betonin purkulujuuden saavuttamiseksi tarvittava aika. L tarkoittaa lentotuhkaa ja M masuunikuonaa. L- ja M- kirjaimien jälkeen numeroarvo kuvaa seosaineen osuutta sideaineen yhteismäärästä painoprosentteina. (Tulimaa, Wirtanen, Holt, Kukko & Penttala 2005, 46).....	36
	Kuvio 11. Valukone muodosti laatukriteerit täyttävää laattaa uudella reseptillä.....	46
	Kuvio 12. Karkean kiviaineksen osuuden vaikutus kiviainesten väliin jäävän tyhjätilan suuruuteen. ....	49

**Taulukot**

Taulukko 1. Betonin valmistuksen näytteiden vähimmäismäärä vaatimuksenmukaisuuden arvioinnissa (By201 2021, 190).....	29
Taulukko 2. Valmiiden laattojen poikkileikkausmittausten koonti. ....	46
Taulukko 3. Mikroaaltouunikuivatuksen tulokset. ....	47
Taulukko 4. Puristuslujuuskokeiden tulokset. ....	50
Taulukko 5. Sementin vähennyksellä saavutettavat hiilidioksidipäästöjen säästöt.....	51

# 1 Johdanto

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, ja sitä tuotetaan vuodessa 13 miljardia m<sup>3</sup> (by 201 2021, 13). Betoni on myös suurin yksittäinen hiilidioksidipäästöjen lähde. Betonin saastuttavin osuus on sementin valmistus, ja sementtiteollisuus tuottaakin 1,9 % Suomen ja maailmanlaajuisesti 7 % kaikista hiilidioksidipäästöistä (Ympäristöraportti 2022, 14). Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi betoniteollisuuden tavoitteena on pyrkiä vähentämään betonin päästöjä merkittävästi. Euroopan sementtiteollisuuden kattojärjestön CEMBUREAU:n (European Cement Assosiation) tavoitteet sementin valmistuksen ja arvoketjun hiilineutraaliudesta vuoteen 2050 mennessä ja Suomen valtion asettamat tavoitteet hiilineutraaliudesta vuoteen 2035 mennessä vaativat toimia myös betoniteollisuuden yrityksiltä (Cementing the European Green Deal n.d., 10–12; Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035 n.d).

Yleisin betonirunkoisten rakennusten lattiatyyppi on ontelolaatta. Ontelolaattojen valmistuksessa syntyvistä hiilidioksidipäästöistä jopa 79 % syntyy betonin sideaineena käytetystä sementistä, minkä takia sementtiä vähentämällä voidaan vaikuttaa merkittävästi ontelolaattojen hiilidioksidipäästöihin (Ontelolaatat n.d.). Sementti on kuitenkin välttämätöntä betonin lujuuden muodostukseen ja sen vähentäminen voi vaikuttaa merkittävästi betonin ominaisuuksiin ja sitä kautta ontelolaattojen valmistukseen ja valmiiden tuotteiden ominaisuuksiin ja laatuun (Ympäristöraportti 2022, 14).

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Parma Oy, joka on Suomen suurin betonielementtivalmistaja. He ovat asettaneet tavoitteekseen valmistaa betonielementtejä mahdollisimman ekologisesti ja vähentää toimintansa hiilidioksidipäästöjä 5 % vuosittain lukuisten yksittäisten toimenpiteiden avulla (Vuosisraportti 2022). Tässä opinnäytetyössä kehittämistutkimuksen avulla ensin pyrittiin kehittämään Parma Oy:n Uuraisten tehtaalle uusi ontelolaattaresepti, jossa on käytetty vähemmän sementtiä, jonka jälkeen koevalulla testattiin uuden reseptin toimivuus, sekä miten reseptin muutos vaikuttaa ontelolaatan valmistuksen käytännön työn suoritukseen, valmiin tuotteen laatuun sekä hiilidioksidipäästöihin. Tietoa tutkittavasta ilmiöstä haettiin julkisista lähteistä, toimeksiantajan sisäisistä lähteistä ja Consolis Parman työntekijöiden kanssa keskustelemalla ja aiheeseen perehtymällä.

## 2 Kehittämistyön toimeksiantaja, tausta, tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

### 2.1 Parma Oy

Parma Oy on Suomen suurin betonielementtivalmistaja ja se kuuluu Consolis-konserniin, joka on Euroopan suurin betoniteknikkaan perustuvien ratkaisujen tuottaja ja betonisten valmisosien valmistaja. Parma Oy:n historia on alkanut Lohjan Kalkkitehtaasta ja Paraisten Kalkista jo reilun sadan vuoden takaa, ja se on kasvanut toimialan johtavaksi valmistajaksi lukuisten yrityskauppojen myötä. Nimellä Parma Oy yritys on toiminut nimellä vuodesta 2003 lähtien. Parma Oy työllistää Suomessa yli 650 henkeä ja koko Consolis-konserni toimii 17 eri maassa ja työllistää noin 10 000 henkilöä. (Tietoa Parmasta n.d.)

Consolis Parma on asettanut tavoitteekseen olla edelläkävijä vastuullisuudessa, ja heidän PARMA Concrete Care™ -vastuullisuusohjelmansa ympäristötavoitteena on betonisten valmisosien mahdollisimman ekologinen valmistus. Toiminnan lähtökohtana on jatkuvan parantamisen periaate. Konkreettisenä tavoitteena Parmalla on vähentää toimintansa hiilidioksidipäästöjä vuosittain 5 % ja näin puolittaa päästönsä vuoteen 2035 mennessä (Vuosiraportti 2022). Päästötavoitteisiin pyritään lukuisilla yksittäisillä toimenpiteillä, joilla tehostetaan prosesseja, vähennetään energiankulutusta ja minimoidaan valmistuksessa syntyvää hukkaa esimerkiksi käyttämällä hukkabetonia betonimurskeena uusien tuotteiden valmistuksessa (Betonielementtien valmistuksen ekologiset kehityskohteet n.d.). Vuonna 2022 yhtiön ominaispäästöihin on vaikuttanut eniten sementin tehokkaampi käyttö ja energian käytön vähentäminen tuotantoyksikköä kohden energiatehokkuus-toimien avulla (Vuosiraportti 2022).

Consolis Parma pyrkii pienentämään hiilidioksidipäästöjään myös kehittämällä jatkuvasti yhä vähähiilisempiä betonituotteita, jotka perustuvat PARMA Green™ -teknologiaan. Päästövähennykseen pyritään esimerkiksi vähähiilisemmällä betonimassalla, hiilioptimoimalla tuotteen raaka-ainemenekkiä, korvaamalla raaka-aineita kierrätysmateriaaleilla tai hiilitehokkailla suunnitteluratkaisuilla. Vakiotuotteeseen verrattuna PARMA Green™ -teknologiaa hyödyntävien Consolixen Green Spine Line® -tuoteperheen tuotteiden hiilidioksidipäästöt voivat olla jopa 60 prosenttia pienemmät. (Parma Green n.d.) Kehitystyön pääpaino on vähentää sementin tarvetta sen suuren hiilijalanjäljen takia. Vähähiilisissä betonimassoissa sementtiä korvataan seosaineilla, tällä hetkellä esimerkiksi

lentotuhkalla ja masuunikuonalla, mutta Consolis Parma testaa jatkuvasti uusien sideaineiden käyttömahdollisuuksia, esimerkiksi saven sekä riisin ja viljan kuorituhkan käyttöä (Green Spine Line® 2023). Tällä hetkellä Green Spine Line® -tuotteita tehdään osassa Consoloksen tehtaista Euroopassa ja Suomessa Parman Forssan, Hyrylän ja Nurmijärven tehtailla (Tilannepäivitys 2023).

## 2.2 Parma Oy Uurainen

Uuraisten betonitehtaan perusti Keski-Suomen Betoni Oy jo 1963, jonka jälkeen tehdas on siirtynyt ensin Harjun Betoni Oy:lle ja sen kautta Betonimestarit Oy:lle ja lopulta Parmalle 2000-luvun vaihteessa (Tehdään elementeistä 2009, 278–279). Tehtaalla on kaksi eri tuotantorakennusta, joissa valmistetaan ontelolaattoja, betonipilareita, teräsbetoni- ja jännebetonipalkkeja sekä TT- ja HTT-laattoja, ja tehdas työllistää tavallisesti noin 50 työntekijää.

Suoritin opintojeni toimihenkilöharjoittelun Parma Oy Uuraisilla kesällä 2022 ja toimin ontelolaattahallin työnjohtoharjoittelijana 5 kuukautta. Ontelolaattahalli työllistää noin 20 betonielementti-työntekijää. Uuraisten tehtaalla ontelolaattoja valetaan tavallisesti kahdessa vuorossa kello 6.00 – 22.30, mutta laattojen sahausta ja kuormien lastausta tehdään kolmivuorotyönä myös öisin. Uuraisten tehtaalla on neljä noin 110 m pitkää valualustaa ja siellä valetaan päivittäin keskimäärin 570 m ja 690 m<sup>2</sup> ontelolaattaa.

## 2.3 Kehittämistyön tausta

Consolis Parman ympäristötavoitteiden mukaisesti Parma pyrkii vähentämään toimintansa hiilidioksidipäästöjä kaikissa yksiköissään, vaikka vain osassa tehtaissa tuotetaan PARMA Green™ -teknologiaan perustuvia tuotteita (Vuosisraportti 2022). Parman Uuraisten tehtaalla on tavoitteena saada vähennettyä ontelolaattojen valmistukseen käytettävän sementin määrää 4,4 %. Seosaineiden käyttöönotto vaatisi Uuraisten tehtaalla investointeja, koska ontelolaattapuolen betoniaseamalla ei ole seosaineelle tarvittavaa siiloa. Tehtaalla käytetään pääsääntöisesti ontelolaattabetonissa myös tehtaalla syntyvää murskattua hukkabetonia korvaamaan massan kiviaineksia. Betonimurskeen käytössä on kuitenkin omat haasteensa, koska murske jähmettyy herkästi siilon pohjalle, etenkin jos siilo on ylitäytetty tai murske on ollut siiloon laitettaessa liian kosteaa. Kehittämistyön aikaan betonimurske ei ollut käytössä murskeen siiloon kovettumisen takia. Sittemmin siilo on tyhjennetty ja murske otettu takaisin käyttöön.

Uuraisten tehtaalla on 4 valualustaa, mutta siellä valetaan tavallisesti 5 valuohjelmaa päivittäin, joskus jopa 6, joten seosmenttien käyttö aiheuttaisi ongelmia tuotannon kierrossa, koska useimmat seosaineet heikentävät varhaislujuuden kehitystä (Punkki 2021). Uuraisilla jänneterästen laukaisuaika valun jälkeen on laattatyypistä, lämmityksestä ja tuotantotilan sisälämpötilasta riippuen noin 8 tuntia, jonka jälkeen laatat sahataan ja nostetaan pois valualustalta, jotta saadaan tyhjiä valualustoja seuraaville valuohjelmille muiden valualustojen täytyttyä. Seosmenttien käyttö hidastaisi tuotannon kiertoa merkittävästi, ja nykyisellä tuotantomäärällä käytännössä niitä voisi käyttää vain perjantai-iltaisina, koska silloin valetuilla pedoilla on mahdollisuus kovettua pidempään, jolloin varhaislujuudenkehitys ei ole niin merkittävässä osassa. Uuraisilla onkin testattu muutamia kertoja niin sanotun perjantaibetonin käyttöä, jossa on käytetty vähemmän sementtiä. Seosainesten vaatimien resurssien puuttuessa ja tuotannonkierron säilyttämisen takia sementin vähentämiseen on järkevää pyrkiä nykyistä betonireseptiä optimoimalla. Vastaavia optimointeja on tehty myös muilla Parman Suomen tehtailla, mutta käytössä olevat valukoneet eivät ole täysin samanlaisia tehtaittain ja paikallinen kiviaines vaikuttaa betonin koostumukseen, joten olemassa olevia reseptejä ei voida suoraan siirtää toisille tehtaalle.

Yli puolet Uuraisilla tehdyistä ontelolaatoista on P32-tyyppin ontelolaattaa. Järjestelmään on kirjattu P32-laatalle betoniresepti, joka jo täyttää tavoitellun sementtimäärän tuotettua betonikuutiota kohden. Toimeksiantaja kuitenkin uskoo, että järjestelmään kirjattuihin resepteihin tehdään valun aikana muutoksia, koska sementin määrän toteutunut keskiarvo ei vastaa järjestelmässä olevaa reseptiä. Mikäli valukone ei toimi halutulla tavalla ja ei esimerkiksi muodosta laattaa, on käytännössä todettu, että sementin lisääminen saattaa auttaa laatan koossapysymisessä. Sementin lisäys on todettu myös melko helpoksi ja nopeaksi tavaksi ratkaista ongelma, jotta tuotanto ei keskeydy, verrattuna esimerkiksi koneen ajoarvojen säätämiseen tai jopa valukoneen nostamiseen pois valualustalta ja kulutusosien vaihtoon tai säätöön. Etenkin suurimmilla Uuraisilla käytetyillä punosmäärillä (13 kpl) tehtävissä valuissa on ollut ongelmana laatan pysyminen koossa, jota on totuttu korjaamaan sementtimäärää nostamalla. Tavoitteena on kuitenkin saada kehitettyä sementtireseptiä niin, että se ei ole häiriöherkkä ja samalla sementtimäärä pysyy asetetussa tavoitteessa, kun muutoksia sementin määrään ei tarvitse tehdä.

## 2.4 Kehittämistyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää Parma Oy Uuraiselle P32-ontelolaatoille uusi sementtiresepti, jonka tarkoitus on vähentää käytettävän sementin määrää. Kehittämistyössä on tarkoitus myös syventyä ontelolaattabetonin suhteituksen erityispiirteisiin, jotta löydetään juuri Uuraisten tehtaan kalustolle sopiva ontelolaattabetoniresepti. Lisäksi uusi resepti testataan käytännössä ja tutkitaan, vaikuttaako reseptin optimointi ontelolaatan valmistusprosessiin, kuten betonimassan koostumukseen, valukoneen toimintaan ja valutyön suoritukseen sekä valmiin ontelolaatan laatuun. Käytettävän sementin kokonaismäärää on tarkoitus vähentää 4,4 % aiemmasta. P32-tyypin ontelolaattaa tehdään tehtaalla eniten, joten uuden resepti kehitettiin ja testattiin ensin vain P32-ontelolaatoilla. Opinnäytetyön tulosten pohjalta voidaan mahdollisesti vastaava reseptien optimointi tehdä muillekin ontelolaattatyypeille tehtaan sementin kokonaiskulutuksen pienentämiseksi. Mikäli kehitelty resepti ei sovellu tehtaan ontelolaattakoneille tai testilaatta ei täytä laatu-kriteerejä, täytyy reseptiä muokata ja testata uudestaan.

Sementin käytön vähentämisen tarkoitus on vähentää ontelolaatan valmistuksesta syntyviä hiilidioksidipäästöjä sekä valmistuskustannuksia ja edesauttaa Parman ympäristötavoitteisiin pääsyä. Sementin hiilidioksidipäästöt muodostavat suurimman osan koko ontelolaatan valmistuksesta syntyvistä päästöistä, joten sementin vähentämisellä on suuri vaikutus koko ontelolaattaprosessin päästöihin (Ontelolaatat n.d.). Parman Uuraisten tehtaalla ei ole ilman investointeja mahdollista lisätä valmistuksen yhteydessä seosaineita sementin korvaajaksi, joten sementin vähentäminen reseptiä optimoimalla on paras ratkaisu hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi.

Opinnäytetyössä haetaan kehittämistutkimuksen avulla vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten ontelolaattabetonireseptiä voidaan optimoida sementin vähentämiseksi?
- Miten reseptin optimointi/sementin vähentäminen vaikuttaa ontelolaatan valmistusprosessiin ja valmiin tuotteen laatuun?
- Miten sementin vähentämistavoitteet voidaan saavuttaa Parman Uuraisten tehtaalla?
- Miten betonireseptin optimointi vaikuttaa ontelolaattabetonin hiilidioksidipäästöihin?

## 2.5 Kehittämistyön rajaukset

Opinnäytetyössä kehitetään ja testataan ensin ontelolaattabetoniresepti vain P32- ontelolaattatyypille. Opinnäytetyön tulosten pohjalta voidaan mahdollisesti tehdä vastaavat reseptin optimoinnit myös muille ontelolaattatyypeille. Jokaisella laattatyypillä on kuitenkin oma valukoneensa, jonka ominaisuudet pitää ottaa huomioon betonin suhteituksessa. Jokaisen optimoidun betonireseptin käytännön soveltuvuus juuri Uuraisten tehtaan valukoneille täytyy testata testivalulla ja tehdä kaikki tarvittavat laadunvarmistustoimenpiteet, joista merkittävimpänä betonin puristuslujuuden mittaaminen. Jokaisen reseptin optimointi ja testaus olisi kuitenkin ollut opinnäytetyön toteutukseen nähden liian iso kokonaisuus. Muiden ontelolaattatyypien testausta ei olisi myöskään järkevää suorittaa ennen ensimmäisen testin puristuslujuustulosten saamista, ja puristuslujuuskokeet voidaan suorittaa vasta 28 vrk vanhalle betonille. Puristuslujuuskokeista aiheutuvan viiveen takia opinnäytetyö rajataan vain yhteen testauskierrökseen. Mikäli kehitelty resepti ei sovellu tehtaan ontelolaattakoneille tai testilaatta ei täytä laatukriteerejä, ei reseptin uudelleentestaus sisälly opinnäytetyöprojektiin. Tällöin opinnäytetyössä annetaan ehdotus jatkotoimenpiteille ja mahdollisesti ehdotus reseptiin tehtävistä muokkauksista.

Opinnäytetyössä esitetään ontelolaattojen valmistusprosessista sekä laadunvalvonnasta ne osat, joihin betonin ominaisuuksilla on vaikutusta. Esimerkiksi laatuhaavioissa ei käsitellä inhimillisistä virheistä johtuvia laatueroja ja valmistusprosessissa yksityiskohtainen työn suorituksen kuvaus ja on jätetty pois. Betonin hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä keskitytään vain sementin osuuteen, koska se muodostaa suurimman osan betonin päästöistä.

## 3 Ontelolaattojen valmistusprosessi ja laadunvalvonta

### 3.1 Ontelolaatta

Ontelolaatat ovat betonielementtiteollisuuden yleisimpiä tuotteita. Ne ovat esijännitetyjä betonia laattaelementtejä, joiden pituussuuntainen ontelorakenne ja terästen esijännitys mahdollistaa tehokkaan materiaalikäytön. (Ontelolaatat. 2023.) Kantavaan ontelolaattarakenteeseen tarvitaan vain noin puolet vastaavan massiiviteräsbetonilaatan betoni- ja teräsmäärästä, mikä tekee ontelolaatasta massiivilaatta ekologisemman ja kustannustehokkaamman valinnan (Parman ontelolaatatot suunnitteluohje 2018, 8). Ontelolaatoissa on pituussuuntaiset jännitetyt teräspunokset tavallisimmin vain laatan alakannaksessa ja yläpunoksia käytetään lähinnä vain ulokelaatoissa, kuten

parvekelaatoissa. Leikkausraudoitusta ei tarvita (Leskelä 2008, 685). Ontelolaatat toimivat päistään tuettuina 1-aukkoisena kantavana rakenteena ja niitä voidaan käyttää myös liittolaattana yhteistoiminnassa pintabetonin kanssa (Ontelolaatat 2023).

Esijännitetyt teräspunokset mahdollistavat jännittämätöntä rakennetta pienemmät materiaalipaksuudet ja suuremmat jännevälit, mikä vähentää tarvittavien kantavien rakenteiden määrää sekä lisää tilojen muunneltavuutta (Parman ontelolaatatot suunnitteluohje 2018, 8). Ontelolaatalla päästään jopa 20 m:n jänneväleihin (Ontelolaatat 2023). Ontelot myös keventävät laattaa ja niitä voidaan hyödyntää asennustiloina ja ilmanvaihtohormeina (Leskelä 2008, 543). Ontelolaatan keveys, pienempi materiaalin tarve, suuremmat jännevälit ja tehokas suunnittelu ja valmistus tekevät ontelolaatasta muunneltavan ja edullisen ratkaisun moniin eri kantaviin vaakarakenteisiin, kuten ala- väli- ja yläpohjiin kaikenlaisissa rakennuksissa. Ontelolaatan etuja ovat myös paksuuteen nähden suuri kantokyky, hyvä ääneneristävyys sekä nopea ja kuiva asennustapa. Alapohjalaatat voidaan varustaa lämmöneristeellä jo tehtaalla. (Parman ontelolaatatot suunnitteluohje 2018, 4–8.) Ontelolaattoja käytetään myös sokkelielementteinä sekä ja teollisuus- ja liikerakennuksissa niitä voidaan käyttää myös julkisivuelementteinä sandwich-elementin tavoin. (Huhtiniemi & Kiviniemi 1992).



Kuvio 1. Ontelolaattojen onteloiden määrä, korkeus ja muoto vaihtelevat laatan korkeuden ja käytettävän valukoneen mukaan (Honkala 2008, 10).

Ontelolaattojen valmistukseen käytetään C40/50 - C70/85 lujuuden omaavaa betonia.

Ontelolaattojen valmistuspaksuudet ovat 150, 175, 200, 265, 320, 370, 400 ja 500 mm ja vakioleveys on 1200 mm, mutta laattoja voidaan myös kaventaa tai sahata viistoon tarvittaessa. Laatan onteloiden määrä, korkeus ja muoto vaihtelevat laatan korkeuden mukaan. (Ontelolaatat 2023.) Teräksinä käytetään halkaisijaltaan joko 9,3 mm tai 12,5 mm jänneteräspunoksia (Parman ontelolaatat suunnitteluohje 2018). Punosten määrä vaihtelee esimerkiksi laatalle tulevan kuormituksen, suunnitellun käyttöiän ja jännevälin mukaan (Ontelolaatat 2023).

Ontelolaatta on CE-merkitty tuote, mikä osoittaa, että tuote on suunniteltu ja valmistettu hyväksytyt eurooppalaisen EN-tuotestandardin mukaisesti (CE-Merkittyjen ontelolaattojen mitoitus 2023). CE-merkintä asettaa vaatimuksia niin valmistuksessa käytettäville materiaaleille, suunnittelutyölle, valmistukselle, valmistuksen valvonnalle, testaukselle ja testaustavoille sekä tehtaan sisäiselle laadunvalvonnalle. Näitä osa-alueita koskevat useat eri standardit. (SFS-EN 1168 + A3:2012.) Ontelolaattojen tuotestandardi on SFS-EN 1168 ja esimerkiksi Parman ontelolaatat täyttävät tuotestandardin SFS-EN 1168:2005+A3:2011 menettelyn 3b vaatimukset ja valmistuksessa käytetään vain materiaaleja, joiden laatu perustuu varmennettuihin laatutodistuksiin eli CE-merkkiin, varmennettuihin käyttöselosteisiin, SFS-sertifikaattiin tai käyttöturvallisuustiedotteisiin. Inspecta Oy valvoo tehtaan raportoinnin ja tarkastuskäynnein tehtaan sisäisten laadunvarmistusvaatimusten

noudattamista. Tällä hetkellä Suomessa ontelolaattojen mitoituksessa käytetään eurokoodijärjestelmää eli kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja. (Parman ontelolaatatot suunnitteluohje 2018.) Ontelolaattoja ja niiden valmistusta koskevat seuraavat standardit:

- SFE-EN 13369, BETONIVALMISOSIEN YLEISET SÄÄNNÖT
- SFS-EN 1168 + A3, ONTELO- JA KYLPYHUONELAATAT
- SFS-EN 206-1+A1+A2, BETONI OSA1: MÄÄRITTELY, OMINAISUUDET, VALMISTUS JA VAATIMUSTENMUKAISUUS
- SFS 7016
- SFS 7022
- Betonielementtien toleranssit 2011

(Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023)

### 3.2 Ontelolaattojen valmistusprosessi

Ontelolaatat valmistetaan yli 100 m pitkille teräksisille valualustoille. Valmistuksessa voidaan käyttää joko pursotus- tai liukuvalutekniikkaa. Parman Uuraisten tehtaalla on käytössä pursotustekniikka, johon käytetään Extruder-valukoneita. Liukuvalutekniikassa käytetään Slipformer-valukoneita, mutta tässä opinnäytetyössä keskitytään pursotustekniikkaan. (Honkala 2008, 12.)

Ennen valun aloitusta valualustan lämmityslaitteisto kytketään päälle. Lämmityksen on tarkoitus nopeuttaa laatan kuivumista ja lujuudenkehitystä ja tällä tavalla mahdollistaa nopeampi tuotannon kierto (Johansson 2023, 54). Puhdistetulle ja öljytylle valualustalle vedetään kyseiselle valuohjelmalle suunniteltu määrä jänneteräksiä ja teräkset jännitetään punossuunnitelman mukaisesti 900...1100 N/mm<sup>2</sup> alkulujuuteen ja mitataan jokaisen punoksen venymä (Ontelolaatat 2023; Hietanen, Kaivola & Suikka 2009, 13). Sallittu venymä riippuu määrittelystä alkujännityksestä ja käytettävän punokseen halkaisijasta (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023).

Jännitystyön jälkeen valutyö aloitetaan asettamalla ontelolaattakone valualustan, eli pedin sen reunoilla olevien kiskojen päälle. Jokaiselle eri ontelolaattatyypille on oma valukoneensa. Jännitettyjen punosten suunnitelmien mukainen sijainti varmistetaan koneen eteen asetettavalla punosohjaimella. Pedille valukoneen eteen syötetään vettä, joka kulkee koko valun ajan liukuvalukoneen edessä. Valupedin puhdistamisen, öljyämisen ja pohjaveden tarkoitus on estää ontelolaattaa tarttumasta kiinni valualustaan ja tasoittaa ontelolaatan pohjan pintaa, jotta se täyttäisi asetetun pinnan laatuvaatimukset (Honkala 2008, 13).

Ontelolaattabetoni on maakostea betonia, joka säilyttää muotonsa valukoneen muotoilun ja tiivistyksen jälkeen ilman erillisiä muottilaitoja (Ontelolaatat 2023). Betoni muistuttaa sekoituksen jälkeen paljon kostea sora. Betoniasemalta betoni voidaan tuoda valukoneelle eri tavoilla tehtaan laitteistosta riippuen (Honkala 2008, 12). Uuraisten tehtaalla betonimyllystä valmis massa tiputetaan betonikuljetussukkulaan, joka kuljettaa betonin valukoneen kanssa samaan tahtiin liikkuvalla välikuljettimelle. Välikuljetin annostelee betonin edelleen valukoneen massasäiliöön.

Valun aluksi betoniaseman työntekijä valitsee tietokoneelta valuohjelman vaatimusten mukaisen massan betoniaseman ohjausjärjestelmästä ja tilaa ensimmäisen annoksen, kun valutyöntekijät ovat valmiita aloittamaan valun. Jokaiselle laattatyypille ja lisäksi erikoismassoille, esimerkiksi nopeammin varhaislujuutta kehittäväälle pikamassalle, on järjestelmässä kirjattuna omat reseptinsä. Valun alussa massan koostumus ja kosteus tarkistetaan silmämääräisesti yleensä sekä betoniasemalla sekoitusvaiheessa että valukoneella. Tarvittaessa reseptiin tehdään betoniasemalla kosteuden korjaus, ja tehdyt muutokset kirjautuvat automaattisesti ohjausjärjestelmän annosraporttiin. (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023.)

Massasäiliöstä betoni valuu valukoneen syöttöruuveille, jotka pursottavat betonia saattoputkien ympärille. Valukoneen sivulaidat, tasoituspalkisto ja valupeti muodostavat laatan ulkoreunat. Massan pursotus sekä sivulaitojen ja saattoputkien edestakainen liike tiivistävät betonimassan ja tasoituspalkiston edestakainen liike valmistelee laatan yläpinnan. Vastakkaisiin suuntiin tapahtuvaa tiivistysmenetelmää kutsutaan leikkaustiivistykseksi. Laatan yläpinnan viimeistelee vielä silotuslevy ja valukoneen valmistaman laatan pintoja ei tarvitse erikseen enää viimeistellä. Massan syöttöruuveista aiheutuu pursotusvoima, joka työntää konetta valukiskoilla eteenpäin ja kone jättää jälkeensä valmista vielä kovettumatonta ontelolaattaa. Laatta kestää kuormitusta, esimerkiksi työntekijän painon vain minuutteja valun jälkeen. (Honkala 2008, 14.)

Vastavalettuun ontelolaattaan merkataan laatan katkaisukohtat ja laattakuvien mukaiset mahdolliset aukotukset ja varustelut, kuten nostolenkit, sekä kiinnitetään elementin tunnuslappu (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023). Mikäli kyseessä on kylpyhuonelaatta, johon tehdään koko laatan pituudelle tai osittain syvennys kylpyhuoneen kallistusvalua ja talotekniikan asennusta varten, käytetään erillistä kylpyhuonelaattakonetta, joka tiivistää valetun

laatan matalammaksi haluttuun korkeuteen. Tiivistystyössä laatan ontelorakenne rikkoutuu ja laatasta tulee syvennyksen osalta umpilaatta. Valmis ontelolaatta, johon aukotukset ja varaukset on tehty, peitetään höyryä läpäisemättömällä muovikelmulla.

Kun betoni on kovettunut tarpeeksi, jotta se on saavuttanut laukaisulujuuden, päästetään esijännitys punoksista, eli punokset katkaistaan ensin valualustan päältä, jossa jännitystyö on tehty. Laukaisulujuuden tulla olla vähintään 60 % nimellislujuudesta, paitsi 400 ja 500 mm paksuilla laatoilla vähintään 70 % nimellislujuudesta. (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023.) Tällöin laatta esijännittyy, kun punosten voima siirtyy laatalle puristusjännitykseksi. (Ilveskoski 2012, 159.). Kun punokset on katkaistu molemmista päistä, voidaan ontelolaatat sahata suunniteltuihin mittoihin valualustan päälle nostettavalla timanttisahalla. Laukaisulujuuden saavuttanut sahattu laatta kestää myös noston laatan nostourista. Sahauksen jälkeen ontelolaatat nostetaan nosturilla kuormausohjeen mukaisesti kuormiin. Kuormausohjeissa on huomioitu laattojen asennusjärjestys, koska laatat puretaan työmaalla suoraan kuormasta.

### **3.3 Ontelolaatan lujuudenkehitykseen vaikuttavat tekijät**

Mitä lyhyempi aika valun lopetuksen jälkeen kuluu siihen, että ontelolaatan lujuus on kehittynyt laukaisulujuuteen, sitä vähemmän tuotannon kierto on syntynyt laatan kovettumisesta johtuvaa odottelua. Mikäli samana päivänä on tarkoitus tehdä useampi valu, mitä tehtaalla on valualustoja, on aiemmin valetut alustat saatava tyhjennettyä uuden valun tieltä. Aikaan, joka kuluu siihen, että ontelolaatan lujuus kehittyy laukaisulujuuteen, vaikuttaa: käytetty sementti ja sen määrä; käytetyt seosaineet ja niiden määrät; vesi-sementtisuhte; lisäaineet; massan lämpötila ja ulkoiset olosuhteet, esimerkiksi suojaus ja lämmitys (Johansson 2023, 51).

Lämpötilan nostamisella on merkittävä vaikutus lujuudenkehityksen nopeuteen. Liian korkeat lämpötilat kuitenkin aiheuttavat lujuuskatoa, mikä on otettava huomioon etenkin massiivissa valuissa, joissa hydrataatioreaktiosta syntyvä lämpö nostaa merkittävästi valun lämpötilaa. Yli 70°C on rakenteelle jo vaarallinen ja lujuuskadon mahdollisuus on otettava huomioon jo yli 50 °C lämpötiloissa. (Johansson 2023, 53.) Ontelolaatan onteloraakenteen vuoksi rakenteen liian korkean hydrataatiolämmön muodostus ei ole todennäköistä, vaan valualustoja lämmitetään varhaislujuuden kehityksen nopeuttamiseksi. Valun peittäminen muovikelmulla myös tasaa lämpötilaa koko va-

lussa, vaikka lämmitys tapahtuu vain laatan alapuolelta. Lämpötilan tasaisuus ehkäisee pinnan kovettumista muuta laattaa aiemmin, mikä saattaisi aiheuttaa halkeilua (Kosomaa, Mattila & Tepponen 2015, 42).

Lisäksi peittäminen estää kosteuden haihtumista, mikä edistää sementin reagointia veden kanssa. Kovettuminen jatkuu niin pitkään, kun betonissa on reagoimatonta sementtiä tai muuta sideainetta ja vettä. Peitteen avulla saadaan aikaan tasainen kovettuminen koko laattaan, kun peite ehkäisee sementin kovettumisreaktion keskeytymistä betonin pinnassa liian varhaisen kuivumisen takia, mikä saattaisi aiheuttaa esimerkiksi nostourien lohkeamista. (Kosomaa, Mattila & Tepponen 2015, 42.) Eriyisen paljon peittämisen tärkeys korostuu ulkolämpötilojen ääripäissä, koska ne vaikuttavat väistämättä tuotantohallin sisälämpötilaan ja tätä kautta valun pinnan nopeampaan kuivumiseen tai pinnan lämpötilaeroon muuhun laattaan verrattuna.

Tärkein betonin varhaislujuuteen vaikuttava seikka on betonin sisältämän veden ja sideaineen painon suhde, eli useimmiten vesi-sementtisuhte. Mitä vähemmän betoni sisältää vettä suhteessa sementtiin, eli mitä alhaisempi vesi-sementtisuhte, sitä lyhyempi on sitoutumisaika ja korkeampi varhais- ja loppulujuus kasvaa. (Johansson 2023, 51–72.) Alhainen vesimäärä myös kasvattaa myös betonin tiiveyttä, mutta huonontaa betonin työstettävyyttä. Veden lisääminen työstettävyyden parantamiseksi vaatii lisäämään myös sementtiä toivotun lujuuden saavuttamiseksi. (Betonin lujuus riippuu vesi-sementtisuhteesta n.d.)

Osittain sementin tilalla voidaan käyttää myös seosaineita, kuten masuunikuonaa ja silikaa. Seosaineet kuitenkin siirtävät sitoutumisen alkua, mikä vaikuttaa lujuuden kehitykseen (Johansson 2023, 51–72). Esimerkiksi masuunikuona nostaa betonin loppulujuutta ja vähentää vedentarvetta betonissa, mutta hidastaa varhaislujuuden kehitystä (Masuunikuonajauhe KJ400 2019). Samoin silika kasvattaa loppulujuutta, mutta lisää myös vedentarvetta ja näin huonontaa massan työstettävyyttä, joten sitä lisättäessä on aina käytettävä notkistinta. Silika ei myöskään vaikuta juurikaan varhaislujuutta nostavasti etenkin huoneenlämmössä tai sitä alemmissa lämpötiloissa. (Timonen-Nissi 2019, 18.)

Myös käytetyt lisäaineet vaikuttavat lujuuden kehitykseen. Notkistin parantaa massan työstettävyyttä alhaisilla vesimäärillä, mikä mahdollistaa alhaisemman vesi-sementtisuhteen, mutta tekee

massasta herkemmän vesimäärän heilahteluille kuten kiviaineskosteuksien vaihteluille. Monet notkistimet myös hidastavat sitoutumisen alkua ja lujuudenkehitystä etenkin viileässä ja lämpimässä taas niiden vaikutusaika lyhenee. Kiihdytin, eli betonin lujuudenkehitystä kiihdyttävä aine kasvattaa varhaislujuutta, mutta vaikuttaa loppulujuuteen negatiivisesti. Kiihdytin myös lyhentää työstöaikaa. (Johansson 2023, 51–72). Sekä seosaineiden ja lisäaineiden käytössä tulee betonielementti- ja etenkin ontelolaattateollisuudessa ottaa huomioon niiden vaikutus niin varhaislujuuteen, työstettävyyteen ja loppulujuuteen. Mikään yksittäinen seos- tai lisäaine ei ole osoittautunut ongelmattomaksi pyrittäessä korkeaan varhaislujuuteen tuotannon kierron nopeuttamiseksi.

### **3.4 Ontelolaattabetonin koostumuksen vaikutus valmistukseen**

Pursotustekniikkaa ja Extruder-valukoneita käytettäessä betonin oikeanlainen koostumus on erittäin tärkeää, koska laatan pitää pysyä muodossaan ilman erillisiä muottilaitoja välittömästi valun jälkeen. Mikäli massa ei ole oikeanlaista, ei kone pysty muodostamaan laattaa ollenkaan, tai laatan ontelot ja siten koko laatta sortuu valamisen jälkeen. Liian jäykkä ja kuiva massa saattaa myös nostattaa valukonetta valupedin kiskoilla, jolloin laatasta tulee liian korkea (Uuraisten ontelolaatta-tehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023). Valutyöntekijä voi tarvittaessa säätää myös valukoneen ajoarvoja, kuten massan syöttönopeutta massan koostumuksen ja valuohjelman mukaan, mutta tavoiteltavaa on, että massa olisi niin tasalaatuista, ettei ajoarvoihin tarvitse tehdä valun aikana suuria muutoksia.



Kuvio 2. Valukone ei pystynyt muodostamaan ehjää laattaa.

Vääränlainen betonimassa voi aiheuttaa myös laatuhäiriöitä laattoihin, vaikka ne ulkomitoiltaan täyttäisi niille asetetut standardit. Esimerkiksi laatan pohja voi olla harvaa. Tähän voi vaikuttaa vääränlainen, kuten liian jäykkä tai kuiva, ja siten hankalasti tiivistettävä massa, mutta myös valukoneen kuluminen tai säädöt. Muita vastaavia laatuhäiriöitä ovat jännepunosten luistaminen, halkeamat, laatan pinnan aaltoilu tai pinnan, kuten nostourien lohkeilu. Usein on hankala selvittää yhtä selkeää yhtä syytä laatuhäiriöihin, vaan ne voivat johtua esimerkiksi massan koostumuksesta, valukoneen kulumisesta tai säädöistä, tuotantohallin lämpötilasta tai jälkihoidosta tai kaikkien näiden yhdistelmästä. Betonimassan koostumus voi vaihdella myös merkittävästi, vaikka siihen käytetty resepti olisi sama. Kiviainekosteudet voivat poiketa mitatuista, tai talvisin kiviainesten seassa voi olla jopa jäätä. Myös muiden aineiden lämpötilat sekä ilman lämpötila voi vaikuttaa massan koostumukseen. Lisäksi betonimylllyn automatisoiduissa vaoissa on mittaepätarkkuuksia.

Betonimassan koostumus, ja etenkin kiviaineksen ominaisuudet, vaikuttaa massan virtaukseen valukoneessa ja sitä kautta merkittävästi valukoneen kulumiseen ja huollon tarpeeseen. Valukoneet toimivat erittäin haastavissa olosuhteissa, ja maakostea massa aiheuttaa kulumista valukoneen kulutusosiin. Kiviaineksista etenkin murskattu kiviaines on luonnonkiveä kuluttavampaa valukoneen kulutusosille. (Honkala 2018, 16.)

### 3.5 Ontelolaattabetonin suhteitus

Suhteituksella tarkoitetaan betoniin käytettävien osa-aineiden määrien keskinäistä suhdetta ja niiden yhdistämistä niin, että sekä tuore massa että kovettunut betoni saavuttavat halutut ominaisuudet. Useimmat Suomessa käytettävät betonin suhteitusohjelmat perustuvat Nykäsen suhteitusmenetelmään. (by 201 2018, 155.) Ontelolaattojen valmistukseen käytetään C40/50–C70/85 lujuusluokan betonia ja Parman Uuraisten tehtaalla yleisimmin on käytössä C50/60 lujuuden omaavaa betonia (Ontelolaatat 2023). Vaikka C50/60 lujuusluokkaa ei luokitella vielä korkealujuusbetoniksi (C55/65 ylöspäin), ei Nykäsen suhteitusmenetelmän asteikko riitä sen suhteitukseen (By201 2018, 16). Ontelolaattabetonin suhteituksessa pitää ottaa huomioon myös massan maa-  
kosteaa koostumus.

Betoni pyritään yleisesti ottaen valmistamaan niin, että runkoaineen määrä betonissa on mahdollisimman korkea, ja sementtipastan osuus mahdollisimman pieni, sillä sementtipasta on betonin heikoin aines ja betonin murtuminen puristusrasituksessa johtuu sementtikiven, eli kovettuneen sementtipastan halkeamisesta (Nykyri 2020, 35–36). Optimaalisin kiviainesjakauma selvittämällä voidaan runkoainesten väliin jäävä tila, eli tyhjätila, saada mahdollisimman pieneksi (Mohammed, Pusch, Al-Ansari & Knutsso 2012, 208–209). Myös ontelolaattabetonin suhteituksessa voidaan hyödyntää käytettyjen kiviainesten väliin jäävän tyhjätilan määrittämistä kiviainespakkaantuvuustestin avulla.

Tyhjätila voidaan määrittää IC-testerillä käyttämällä käytössä olevia kiviaineksia kyseiseltä tehtaalta. Mitä pienemmäksi kiviainesten väliin jäävä tyhjätila saadaan, sitä vähemmän tarvitaan sementin ja veden muodostamaa sementtipastaa kiviainesten väliin ja siten suurempi puristuslujuus on mahdollista saavuttaa pienemmällä sementtimäärällä (Mohammed, Pusch, Al-Ansari & Knutsso 2012, 221). Koska kiviaineksen puristuslujuus on huomattavasti valmista betonia parempi, on sementtipasta betonin heikoin lenkki. Sementtipastaa tarvitaan kuitenkin kiviaineksen tyhjätilan täyttämisen ja kiviainesten yhteen sitomisen lisäksi betonin työstettävyyden takia ja tämän takia kiviainesten väliin jäävän tyhjän tilan tulee olla jonkin verran ”ylitäytetty” (Mohammed, Pusch, Al-Ansari & Knutsso 2012, 221). Ylitäytön määrä riippuu esimerkiksi valukoneen tiivistyskapasiteetista.

Kiviainespakkaantuvuuden lisäksi valmista betonireseptiä voidaan testata IC-testerillä. IC-tester on tietokoneen kanssa yhdessä toimiva paineilmakäyttöinen laite, joka on kehitetty maakostean betonin tiivistettävyyden ja työstettävyyden testaamiseen. IC-testeriä käytetään esimerkiksi uuden betonireseptin testausvaiheessa, jolloin mahdolliset laatupoikkeamat voidaan havaita ennen reseptin siirtämistä tuotantokäyttöön. Laitteen tarkoitus on puristaa testattava betonimassa sylinterin muotoiseksi ja määrittää massan tiheys. Testattava massa laitetaan teräksiseen sylinteriin ja laitteen ylämäntä puristaa ja alamäntä pyörii samanaikaisesti. (Rautiainen 2013, 17–18.) Koneella saadaan muodostettua oikeanlaisilla säädöillä betonimassaan samankaltainen tiivistys, mitä ontelolaattavalukone tuottaa. Kun testattava betonimassa otetaan pois tiivistyksen jälkeen pois sylinteristä, massan pitäisi olla pysyvä muodossaan reunojen pullistumatta ja sen pitäisi olla tasaisesti tiivistynyt.



Kuvio 3. IC-testerillä voidaan mitata kiviainespakkaantuvuutta ja betonireseptin työstettävyyttä ja tiivistettävyyttä.

### 3.6 Ontelolaattojen valmistusprosessin laadunvalvonta ja laatupoikkeamat

Ontelolaattojen valmistusta sitovat monet standardit, jotka edellyttävät tehtaalta useita eri laadunvalvontatoimenpiteitä (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023; SFS-EN 1168 + A3:2012). Tässä luvussa keskitytään niihin laatupoikkeamiin ja jatkuviin tehtaalla tehtäviin päivittäisiin laadunvalvontatoimenpiteisiin, joihin betonimassan koostumus ja ominaisuudet liittyvät. Luvussa ei käsitellä esimerkiksi laitteistolle tehtäviä tarkastuksia ja kalibrointeja. Luvussa käsitellään pääsääntöisesti Parman Uuraisten tehtaalla tehtäviä laadunvalvontatoimenpiteitä

#### 3.6.1 Mahdolliset laatupoikkeamat

Luvussa käsitellään niitä valmiiden tuotteiden laatupoikkeamia, joihin betonin koostumus ja ominaisuudet vaikuttavat. Luvussa ei käsitellä esimerkiksi koneiden rikkoutumisesta tai inhimillisistä virheistä johtuvia laatuhäiriöitä, kuten huolimattomasta mittauksesta ja sahauksesta johtuvia virheitä.

Yksi yleisimmistä laatan hylkäykseen johtavista laatupoikkeamista on punosluisto (Betonivalmisosien laatu poikkeamien käsittely 2006, 13). Punosluisto saa paksulla, halkaisijaltaan 12,5 mm punoksella olla maksimissaan 3 mm ja 9,3 mm punoksella 2 mm (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023). Punostartunta voi olla heikko esimerkiksi betonin huonon tiivistymisen tai liian alhaisen laukaisulujuuden takia. Punosluistosta huolimatta laatan kantokyky voi olla riittävä, esimerkiksi jos laatta on valettu alustalle, jossa on ollut enemmän punoksia, mitä kyseinen laatta olisi kantavuuden puolesta tarvinnut. Havaitut punosluistot tulee aina merkata laattaan, vaikka laattaa ei tarvitsisi hylätä, jotta työmaalla tiedetään, että laatan kantavuus punosluistosta huolimatta on selvitetty. (Betonivalmisosien laatu poikkeamien käsittely 2006, 13.)



Kuvio 4. 11 punoksen ontelolaatassa yhdessä punoksessa punosluisto. Havaitut punosluistot täytyy aina merkata laattaan, vaikka laatan kantokyky olisi todettu riittäväksi.

Laattaan voi tulla myös halkeamia. Halkeamat voivat olla laattaan nähden poikittaisia, pitkittäisiä ontelokannaksen, ontelon tai laatan reunan kohdalla tai uumassa esijännityspunoksen yläpuolella. Liitteessä 3 on esitelty näihin halkeamatyyppeihin vaikuttavia syitä ja niiden vaikutusta laatan käyttöön. Halkeamien syntyyn on useita mahdollisia syitä, mutta useimmissa tapauksissa mahdollisina aiheuttajina on betonimassan liiallinen kosteus ja liian aikainen lämpökäsittely. Myös betonimassan puutteellinen tiivistys ja liian alhainen laukaisulujuus voi aiheuttaa etenkin pitkittäisiä halkeamia laatan reunoihin. (Betonivalmisteiden laatu- ja käyttösuositusten käsittely 2006, 14, 33–40.)

Liian kostea massa voi aiheuttaa myös laatan pinnan aaltoilua. Pinnan aaltoilulle on myös määritetty toleranssit ja mikäli aaltoilu ylittää toleranssit (katso liite 1), ei sitä kohtaa valusta voida käyttää. (Parman ontelolaatatot suunnitteluohje 2018, 45). Samoin liian korkea tai matala laatta pitäisi hylätä jo valuvaiheessa (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023). Liian kuiva ja huonosti tiivistyvä massa ja puutteellinen jälkihoito voivat puolestaan aiheuttaa laatan nostourien lohkeilua etenkin kesällä, kun tuotantotilan lämpötila nousee ulkolämpötilan noustessa (Kosomaa, Mattila & Tepponen 2015, 42). Etenkin tällaisissa olosuhteissa laatan peittäminen välittömästi valun jälkeen on erityisen tärkeää pinnan liian nopean kuivumisen estämiseksi.



Kuvio 4. Laatan pinnan aaltoilu ylittää sille määritetyt toleranssit.



Kuvio 5. Lohjennut nostoura estää laatan turvallisen nostamisen kyseisestä kohdasta.

### 3.6.2 Valun aikana tehtävät laadunvalvonta

Jännitystyön jokaisen punoksen venymätulokset kirjataan laadunvalvontapöytäkirjaan (liite 3). Valun aikana valettava laatan korkeus mitataan vähintään kolmesti molemmin puolin ja tulokset kir-

jataan valuohjelman laadunvalvontapöytäkirjaan. Lisäksi laatan korkeutta mitataan aina tarvittaessa, esimerkiksi valukoneen säätöjä tai massan koostumusta muuttaessa sekä etenkin valun aloituksessa, jotta varmistetaan että massa on oikeanlaista ja säädöt kohdillaan. Mittaus ehkäisee syntyvää hukkaa. Jokaiselle laattatyypille on määritetty korkeutta koskevat toleranssit (katso liite 1), ja mikäli mittaustulos ei ole toleranssin sisällä, ei valettua laattaa voi käyttää siltä matkalta, miltä toleranssit ylittyvät. Laadunvalvontapöytäkirjat varastoidaan tehtaalla 10 vuotta. (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023.)

Lisäksi valun aikana havainnoidaan silmämääräisesti laatan laatua. Mikäli pinnassa esiintyy esimerkiksi aaltoilua tai pinta ei ole tasainen, täytyy joko valukoneen säätöjä tai massan koostumusta muuttaa. Harjaantunut valutyöntekijä osaa usein sanoa massan ja valussa muodostuvan laatan perusteella, onko betonin koostumus oikeanlaista. Esimerkiksi sopivan kostea massa jättää muodostuvan laatan pinnan kiiltäväksi heti valun jälkeen, mutta liian kosteassa massassa pinta jää kiiltämään pitkältä matkalta. Valutyöntekijä ilmoittaa radiopuhelimella tai puhelimella massassa tai laatussa havaittavat poikkeamat betoniaseman työntekijälle, jotta hän osaa tarvittaessa tehdä oikeanlaiset muutokset massaan. Jokaiseen annokseen annostellut materiaalmäärät tallentuvat betoniaseman ohjausjärjestelmään annosraportteina. (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023.)

Myös valukoneen säädöillä, esimerkiksi massan syöttönopeudella on vaikutusta laatan laatuun, mutta tavoitteena on, että massa olisi niin tasalaatuista, ettei ajoarvoihin tarvitse tehdä valun aikana suuria muutoksia, vaan jokaiselle laattatyypille ja eri punosmäärille olisi vakioajoarvonsa. Esimerkiksi kiviainesten kosteus ja lämpötila saattavat vaihdella, mikä saattaa näkyä muutoksena valmiin massan ominaisuuksissa. Valun aikainen laadunvalvonta onkin tärkeää, mutta haastetta tasalaatuisuuteen tuo se, että laatuun vaikuttavia tekijöitä on paljon, ja aina ei ole helppo sanoa, mistä laatuongelma johtuu. Joskus on mahdollista, että liika säätöjen ja tai massan korjaaminen voi kostautua, jos esimerkiksi liian kostea betoni olikin seurausta hetkellisestä muutoksesta, esimerkiksi kiviaineksen mukana olevasta jäästä.

Valun aikaisella laadunvalvonnalla on suuri merkitys hukan vähentämiseen, kun ongelmiin voidaan reagoida mahdollisimman nopeasti, eikä tehdä liian kauaa huonolaatuista laattaa, joka ei täytä laa-

tukriteerejä. Myös huonolaatuisten osuuksien hylkääminen jo valuvaiheessa vähentää hukkabetonin, kun hylätään vain huono osuus, eikä esimerkiksi koko laattaa, josta vain osa ei täytä vaatimuksia. Samalla myös ehkäistään sitä, että kiireiset laatat, joiden toimitus lähestyy, jouduttaisiin valamaan uudelleen, jos ne hylättäisiin vasta kovettumisen ja sahausksen jälkeen. Valutyöntekijät voivat näin reagoida heti valun aikana jättämällä ohjelmasta pois vähemmän kiireisiä laattoja varmistuen kiireisten laattojen laadun ja toimituksen ajallaan.

Ennen punosten jännityksen laukaisua, tulee varmistaa, että laatta on saavuttanut laukaisulujuuden. Tuotestandardin EN 1168:2005+A3:2011 mukaan kypsyyden varmistaminen tulee tehdä yhdelle koekappaleella joka päivä jokaiselta valualustalta. Valun sen hetkinen puristuslujuus voidaan mitata esimerkiksi kimmovasara- tai ultraäänimittauksella, jotka ovat kalibroitu laboratoriotestausten kanssa tai kovettumisaste voidaan arvioida myös laskemalla. (EN 1168:2005+A3:2011, 26) Parmalla valualustan lujuudenkehitystä seurataan Addheat-ohjelmalla, joka laskee valun lämmönkehityksen avulla betonin lujuuden.

### **3.6.3 Valmiille tuotteelle tehtävät laadunvalvontatoimenpiteet**

Työntekijä, joka nostaa laatat valualustoilta kuormiin, tekee laatoille silmämääräistä laadunvalvontaa. Kun laatta nostetaan alustalta nosturilla, nähdään myös laatan pohjan laatu. Mikäli laatoissa ilmenee laatupoikkeamia, työntekijä raportoi havainnoista joko laadunvalvojalle tai työnjohtoon, jotta laatalle tehdään tarkempia tarkastuksia. Lisäksi CE-merkintä edellyttää ontelolaattojen tuotestandardin SFS-EN 1168 kohdan 5.3 mukaista mittauksia yhdelle laatalle jokaiselta valulinjalta päivässä. Esimerkki mittausraportista on liitteessä (liite 5). Uuraisilla jokaisesta valusta mitataan vähintään yksi laatta. Tarkistettavan laatan korkeus reunojen, onteloiden ja uumien kohdalla mitataan mittanauhalla ja nostourien korkeudet, punosten etäisyydet ja luistot työntömitalla. Mittaukset kirjataan sille tarkoitetulla laitteella, joka ohjaa mittaajaa, jotta kaikki tiedot tulevat kirjattua. Mittausten kirjaamisen jälkeen tiedot lähetetään eteenpäin Parman tuotannonohjausjärjestelmään. (Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC) 2023.)

Mittaukset suorittaa usein tehtaan laadunvalvoja ja hänen poissa ollessa työnjohtaja. Laadunvalvoja tekee mittauksien lisäksi silmämääräistä valvontaa ja kirjaa havaitsemansa ja mahdollisesti myös purkutyöntekijän havaitsemat laatupuutteet Parmalla käytettävään Kiwa Impact™ -järjestelmään. Laattojen hylkäyksestä ja uudelleen tekemisestä päättää joko laatuvalvoja yksin tai yhdessä

työnjohtajan kanssa tai epäselvissä tilanteissa, yleisimmin punosluisto- ja halkeamatapauksissa, konsultoidaan yleisimmin punossuunnittelijaa. Hylkäyksen jälkeen työnjohtaja kirjaa hylkäyksen tuotannonohjausjärjestelmään ja ilmoittaa asiasta tuotannonsuunnittelija, jonka jälkeen laatalle suunnitellaan uusi valmistusajankohta ja -ohjelma.

### 3.6.4 Puristuslujuuden testaaminen

Kovettuneen betonin tärkein rakennetekninen ominaisuus on puristuslujuus. Betonilla on kyky kestää suuria puristusrasituksia, mutta sen vetolujuus on vain noin 5–8 % puristuslujuudesta ja käytännössä rakenteessa esiintyvät vetojännitykset otetaan vastaan raudoituksella. Puristuslujuuskokeet ovat keskeinen osa ontelolaattojen laadunvalvontatoimenpiteitä, koska useat betonin ominaisuudet, kuten vetolujuus, taivutusvetolujuus, kimmokerroin ja säilyvyys ovat siihen verrannollisia. (By201 2021, 85.) Ontelolaattojen CE-merkintä edellyttää betonin puristuslujuuden vaatimuksenmukaisuuden osoittamista, joka todetaan tuotannosta otettavilla puristuskokeilla ja niiden taajuus määritellään standardissa SFS-EN 13791. Uuraisten tehtaalla jatkuvan testauksen vaiheessa näytteiden vähimmäismäärän määräävät ehdot ovat 1 näyte/ 400 m<sup>3</sup> kohden tai 1 näyte 5 tuotantopäivää kohden. (By201 2021, 186–199.) Puristuskoeikäytäntö on tarkkaan määritetty ja sitä koskevat seuraavat standardit:

- SFS-EN 12504-1 Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet. Näytteenotto, tutkiminen ja puristuslujuuden testaus.
- SFS-EN 12390-2 Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuuksitejä varten
- SFS-EN 12390-3 Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus.
- SFS-EN 12390-4 Kovettuneen betonin testaus. Osa 4: Puristuslujuus. Vaatimukset testauskoneille.
- SFS-EN 12390-6 Kovettuneen betonin testaus. Osa 6: Koekappaleiden halkaisuvetolujuus.

(Hietanen, Kaivola & Suikka 2009, 3).

Taulukko 1. Betonin valmistuksen näytteiden vähimmäismäärä vaatimuksenmukaisuuden arvioinnissa (By201 2021, 190).

Valmistus	Näytteiden vähimmäismäärä	
	Valmistuksen ensimmäiset 50 m <sup>3</sup>	Sen jälkeen <sup>a</sup> , kun on valmistettu ensimmäiset 50 m <sup>3</sup>
Alkuvaihe (kunnes on saatu vähintään 35 testaustulosta)	3 näytettä	1 näyte / 200 m <sup>3</sup> tai 1 näyte / 3 tuotantopäivää
Jatkuva <sup>b</sup> (kun käytettävissä on vähintään 35 testaustulosta)		1 näyte / 400 m <sup>3</sup> tai 1 näyte / 5 tuotantopäivää <sup>c</sup> tai 1 näyte / kalenterikuukausi

a) Näytteenotto on kohdistettava koko valmistukseen. Näytteiden määrän ei tarvitse kuitenkaan olla suurempi kuin 1 näyte 25 m<sup>3</sup>:ä kohden.

b) Jos arviointijakson viimeisen 15 tai useamman testaustuloksen keskihajonta ylittää taulukon 7.5.4 mukaisen  $s_n$ :n ylärajat, näytteiden lukumäärää on lisättävä vastaamaan tuotannon alkuvaiheen näytteiden lukumäärää, kunnes on saatu seuraavat 35 testaustulosta. Vaatimustenmukaisuus arvioidaan kuitenkin edelleen jatkuvan valmistuksen ehdoilla.

c) Tai jos 7 perättäisen kalenteripäivän aikana on yli 5 tuotantopäivää, kerran kalenteriviikossa.

Puristuskokeessa saavutettava lujuus riippuu olennaisesti koekappaleen mittasuhteista. Uuraisten tehtaalla ontelolaattojen valmistuksessa käytettävä betoni on lujuusluokkaa C50/60, joista 50 MPa kertoo betonille standardilieriöstä määritetyn ominaislieriölujuuden  $f_{ck}$  ja 60 MPa standardikuutiosta määritetyn ominaiskuutiolujuuden  $f_{ck,cube}$ . Lujuusluokka ilmoitetaan standardikokeiden mukaisesti valetun halkaisijaltaan 150 mm ja 300 mm pituisen lieriön ja 150 mm kuution puristuslujuutena, mutta ontelolaattojen puristuslujuus määritetään valmiista laatasta poratusta rakennekoekappaleesta, jonka lieriölujuus muunnetaan vastaamaan standardikokeen kuutiolujuutta SFS 7022 mukaisesti. (Nykyri 2020, 36–37.)

Ontelolaattojen puristuslujuustestejä varten valun aikana laattojen väliin jätetään kaistale, josta porataan halkaisijaltaan 54 mm poralieriöt koekappaleiksi. Puristuslujuuskokeet suoritetaan tuotteesta poratessa standardien SFS-EN 12504-1 ja SFS-EN 12390-3 mukaisesti ja ne arvioidaan standardin SFS-EN 13791 mukaisesti. Koekappaleet lähetetään ulkopuoliselle tarkastajalle testattavaksi, joka Uuraisilla on Eurofins Expert Services Oy. Koekappaleet sahataan näytteenottokeskuksessa niin, että koekappaleen korkeuden suhteeksi halkaisijaan muodostuu 1:1. Koekappaleet puristetaan 28 vrk:n iässä. (By201 2021, 204; Hietanen, Kaivola & Suikka 2009, 17).

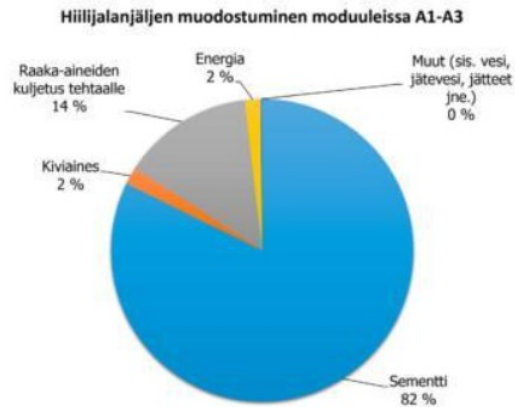
## 4 Betonin ja sementin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen

### 4.1 Betonin ja sementin hiilidioksidipäästöt

Vaikka rakennusten energiankulutuksesta ja päästöistä suurin osa muodostuu niiden käytön aikana, on materiaalien ja valmistamisen osuus 10–15 % rakennuksen päästöistä, mikä laajassa mitakaavassa on merkittävä päästöjen lähde (Ympäristöraportti 2022, 5). Maailman käytetyin rakennusmateriaali on betoni, jota tuotetaan vuodessa 13 miljardia kuutiometriä, minkä takia betoni on maailmassa suurin yksittäinen hiilidioksidipäästöjen lähde (by 201 2021, 13; Ympäristöraportti 2022, 14). Betonin saastuttavin osuus on sementin valmistus, ja sementtiteollisuus tuottaakin 1,9 % Suomen ja maailmanlaajuisesti 7 % kaikista hiilidioksidipäästöistä (Ympäristöraportti 2022, 14). Valmisbetonin tuotannossa jopa 82 % hiilidioksidipäästöistä syntyy sementistä ja betonielementtiteollisuudessa, kuten ontelolaattojen valmistuksessa, osuus on 79 % (Valmisbetonit n.d.; Ontelolaatat n.d.). Loput päästöistä syntyvät raaka-aineiden ja valmiiden tuotteiden kuljetuksesta, kiviaineksesta ja betonin valmistuksesta. (Ontelolaatat n.d.) Kuitenkaan sementin ja sitä kautta betonin ominaispäästöt eivät ole erityisen korkeat, mutta betonin merkittävät hiilidioksidipäästöt johtuvat betonin valtavista käyttömääristä (Punkki 2021, 76).

## NORMAALI RAKENNEBETONI C30/37

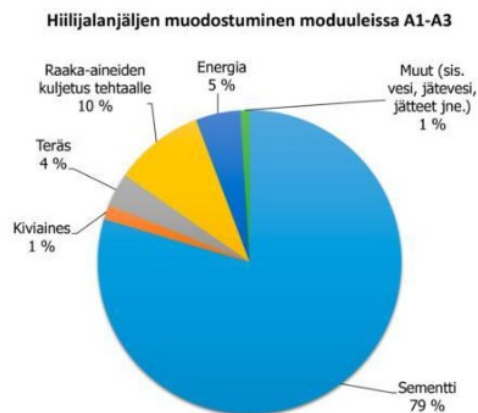
A1-A3 päästöt (GWP): 268 kg CO<sub>2</sub> eq./betoni-m<sup>3</sup>



Kuvio 6. Sementin päästöt aiheuttavat 82 % normaalin rakennebetonin hiilidioksidipäästöistä (Valmisbetonit n.d.).

## ONTELOLAATTAELEMENTTI 320 mm

A1-A3 päästöt 58 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup>



Kuvio 7. 79 % ontelolaattaelementin synnyttämistä hiilidioksidipäästöistä aiheutuu sementin päästöistä.

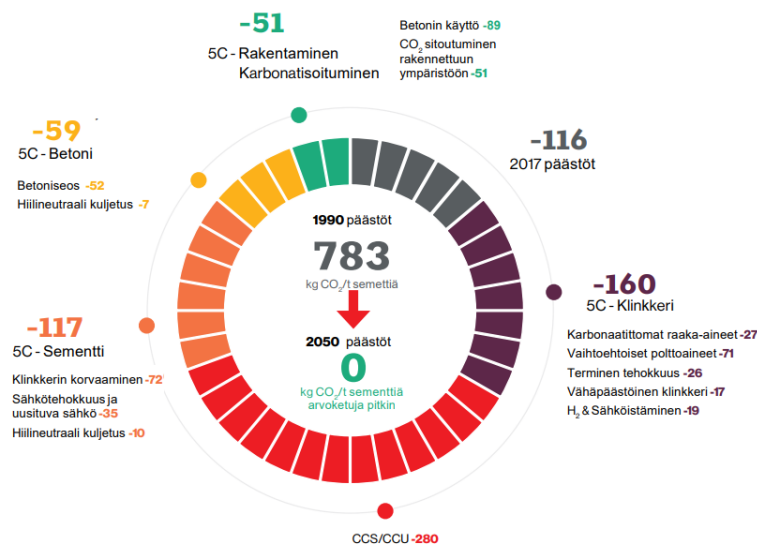
Betoni koostuu kiviaineksesta, vedestä, sideaineesta ja mahdollisista lisä- ja seosaineista (by 2012, 24). Sideaineena käytetään yleisimmin Portland-sementtiä, jonka pääraaka-aine on maaperästä louhittu kalkkikivi, joka on yksi maankuoren yleisimmistä kivilajeista. Kalkkikivestä saatavan

kalsiumkarbonaatin ( $\text{CaCO}_3$ ) lisäksi sementin valmistuksessa tarvitaan kalkkikivilouhoksen sivukivistä ja teollisuuden sivutuotteina saatavia pii- ( $\text{SiO}_2$ ), rauta- ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ja alumiinioksideja ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Sementin valmistusprosessissa raaka-aineet ensin jauhetaan ja homogenisoidaan, jonka jälkeen jauhe syötetään uunin esilämmitysjärjestelmään. Esilämmitysjärjestelmässä jauhe sekoittuu poltosta tuleviin savukaasuihin ja kuumenee nopeasti, mistä aiheutuu kalsinointireaktio, jossa kalkkikiven karbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi ( $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). (Ympäristöraportti 2022, 7–10.)

Kaksi kolmasosaa sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöistä aiheutuu tästä kalsinointireaktiosta, jolloin hiilidioksidia vapautuu runsaasti. Kalsinointireaktio on kuitenkin sementtiklinkkerin valmistuksessa välttämätön reaktio. Esilämmityksen jälkeen jauhe poltetaan kiertouunissa noin 1450 asteessa, jolloin jauhe osittain sulaa ja klinkkerimineraalit muodostuvat. Kalkkikiven polttaminen korkeassa lämpötilassa vaatii paljon energiaa, ja polttoainesten palamisesta syntyy noin kolmannes sementin hiilidioksidipäästöistä. Polton jälkeen syntyneeseen sementtiklinkkeriin lisätään eri sementtilaatujen reseptin mukaan seosaineita ja kipsiä ja jauhetaan hienoksi jauheeksi. (Ympäristöraportti 2022, 11.)

Yksi keino vähentää sementtiteollisuuden päästöjä on käyttää polttoaineena fossiilisten polttoaineiden sijaan kierrätyspolttoaineita. Suomen ainoan sementtituottajan Finnsementin Paraisten ja Lappeenrannan tehtailla pääpolttoaineena käytetään kivihiiltä ja öljynjalostuksen sivutuotteena syntyvää petrokoksia ja erilaisia kierrätyspolttoaineita. Kierrätyspolttoaineina hyödynnetään öljynjalostuksen sivutuotteena syntyvää asfalteenia, kierrätysöljyä, nestekartonkien valmistuksesta kertyvää PPAF-reunanauhaa, rengasmursketta sekä teollisuuden ja kaupan pakkausmateriaalijätteistä valmistettavaa SRF-kierrätyspolttoainetta. Kierrätyspolttoaineiden osuus Finnsementin valmistusprosessissa on yli 40 % ja määrää on tarkoitus tulevaisuudessa vielä lisätä. Kierrätyspolttoaineiden käyttö vähentää neitseellisten fossiilisten raaka-aineiden valmistusta ja tarvetta. Myös prosessissa syntyvä lämpö pyritään hyödyntämään, ja savukaasujen sisältämää lämpöä hyödynnetään tehtaalla raaka- ja hiilimyllyssä syötettävän materiaalin kuivatukseen. Finnsementin tehtaot myös tuottavat myös vuosittain 30 GWh kaukolämpöä Paraisten ja Lappeenrannan kaupungin verkkoon. (Ympäristöraportti 2022, 8–10.)

Kierrätyspolttoaineiden käyttö ja energiatehokkuuden parantuminen on vähentänyt merkittävästi polttoaineesta peräisin olevia hiilidioksidipäästöjä, mutta kalkkikiven kalsinointireaktiossa vapautuvat hiilidioksidipäästöt ovat pienentyneet vain vähän. Finnsementti tavoittelee kuitenkin vuoteen 2030 mennessä kokonaispäästöihin neljänneksen vähennystä vuoden 2020 tasoon verrattuna. (Ympäristöraportti 2022, 3, 11.) Myös Euroopan sementtiteollisuuden kattojärjestö CEMBUREAU (European Cement Association) on asettanut tavoitteeksi betonin ja sementin arvoketjun hiilineutraaliuden vuoteen 2050 mennessä (Cementing the European Green Deal n.d., 10–12). Suomen vuoden 2019 hallitusohjelman tavoitteena myös on, että Suomi on hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja ensimmäinen fossiilivapaa hyvinvointiyhteiskunta (Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035 n.d.). Nämä kunnianhimoiset tavoitteet pakottavat myös betoni- ja sementtiteollisuutta tekemään suuria teknologiaharppauksia.



Kuvio 8. Euroopan sementtiteollisuuden kattojärjestön CEMBUREAU:n 2050 -tiekartta, josta näkyy eri toimenpiteillä saavutettavat päästövähennykset lukuina (Ympäristöraportti 2022, 13).

## 4.2 Hiilidioksidin talteenotto

Ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi on kalsinointireaktiossa vapautuva hiilidioksidi pystyttävä varastoitamaan. Tällä hetkellä onkin käynnissä useita tutkimuksia, joilla tutkitaan hiilidioksidin varastointi- ja hyödyntämismahdollisuuksia. Hiilidioksidin talteenotto tehtaalla voidaan suorittaa joko

valmistusprosessin jälkeen (post combustion) tai osana valmistus prosessia (intergrated process). Olemassa oleviin tehtaisiin sopii paremmin post combustion -menetelmät, kun taas integroidut ratkaisut soveltuvat parhaiten uusiin tehtaisiin. Hiilidioksidin hyödyntämiseen talteenoton jälkeen on esitetty useita eri mahdollisuuksia, joita tutkitaan parhaillaan. Yksi vaihtoehto on pysyvä geologinen varastointi, jossa nestemäiseksi paineistettu hiilidioksidi pumpataan tyhjentyneisiin öljy- ja kaasuesiintymiin vähintään 800 metrin syvyyteen, jolloin vallitseva paine ja lämpötila saavat sen pysymään nestemäisenä. Alle 800 metrin syvyydessä hiilidioksidi muuttuu jälleen kaasuksi, joten esiintymä täytyy tiivistää. Menetelmä on arvioitu luotettavaksi, mutta nykytiedon valossa Suomesta ei löydy geologiseen varastointiin soveltuvia paikkoja. (Ympäristöraportti 2022, 16–18.)

Åbo Akademiilla, Nesteellä ja Finnsementillä on kuitenkin käynnissä PILCCU-hanke, jossa tutkitaan mahdollisuutta sitoa sementin valmistuksen savukaasujen hiilidioksidi erilaisiin mineraaleihin, mihin soveltuvaa kiviainesta Suomen maaperästä löytyy runsaasti. (Ympäristöraportti 2022, 16–18.) Tämän lisäksi Finnsementin ja Lappeenrannan teknisen yliopiston Power 2 Methanol -hankkeessa on todettu teknisesti mahdolliseksi ja kannattavaksi hiilineutraalin polttoaineen tuottaminen hyödyntämällä sementtitehtaalla talteen otettua hiilidioksidia ja Kemiran klooraattitehtaan ylijäämävevettä ja hanke on edennyt pilottivaiheeseen (Laaksonen, Karjunen, Ruokonen, Laari, Zhaurova, Kinnunen, Kosonen, Kärri, Sinkkonen, Rissanen, Tervonen & Varis 2021, 90–91). Finnsementti ja VTT ovat myös tutkineet Decarbonate-hankeessa mahdollisuutta korvata sementin valmistuksessa käytetyt polttoaineet päästöttömästi tuotetulla sähköllä ja testiuunilla suoritetut kokeet ovat olleet myönteisiä. Sähkön käyttö lämpöenergiana vähentää polttoaineista aiheutuvia päästöjä ja sähkökalsinoinnissa syntyy myös hyvin puhdasta hiilidioksidia, mikä helpottaa sen talteenottoa ja uudelleenkäyttöä. (Ympäristöraportti 2022, 16–18.)

### 4.3 Seosaineiden käyttö

Sekä sementin että betonin valmistuksessa hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää korvaamalla sementin klinkkeriä vähäpäästöisimmillä seosaineilla, joilla on kyky muodostaa sementtikiveen lujuutta, kun ne sekoitetaan emäksiseen Portland-sementtiin (Kosomaa, Mattila, & Tepponen 2015, 38). Suomessa käytössä olevia seosaineita ovat lentotuhka, silika, masuuni- ja ferrokromikuona. Näistä masuunikuona, silika ja ferrokromikuona syntyvät metalliteollisuuden ja lentotuhka kivihiilen polton sivutuotteena, joten ne lasketaan hiilidioksidineutraaleiksi. (Johansson & Mannonen

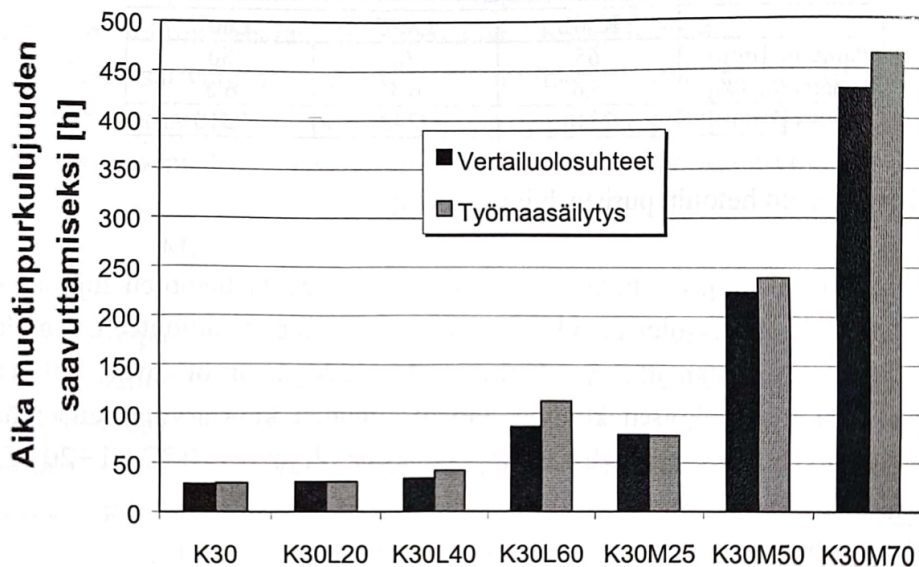
2016, s. 129.) Eri seosaineilla on myös mahdollista saavuttaa betonille tiettyjä ominaisuuksia, kuten alhaisempi hydrataatiolämpö kovettumisvaiheessa, sulfaatin kestävyys, parempi tiiveys kloridien tunkeutumista vastaan, vedenpitävyys ja työstettävyys. (Kosomaa, Mattila, & Tepponen 2015, 38). Seosaineet voidaan sekoittaa sementin joukkoon joko ennen klinkkerin valmistusta, sementin jauhausvaiheessa tai betoniasemalla.

Nykyisten olemassa olevien seosaineiden lisäksi tehdään jatkuvasti selvitystyötä uusien seosaineiden löytämiseksi. Tutkimusta tarvitaan, koska käytössä olevien seosaineiden saatavuus tulevaisuudessa ei ole taattua. Sementtiteollisuus on tietoinen, että lentotuhkan saatavuus rajoittuu hiilivoimaloiden vähentyessä. Myöskään masuunikuonaa ei synny terästeollisuuden sivutuotteena tarpeeksi sementin käyttömääriin verrattuna etenkin seosementtien yleistyessä. Euroopan sementtiteollisuuden kattojärjestö CEMBUREAU tutkiikin, voiko myös muiden teollisuudenalojen sivuvirtoja ja jätemateriaaleja hyödyntää klinkkerin valmistuksessa osittain kalkkikiven korvaajina. Jättemateriaaleina voitaisiin käyttää esimerkiksi purkujätettä, joka sisältää kierrätettyä sementtipastaa. (Cementing the European Green Deal n.d., 15, 23.) Myös betonielementtivalmistajat tekevät jatkuvaa tutkimusta uusien sideaineiden käyttömahdollisuuksista, esimerkiksi Consolis Parma on tutkinut saven sekä riisin ja viljan kuorituhkan käyttöä sideaineena (Green Spine Line® 2023). Kalkkikiveä on kuitenkin mahdollista korvata vain osittain seosaineilla, koska kalsinointireaktio on välttämätön reaktio klinkkerin valmistuksessa (Ympäristöraportti 2022, 11). Myös betonin ominaisuuksia, valmistusta ja vaatimuksenmukaisuutta säätelevä standardi SFS-EN 206 sekä sen kansallinen liite SFS 7022 rajoittavat seosaineiden käyttöä Suomessa, ja rajoitukset riippuvat rakenteen kantavuudesta ja rasitusluokasta (SFS-EN 206:2014 + A2:2021 2021; SFS 7022:2019 2019). Lisäksi sementin sallittuja raaka-aineita säätelee sementtistandardi SFS-EN 197-1 (SFS-EN 197-1 2012, 15).

Tällä hetkellä useimmissa vähähiilisissä betoneissa on sementtiä korvattu masuunikuonalla, joka tutkimuksen mukaan vähentää betonin hiilidioksidipäästöjä enemmän kuin lentotuhkan käyttö (Tulimaa, Wirtanen, Holt, Kukko & Penttala 2005, s. 109). Masuunikuonalla saavutetaan betonille myös monia haluttuja ominaisuuksia, kuten korkea loppulujuus, parempi pakkassuolakestävyys ja suurempi tiiveys, joka parantaa betonirakenteiden korroosionkestävyyttä, kun betonin läpäisevyys pienentyy. Masuunikuona myös alentaa lämmönkehitystä, ja vähentää täten liian korkeasta lämmöstä johtuvaa lujuuskatoa, minkä takia se sopii hyvin massiivisten rakenteiden valmistukseen,

missä hydrataatiolämpö saattaa nousta liian korkeaksi. (Masuunikuonajauhe KJ400 2019.) Masuunikuonan on tutkittu parantavat myös betonin työstettävyyttä ja pienentävän kuivumiskutistumaa ja ehkäisevän halkeilua (Hawileh, Abdalla, Fardmanesh, Shahsana & Khalili 2017, 512, 518).

Masuunikuona kuitenkin hidastaa betonin alkulujuudenkehitystä sekä pidentää betonin jälkihoitoaikaa (Masuunikuonajauhe KJ400 2019.). Myös Tulimaan ja muiden (2005, 45–46) tutkimuksesta käy ilmi, että mitä suurempi osuus sideaineista on masuunikuonaa, sitä pidempi aika tarvitaan betonin muotinpurkulujuuden saavuttamiseksi, mitä havainnollistaa kuvio 9. Tämä rajoittaa masuunikuonan käytön määrää esimerkiksi betonielementtiteollisuudessa, jossa muottien ja elementtien purku aika halutaan mahdollisimman lyhyeksi tuotannon maksimoimiseksi.



Kuvio 9. Betonin purkulujuuden saavuttamiseksi tarvittava aika. L tarkoittaa lentotuhkaa ja M masuunikuonaa. L- ja M- kirjaimien jälkeen numeroarvo kuvaa seosaineen osuutta sideaineen yhteismäärästä painoprosentteina. (Tulimaa, Wirtanen, Holt, Kukko & Penttala 2005, 46).

Hawileh, Abdalla, Fardmanesh, Shahsana ja Khalili (2017, 518) selvittivät, että teräsbetonipalkit, joiden sideaineena on käytetty jopa 70 % masuunikuonaa, käyttäytyvät tavanomaisella betoni-seoksella valettujen palkkien tavoin ja niiden puristuslujuus ja taivutusvetolujuus vastaavat seostamatonta teräsbetonipalkkia. Toisaalta taas Tulimaa ja muiden mukaan (2005, s. 53) masuunikuonan sideainesosuuden ollessa 70 %, betonin pakkasenkestävyys vähenee verrattuna pienem-

piin masuunikuonan osuuksiin. Masuunikuona vähentää kuitenkin merkittävästi betonin hiilidioksidipäästöjä, joten sitä voidaan käyttää sideaineena esimerkiksi sisätilojen betonirakenteissa, joihin ei kohdistu pakkasenkestävyysvaatimuksia (Tulimaa ym. 2005, 53–55, 74–75).

#### 4.4 Karbonatisoituminen ja betonin kierrätys

Sementin valmistuksessa sementtiuunissa kalsinointireaktiossa kalkkipitoisen kiviaineksen sisältämät mineraalit sulavat ja reagoivat keskenään, jolloin kalkkikiveen sitoutunut hiilidioksidi vapautuu ilmaan ( $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Sementtikiven kovettuessa muodostuu kalsiumhydroksidia, eli sammutettua kalkkia  $\text{Ca(OH)}_2$ , joka tekee sementtikiven sisältämistä mineraaleista hyvin emäksisiä ja sementtikiven pH onkin noin 13 – 14. Ilman sisältämä hiilidioksidi on taas hapan kaasu, joka pyrkii neutraloimaan emäksisiä yhdisteitä eli myös sementtikiveä. Tästä syntyy neutraloitumisilmiö, jossa kalkkikiven polton yhteydessä vapautunut hiilidioksidi pyrkii sitoutumaan takaisin sementtikiveen ja muuttamaan kalsiumhydroksidin takaisin kalsiumkarbonaatiksi, eli kalkkikiveksi ( $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ). Reaktiota kutsutaan karbonatisoitumiseksi. (Hiilidioksidin sitoutuminen betoniin n.d.)

Karbonatisoitumisen nopeuteen vaikuttaa monet tekijät, mutta ennen kaikkea betonin tiiviys ja kalsiumhydroksidipitoisuus. Tiiveys vaikuttaa betonin diffuusiovastukseen, eli vesihöyryn virtauksen vastustukseen, ja sitä kautta siihen, kuinka helposti ilman hiilidioksidi ja rikkiyhdisteet pääsevät tunkeutumaan betoniin. Betonin vesi-sementtisuhte ja hydratoitumisaste, eli veden ja sementin sitoutumisaste, vaikuttavat eniten betonin tiiveyteen ja huokosrakenteeseen. Mitä pienempi vesi-sementtisuhte, sitä lujempaa ja tiiviimpää betoni on. (Betonisanasto n.d.) Karbonatisoituminen etenee vähitellen betonin pinnasta alkaen, jolloin karbonatisoituneen vyöhykkeen pH-laskee noin arvoon 8,5. Karbonatisoituminen voi myös tiiviissä betonirakenteessa lähes pysähtyä tai hidastua, kun sen edetessä hiilidioksidin tunkeutuminen karbonatisoitumisvyöhykkeelle vaikeutuu. Halkeamat betonissa voivat nopeuttaa karbonatisoitumista, kun hiilidioksidi pääsee tunkeutumaan rakenteeseen paremmin. Myös betonin kosteuspitoisuus vaikuttaa karbonatisoitumiseen. Mikäli betonin huokosverkosto on kyllästetty vedellä, hiilidioksidin tunkeutuminen rakenteeseen pienee. Toisaalta taas karbonatisoitumisreaktio tapahtuu vain vesiliuoksessa, joten hyvin kuivissa olosuhteissa, kun RH on alle 30%, karbonatisoituminen pysähtyy. (Lahdensivu, Weiijo, Ruuska-Jauhijärvi & Pyy 2019, 18–19.)

Betonin emäksisyys ja alkalisuus ehkäisee betonirakenteiden raudoitteiden ruostumista, kun terästen pinnalle muodostuu ohut suojaava oksidikalvo (Lahdensivu ym. 2019, 17). Karbonatisoitumista on pidetty aiemmin lähes kokonaan haitallisena ilmiönä, koska karbonatisoituminen aiheuttaa betonin neutralisoitumista, jolloin terästen ruostuminen käynnistyy, jos kosteutta on riittävästi (Hiilidioksidin sitoutuminen betoniin n.d.). Korroosiotuotteet vievät huomattavasti alkuperästä teräksen tilavuutta enemmän tilaa, mikä saattaa aiheuttaa betonin halkeilua ja murtumista, ja ruostuminen pienentää teräksen poikkileikkausala, jolloin terästen lujuusominaisuudet myös heikkenevät ja rakenteen kantavuus pienenee (Lahdensivu ym. 2019, 17–18). Raudoitteiden ruostumista pyritään ehkäisemään normien mukaisella suojabetonikerroksella, jotta teräkset sijaitsevat riittävän syvällä betonissa ja rakenteen pintakerros voi karbonatisoitua eli sitoa hiilidioksidia ilman että rakenteen käyttöikä lyhenee terästen ruostumisen takia (Hiilidioksidin sitoutuminen betoniin n.d.).

Betonin hiilidioksidipäästöjen kannalta karbonatisoituminen on positiivinen reaktio. Ilmiö alentaa merkittävästi ilmakehän hiilidioksidia, koska koko olemassa oleva betonirakennekanta sitoo jatkuvasti hiilidioksidia siltä osin, kun se on ilman kanssa kosketuksessa. Näin ollen kaikkia olemassa olevia betonirakenteita voidaan pitää hiilinieluna. (Betoniko hiilinielu? 2019.) Suojabetonipeitteen lisäksi voidaan käyttää etenkin kosteusrasitukselle alttiissa rakenteissa, kuten betonijulkisivuissa, ruostumatonta raudoitusta, jolloin karbonatisoitumista voidaan vaaratta ja rakenteen käyttöikää lyhentämättä käyttää hiilen sidontaan, eikä syvällekkään edennyt karbonatisoituminen aiheuta ruostumisongelmaa. Myös sisätiloissa betonin karbonatisoituminen ei aiheuta ongelmia, koska kosteutta ei ole riittävästi terästen ruostumisen käynnistämiseen. (Hiilidioksidin sitoutuminen betoniin n.d.)

Kun betoni murskataan, ilmalle alttiiden pintojen pinta-ala kasvaa ja karbonatisoituminen kiihtyy. Tätä murskattavaa kierrätysbetonia syntyy sekä purettavista käyttöikänsä päähän tulleista rakenteista sekä tehtaiden ja työmaiden ylijäämästä Suomessa vuosittain noin miljoona tonnia. (Hiilidioksidin sitoutuminen betoniin n.d.) Suuren määränsä takia myös murskattu kierrätysbetoni sitoo itseensä merkittäviä määriä ilman hiilidioksidia ja toimii myös hiilinieluna. Murskauksessa suuri osa sementtipastasta pulveroituu murskauksessa, jolloin karbonatisoituva hiilidioksidille altis pinta-ala on suurempi kuin sorapartikkeleiden pinta-ala ja yhä suurempi määrä hiilidioksidia sitoutuu murs-

kaan. (CO<sub>2</sub>NCRETE SOLUTION 2020, 3.) Kierrätysbetonin käsittelyllä on siis suuri vaikutus sen kykyyn sitoa hiilidioksidia. Murskattua ja karbonatisoitunutta kierrätysbetonia voidaan alkuperästä riippuen käyttää muun muassa betonin uusiokiviaineena, talonrakennukseen, maanrakennusaineena, viherrakentamiseen, lannoitteena, kalkitusaineena, maanparannusaineena tai kasvualueena (Ketonen 2023, 23).

Betonin hiilidioksidipäästöjä laskettaessa ja valtioiden laatimissa hiili-inventaarioissa betonin sitoma hiilidioksidia ei vielä oteta huomioon (Ympäristöraportti 2022, 6). Euroopan sementtiteollisuuden kattojärjestön CEMBUREAU:n ja Suomen valtion kunnianhimoisten hiilineutraaliustavoitteiden takia sitoutuvan hiilidioksidin määrän huomioimisen merkitys kasvaa (Cementing the European Green Deal n.d., 10; Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035 n.d.). Kekkosen (2020) mukaan karbonatisoitumista ja hiilidioksidin sitoutumista betoniin käsittelevien kansainvälisten tutkimusten tuloksissa on kuitenkin suurta vaihtelua. Sitoutuvan hiilidioksidin määrän määrittämistä hankaloittavat betonin ominaisuuksien ja ympäristön olosuhteiden suuri vaikutus karbonatisoitumisreaktioon. Tutkijat ovat myös eri mieltä siitä, kuinka suuri prosentti rakenteen CaO:sta on mahdollista karbonatisoitua, eli rakenteen karbonatisoitumisasteesta ja luvut vaihtelevat tutkimuksista riippuen jopa 20–100 %:n välillä. Suurin osa tutkimustuloksista on kuitenkin yhtenäisiä, että eri faaseihin sitoutuneesta CaO:sta sementissä 70–75 % karbonatisoituu. (CO<sub>2</sub>NCRETE SOLUTION 2020, 3.)

Tutkimusten vertailua hankaloittaa myös erilaisten laskentamenetelmien käyttö. Osassa tutkimuksissa päästöjä verrataan vuosittain tuotettuun betoniin, kun taas osassa käsitellään betonirakenteen koko elinkaarta. Kuitenkin myös betonin elinkaaren huomioivissa tutkimuksissa esimerkiksi betonirakenteelle määritetyt käyttöiät ja kierrätyksen huomioiminen vaihtelevat. Kun halutaan selvittää betonin pitkäaikaisvaikutuksia ympäristöön ja hiilidioksidipäästöihin ja ymmärtää myös materiaalin käsittelyn vaikutus käytöstä poiston jälkeen, on rakenteen koko elinkaaren huomioiminen järkevää. (CO<sub>2</sub>NCRETE SOLUTION 2020, 3–5.)

Tulokset siitä, kuinka paljon kalsinointireaktiossa vapautuvasta hiilidioksidista voi sitoutua, vaihtelevat jopa 8–90 %:n välillä. Korkeimpiin arvoihin on päästy Possan & al.:n tutkimuksessa, jonka mukaan 40–90 % kalkin poltosta syntyneistä päästöistä absorboituisi rakenteeseen 100 vuoden elinkaarella käytetystä betonityypistä riippuen. Vaikka tuloksissa on suurta vaihtelua, voidaan

yhteenvetona sanoa, että karbonatisoitumisilmiö tekee koko betonirakennuskannasta suuren hiilinielun. Hiilidioksidipäästöjen minimoimiseksi on myös tärkeää suunnitella rakenteet mahdollisimman pitkäikäisiksi ja huolehtia oikeanlaisesta kierrätyksestä myös käytöstä poiston jälkeen.

(CO<sub>2</sub>NCRETE SOLUTION 2020, 3–5.) Kun sitoutuneen hiilidioksidin määrän laskentatavasta päästään yksimielisyyteen, on betonirakenteiden kokonaispäästöjä laskettaessa järkevää ottaa huomioon myös karbonatisoitumisen vaikutus, mikä helpottaa myös hiilineutraaliustavoitteisiin pääsyä.

Myös Suomessa on tutkittu Suomen betonikantaan sitoutunutta hiilidioksidin määrää ja uusia hiilidioksidia sitovia kierrätystapoja CANEMURE- hankkeen CO<sub>2</sub>ncrete Solution -projektissa. Tutkimuksessa on ensin määritetty ja mallitettu koko Suomen betonikanta, joka analyysin mukaan oli vuonna 2018 n. 340 miljoonaa kuutiota (m<sup>3</sup>) betonia, josta 241 miljoonaa m<sup>3</sup> on talokannassa ja 98 miljoonaa m<sup>3</sup> infrassa. Tutkimuksen mukaan koko betonikantaan oli 2018 mennessä sitoutunut 5,2 miljoonaa tonnia hiilidioksidia, joista 4,8 miljoonaa tonnia talokantaan, mikä vastaa 14% talokantaan käytetyn betonin kalsinoinnin hiilidioksidipäästöistä. Hiilivarasto on kasvanut melko tasaisesti ja vuotuinen betonikannan hiilinielu on noin 0,1 miljoonaa tonnia, joka on noin 10 % Suomen sementtiteollisuuden kokonaispäästöistä. Tutkimuksessa on huomioitu myös betonin poistuma, mutta ei purkubetonin vaikutusta hiilinieluun. Projektin jatko keskittyykin tutkimaan, miten betonia voidaan hyödyntää hiilinielua ja pysyvänä hiilivarastona eri kierrätystavoilla ja säästää samalla neitseellisen kiviaineksen louhintaa. (Ketonen 2021).

## **5 Toteutus**

### **5.1 Kehittämistyön menetelmä ja toteutus**

Tässä opinnäytetyössä pyritään vastaamaan tutkimuskysymyksiin kehittämistutkimuksen avulla. Kehittämistutkimusta ei pidetä omana tutkimusmenetelmänä, vaan enemmän monimenetelmällisenä tutkimusotteena tai tutkimusstrategiana, jossa yhdistyvät kvalitatiivinen eli laadullinen ja kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus ja niiden tutkimusmenetelmät (Kananen 2015, 76). Kehitystutkimuksessa on kaksi prosessia, kehitystyö ja tutkimustyö ja sillä pyritään poistamaan jokin ongelma tai kehittämään jotain asiaa paremmaksi. Kehittämistyön kohteena on usein prosessi ja tutkimustyö taas on ennen ja jälkeen kehittämistyön. (Kananen 2012, 19,45.)

Opinnäytetyön kehittämistyö kohdistuu ontelolaattabetonin kehitykseen. Kehittämistyössä nojataan julkiseen tutkimustietoon sekä Consolis Parman oman kehitystyön tuloksiin. Uutta betonireseptiä kehitettiin Consolixen Ruskon materiaalikehityskeskukseen betonilaboratorion työntekijöiden kanssa. Uuraisten tehtaalla käytetään maakostea lujuusluokan C50/60 betonia, jonka suhteitukseen ei pysty hyödyntämään Nykäsen suhteitusmenetelmää. Parmalla ontelolaattabetonin suhteitus perustuu käytetyn kiviainespakkaantuvuuteen ja kiviainesten väliin jäävän tyhjätilan määrittämiseen. Tyhjätila määritetään IC-testerillä käyttämällä tuotannossa käytössä olevia kiviaineksia kyseiseltä tehtaalta. Myös valmis betoniresepti voidaan testata IC-testerillä (Rautiainen 2013, 17–18). Laboratoriossa oli jo aiemmin testattu Uuraisten tehtaalla käytettävien kiviainesten kiviainespakkaantuvuus sekä kiviainesten väliin jäävä tyhjätila erilaisilla kiviainesjakaumilla (liite 4) ja testin tuloksia käytettiin reseptin muodostukseen. Eri kiviainesjakaumien kiviainespakkaantuvuustestin tuloksista on muodostettu karkeimman kiviaineksen prosentuaalisen osuuden mukaan käyrästä, josta selviää pienin mahdollinen tyhjätila kyseisillä kiviaineksilla.

Consolis on tehnyt kehitystyötä määritelläkseen eri ontelolaattatyypeille ja eri valukoneille optimaaliset toiminta-alueet, eli kuinka paljon tyhjätilaa enemmän sementtipastaa täytyy reseptissä olla ja millä kiviainespakkaantuvuudella valukoneen on mahdollista toimia suunnitellusti. Optimaalisella toiminta-alueella valukoneen tiivistyskapasiteetti riittää, ja kone pystyy muodostamaan laatuksiteerit täyttävää ontelolaattaa. Uuraisten tehtaalla käytössä olevaa P32-reseptiä tutkiessamme huomasimme sen sisältävän paljon hienompaa kiviainesta karkeaan kiviainekseen verrattuna. Olemassa olevan kiviainespakkaantuvuuskäyrän perusteella tyhjätilaa ja samalla käytettävää sementtipastaa vähentääkseen, olisi kiviainesjakaumaa muutettava karkeammaksi.

Olemassa olevan reseptin kiviainesjakauma vaatii enemmän sementtipastaa, koska kiviainesten väliin jäävä tyhjätila jää isommaksi, ja koska hieno kiviaines sitoo betonissa karkeaa enemmän vettä. Jotta vesi-sementtisuhde pysyy samana, on vettä lisättäessä myös sementtiä lisättävä, minkä ajateltiin olevan mahdollinen syy siihen, että toteutunut sementin kulutus ei vastaa järjestelmässä olevaa betonireseptiä. Toisaalta laskennallisesti olemassa olevalle reseptille pitäisi riittää reseptiä pienempikin sementtipastan määrä. Veden ja sementin määrä päätettiin kuitenkin pitää reseptissä samana, koska se täytti toimeksiannossa annetun tavoitearvon ja vain vaihtaa kiviainesta karkeammaksi. Valmista reseptiä ei testattu IC-testerillä, koska muutos entiseen reseptiin oli verrattain pieni.

Opinnäytetyön kehitystutkimuksen tutkimistyövaiheessa valmis ontelolaattaresepti testattiin tehtaalla ja tutkittiin, vaikuttaako reseptin optimointi ontelolaatan valmistusprosessiin, kuten betonimassan koostumukseen, valukoneen toimintaan ja valutyön suoritukseen sekä valmiin ontelolaatan laatuun. Testivalussa ensin valettiin laattaa järjestelmässä olevalla P32-ontelolaatan reseptillä ja valuun jätettiin myös kaistale, josta koekappaleet porataan. Noin puolet valusta tehtiin uudella reseptillä, johon myös jätettiin kaistale koekappaleiden porausta varten. Testivalu suoritettiin suoraan tuotannossa oleville laatoille, koska muutos reseptiin oli kohtuullisen pieni, eikä betonimassan vesi-sementtisuhde muuttunut.

Testivalun aikana laatalle suoritettiin sisäisen laadunvalvontaohjeen (FPC) mukaiset valunaikaiset laadunvalvontatoimenpiteet (Uuraisten ontelolaattatehtaan sisäisen laadunvalvontaohjeen (FPC) 2023). Massan koostumusta ja koneen muodostaman laatan laatua havainnoitiin silmämääräisesti ja havaintojen tueksi otettiin valokuvia. Laatan korkeutta tarkkailtiin mittaamalla ja tulokset kirjattiin laadunvalvontapöytäkirjaan (liite 3). Valmiille laatoille tehtiin katkaisun ja kuormiin noston yhteydessä silmämääräiset tarkastukset. Lisäksi valualustalta mitattiin 5 laatan poikkileikkaukset normaalin yhden sijaan, 2 vanhalla reseptillä tehtyä ja 3 uudella reseptillä tehtyä laattaa.

Testatusta uudesta reseptistä testattiin myös vesi-sementtisuhde, vaikka annosraporteista löytyy myös laskennallinen vesi-sementtisuhde, joka perustuu kiviainesten kosteuden mittauksiin. Todellisissa kiviainesten kosteuspitoisuudessa saattaa olla kuitenkin vaihtelua annoksesta riippuen. Mittaus suoritettiin ottamalla betonikuljetussukkulasta betonia, jonka vesi-sementtisuhde määritettiin lämmittämällä betoninäytettä mikroaaltouunissa niin, että vesi haihtuu näytteestä ja punnitsemalla haihtunut vesi. Vesi-sementtisuhteen määrittämiselle mikroaaltouunikuivatuksella ei ole olemassa virallista standardia, mutta menetelmää käytetään kuitenkin varsin yleisesti (Ojala, Punkki & Tauqir 2019). Haihtuneen veden perusteella saadaan selville, mikä näytteen kokonaisvesipitoisuus on ja näin määritettyä veden ja sementin suhde. On oletettavaa, että osa vedestä ehtii reagoida sementin kanssa sekoittamisen ja kuivaamisen aikana, mutta tämä osuus on varsin pieni, noin 2–4 % (Ojala & Punkki 2018, 81). Näytettä kuumennettiin 5 minuuttia kerrallaan, jonka jälkeen näyte punnittiin ja tulos kirjattiin ylös. Näytettä kuivatettiin yhteensä 25 minuuttia.

Testivalun jälkeen kaikki valun annosraportit kerättiin tarkempaa analysointia varten. Tehtaan laboratoriotyöntekijä porasi kolme näytekappaletta valualustaan jätetyistä koekaistoista, yhden vanhalla reseptillä tehdystä osasta ja kaksi uudella reseptillä tehdystä. Koekappaleet lähetettiin ulkopuoliselle tarkastaja Eurofins Expert Services Oy:lle, joka suoritti niille puristuslujuusmittaukset. Annosraporttien ja laadunvalvontatulosten analysoinnin jälkeen tuloksia verrattiin toimeksiantajan kanssa yrityksen tilastotietoihin.

## 5.2 Kehittämistyön aineisto ja sen keruu ja analyysi

Opinnäytetyön aineiston keräämisessä hyödynnettiin sekä kvalitatiivisen että kvantitatiivisen tutkimuksen aineistonkeruumenetelmiä. Kvalitatiivista aineistoa tutkimuksessa kerättiin erilaisten olemassa olevien dokumenttien, esimerkiksi kirjallisuuden ja raporttien sekä havainnoinnin avulla. Kvalitatiivisen tutkimuksen keinoilla pyrittiin hankkimaan ymmärrystä tutkimuskysymysten takana olevista ilmiöistä keräämällä mahdollisimman monilähteinen ja kattava aineisto. (Kananen 2012, 88–92; Kananen 2015, 128–129.) Tietoa on haettu julkisista lähteistä, keskustelemalla Consolis Parman työntekijöiden kanssa sekä tekemällä havainnoita tehtaalla. Tutkittavan ilmiön ymmärtämistä edesauttoi myös työskentelyni ontelolaattahallin työnjohtoharjoittelijana 5 kuukauden ajan kesällä 2022.

Aineistoa on kerätty julkisista lähteistä, kuten esimerkiksi julkisista sekä suomalaisista että ulkomaalaisista tutkimuksista. Lisäksi on tutustuttu betonitekniikan ja betoniteollisuuden omaan kirjallisuuteen. Ymmärrystä ontelolaattojen onnistuneen valmistuksen takana olevista ilmiöistä on lisätty myös Consolis Parman työntekijöiden kanssa käytyjen keskustelujen kautta. Ruskon materiaalikehityskeskuksessa sain perehdytyksen sekä sementin valmistuksesta että ontelolaatta-betonin suhteituksesta. Keskusteluja työntekijöiden kanssa ei litteroitu. Tutkimusongelman kannalta ymmärrystä lisäävät osat aineistosta on tiivistetty opinnäytetyön tietoperustaan lukuihin 3 ja 4. Suoraa havainnointia käytettiin testivalun aikana arvioimaan valun onnistumista, testimassan vaikutusta valutyön suoritukseen sekä valmiin tuotteen laatua. Havainnoinnin tulokset kirjattiin ylös ja niiden tueksi otettiin valokuvia.

Kvantitatiivisen, eli määrällisen tutkimuksen menetelmiä hyödynnettiin tekemällä erilaisia mittauksia ja hyödyntämällä olemassa olevia tilastoja. Testivalun aikana laatalle suoritettiin valun aikaiset laadunvalvontatoimenpiteet, esimerkiksi laatan korkeuden mittaukset, jotka kirjattiin laadunvalvontapöytäkirjaan (liite 3). Valutyöntekijä suoritti mittaukset, jonka arvot kirjasiin pöytäkirjaan. Myös valmiille tuotteille suoritettiin poikkileikkausten mittauksia sekä koekappaleille puristuslujuuden testaukset. Poikkileikkausten mittaukset suoritti tehtaan laadunvalvoja ja puristuslujuuskokeet ulkopuoliselle tarkastajalle Eurofins Expert Services Oy. Samat mittaukset tehtiin sekä vanhalla että uudella reseptillä toteutetuille laatoille. Määrällisten menetelmien avulla saatiin tuloksiksi lukuja, jotka taulukoitiin ja analysoitiin tulosten mahdollisia korrelaatioita. Mittausten tuloksia myös verrattiin mittauksille asetettuihin toleransseihin. Analyysissä otettiin huomioon, että korrelaatio ei takaa kausaliteettia. Syy-seuraussuhteiden määrittelyssä auttoi aiemmin kvalitatiivisten menetelmin hankittu ymmärrys tutkittavasta aiheesta (Kananen 2015, 145–146.)

Osa aineistosta saatiin myös toimeksiantajayritykseltä valmiina, esimerkiksi Uuraisten tehtaalla käytettyjen kiviainesten kiviainespakkaantuvuustestin tulokset (liite 4). Osan aineiston salaisuus hankaloitti aineiston keräämistä ja saatavuutta. Esimerkiksi suurin osa perehdytyksen aineistosta käsittelee Consolixin kehitystyön tuloksia, minkä takia en saanut perehdytyksen aineistoa käyttööni. Myös voimassa olevan työsopimuksen puuttuminen asetti haasteita aineiston keruuseen, esimerkiksi yrityksen tilastojen saatavuuteen.

### 5.3 Eettisyys

Opinnäytetyössä noudatetaan hyvää tieteellistä käytäntöä ja sen osana tutkimusetiikkaa. Opinnäytetyö toteutetaan eettisesti, eli siinä noudatetaan rehellisyyttä ja yleistä huolellisuutta tutkimustyössä, aineistojen ja tulosten tallentamisessa ja esittämisessä ja otetaan huomioon tekijänoikeudet. Tekijänoikeuksien huomioimiseen kuuluu lähdeviitteiden oikeanlainen merkitseminen. (Kallinen & Kinnunen n.d.) Opinnäytetyössä noudatetaan raportointiohjeiden ohjeistusta lähdeviitteiden merkitsemisestä ja noudatetaan Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettisiä periaatteita. Tutkimuksessa ei käsitellä henkilötietoja.

Tutkimuksessa vältetään aiheuttamasta toimeksiantajayritykselle ja sen työntekijöille aiheutuvia merkittäviä riskejä, vahinkoja ja haittoja (Kallinen & Kinnunen n.d.). Opinnäytetyön julkiset tulokset ja aineistot on esitetty niin, ettei salassa pidettäviä tietoja tule esille. Esimerkiksi aineistoissa ja

tuloksissa käytetään prosentteja tarkkojen lukujen sijaan. Toimeksiantajaryitykselle opinnäytetyöstä aiheutuvia riskejä vähennetään opinnäytetyöhön sisällytetyllä salattavalla liitteellä. Salassapidon perusteena on yksityisen, valtion, kunnan tai muun julkisyhteisön, yhteisön, laitoksen tai säätiön liike- tai ammattisalaisuudet (Julkl 24§, 17 ja 20) sekä teknologista taikka muuta kehittämistyötä ja niiden arviointia koskevat tiedot (Julkl 24§, 21). Toimeksiantaja saa opinnäytetyön tarkistettavaksi ja hyväksyttäväksi ennen opinnäytetyön julkaisua, jolloin he voivat ottaa kantaa, onko salassa pidettävien ja julkisten tietojen raja vedetty oikein. Opinnäytetyön liiteaineiston salassapitoaika on 5 vuotta opinnäytetyön hyväksymispäivästä lukien. (L621/1999, 24§.)

## **6 Tulokset**

### **6.1 Valun aikaisten ja valmiille laatoille tehtyjen laadunvarmistustoimenpiteiden tulokset**

Valun aikaisten silmämääräisten havaintojen perusteella valukone muodosti ehjää ja siistiä laattaa uudella betonireseptillä tehdyllä betonilla. Pinnassa ei ollut havaittavissa merkittävää aaltoilua. Laatu ei merkittävästi poikennut vanhalla reseptillä valmistetusta laatasta ja valukoneen ajoarvoja ei tarvinnut muuttaa reseptin vaihtuessa. Laatan pinnan huomattiin jäävän melko kiiltäväksi pitkähköksi aikaa valun jälkeen, mikä on todennäköisesti merkki liiallisesta kosteudesta. Vanhalla reseptillä pinta ei ollut yhtä kostean näköinen.



Kuvio 10. Valukone muodosti laatukriteerit täyttävää laattaa uudella reseptillä.

Laatan korkeusmittauksissa uudella betonilla valettu laatta oli pääsääntöisesti vanhalla reseptillä valettua laattaa korkeampi (taulukko 2). Sama voidaan todeta sekä valun aikana tehdyistä laadunvalvontapöytäkirjaan tehdyistä korkeusmittauksista (liite 3.), että valmiista laatoista tehdyistä poikkileikkausmittauksista (liite 5.) Yksi vanhalla betonilla valetun laatan toisen reunan korkeus ei ole asetettujen toleranssien sisällä, vaan laatta oli reunasta liian matalaa. Muut valunaikaiset sekä valmiille laatoille tehdyt mittaukset olivat toleranssissaan. Liian jäykkä ja kuiva massa saattaa nostattaa valukonetta valupedin kiskoilla, mutta testivalussa kosteamman oloinen uudella reseptillä valmistettu massa teki korkeampaa laattaa, kuin ulkoisesti kuivemman näköinen massa.

Taulukko 2. Valmiiden laattojen poikkileikkausmittausten koonti.

Betoni	Laatta	Matalin korkeus mm	Korkein korkeus mm	Suurin vierekkäisen mittauksen ero mm	Keski-arvo mm
Vanha resepti	1	310	323	7	317,8
	2	315	320	3	318,1
Uusi resepti	3	317	321	4	318,9
	4	318	322	4	319,8

Valmiissa kovettuneissa laatoissa ei havaittu silmämääräisesti laatupuutteita, esimerkiksi halkeamia tai punosluistoja niin vanhalla kuin uudella reseptillä valmistetuissa laatoissa. Punosten

suojaetäisyydet olivat molemmilla reseptillä tehdyillä laatoilla toisiaan vastaavat ja toleranssien mukaiset. Molemmilla massoilla valmistetuilla laatoilla nostourien korkeus ylitti toleranssin, mikä ei johdu niinkään käytetystä massasta vaan valukoneen säädöistä.

## 6.2 Mikroaltokuivatuksen tulokset

Mikroaltokuivatus tehtiin vain uudelle betonille. Jotta tuloksia olisi voinut verrata, olisi kuivatus pitänyt tehdä myös vanhalla reseptillä tehdyille betonille. Uuden betonin annosraportin mukaan laskennallinen tehollinen vesi-sementtisuhde oli 0,4393. Ero johtuu siitä, että tehollisessa vesi-sementtisuhteessa on huomioitu kiviainekseen imeytynyt vesi (Johansson, Kihula, Mantila, Paukku, Punkki, Ruuth, & Tikkanen 2021, 35.) Tulos on linjassaan aiemmin tehtaalla tehtyjen mittausten kanssa. Vanhalla reseptillä annosraportin mukainen tehollinen vesisementtisuhde oli 0,4295, mikä selittyy sillä, että uuden ja vanhan reseptin välillä oli sementtimäärässä 6 kg ero betoniaseman vaa'an mittaepätarkkuuden takia.

Taulukko 3. Mikroaltouunikuivatuksen tulokset.

Betonin tavoitetiheys kg/m <sup>3</sup>	2350										
stian paino g	Astia + näyte /g	Betonin paino/	5min	10min	15min	20min	25min	Haihtunut	Kosteus - % , w	Vesi	Vesi-sementtisuhde
[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	
896	2800	<b>1904,0</b>	2794,6	2775,4	2748,6	2710,8	2673	<b>127,0</b>	<b>6,67</b>	<b>156,7</b>	<b>0,4823</b>

## 6.3 Annosraporttien ja tilastojen analyysin tulokset

Annosraportit ja betonireseptejä koskevat tarkat tilastot ovat salaista tietoa, joten tässä luvussa esitetään vain niiden analyysistä saadut tulokset. Testivalun annosraporteista ilmenee, että vanhalla reseptillä tehtyyn betoniin ei jouduttu tekemään valun aikana veden ja sementin lisäystä, niin kuin aiemmin toimeksiantajalla oli ollut oletus. Vaikka uudella reseptillä valettu laatta näytti melko kostealta, ei kosteuden tarkistusta tarvinnut tehdä, koska laatassa ei havaittu merkittävää aaltoilua.

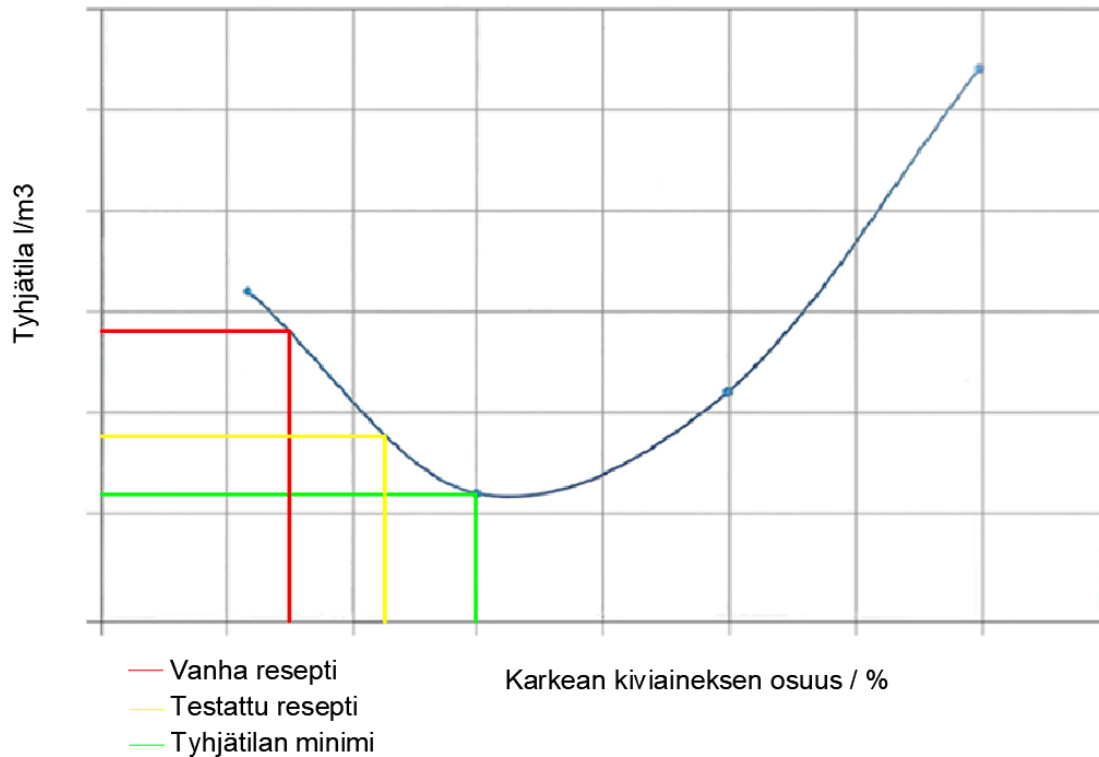
Annosraporteista käy ilmi myös, että betoniaseman aineiden vaa'at aiheuttavat myös heittoja suhteitukseen. Suurin annosraporteista ilmenevä vaakavirhe oli sepelin mittauksessa, jonka toteumamäärä poikkesi 11 kg tavoitemäärästä. Annosteluvirheet ovat kuitenkin prosentuaalisesti pieniä,

eri aineksista riippuen maksimissaan 1,5 %. Sementin määrän keskiarvoa annosteluvirheet nostivat valun aikana 0,6 %, mikä on vastaa 13,3 % toimeksiantajan asettamaa sementin vähennystarvetta.

Kun annosraporteista kävi ilmi, että toimeksiantajan oletus sementin lisäämisestä ei toteutunut, tutkittiin toimeksiantajan kanssa yrityksen vuodelta 2022 koottuja tilastoja, johon on kirjattu jokaisen järjestelmässä olevan betonireseptin toteutunut sementin kulutus. Salassa pidettävyyden vuoksi minulle ei ollut annettu tätä tiedostoa opinnäytetyön lähtötiedoiksi. Tilastoja tutkiessa havaittiin, että vaikka Uuraisilla valmistetuista ontelolaatoista P32-ontelolaattaa on 51 %, käytetyn sementin määrää nostavat muut vähemmän käytetyt reseptit, esimerkiksi paksummat ontelolaatat sekä pikamassat, ei P32-laatan reseptiin lisätty sementti. Toimeksiantajan lähtötieto oli siis väärä ja uudessa reseptissä olisi pitänyt olla 4,4 % vähemmän sementtiä, jotta tehtaassa käyttämä sementin kokonaismäärä olisi saatu tavoitetasolle.

#### **6.4 Reseptin kehitystyön tulokset**

Uutta reseptiä määriteltäessä kävi ilmi, että sekä vanhassa että uudessa reseptissä on laskennallista vaadittua kiviainesten tyhjätilan ylitäyttöä enemmän sementtipastaa. Consolis on määrittänyt kullekin valukoneelle optimaalisen ylitäytön tyhjätilan lisäksi, mutta vanhassa reseptissä on tätä laskennallista sementtipastan kokonaismäärää 8,8 % enemmän sementtipastaa. Koska oletus oli, että vanhan reseptin hienompi kiviaines aiheuttaa betoniasemalla reseptiin veden ja samalla sementin lisäystä, kiviainesjakauma muutettiin karkeammaksi, mutta sementtipastan määrä pysyi samana, mikä nosti sementtipastan osuuden entisestään 11 prosenttiin laskennalliseen osuuteen verrattuna. Sementtipastan suurempi määrä betonissa todennäköisesti vaikutti siihen, että betoni valun aikana vaikutti silmämääräisesti havainnoiden kosteammalta.



Kuvio 11. Karkean kiviaineksen osuuden vaikutus kiviainesten väliin jäävän tyhjättilan suuruuteen (Aggregate Packing ICT-test 2021, muokattu).

Laskennallisesti sementtipastan määrää voisi vähentää myös vanhan reseptin kiviainesjakaumalla. Laskennallisen optimaalisen sementtipastan määrän käyttö reseptissä vähentäisi sementin määrää 8,1 % nykyisestä määrästä. Uuden reseptin kiviainesjakaumalla sementtiä on teoriassa mahdollista vähentää 9,9 % nykyisestä. Molemmat arvoista ylittävät toimeksiantajan tavoitteet 4,4 % sementin vähennyksestä. Mikäli karkean kiviaineksen määräksi laitettaisiin kiviainespakkaantuvuuskokeella määritetty tyhjättilan minimiä vastaava arvo, sementin määrää voitaisiin vähentää 11,1 % nykyiseen nähden.

## 6.5 Puristuslujuuskokeiden tulokset

Testivalusta otettiin puristuslujuuskokeeseen 1 koekappale vanhalla ja 2 koekappaletta uudella reseptillä tehdystä laatasta. Vertailuun otettiin lisäksi 1 aiemmin valettu vanhalla reseptillä tehty koekappale, joka annosraportin mukaan oli materiaaleiltaan lähes identtinen verrattuna testivalupäivänä vanhalla reseptillä valetun koekappaleen kanssa. Myös mitatut olosuhteet, eli massan lämpötila ja ulkolämpötila olivat lähes samat. Puristuslujuuskokeen tuloksista ilmenee, että van-

halla reseptillä tehtyjen koekappaleiden puristuslujuus on huomattavasti uudella reseptillä tehtyjen koekappaleita suurempi, keskiarvoltaan jopa 16,6 % suurempi verrattuna uudella reseptillä tehtyihin, vaikka kaikkien kappaleiden laskennallinen vesi-sementtisuhte on sama. Otos on kuitenkin hyvin rajattu. Kaikki koekappaleet ylittävät kuitenkin tavoitearvon  $60 \text{ MN/m}^2$  (= 60 MPa). Alin puristuslujuus  $69,1 \text{ MN/m}^2$  ylittää tavoitearvon 15,2 %:lla. On myös normaalia, että betonierän lujuuskoetuloksissa on jakaumaa; lujuuksien jakauma noudattaa yleensä normaalijakaumaa (by 201 2021, 186).

Taulukko 4. Puristuslujuuskokeiden tulokset.

Betoni	Näyte	Valupäivä	Testaus päivä	Testausikä vrk	Pituus mm	Halkaisija mm	Pit./ja halk. suhde %	Massa kg	Tiheys $\text{kg/m}^3$	Murtovoima kN	Kuutiolujuus $\text{MN/m}^2$	Sementtipastan ylitäyttö
Vanha resepti	1	16.2.2023	16.3.2023	28	54	54	100	0,296	2410	186,6	89,6	8,8
	2	27.2.2023	27.3.2023	28	53	54	98	0,280	2330	160,1	76,9	8,8
Uusi resepti	3	27.2.2023	27.3.2023	28	53	54	98	0,282	2330	143,9	69,1	11,0
	4	27.2.2023	27.3.2023	28	54	54	100	0,284	2320	153,4	73,7	11,0

Puristuslujuuden ja tiheyden välillä ei ole näiden tulosten perusteella ole suoraa yhteyttä. Koekappaleen tiheys on määritetty mittojen ja massan perusteella standardin SFS-EN 12390-7 mukaisesti. Halkaisijaltaan alle 100 mm koekappaleiden koko on kuitenkin standardin SFS-EN 12390-7 vaatimusta pienempi, joten näiden osalta tiheysmäärittelyn tulos on suuntaa antava. Tuloksista voidaan kuitenkin olettaa, että kaikki testivalun näytteet ovat tiivistyneet verrattain tasaisesti. 16.2. valetun koekappaleen sekä tiheys että lujuus ovat 27.2. valettuja näytteitä suurempi. Yhden näytteen perusteella on hankalaa selvittää koetulosten eroihin johtaneita syitä, mutta esimerkiksi valukoneen kulutusosien kulumisen tai tiivistyskapasiteetin lasku voivat vaikuttaa näytteiden puristuslujuuksiin laskevasti. Sementtipastan suurempi osuus korreloi tuloksissa pienempään puristuslujuuteen, mutta otanta on hyvin rajattu.

## 6.6 Betonireseptin optimoinnin vaikutus hiilidioksidipäästöihin

Nyt testatulla uudella reseptillä ei saatu vähennettyä ontelolaattabetonin hiilidioksidipäästöjä, sillä vanhalla reseptillä valmistettuun betonimassaan ei tarvinnut alkuoletuksesta huolimatta lisätä sementtipastaa, joten sementin määrä oli molemmissa betoneissa sama. Uuraisten ontelolaattatehtaalla on käytetty vuonna 2022 noin 44 167 000 kg sementtiä ja jokainen sementtikilo aiheuttaa 0,589 kg hiilidioksidipäästöjä (Ympäristöraportti 2022, 19). Mikäli olisi päästy toimeksiantajan aset-

tamaan 4,4 %:n vähennykseen, olisi vuodessa syntynyt noin 884 500 kg vähemmän hiilidioksidipäästöjä. Taulukossa on esitetty myös teoreettisesti mahdolliset hiilidioksidipäästöjen säästöt, mikäli resepteissä noudatettaisiin Consolixen määrittämää sementtipastan määrää.

Taulukko 5. Sementin vähennyksellä saavutettavat hiilidioksidipäästöjen säästöt.

Sementin kokonaiskulutus 2022 kg	44166764,36 kg				
Sementin hiilidioksidipäästöt /sementtikilo	0,589 kg				
	Nykyiset päästöt	Tavoitearvo	Vanhan reseptin kiviainesjakauma	Uuden reseptin kiviainesjakauma	Tyhjätilan minimi
Sementin vähennys %	0	4,4	8,1	9,9	11,1
Päästöjen vähennys kg	26 014 224,21	884 483,33	2 107 152,16	2 575 408,20	2 627 436,65

## 7 Pohdinta

### 7.1 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tavoitteena oli vastata asetettuihin tutkimuskysymyksiin kehittämistutkimuksen keinoin. Tavoitteena oli kehittää Parma Oy Uuraisille P32-ontelolaattatyypille resepti, jonka tarkoituksena on käytettävän sementin kokonaismäärää 4,4 % vähentämällä pienentää ontelolaattojen valmistuksessa syntyviä hiilidioksidipäästöjä ja myös valmistuskustannuksia. Nyt testatulla uudella reseptillä ei saatu vähennettyä ontelolaattabetonin hiilidioksidipäästöjä, sillä vanhalla reseptillä valmistettuun betonimassaan ei tarvinnut toimeksiantajan alkuoletuksesta huolimatta lisätä sementtiä valun aikana. Kehittämistyön aikana kuitenkin havaittiin, että nykyisestä reseptistä olisi teoreettisesti mahdollista vähentää sementtipastan ja sitä kautta sementin määrää. Reseptin kiviainesjakaumaa muuttamalla karkeammaksi pystytään laskennallisesti vähentämään sementin määrää jopa 11,1 % nykyisestä.

Nyt testattu uusi betoniresepti ei vaikuttanut valutyön käytännön suoritukseen. Ulkoiselta laadultaan uudella reseptillä valettujen laattojen laatu oli jopa vanhaa parempi, sillä poikkileikkausmitaukset olivat lähempänä tavoitearvoja. Valusta porattujen koekappaleiden puristuslujuus oli vanhalla reseptillä valmistettuja koekappaleita pienempi, mutta kuitenkin yli tavoitelujuuden.

Tulosten perusteella ei kuitenkaan voida sanoa, millaisia vaikutuksia valmistukseen ja laatuun olisi tullut, jos sementtiä olisi ollut nyt testattua reseptiä 4,4 % vähemmän.

Kehittämistyössä ei päästy kaikkiin sille alun perin asetettuihin tavoitteisiin, eikä saatu vastausta kaikkiin asetettuihin tutkimuskysymyksiin alkutietojen puutteiden takia. Käytännössä kehittämistyössä ei päästy testaamaan reseptiä, jossa sementtimäärää olisi vähennetty. Annetuissa alkutiedoissa ja toimeksiantopyynnössä ei ollut otettu huomioon kokonaisuutta, mitkä tekijät nostavat sementtimäärän tehtaan tavoitekeskiarvon yläpuolelle. Toimeksiannon saamisen jälkeen olisi pitänyt tehdä tarkempi alkukartoitus, että onko toimeksiantajan oletus perusteltu. Kehittämistutkimuksen aikana kuitenkin huomattiin, mistä tavoitearvon ylitys johtuu, ja mitä vaaditaan, jotta tavoitearvoon päästään. Kehittämistutkimukselle on myös ominaista, että kehittäminen ja tutkimus yhdistyvät syklisessä prosessissa ja välillä joudutaan tekemään korjaustoimenpiteitä ja uusi kehittämissykli (Kananen 2012, 79).

Rajoitukseksi osoittautui se, ettei minulla ollut opinnäytetyön teon aikana voimassa olevaa työ sopimusta, mikä hankaloitti esimerkiksi toimeksiantajayrityksen tietokantoihin pääsyä sekä rajoitti aineistoa, jota minulle liikesalaisuuksien takia voitiin antaa. Mikäli tietokantoihin olisi ollut pääsy, olisi ehkä huomattu ennen testivalun tekemistä, mistä sementtimäärän keskiarvo muodostuu. Kehittämistyön tekemistä hankaloitti myös tehtaan alkukevällä alkanut seisakki, jonka takia testivalu piti suorittaa mahdollisimman nopeasti testireseptin kehittämisen jälkeen. Myös testivalun koekappaleiden puristuslujuus testataan 28 vuorokautta valun jälkeen, minkä takia uutta testivalua ei voitu tehdä enää, koska tulokset eivät olisi ehtineet valmistua ajoissa opinnäytetyön valmistumista ajatellen.

Kehittämistyössä tuli kuitenkin ilmi, että teoriassa myös niillä tehtailla, joilla ei ole mahdollista käyttää seossementtejä esimerkiksi investointitarpeiden tai tuotannonkierron takia, on mahdollista vähentää sementin määrää ja sitä kautta hiilidioksidipäästöjä. Jos vastaava sementin vähennys saadaan tehtyä kaikille tai ainakin suurimmalle osalle ontelolaattaresepteistä, saavutetaan sillä vuositasolla merkittävä hiilidioksidipäästöjen vähennys.

## **7.2 Luotettavuus**

Tutkimuksen luotettavuus ja aineiston yhtenäisyys ja virheettömyys varmistetaan huolellisuuden lisäksi käyttämällä aineiston keruussa Parman Oy:n laadunvalvontakriteerit täyttyviä sekä laadunvalvontaa koskevien standardien mukaisia tieteellisesti hyväksyttäviä menetelmiä. Aineiston käsittelyssä alkuperäinen aineisto on tallennettu erilleen ennen analysointia ja muokkausta.

Tutkimuksen reliabiliteettia, eli tutkimustulosten pysyvyyttä ja toistettavuutta hankaloittaa olosuhteiden suuri vaikutus ja monet vaikuttajat ontelolaattojen valmistuksessa. Esimerkiksi valukoneen kuluminen voi aiheuttaa merkittäviä eroja muun muassa testivalun laadunvarmistustoimenpiteiden tuloksiin. Myös ulkoiseen validiteettiin, eli tulosten yleistettävyyteen vaikuttaa juuri kyseisen tehtaan olosuhteet sekä käytössä olevat laitteistot. Kehittämistyön perustana olevat tutkimustulokset ja tietoperusta ovat kuitenkin hyödynnettävissä muissa vastaavissa tutkimuksissa ja saatuja tuloksia voidaan hyödyntää myös uuden testivalun tekemisessä muokatulla reseptillä tai myös muiden ontelolaattatyyppeiden reseptien optimoinnissa.

Tutkimuksen sisäinen validiteetti tarkoittaa määrällisessä tutkimuksessa syy-seuraussuhdetta (Kananen 2015, 347). Esimerkiksi testivalulle tehdyt laadunvarmistustoimenpiteet tuottivat melko rajallisen määrän mittaustuloksia. Opinnäytetyössä onkin pyritty välttämään syy-yhteyksien muodostamista, mikäli yhteyttä ei voida luotettavasti perustella.

### **7.3 Keskeisten tulosten tarkastelu suhteessa alkuosan teoreettiseen viitekehykseen**

Kehitystyön tuloksen mukaan teoriassa pitäisi olla reseptiä optimoimalla mahdollista vähentää sementin määrää nykyisestä tasosta jopa 11,1 %, joka on yli puolet enemmän, mikä oli alkuperäinen tavoite. Vaikka resepti todettaisiin käytännön testeissä toimivaksi ja sementin vähennys saataisiin tehtyä, muodostaisi sementin aiheuttamat päästöt edelleen suurimman osan ontelolaattojen valmistuksen päästöistä. Seossementeillä saadaan ontelolaattojen valmistuksen hiilidioksidipäästöjä pudotettua jopa 50 %, mutta seosaineet vaikuttavat merkittävästi hidastavasti betonin alkulujuiden kehitykseen ja sitä kautta tuotannon kiertoon, sekä suurina määrinä käytettyinä myös betonin pakkaskestävyyteen. (Parma Green n.d.; Tulimaa, Wirtanen, Holt, Kukko & Penttala 2005, 46, 53–55, 74–75). Myös seosaineiden saatavuuteen voi tulevaisuudessa tulla ongelmia seossementtien yleistyessä (Punkki 2021; CEMBUREAU 2020, 15, 23.). Mikäli ontelolaattojen valmistuksessa halutaan tulevaisuudessa päästä kunnianhimoisiin hiilidioksidipäästötaivoitteisiin, nousee sementin valmistuksen päästöjen vähentäminen sementin käytön vähentämistä ja seossementtejä tärkeämmäksi kehityskohteeksi.

Mohammedin, Puschin, Al-Ansarin ja Knutsson (2012, 221) mukaan mitä pienemmäksi kiviainesten väliin jäävä tyhjätila saadaan, sitä vähemmän tarvitaan sementin ja veden muodostamaa sementtipastaa kiviainesten väliin ja siten suurempi puristuslujuus on mahdollista saavuttaa pienemmällä sementtimäärällä. Betoni pyritään myös yleisesti ottaen valmistamaan niin, että runkoaineen määrä betonissa on mahdollisimman korkea ja sementtipastan osuus on mahdollisimman pieni (Nykyri 2020, 35–36). Opinnäytetyön tuloksissa mittauksien mukaan pienemmällä tyhjätilavuusmäärällä, mutta suositukseen suhteessa suuremmalla sementtipastan määrällä saatiin matalampia puristuslujuustuloksia mitä kiviainesjakaumalla, jolla oli suurempi tyhjätila. Virheellisen alkuasetelman takia tutkimuksessa ei täysin päästy testaamaan Mohammedin ja muiden (2012, 221) tutkimustuloksia käytännössä, koska nyt testatun uuden reseptin kiviainesten tyhjätilan ylitäyttö oli Consolixen määrittelemää optimaalista tasoa paljon suurempi. Puristuslujuustuloksista ei voida tehdä varmoja päätelmiä, koska otanta oli niin pieni, mutta ne viittaisivat siihen, että sementtipastan määrä ei saa olla liian suuri kiviainesten tyhjätilaan nähden.

#### **7.4 Kehittämisehdotukset**

Saatujen tutkimustulosten perusteella testattua reseptiä voidaan muokata niin, että se täyttää alun perin annetun 4,4 %:n sementinvähennystavoitteen. Tulosten perusteella voidaan päästä myös tavoitetta suurempiin sementin vähennyksiin. Ennen uutta testikierrosta olisi hyvä tehdä kiviaineksille uusi pakkaantuvuustesti, jotta varmistetaan, että resepti määritetään varmasti juuri käytössä olevien kiviainesten tyhjätilaan perustuen. Koska uuden reseptin puristuslujuustulokset olivat jopa 16,6 % matalammat vanhaan reseptiin verrattuna, uusi testivalu voitaisiin suorittaa laattoihin, jotka toimitetaan asiakkaalle vasta puristuslujuustulosten tultua tai tehdä uudella massalla erillisiä testilaattoja, joka voidaan mahdollisesti ottaa käyttöön tulosten tultua. Mikäli toinen testikierros P32-laatoille onnistuu suunnitellusti, voi vastaavan betonireseptin optimoinnin tehdä myös muille ontelolaattatyypeille.

Kehittämistutkimuksen aikana kävi ilmi, että tehdaspäälliköllä ja työnjohdolla oli vääriä käsityksiä siitä, mitkä asiat vaikuttavat sementin kokonaismäärään. Jatkossa vastaaviin kehitystöihin olisi hyvä ottaa alusta asti mukaan myös betoniaseman ja laboratorion työntekijät. Resepteihin valun aikana betoniasemalla tehdyt muutokset olisi hyvä myös kirjata tarkkaan ylös perusteluineen ja nämä olisi hyvä käydä läpi säännöllisin väliajoin yhdessä työnjohdon kanssa. Ylipäätään olisi hyvä

varmistaa, että sekä työnjohdolla että betoniaseman työntekijöillä on riittävä ja ajantasainen osaaminen ontelolaattabetonin suhteituksesta ja sen vaikutuksesta betonimassan ominaisuuksiin.

## Lähteet

Aggregate Packing ICT-test. 2021. Consolixen sisäinen lähde. Viitattu 20.4.2023.

Betonielementtien valmistuksen ekologiset kehityskohteet. N.d. Vastuullisuustietoa yrityksen verkkosivuilla. Viitattu 1.4.2023. <https://parma.fi/vastuullisuus/betonielementtien-valmistuksen-ekologiset-kehityskohteet/>.

Betoniko hiilinielu? 2019. CANEMURE-hankkeen CO<sub>2</sub>ncrete Solution -projektin video. Viitattu 1.4.2023. [https://www.youtube.com/watch?v=eHq\\_C47sVQ&t=9s](https://www.youtube.com/watch?v=eHq_C47sVQ&t=9s).

Betonin lujuus riippuu vesi-sementtisuhteesta. N.d. Tietoa betonista. Artikkelit Finnsementin verkkosivuilla. <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-jarautakauppiaalle/betonin-lujuus-riippuu-vesi-sementtisuhteesta/>.

Betonisanasto. N.d. Betonitiedon verkkosivuilla oleva betonisanasto. Viitattu 1.4.2023. <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto.html>.

Betonivalmiskosten laatupoikkeamien käsittely. 2006. Tassu-projekti. Betonikeskus ry. Viitattu 10.4.2023. [https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23246/Betonielementtien\\_laatu-uut-teet-Lokakuu2006\[1\].pdf](https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23246/Betonielementtien_laatu-uut-teet-Lokakuu2006[1].pdf).

CE-merkittyjen ontelolaattojen mitoitus. 2023. Artikkelit Betoniteollisuus ry:n ylläpitämällä elementtisuunnittelu.fi -verkkosivuilla. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/kantokykykayrat/ontelolaatat>.

Cementing the European Green Deal. N.d. Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain By 2050. Euroopan sementtiteollisuuden kattojärjestön CEMBUREAU:n 2050-tiekartta. Viitattu 2.4.2023. [http://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap\\_final-version\\_web.pdf](http://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf).

CO<sub>2</sub>NCRETE SOLUTION. 2020. Report Q1/2020, Kirjallisuusreferaatti (kompakti). Tutkimusraportti CANEMURE-hankkeen CO<sub>2</sub>ncrete Solution -projektin sivuilla. Viitattu 1.4.2023. <https://concretesolution.fi/wp-content/uploads/2020/04/CO2NCRETE-SOLUTION-kirjallisuusraportti-6p-20200206.pdf>.

Green Spine Line®. 2023. Sustainability. Consolis-konsernin verkkosivut. Viitattu 1.4.2023. <https://www.consolis.com/sustainability/green-spine-line/?playlist=b08e57c&video=17b94f5>.

By 201. 2018. Betonitekniikan oppikirja 2018. 9. p. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. N.d. Hiilineutraali Suomi. Vastuualueet. Tiedote Ympäristöministeriön verkkosivuilla. Viitattu 5.4.2023. <https://ym.fi/hiilineutraali-suomi2035>.

Hawileh, R.A., Abdalla, J.A., Fardmanesh, F., Shahsana, P. & Khalili, A. 2017. Performance of reinforced concrete beams cast with different percentages of GGBS replacement to cement. Archives

of civil and mechanical engineering. Elsevier. Viitattu 1.4.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1644966516301480>.

Hietanen, T., Kaivola, E. & Suikka, A. 2009. CE-merkittyjen ontelolaattojen laadunvalvontaohje. Betonikeskus ry. Viitattu 15.3.2023. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21941/Ontelolaattojen%20laadunvalvonta.pdf>.

Honkala, J. 2008. Ontelolaattakoneiden huolto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK 2008. Tampereen ammattikorkeakoulu. kone- ja tuotantotalouden koulutusohjelma, kone- ja laiteautomaatio. Viitattu 5.3.2023. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8706/Honkala.Jari.pdf>.

Huhtiniemi, S. & Kiviniemi, J. 1992. Elementtityöt. Helsinki: Rakennustieto.

Hytönen, Y. & Seppänen, M. 2009. Tehdään elementeistä. Suomalaisen betonielementtirakentamisen historia. Jyväskylä: SBK-säätiö. Viitattu 1.4.2023. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/06/Tehdaan-Elementeista.pdf>.

Ilveskoski, O. 2012. Johdatus betonirakenteiden suunnitteluun eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 ja 2 mukaan. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu. Viitattu 10.4.2023. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/48799/HAMK\\_Ilveskoski\\_Johdatus-betonirakenteiden-suunnitteluun.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/48799/HAMK_Ilveskoski_Johdatus-betonirakenteiden-suunnitteluun.pdf)

Johansson, K. 2023. Nuoren ja kovettuneen betonin ominaisuudet. Betonilattiatyönjohtajan ja betonilattian pinnoitustyönjohtajan pätevyityskurssin aineistoa. Helsinki 21.3.2023. Viitattu 14.4.2023. <https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssit/betonilattiakurssi/nuoren-ja-kovettuneen-betonin-ominaisuudet-2023.pdf>.

Johansson, K & Mannonen R. 2016. by 65 Betoninormit 2016. Helsinki: BY-koulutus.

Johansson, K., Kihula, J., Mantila, A., Paukku, E., Punkki, J., Ruuth, J. & Tikkanen, J. 2021. by 65 Betoninormit 2021. Helsinki: BY-koulutus.

Kallinen, T. & Kinnunen, T. N.d. Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Etnografia. Toimittaja Vuori, J. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Viitattu 1.3.2023. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/>.

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja -sarja. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2015. Opinnäytetyön kirjoittajan opas. Näin kirjoitat opinnäytetyön tai pro gradun alusta loppuun. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 202. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kekkonen, T. 2023. Betonin hiilensidonta – laskelmia karbonatisaatiosta. CANEMURE-hankkeen CO<sub>2</sub>ncrete Solution -projektin esitys. Viitattu 10.4.2023 [https://www.oamk.fi/images/Hankkeet/KASVU/CO2ncreteSolution\\_OAMK\\_20230321.pdf](https://www.oamk.fi/images/Hankkeet/KASVU/CO2ncreteSolution_OAMK_20230321.pdf).

Kekkonen, T. 2021. Suomen betonikanta sitoo n. 5,2 miljoonaa tonnia hiilidioksidia. Artikkelit CANEMURE-hankkeen CO<sub>2</sub>crete Solution -projektin verkkosivuilla. Viitattu 1.4.2023. <https://concretesolution.fi/suomen-betonikanta-sitoo-n-52-miljoonaa-tonnia-hiilidioksidia/>.

Kekkonen, T. 2020. Tutkimustuloksia maailmalta – Betoni on hiilinielu. Artikkelit CANEMURE-hankkeen CO<sub>2</sub>crete Solution -projektin verkkosivuilla. Viitattu 1.4.2023. <https://concretesolution.fi/tutkimustuloksia-maailmalta-betoni-on-hiilinielu/>.

Kosomaa, S., Mattila, J. & Tepponen P. 2015. Mitä betoni on? Artikkelit Betoni-lehdessä [https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502\\_38-43.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502_38-43.pdf).

Laaksonen, P., Karjunen, H., Ruukonen, J., Laari, A., Zhaurova, M., Kinnunen, S.-K., Kosonen, A., Kärri, T., Sinkkonen, T., Rissanen, T., Tervonen, A. & Varis, J. 2021. Feasibility Study for Industrial Pilot of Carbon-Neutral Fuel Production – P2X. Final report. Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT. Viitattu 1.4.2023. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162597/P2X%20Joutseno%20Final%20Report.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

L621/1999. Laki viranomaisten toiminnan julkisuudesta. Viitattu 20.4.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/1999/19990621>

Lahdensivu, J., Weijo, I., Ruuska-Jauhijärvi, K. & Pyy, H. 2019. Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019. by 42. 4. päivitetty painos. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

Leskelä, M. V. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008. By 210. 2. p. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys Ry.

Masuunikuonajauhe KJ400. 2019. Tuote-esite Finnsementin verkkosivuilla. [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe\\_KJ400.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe_KJ400.pdf).

Nykyri, P. 2020. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1 2013. By211. Vaasa: BY-Koulutus.

Ojala, T & Punkki, J. 2018. Vesi-sementtisuhde 100 vuotta. Artikkelit Betoni-lehdessä. Viitattu 10.4.2023. [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/BET1801\\_78-83.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/BET1801_78-83.pdf).

Ojala, T., Punkki, J. & Tauqir, A. 2019. Vesi-sementtisuhteen määrittäminen betonista. Betoniteknikka. Diplomityö Aalto-yliopistossa. Betoni-lehti. Viitattu 10.4.2023. [https://betoni.com/wp-content/uploads/2019/02/BET1901\\_76-81.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2019/02/BET1901_76-81.pdf).

Ontelolaatat. 2023. Artikkelit Betoniteollisuus ry:n ylläpitämällä elementtisuunnittelu.fi -verkkosivuilla. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/laatat/ontelolaatat>.

Ontelolaatat. N.d. Elementit. Ympäristöselosteet Betoniteollisuus ry:n verkkosivuilla. Viitattu 2.3.2023. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/05/Ontelolaattaelementti-320-mm.pdf>.

Punkki, J. 2021. Betonin sideaineet tulevaisuudessa. Artikkelit Tutkimus ja kehitys Nro4/21. Betoni-verkkolehti. Viitattu 5.3.2023. <https://betoni.com/lehti/2021/12/10/betonin-sideaineet-tulevaisuudessa/>.

Parman ontelolaatatot suunnitteluohje. 2018. Viitattu 3.3.2023. [https://parma.fi/userassets/uploads/2018/12/parma\\_ontelolaatatot\\_suunnitteluohje\\_2018-1.pdf](https://parma.fi/userassets/uploads/2018/12/parma_ontelolaatatot_suunnitteluohje_2018-1.pdf).

SFS-EN 1168 + A3:2012. Betonivalmisosat. Ontelolaatat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 23.1.2012. p. 4. Viitattu 14.4.2023. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS-EN 197-1 (2012). Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 23.1.2012. Viitattu 14.4.2023. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS-EN 206:2014 + A2:2021. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 26.3.2021. Viitattu 14.4.2023. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS 7022:2019/Korjaus:2019. Betoni. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 25.10.2019. Viitattu 14.4.2023. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

Tietoa Parmasta. N.d. Yrityksen verkkosivut. Viitattu 2.1.2023. <https://parma.fi/tietoa-parmasta/>.

Tilannepäivitys. 2023. Green Products 7.4.2023. Parma Oy:n sisäinen salassa pidettävä lähde.

Timonen-Nissi, H. 2019. Betoni materiaalina. Rudus Betoniakatemia koulutusmateriaali 25.1.2019. Viitattu 15.3.2023. <https://www.rudus.fi/Download/27932/Betoniakatemia%20Betoni%20materiaalina.pdf>

Tulimaa, M., Wirtanen, L., Holt, E., Kukko, H. & Penttala, V. 2005. Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto, Rakennusmateriaalitekniikka. Julkaisu 18. Edita Prima Oy. Helsinki 2005.

Uuraisten ontelolaattatehtaan laadunvalvontaohje (FPC). 2023. Ontelo- ja kylpyhuonelaatat, kuori-laatat. Sisäinen laadunvalvontaohje. Consolis Parman sisäinen salassa pidettävä lähde.

Valmisbetonit. N.d. Ympäristöselosteet Betoniteollisuus ry:n verkkosivuilla. Viitattu 2.3.2023. <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/ymparistoselosteet/valmisbetonit/>.

Vuosiraportti 2022. Consolis Parman ilmastotavoitteet. Viitattu 3.4.2023. <https://parma.fi/userassets/uploads/2023/03/parma-ilmastotavoitteet-vuosiraportti-2022.pdf>.

Ympäristöraportti. 2022. Finnsementti Oy:n julkaisema ympäristöraportti. Viitattu 1.4.2023. <https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Ymparistoraportti-Finnsementti-2022-1.pdf>.

## Liitteet

### Liite 1. Ontelolaattojen valmistustoleranssit

## 17. LAATTOJEN VALMISTUSTOLERANSSIT

Parma Oy:n ontelolaatat täyttävät ontelolaattojen harmonisoidussa tuotestandardissa EN 1168:2005+A3:2011 esitetyt valmistustoleranssit. Tämän lisäksi Parman ontelolaattojen tuotannossa on käytössä seuraavat valmistustoleranssit:

#### VALMISTUSTOLERANSSIT

- 1. Pituus (L)**  $\pm 15$  mm  
tai  $L/1000$   
Pituus mitataan laatan yläpinnasta laatan keskeltä

- 2. Leveys (b)**  
kokonainen laatta  $+ 0$   
 $- 5$  mm  
kavennettu laatta  $\pm 20$  mm

- 3. Korkeus (h)**  
P18M, P20  $\pm 5$  mm  
P27, P32, P37  $\pm 7$  mm  
P40, P40R  $\pm 10$  mm  
P50, P50R  $\pm 10$  mm  
Laatan poikkileikkauksen korkeus mitataan keskimmäisen ja reunimmaisen uuman kohdalta sekä reunimmaisen ontelon keskeltä

- 4. Yläpinnan aaltoilu (y)**  
P18M...P40R 8 mm  
P50, P50R 10 mm

- 5. Pään kulmapoikkeama (p)**  
1200 mm:ä kohti  $\pm 10$  mm

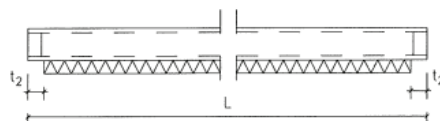
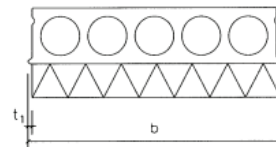
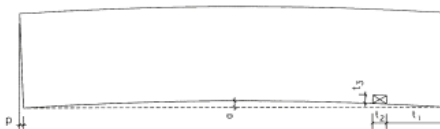
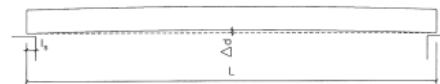
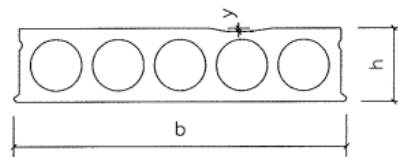
- 6. Sivukäyryys (a)**  $\pm L/1000$ ,  
enint.  $\pm 10$  mm

- 7. Taipuma**  
ennen asennusta (d)  $\pm 6$  tai  $L/1000$   
Poikkeama ennakkoon suunnitellusta taipumasta, johon sisältyy mahdollinen ennakkokorotus ja laskennallinen taipuma. Laskennalliset taipumat koskevat laattoja, joissa ei ole reikiä tai varauksia.

- 8. Reiät, varaukset (t)**  
teko tuoreeseen betoniin  
koko  $+ 50$  mm  $- 0$  mm  
sijainti  $\pm 15$  mm  
teko jälkikäteen  
koko  $- 0$  mm  $+ 30$  mm  
sijainti  $\pm 15$  mm

- 9. Tartunnat (t)**  
tehtaalla asennetut  $\pm 20$  mm

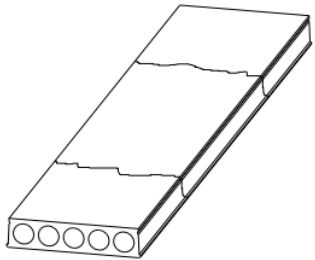
- 10. Eristeen sijainti (t)**  
sivusijainti (t1)  $\pm 10$  mm  
poisto tukipinnalta (t2)  $\pm 15$  mm



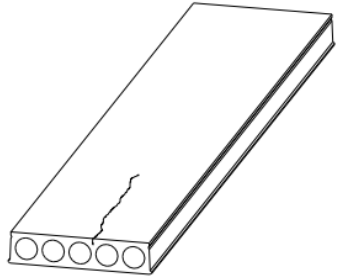
## Liite 2. Tyypilliset ontelolaattojen laatu puutteet ja niiden käsittely halkeamatapauksissa

Liitteessä on esitetty ne tyypilliset ontelolaattojen halkeamatapaukset, joihin on voinut vaikuttaa käytetyn betonin koostumus ja ominaisuudet, kuten lujoudenkehitys.

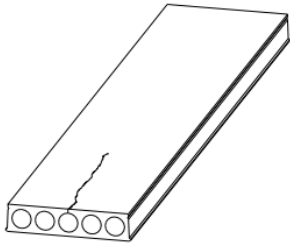
### POIKITTAISET HALKEAMAT

Aiheuttaja	Ennaltaehkäisy	Vaikutukset	Korjaus	Tyypillinen tapaus
A. Virhe suunnittelussa Liian suuri yläpinnan vetojännitys, esim. ulkokuormitus <b>Liian alhainen laukaisulujuus</b>	Vähennetään vetojännitystä tai lisätään raudoitusta Nostetaan laukaisulujuutta			
B. Virhe valmistuksessa 1. Pitkäaikainen kutistuminen  a. Liiallinen kosteus betonimassassa  b. Liian aikainen lämpökäsittely  c. Liian korkea lämpötila lämpökäsittelyn aikana  d. Lämmön epätasainen jakautuminen muotissa	Muutetaan seosta ja lämpökäsittelyä  a. Vähennetään seoksen vesipitoisuutta. Valun jälkeen heti kun mahdollista peitetään elementti.  b. Lykätään lämpökäsittelyn lämmön nousun alkamista  c. Lasketaan lämpökäsittelyn lämpötilaa  d. Varmistetaan lämmön tasainen jakaantuminen	Leikkauslujuus saattaa olla heikentynyt mikäli halkeama sijaitsee laatan päässä. Voi heikentää merkittävästi ulokkeiden leikkaus- ja taivutuslujuutta. Taivutusvastuksen heikentyminen elementin keskivaiheilla voi lisätä taipumista.	Lieviin halkeamiin voidaan injektoida epoksia. Onteloiden täyttövalu halkeaman kohdalta voi parantaa laatan leikkauslujuutta.  Pienet yläpinnan positiivisen momentin alueella tai alapinnan negatiivisen momentin alueella olevat halkeamat eivät välttämättä vaadi korjausta.  Jos laatasta on iso halkeama, vaurioitunut osa hylätään ja vaurioitumaton osa elementistä voidaan säilyttää myöhempää käyttöä varten.	
2. Esijännityksen laukaisemisen viivästyisestä aiheutuva kutistuminen	Laukaistaan esijännitys heti kun elementti saavuttanut riittävän vahvuuden, mutta ei vielä jäähtynyt			

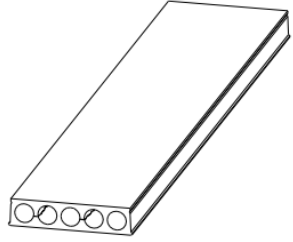
## PITKITTÄISET HALKEAMAT ONTELOKANNAKSEN KOHDALLA

Aiheuttaja	Ennaltaehkäisy	Vaikutukset	Korjaus	Tyypillinen tapaus
<p>A. Virhe valmistuksessa</p> <p>1. Painumia onteloiden päällä</p> <p>a. Liiallinen kosteus betonimassassa</p> <p>b. Liian aikainen lämpökäsittely</p> <p>2. Virheellisestä lämpökäsittelystä ja massan koostumuksesta aiheuva kutistuminen</p> <p>c. Liiallinen kosteus betonimassassa</p> <p>d. Liian nopea kuivuminen</p> <p>e. Liian aikainen lämpökäsittely</p> <p>f. Liian korkea lämpötila lämpökäsittelyn aikana</p> <p>g. Epätasainen lämpökäsittely</p>	<p>1. Estetään painumat onteloiden päällä</p> <p>a. Vähennetään massan vesipitoisuutta</p> <p>b. Myöhäistetään lämpökäsittelyä</p> <p>2. Parannetaan massaa ja lämpökäsittelyä.</p> <p>c. Vähennetään vesipitoisuutta</p> <p>d. Valun jälkeen heti kun mahdollista peitetään elementi. Ääriolosuhteissa ennen peittämistä suihkutetaan jälkihoitoaineella tai vedellä.</p> <p>e. Lykätään lämpökäsittelyn lämmön nousun alkamista</p> <p>f. Lasketaan lämpökäsittelyn lämpötilaa</p> <p>g. Varmistetaan lämpökäsittelyn tasaisuus</p>	<p>Lievä halkeilu ei juuri aiheuta ongelmia käytölle. Mikäli laatta on haljennut koko pituudeltaan, voi kuormien jakaantuminen poikkisuunnassa muuttua, mikäli laatan päälle ei valeta pintabetonia.</p>	<p>Mikäli halkeilun vakavuus estää elementin normaalin käytön, voidaan sen vaurioitumattomat osat käyttää kavennettuna laattana tai lisätä kohteeseen pintabetoni.</p>	

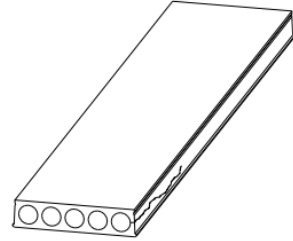
## PITKITTÄISET HALKEAMAT ONTELOIDEN KOHDALLA

Aiheuttaja	Ennaltaehkäisy	Vaikutukset	Korjaus	Tyypillinen tapaus
<p>A. Virhe valmistuksessa</p> <p>1. Poikittainen kutistuminen</p> <p>a. Ylimääräinen kosteus seoksessa</p> <p>b. Liian nopea kuivuminen</p> <p>c. Liian aikainen lämpökäsittely</p> <p>d. Lämpökäsittelyn liian korkea lämpötila</p> <p>e. Erot lämpökäsittelyssä ylä- ja alapinnan välillä</p> <p>2. Epätasainen betonin tiivistyminen</p> <p>3. Esijännitysteräksen epäkeskisyys</p> <p>h. Teräs liikkunut valun aikana</p> <p>i. Virheellinen punosten katkaisutapa</p> <p>4. Laippa liian ohut ontelomuotin liikkumisesta tai virheellisestä asettelusta johtuen.</p> <p>6. Ontelon liian suuri koko</p>	<p>a. Vähennetään seoksen vesimäärää</p> <p>b. Valun jälkeen heti kun mahdollista peitetään elementi. Ääriolosuhteissa ennen peittämistä suihkutetaan jälkihoitoaineella tai vedellä.</p> <p>c. Siirretään lämpökäsittelyä myöhemmäksi.</p> <p>d. Lasketaan lämpökäsittelyn lämpöä</p> <p>e. Korjataan lämpötilat yhdenmukaisiksi.</p> <p>Parannetaan tärytystä</p> <p>Sijoitetaan teräkset tasaisesti</p> <p>h. Estetään teräksen liikkuminen valun aikana</p> <p>i. Leikataan teräkset aloittaen keskeltä ja edeten reunoja kohti</p> <p>Varmistetaan onteloiden oikea sijoittelu</p> <p>Varmistetaan muottien oikea koko</p>	<p>Halkeamat voivat muuttaa ilman pintabetonia olevissa kohteissa kuorman poikittaista jakaantumista.</p> <p>Niillä voi myös olla vaikutusta laattoihin, joissa on aukkoja tai poikittaaisia ulokekuormia.</p>	<p>Aukkojen valaminen umpeen voi paikata halkeamat.</p> <p>Pintabetonia käytettäessä ei halkeamia tarvitse erikseen korjata.</p> <p>Vakavan halkeaman kohdalla toimitaan siten, että vaurioitunut kohta poistetaan ja hylätään ja vaurioitumaton osa elementistä voidaan säilyttää myöhempää käyttöä varten.</p>	
<p>B. Virhe käsittelyssä</p> <p>Epätasainen pinon alusta tai pinon painuminen</p>	<p>Tasataan alusta, pinotaan raskaat laatat alimmaksi ja rajoitetaan pinon korkeutta</p>			

## HALKEAMAT UUMASSA ESIJÄNNITYSPUNOKSEN YLÄPUOLELLA

Aiheuttaja	Ennaltaehkäisy	Vaikutukset	Korjaus	Tyypillinen tapaus
A. Virhe suunnittelussa Liian suuri esijännitysvoima betonipoikkileikkaukseen nähden.	Vähennä uuman leikkausjännitystä. Levennetään uumaa. Lisätään ylös esijännityspunoksia Raudoitetaan uuma Vähennetään esijännityksen voimakkuutta	Halkeamat voivat alentaa leikkauslujuutta.  Elementin leikkaukskapasiteettia alennetaan rikkoutuneiden uumien osalta. Suunnittelijan tulee tarkistaa kantokyvyn riittävyys.	Leikkauslujuus voidaan saada osittain palautettua täyttämällä ontelot niiltä kohdin kuin laatasta on vaurioita.	
B. Virhe valmistuksessa 1. Puutteellinen laukaisulujuus 2. Elementin pohjan tarttumisen muottiin muottien purun aikana 3. Saha ei ole katkaissut laattaa riittävän syvältä. 4. Seos liian märkää tai kuivaa 5. Riittämätön tärytys.	1. Lisätään laukaisulujuutta 2. Puhdistetaan ja öljytään muotin pinta tai varmistetaan kuiva kosketuspinta 3. Leikataan mahdollisimman läheltä esijännityspunoksia ja elementin pohjaa. 4. Muutetaan betonin suhteitusta 5. Parannetaan tärytystä ja tiivistämistä			

## PITKITTÄISET HALKEAMAT ELEMENTIN REUNOISSA

Aiheuttaja	Ennaltaehkäisy	Vaikutukset	Korjaus	Tyypillinen tapaus
A. Virhe suunnittelussa a. Laatta liian ohut kestääkseen esijännityksestä aiheutuvaa painetta b. Esijännityspunosten halkaisija liian suuri laataan paksuuteen nähden. c. Esijännityspunosten sivuittainen liikkuminen valun aikana d. Heikko laukaisulujuus	a. Jos mahdollista, kasvatetaan laataan paksuutta. b. Pienennetään esijännityspunosten halkaisijaa c. Varmistetaan esijännityspunosten paikallapysyminen valun aikana d. Varmistetaan riittävä laukaisulujuus	Halkeamat voivat alentaa leikkauslujuutta.  Arvioidaan elementin leikkauslujuutta ilman haljenneita ontelokannaksia.	Halkeamien korjaustoimenpiteet riippuvat tavoiteltavasta leikkauslujuudesta. Ontelot voidaan täyttää massalla.  Mikäli vauriot ovat keskittyneet tietylle alueelle laatasta, voidaan se poistaa ja hylätä ja laatta muilta osin säilyttää.  Reunakannasten halkeamat täyttyvät laatasta saumattaessa.	
B. Virhe valmistuksessa 1. Betoni ei riittävän tiivistä esijännityspunosten ympärillä 2. Betonikerrokset eivät liittyneet yhteen. 3. Nostokoneiden aiheuttamat vauriot 4. Sivujen katkaisu ei riittävän syvä tai perusteellinen	1. Varmistetaan betonin riittävä tiivistys 2. Estetään valun epäjatkuvuuden syntyminen 3. Käytetään nostopuomia tasaisen noston aikaansaamiseksi. 4. Sahataan elementin läpi asti			

### Liite 3. Testivalun valuohjelma/laadunvalvontapöytäkirja

Vihreällä merkityt laatat ovat uudella reseptillä valettuja. Valujärjestys poikkeaa ohjelman järjestyksestä.

CONSOLIS		VALUOHJELMA / LAADUNVALVONTAPÖYTÄKIRJA										06.04.23 12.54						
PARMA												Sivu 1 / 3 JSUV						
UURAINEN																		
Ohjelma	Laattatyyppi	Punostus	Jännitys	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kpl	Alusta	Valukone	Betoni	Valupäivä		
18231	15P32	9	Jännitys	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kpl	2		C50/60	27.02.2023		
Huomautus											Kpl	Betonipeite	Ter.kork.					
oT palolaattaa											Jännitys	1000			9	Ohjuri nro: _____		

No.	Tilaus	Kuorma	Elementti	Irtokivi	Huom!	Pituus	Leveys	Jonomitta	Kolo	Varasto	Nosto- Yksilö	Ansas lenkit	Korkeus	Paino	Tarkastettu pituus	Tarkastettu leveys	Toimenpide punosluisto
1	102916	41 Av 3	15P32-9-9028	*		9 030	1 200	9 040	0,00	A	477		4,1				
2	102916	42 Av 1	15P32-5X-9015	*		5 620	1 200	14 670	0,00	A	504	4	2,8				
3	23781	257 Bv 3	15P32-9-9007			9 370	1 200	24 050	0,00	D	2334		4,3				
4	23781	257 Bo 3	15P32-9-9007			9 370	1 200	33 430	0,00	D	2335		4,3				
5	23781	257 Bv 2	15P32-9-9009S	*		9 370	1 200	42 810	0,00	D	2339		4,3				
6	23781	257 Bo 2	15P32-9-9009S	*		9 370	1 200	9 380	0,00	D	2333		4,3				
7	23781	257 Bv 1	15P32-9-9009S	*		9 370	1 200	18 760	0,00	D	2340		4,3				
8	23781	257 Bo 1	15P32-9-9009S	*		9 370	1 200	28 140	0,00	D	2346		4,3				
9	23781	256 Cv 3	15P32-5X-9001			2 970	1 200	31 120	0,00	D	2328		1,4				
10	23781	256 Co 2	15P32-5X-9001			2 970	1 200	34 100	0,00	D	2326		1,4				
11	23781	256 Cv 2	15P32-5X-9001			2 970	1 200	37 080	0,00	D	2325		1,4				
12	23781	256 Co 1	15P32-5X-9001			2 970	1 200	40 060	0,00	D	2322		1,4				
13	23781	256 Bo 2	15P32-5X-9004	*		2 970	1 200	43 040	0,00	D	2323		1,3				
14	23781	256 Bv 3	15P32-5X-9002	*		2 970	1 200	46 020	0,00	D	2324		1,2				
15	23781	256 Av 1	15P32-5X-9000	*		2 970	1 200	49 000	0,00		2327		1,2				
16	23781	256 Ao 1	15P32-5X-9003	*		2 970	760	2 980	0,00	D	2316	4	1,2				
17	23781	256 Cv 1	15P32-5X-9001			2 970	1 200	5 960	0,00	D	2321		1,4				

CONSOLIS		VALUOHJELMA / LAADUNVALVONTAPÖYTÄKIRJA										06.04.23 12.54			
PARMA												Sivu 2 / 3 JSUV			
UURAINEN															
Ohjelma	Laattatyyppi	Punostus										Alusta	Valukone	Betoni	Valupäivä
18231	15P32	9										2		C50/60	27.02.2023

No.	Tilaus	Kuorma	Elementti	Huom!	Pituus	Leveys	Jonomitta	Kolo	Varasto	Nosto- Yksilö	Ansas lenkit	Korkeus	Paino	Tarkastettu pituus	Tarkastettu leveys	Toimenpide punosluisto
18	23781	256 Bv 2	15P32-5X-9001		2 970	1 200	8 940	0,00	D	2320		1,4				
19	23781	256 Bo 1	15P32-5X-9001		2 970	1 200	11 920	0,00	D	2319		1,4				
20	23781	256 Bv 1	15P32-5X-9001		2 970	1 200	14 900	0,00	D	2318		1,4				
21	23781	256 Ao 2	15P32-5X-9001		2 970	1 200	17 880	0,00	D	2315		1,4				
22	23781	256 Av 3	15P32-5X-9001		2 970	1 200	20 860	0,00		2317		1,4				

Jonon pituus:	112,45 m	Syvät tulpat:	32 kpl	Ansas:	0 kpl	Koloja:	0,00 kpl	Kav.:	2,97 m
Teoreettinen betoni määrä:	m3	Nostolenkit:	8 kpl			Sahausta:	0,00 m	Reikiä:	11,67 m
		Pasi-lenkki:	3 kpl			SUR:	0,00 kpl	VUR:	0,00 kpl

A Hylätty	1 Punosluisto	8 Harva laita	15 Reklamoitu	80 Kuljetuksessa rikkoutunut
B Merkitty sahattavaksi	2 Pituusmittavirhe	9 Vajjerirepeämä	16 Ns. virhekoodi	81 Otettu sahausaihioksi
C Valettu raakia	3 Kolot väärin	10 Valukatko	18 Pinta lohkeillut	82 Pään halkeama pystyosuudessa
D Varastohukka ja reklam.	4 Paksuustoleranssi	11 Rikk.pet.nost tai vaun.	20 Kivialineksen erottuminen	83 Huono nostoura
E Alennettu punosmäärä	5 Huono betoni	12 Konerikko	23 Muu	
	6 Repeily	13 Varastossa hävinnyt	24 Sahausvirhe	
	7 Kutistumishalk.	14 Varastossa rikkoutunut	25 Suunnittelu	

CONSOLIS		VALUOHJELMA / LAADUNVALVONTAPÖYTÄKIRJA				06.04.23 12.54	
PARMA		nro. 18231	15P32	Punostus 9	27.2.2023	Sivu 3 / 3 JSUV	
UURAINEN							
<b>Jännityksen tarkastusmittaukset:</b>							
vaadittu venymä	tarkastettu venymä	vaadittu voima	tarkastettu voima				
cm	cm	kN	kN				
päästölukemat	vasen punos	keskipunos	oikea punos	kypsyys %			
<b>Hukka valun aikana:</b>							
aloituspalan pituus	lopetuspalan pituus	konerikko (valettu)		huono betoni (valettu)		muu syy (valettu)	
		mm		mm		mm	
		mm		mm		mm	
		mm		mm		mm	
Betoni tilattu betoniasemalta	lopetus hukka (heitetty pois)	konerikko (heitetty pois)		huono betoni (heitetty pois)		muu syy (heitetty pois)	
m3	m3						
<b>Laatasta mitattavat tarkastusmittaukset:</b> (Valusuunta Äänekoskelta Uuraisiin päin.)							
<b>Laatan korkeudet mitattu valun aikana</b>							
Tunnus ja No:	P9007 ID2334		Tunnus ja No:	P9009S ID2333 (uusi res.)		Tunnus ja No:	P9001 ID2319
h1	315	mm	oikea laita	h1	319	mm	oikea laita
h2	313	mm	vasen laita	h2	321	mm	vasen laita
h3		mm		h3		mm	
no	Jännepunosten suojabetonietäisyydet			laatan paksuudet		reunapunosetäisyydet	
1.							
3.							
viim.							
Laatan tunnus		Tunnuslapun paino		Punnittu paino			
Jännitystyö		Valaja		Jännityksen päästö		Työnjohto	
40,5; 41; 41; 41; 41; 40,5; 39,5; 40,5; 40							

**Liite 4. Uuraisten kiviainesten kiviainepakkaantuvuus ja testattujen reseptien kiviainesjakauma (salassa pidettävä)**

## Liite 5. Laattojen poikkileikkausmittausten tulokset

### Testireseptin poikkileikkausmittaus 1

CONSOLIS PARMA		<b>15P32-5X-9001</b>		CE-mark information etc. Measurements fulfil to the requirements of the European Standard EN1168:2005 + A2:2009 concerning the quality requirements of manufactured hollow-core slabs	
<b>HC-slab information</b>					
Casting bed:	4	Factory:	UURAINEN		
Casting program number:	18231	Production hall:	Uurainen, ontelolaatat		
HC-slab ID number:	2326	Casting day:	27.02.2023		
Concrete strength class:	C50/60	Inspection day:	28.02.2023		
Casting machinery:	VALUKONE 320	Inspection person:	Reijo Paananen		
		Approval:			
<b>Cross section measurement</b>					
Lifting edge position (tolerance)	[mm]	43 (-/+ 5/5 )	required (single/average)		
Depth design (tolerance)	(h) [mm]	320 (-/+ 7 )	measured average		
Flange upper thickness (tolerance)	(h <sub>f</sub> ) [mm]	35 (-/+ 10/15 )	39		
Flange bottom thickness (tolerance)	(h <sub>f</sub> ) [mm]	35 (-/+ 10/15 )			
Web thickness edge (tolerance)	(b <sub>w</sub> ) [mm]	42 (-/+ 10/15 )	minimum overall		measured overall
Web thickness middle (tolerance)	(b <sub>w</sub> ) [mm]	55 (-/+ 10/15 )	248 (-/+ 20/5 )		273
			0		

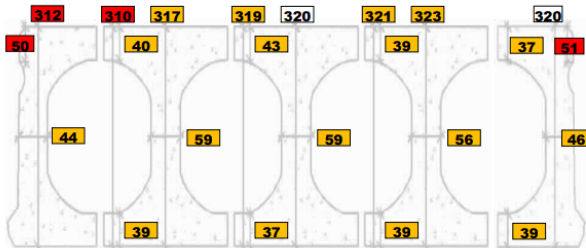
### Testireseptin poikkileikkausmittaus 2

CONSOLIS PARMA		<b>15P32-5X-9001</b>		CE-mark information etc. Measurements fulfil to the requirements of the European Standard EN1168:2005 + A2:2009 concerning the quality requirements of manufactured hollow-core slabs	
<b>HC-slab information</b>					
Casting bed:	4	Factory:	UURAINEN		
Casting program number:	18231	Production hall:	Uurainen, ontelolaatat		
HC-slab ID number:	2319	Casting day:	27.02.2023		
Concrete strength class:	C50/60	Inspection day:	28.02.2023		
Casting machinery:	VALUKONE 320	Inspection person:	Reijo Paananen		
		Approval:			
<b>Cross section measurement</b>					
Lifting edge position (tolerance)	[mm]	43 (-/+ 5/5 )	required (single/average)		
Depth design (tolerance)	(h) [mm]	320 (-/+ 7 )	measured average		
Flange upper thickness (tolerance)	(h <sub>f</sub> ) [mm]	35 (-/+ 10/15 )	40		
Flange bottom thickness (tolerance)	(h <sub>f</sub> ) [mm]	35 (-/+ 10/15 )			
Web thickness edge (tolerance)	(b <sub>w</sub> ) [mm]	42 (-/+ 10/15 )	minimum overall		measured overall
Web thickness middle (tolerance)	(b <sub>w</sub> ) [mm]	55 (-/+ 10/15 )	248 (-/+ 20/5 )		272
			0		

## Vanhan reseptin poikkileikkausmittaus 1

CONSOLIDUS PARMA		<b>15P32-9-9007</b>		CE-mark information etc. Measurements fulfil to the requirements of the European Standard EN1168:2005 + A2:2009 concerning the quality requirements of manufactured hollow-core slabs	
<b>HC-slab information</b>					
Casting bed:	4	Factory:	UURAINEN		
Casting program number:	18231	Production hall:	Uurainen, ontelolaatat		
HC-slab ID number:	2335	Casting day:	27.02.2023		
Concrete strength class:	C50/60	Inspection day:	28.02.2023		
Casting machinery:	VALUKONE 320	Inspection person:	Reijo Paananen		
		Approval:			

## Cross section measurement

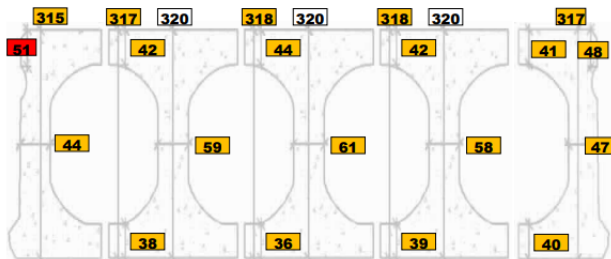


Lifting edge position (tolerance)	[mm]	43 (-/+ 5/5 )		
Depth design (tolerance)	(h) [mm]	320 (-/+ 7 )	required (single/average)	
Flange upper thickness (tolerance)	(h <sub>f</sub> ) [mm]	35 (-/+ 10/15 )	measured average	39
Flange bottom thickness (tolerance)	(h <sub>f</sub> ) [mm]	35 (-/+ 10/15 )		
Web thickness edge (tolerance)	(b <sub>w</sub> ) [mm]	42 (-/+ 10/15 )	minimum overall	248 (-/+ 20/5 )
Web thickness middle (tolerance)	(b <sub>w</sub> ) [mm]	55 (-/+ 10/15 )	measured overall	264
			0	

## Vanhan reseptin poikkileikkausmittaus 2

CONSOLIDUS PARMA		<b>15P32-5X-9001</b>		CE-mark information etc. Measurements fulfil to the requirements of the European Standard EN1168:2005 + A2:2009 concerning the quality requirements of manufactured hollow-core slabs	
<b>HC-slab information</b>					
Casting bed:	4	Factory:	UURAINEN		
Casting program number:	18231	Production hall:	Uurainen, ontelolaatat		
HC-slab ID number:	2315	Casting day:	27.02.2023		
Concrete strength class:	C50/60	Inspection day:	28.02.2023		
Casting machinery:	VALUKONE 320	Inspection person:	Reijo Paananen		
		Approval:			

## Cross section measurement



Lifting edge position (tolerance)	[mm]	43 (-/+ 5/5 )		
Depth design (tolerance)	(h) [mm]	320 (-/+ 7 )	required (single/average)	
Flange upper thickness (tolerance)	(h <sub>f</sub> ) [mm]	35 (-/+ 10/15 )	measured average	40
Flange bottom thickness (tolerance)	(h <sub>f</sub> ) [mm]	35 (-/+ 10/15 )		
Web thickness edge (tolerance)	(b <sub>w</sub> ) [mm]	42 (-/+ 10/15 )	minimum overall	248 (-/+ 20/5 )
Web thickness middle (tolerance)	(b <sub>w</sub> ) [mm]	55 (-/+ 10/15 )	measured overall	269
			0	