

Betonin ominaisuuksien parantaminen hiilidioksidilla

Portfolio työskentelystä tutkimus- ja kehittämishankkeissa

Elli Tykkä

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2024

Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma

TYKKÄ, ELLI:

Betonin ominaisuuksien parantaminen hiilidioksidilla
Portfolio työskentelystä tutkimus- ja kehittämishankkeissa

Opinnäytetyö 70 sivua
Joulukuu 2024

Olen tehnyt opinnäytetyön portfoliomuotoisena ja siihen on kerätty aineistoa tutkimus- ja kehittämishankkeista, joissa olen työskennellyt. Hankkeissa on tutkittu hiilidioksidin vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Tavoitteena on ollut edistää betonirakentamisen hiilineutraaliustavoitteita.

Työhön on kasattu kattava tietoperusta sementistä ja sen ympäristövaikutuksista, hiilidioksidista ja sen talteenotosta sekä betonin hiilidioksidikäsittelyä koskevista aiemmista tutkimuksista. Tietoperustassa on kerrottu oleellinen tieto, jonka lukija tarvitsee seuratakseen työn lopulla esitettyjä tutkimus- ja kehittämishankkeiden kuvauksia.

Työn lopputuloksena on oppimispäiväkirjaosio, jossa olen arvioinut oman osaamiseni kehittymistä. Tätä työtä kirjoittaessani tulin tietoiseksi sekä omista heikkouksistani, että vahvuksistani, ja osaan jatkossa hyödyntää havaintojani.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Masters of engineering (construction)

TYKKÄ, ELLI:

Improving the qualities of concrete with carbon dioxide
Portfolio about working with the research and development projects

Master's thesis 70 pages
December 2024

This thesis is a portfolio in which I have collected material from research and development projects in which I have worked. The projects have studied the effect of carbon dioxide on the properties of concrete. The goal in the projects has been to promote the carbon neutrality goals of concrete construction.

A comprehensive knowledge base on cement and its environmental impact, carbon dioxide and its recovery, as well as previous studies on the carbon dioxide treatment of concrete, has been compiled. The knowledge base contains the essential information that the reader needs to follow the descriptions of research and development projects presented at the end of the work.

The result of the work is a learning diary section in which I have assessed the development of my own competence. As I wrote this work, I became aware of both my own weaknesses and strengths, and I will be able to make use of my observations in the future.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT.....	3
SISÄLLYS.....	4
1 JOHDANTO.....	6
1.1 Tausta.....	6
1.2 Tavoite.....	6
1.3 Suoritus.....	7
2 TIETOPERUSTA.....	8
2.1 Betonin ympäristövaikutukset.....	8
2.2 Sementti.....	9
2.3 Seosaineet.....	12
2.4 Betonin ominaisuudet.....	13
2.5 Betonin karbonatisoituminen.....	17
2.6 Hiilidioksidi.....	19
2.6.1 Hiilidioksidi ilmakehässä.....	19
2.6.2 Hiilidioksidin talteenottomenetelmät.....	20
2.7 Aiemmat tutkimukset aiheesta.....	25
2.7.1 Hiilidioksidi ominaisuuksia parantavana lisäaineena portlandsementtipohjaisessa betonissa.....	26
2.7.2 Kiihdyttävänä lisäaineena käytettävän hiilidioksidin vaikutukset betonin ominaisuuksiin ja kestävyys.....	29
3 KOKOAMISEN PROSESSI JA AINEISTOT.....	32
3.1 Sisällön kasaus.....	32
3.2 Aineisto.....	32
4 OSIEN KUVAUKSET, ANALYYSI JA TULOKSET.....	33
4.1 BECO-hanke.....	33
4.1.1 Tausta ja tarve.....	33
4.1.2 BECO-hankkeen tavoitteet.....	34
4.1.3 BECO-hankkeen resurssit ja sidosryhmät.....	34
4.1.4 BECO-hankkeen tutkimus.....	34
4.1.5 BECO-hankkeen tulokset.....	40
4.2 Behi-hanke.....	44
4.2.1 Behi-hankkeen tavoitteet.....	44
4.2.2 Behi-hankkeen resurssit ja sidosryhmät.....	45
4.2.3 Behi-hankkeen tutkimus.....	45
4.2.4 Behi-hankkeen tulokset.....	49
5 OMAN OSAAMISEN ARVIOINTI.....	56
5.1 Osaamisen kehittyminen.....	56

5.2 Johtopäätökset.....	65
LÄHTEET.....	68

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Ilmastonlämpeneminen ja hiilineutraalius on puhuttanut viime vuosina paljon. Ilmasto lämpenee huolestuttavaa tahtia, sillä maapallolla tuotetaan hiilidioksidia sen varastointikykyä enemmän.

Niin kutsutut kasvihuonekaasut sitovat itseensä auringon lämpöä, jonka seurauksena planeettamme lämpötila nousee. Ilmiön takia muun muassa meren pinta nousee ja biodiversiteetti kapenee, kun lajit eivät ehdi sopeutua ilmastonmuutokseen. Tästä syystä kasvihuonekaasupäästöjä tulisi hillitä, etenkin hiilidioksidin osalta.

Betonirakentaminen on vastuussa suurimmasta hiilidioksidikuormasta, joka aiheutuu ihmisen toiminnasta. Suurin ympäristökuormitus tulee betonin pääraaka-aineen, sementin valmistamisesta (Illikainen, 2019). Betonin ominaispäästöt ovat verrattain pienet, mutta käyttömäärät valtaavat. Betoni on maailman toiseksi eniten käytetty materiaali heti veden jälkeen (GCCA, n.d.).

Olen työskennellyt tutkimus- ja kehittämishankkeissa, joissa pyritään pienentämään betonirakentamisen aiheuttamaa hiilikuormaa. Tässä opinnäytetyössä käyn läpi tekemääni tutkimustyötä.

1.2 Tavoite

Yleisesti betonin hiilijalanjälkeä pienennetään vähentämällä sementin määrää betonin valmistuksessa. Työn tavoitteena on tuoda esille epätavanomainen näkökulma betonin aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiselle. Olen työskennellyt teeman parissa, jossa hiilidioksidilla pienennetään hiilijalanjälkeä. Samalla käyn läpi omaa työskentelyäni aiheen parissa, ja huomioin omat puutteeni, kehityskohteeni sekä onnistumiseni.

Tavoitteenani on tarkastella omaa kehittymistäni analyttisesti. Olen työskennellyt aiheen parissa kahdessa eri TKI-hankkeessa lähes neljä vuotta. Tätä opinnäytetyötä kirjoittaessa minulla on mahdollisuus huomata omat puutteeni, mutta myös nähdä kehittymiseni. Näiden havainnoiminen ja prosessointi on edellytys jatkuvan parantamisen varmistamiseen.

Haluan kehittyä ja kehittää omaa työskentelytapaa tutkimuksen parissa. Vaikka saankin kehitysideoita ja havaitsen poikkeamia työssäni, niin tätä portfoliota kirjoittaessa tulen erityisen tietoiseksi kehityskohteista omassa toiminnassani. Työn jälkeen osaan tarkastella omaa työskentelyäni analyttisemmin. Kehitän osaamistani sekä projektinhallinnassa, että tutkimustyössä.

1.3 Suoritus

Teen työn portfoliomuotoisena. Työn tietoperustan kerään aiemmista tutkimuksista ja monipuolisesti aiheen teemoihin liittyvistä kirjallisuuslähteistä. Olen kirjoittanut aiheen parissa työskennellessäni useita julkaistuja tekstejä, ja lainaan niitä suoraan osassa portfoliotani. Työssä käsittelem kirjallisuustutkimusta soveltuvien osien ja omaa tutkimustyötäni referoiden.

Työn tuloksena kokoon oppimispäiväkirjatyyppisen oman osaamisen arvioinnin. Osiossa pohdin totuudenmukaisesti omaa suoriutumistani.

2 TIETOPERUSTA

2.1 Betonin ympäristövaikutukset

Betoni on maailman eniten käytetty rakennusmateriaali. Se koostuu yksinkertaisimmillaan kiviaineksesta, vedestä ja sementistä. Betonia valmistetaan vuosittain globaalisti 13 miljardia kuutiota (Betoni n.d.). Betonin laaja käyttö tekee siitä ympäristölle kuormittavaa tuottaen 8–9 % vuosittaisista ihmisen aiheuttamista kasvihuonepäästöistä globaalisti (Scientific American n.d.).

Betonin ominaiskasvihuonepäästöt ovat verrattain pieniä (TAULUKKO 1), mutta suuret käyttömäärät tekevät betonista yhden suurimmista kasvihuonepäästöjen aiheuttajasta globaalisti. Esimerkiksi teräs- ja metallituotteiden ominaispäästöt ovat keskimäärin yli 25 kertaa suuremmat, kuin betonituotteilla.

TAULUKKO 1. Eri materiaaliryhmien tuottamia ominaispäästöjä.

materiaali-ryhmä	n	keskiarvo [kgCO ₂ e/kg]	min. [kgCO ₂ e/kg]	max. [kgCO ₂ e/kg]
betonituotteet	79	0,16	0,01	0,35
puutuotteet	13	0,48	0,08	1,20
teräs- ja metallituotteet	19	4,08	0,60	14,00

Betonin pääraaka-aineen, sementin, valmistaminen on kuormittavaa ympäristölle. Sementti valmistetaan polttamalla kalkkikiveä korkeassa lämpötilassa. Kuumentamisen aikana kalkkikivestä vapautuu ilmaan hiilidioksidia, ja lisäksi prosessi vaatii paljon energiaa. Suurin osa tästä energiasta tuotetaan käyttämällä fossiilisia polttoaineita. Yhden sementtiklinkkeritonin valmistamisesta vapautuu noin 700–800 kg hiilidioksidia. Tästä 530 kg vapautuu kalkkikiven kemiallisessa hajoamisessa ja loput energian käytöstä. (Betoni n.d.) Kalkkikiven poltosta vapautuva osuus vastaa noin 70:ää % kokonaispäästöistä (KUVA 1).



KUVA 1. Sementtiklinkkerin valmistuksesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen suhteellinen osuus

Betonin ominaispäästöjen pienentämiseksi on monia eri keinoja. Tehokas tapa on vähentää käytetyn sementin määrää valmistettua betonikuutiota kohden. Sementin osuutta betonin sideaineessa voidaan korvata muilla side- ja seosaineilla. Vaihtoehtoisia sideaineita käytetään kaikissa CEM II-tyypin sementeissä eli portlandseossementeissä.

Seossementissä on portlandsementin lisäksi jotakin vaihtoehtoista sideainetta. Tällä hetkellä vaihtoehtoisena sideaineena käytetään yleisesti terästeollisuuden sivuvirtana saatavaa masuunikuonaa, jonka hiilijalanjälki on laskennallisesti nolla. Masuunikuonan valmistamisesta aiheutuvat kasvihuonepäästöt lasketaan teräksen valmistamisen päästöiksi, joten niitä ei uudelleen lasketa sementin valmistamiselle. Kun osa sementistä on korvattu nollapäästöisellä seosaineella, laskee sementin hiilijalanjälki.

2.2 Sementti

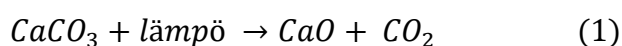
Sementistä puhuttaessa tarkoitetaan yleisimmin portlandsementtiä, ja tässä opinäytetyössä sementillä tarkoitetaan yksinomaan portlandsementtiä. Sementti on

betonin perusraaka-aine, joka sitoo betonin muut komponentit. Betonin kovettuminen alkaa hydrataatioreaktiolla, jossa vesi sitoutuu kemiallisesti ja fysikaalisesti sementtiin muodostaen sementtikiveä.

Sementti valmistetaan kalkkikivestä ja pienistä määristä muita kivilajeja. Kalkkikiven lisäksi sementin valmistamiseen tarvitaan kivilajeja, joissa on piidioksidia, rautaa ja alumiinia. Vaadittavat komponentit kuuluvat maankuoren yleisimpiin alkuaineisiin, joten sementin valmistaminen on materiaaliresurssien puolesta mahdollista lähes missä vaan.

Louhinnan jälkeen kiviaines murskataan ja jauhatetaan. Jauhetuille raaka-aineille määritetään kemiallisen koostumuksen perusteella sopivat seossuhteet, jolla saadaan oikea koostumus sementtiklinkkerille. Raakajauhatuksella, eli jauheen homogoinnilla, varmistetaan seoksen tasalaatuisuus.

Raakajauhatuksen jälkeen seos kuumenee nopeasti sekoittumalla poltosta aiheutuviin savukaasuihin esilämmitysjärjestelmässä. Esikalsinoinnin aikana kalkkikiven kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi (KAAVA 1).



Esikalsinointi on prosessi, jossa raaka-aineita, kuten kalkkikiveä, kuumennetaan korkeaan lämpötilaan ennen varsinaista kalkinpolttua. Tämä esikäsitteily auttaa poistamaan kosteutta ja muita epäpuhtauksia, mikä parantaa lopputuotteen laatua ja tehokkuutta varsinaisessa polttoprosessissa.

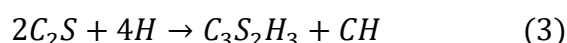
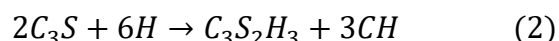
Esikalsinoinnin jälkeen klinkkeri poltetaan kiertoilmaunissa, jonka lämpötila nostetaan noin 1450 °C:seen. Jauhe sulaa osittain polton aikana. Sementtiklinkkeri sintraantuu soraaniseksi kalsiumyhdisteistä, jotka ovat muodostuneet kalkin, piin, alumiinin ja rautayhdisteiden reaktioissa. Sintraantuminen on prosessi, jossa hienojakoiset materiaalit kuumennetaan korkeaan lämpötilaan, mutta ei sulamispisteeseen asti, jotta ne tiivistyvät ja muodostavat kiinteän kappaleen. Muodostuneet reaktiotuotteet ovat aliitti (C₃S), beliitti (C₂S), aluminaatti (C₃A) ja ferriitti (C₄AF). Näiden mineraalien osasuhteita säätämällä pystytään vaikuttamaan sementin ominaisuuksiin.

Rakeinen klinkkeri hienonnetaan kuulamylyssä. Sementtipartikkelien koko vaikuttaa sementin reaktionopeuteen. Mitä hienompaa jauhe on, sitä suurempi ominaispinta-ala yksittäisellä partikkelilla on. Reaktiopinnan kasvu saa sementin reagoimaan veden kanssa nopeammin ja reaktio tuottaa enemmän lämpöä. Myös betonin vedentarve kasvaa, mikä lisää valmiin betonin taipumusta halkeiluun kuitistuman myötä.

Hienonnuksen yhteydessä sementtiin lisätään kipsiä, jotta betonimassalle saadaan pidempi työstöaika. C_3A reaktio veden kanssa on todella nopea, ja betonin sitoutuminen alkaa välittömästi. Kipsiä lisäämällä reaktioita hillitään. Vaihtoehtoiset sideaineet voidaan lisätä sementtiin joko jauhatusvaiheessa, tai vasta sen jälkeen. (Betoniyhdistys n.d.)

Sementin hydrataatio

Sementin ja veden välistä reaktiota kutsutaan hydrataatioksi. Vesi sitoutuu fyysisesti ja kemiallisesti sementtiin muodostaen hydrataatiotuotteita, jotka antavat betonille sen ominaisen lujuuden. Sementtipartikkelien pinnalla käynnistyy aliitin (KAAVA 2) ja beliitin (KAAVA 3) reaktiot, joiden tuotteena muodostuu kalsiumsilikaattihydraattigeeliä (C-S-H-geeli), joka sitoo betonin komponentit toisiinsa.



jossa	C on	CaO
	S on	SiO ₂
	H on	H ₂ O

Hydrataatiossa sementtahiukkasten pinnoilla käynnistyvät kemialliset reaktiot, jolloin muodostuu sementtigeeliksi (C-S-H -geeli) kutsuttava massa, joka sitoo hydratoituneet sementtahiukkaset kiinni toisiinsa ja betonin kiviainekseen. Sementin mineraalien ominaisuudet ja määrät vaikuttavat hydrataation nopeuteen ja lujuuskehitykseen.

Ensimmäisinä reagoivat klinkkerin aluminaattiyhdisteet C_3A ja C_4AF . Reaktio on lähes välitön veden päästessä kosketuksiin sementin kanssa, ja reaktionopeuden hidastamiseksi sementin jauhatuksen yhteydessä lisätään kipsiä sementtiin. Kipsi hidastaa aluminaatin reaktiota ja antaa betonille työstöaikaa.

2.3 Seosaineet

Sementistä voidaan korvata osa vaihtoehtoisilla sideaineilla. Yleisesti käytössä olevia vaihtoehtoisia sideaineita ovat granuloitu masuunikuona, lentotuhka ja silika. Sideainekoostumuksella pystytään vaikuttamaan betonin ominaisuuksiin.

Masuunikuonaa syntyy raakaraudan valmistuksen sivutuotteena. Masuunikuonalla on piilevät hydrauliset ominaisuudet, jotka heräävät kalsiumhydroksidin vaikutuksesta. Hydraulisten ominaisuuksien aktivoituessa, masuunikuona kehittää lujuutta sementin tapaan. Masuunikuonan lujuudenkehitys on tosin hitaampaa, kuin sementillä. Lisäksi masuunikuonaa saa käyttää vain rajoitetusti sementin korvaamiseen Suomessa (SFS 7022).

Lentotuhkaa syntyy kivihiilen poltosta voimalaitoksissa. Se on pozzolaani, joka erotetaan savukaasuista. Pozzolaani on materiaali, joka reagoi kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattigeeliä. Tätä muodostuu myös sementin hydrataatiotuotteena. Lentotuhka toimii sideaineena, mutta sitä voidaan käyttää myös korvaamaan kiviaineksen hienorakeisinta osuutta.

Silika erotetaan ferropiin ja piin valmistuksessa syntyvistä savukaasuista. Se on erittäin hienojakoinen pozzolaani, jolla saadaan lisättyä huomattavasti betonin lujuutta. Se vaikuttaa parantavasti myös betonin kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiviyyttä ja vedenpitävyyttä.

Vaihtoehtoiset sideaineet lasketaan nollapäästöisiksi betoniteollisuudessa, sillä niiden päästöt on laskettu jo alkuperäisen tuotteen tai materiaalin valmistamiseen. Etenkin masuunikuonaa käytetään paljon yleisesti käytössä olevissa portlandseossementeissä hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Masuunikuona onkin hyvä

vaihtoehtoinen sideaine, mutta sen saatavuudessa tulee tulevaisuudessa olemaan ongelmia terästeollisuuden valmistustavan muuttuessa (SSAB 2022). Lisäksi masuunikuona sopii vain tiettyihin rakenteisiin ja kohteisiin käytettäväksi suurina määrinä.

2.4 Betonin ominaisuudet

Betonin ominaisuuksia testataan sekä tuoreesta massasta, että kovettuneesta betonista. Tuoreen massan ominaisuuksia on tärkeää testata, jotta voidaan varmistua suhteituksen, eli betonireseptin luomisen, onnistumisesta. Suihteituksessa määritetään betonilta haluttuja ominaisuuksia, kuten työstettävyyttä ja lopulujuutta.

Tuoreesta betonimassasta testataan työstettävyyden arvioinnissa painuma- tai leviämätestausta. Massasta määritetään lisäksi ilmamäärä, tiheys ja lämpötila. Myös massan koossapysyvyyttä arvioidaan. Tuoreen massan testit suoritetaan Suomessa standardisarjan SFS-EN 12350 *Tuoreen betonin testaus* mukaan. Laadunvarmistuksen näkökulmasta on olennaista tietää betonin ominaisuuksia jo ennen sen kovettumista.

Painuma mitataan standardin SFS-EN 12350-2 menetelmän mukaisesti. Menetelmässä tuore betoni tiivistetään päistään avonaisen, katkaistun kartion muotoiseen muottiin. Muotti nostetaan kohtisuorassa pois betonin päältä, ja betonin annetaan painua painovoimaisesti. Muotin korkeuden ja kokoonpainuneen koekappaleen korkeuden erotus mitataan, ja tulos on betonin painuma.

Painuma pyöristetään lähimpään kymmeneen milliin, ja ilmoitetaan painumaluokkana S:

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| • S1, jäykkä | painuma 10...40 mm |
| • S2, muottiin valettava | painuma 50...90 mm |
| • S3, vetelä | painuma 100...150 mm |
| • S4, erittäin vetelä | painuma 160...210 mm |
| • S5, erittäin notkea | painuma \geq 220 mm |

Betonin painumaluokka valitaan sen käyttökohteen ja vaadittujen ominaisuuksien perusteella. Painumaluokka määrittää, kuinka helposti betonia voidaan käsitellä ja muotoilla valun aikana. Painumaluokan valintaan vaikuttaa rakenteen tyyppi ja vaatimukset.

Leviämä mitataan standardisarjan osan 5 mukaan. Määrittämällä betonin leviämä, saadaan selville betonin kyky täyttää valumuotti ilman tiivistämistä. Leviämää testataankin pääasiassa itsetiivistyvistä betonista, jota ei tiivistetä muottiin täryttämällä. Mittaus tapahtuu leviämäpöydän päällä: päistään avoin, katkaistun kartion muotoinen muotti täytetään betonimassalla, joka sullotaan muottiin (KUVA 2). Muotti poistetaan koekappaleen päältä, ja leviämäpöytää nostetaan ja annetaan sen pudota vapaasti 15 kertaa. Tärähdys aiheuttaa koekappaleeseen muodonmuutoksen. Betoni leviää pöydälle, ja testin tulos on keskiarvo koekappaleen suurimmasta halkaisijasta kahteen suuntaan mitattuna.



KUVA 2. Leviämäpöytä ja -muotti.

Tulos pyöristetään lähimpään kymmeneen millimetriin, ja se ilmoitetaan leviämäluokkana F:

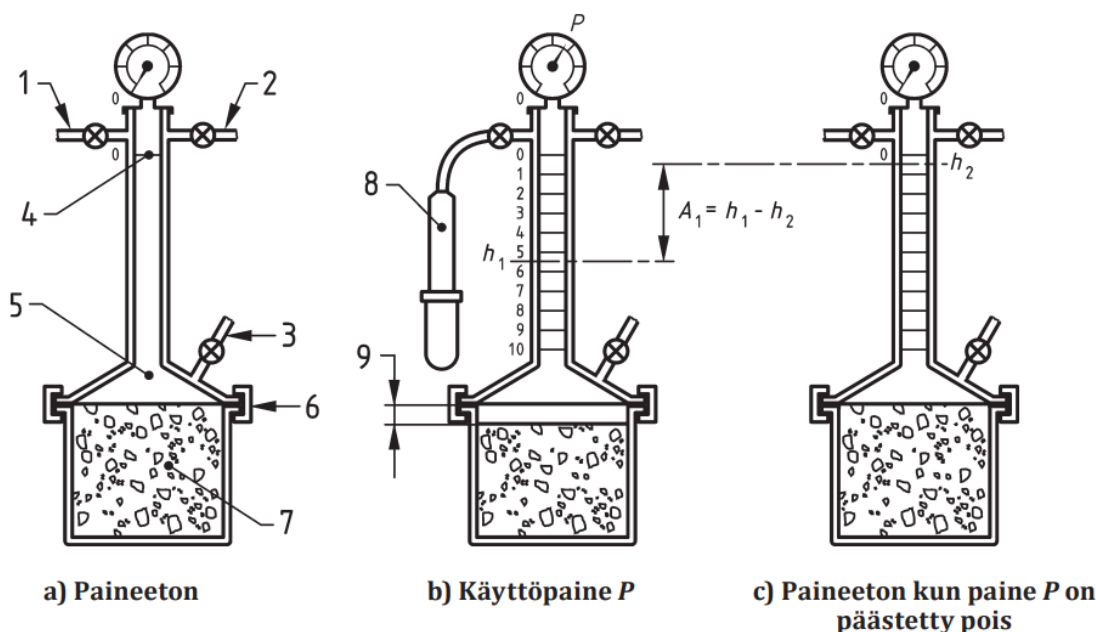
- F1, hyvin jäykkä leviämä 340...410 mm
- F2, jäykkä leviämä 410...480 mm
- F3, kohtalaisen notkea leviämä 480...550 mm
- F4, notkea leviämä 550...620 mm
- F5, erittäin notkea leviämä 620...700 mm
- F6, erittäin notkea leviämä > 700 mm

Leviämän mittauksessa huomioidaan myös betonin koossapysyvyyttä. Mikäli betonimassasta testin aikana erottuu karkeaa kiviainesta tai vettä, betoni ei välttämättä ole koossapysyvää. Tämä voi vaikuttaa negatiivisesti betonin laatuun ja kestävyys, sillä erottuminen voi johtaa epätasaisuuksiin ja heikentää rakenteen lujuutta.

Ilmamäärän voi mitata tuoreesta betonista standardin SFS-EN 12350-7 mukaan joko vesipatsas- tai painemittarimenetelmällä. Säänkestävä betoni tulee olla huokostettu, joten on tärkeää jo ennen valua tarkastaa, että betonissa on riittävästi ilmaa pakkasenkestävyyttä ajatellen. Huokostus lisää myös betonin työstettävyyttä.

Kumpikin mittaustapa perustuu paineeseen, joka nostaa betonissa olevan ilman betonin pinnalle. Ilmamäärämittarin säiliö täytetään betonilla, ja betoni tiivistetään. Mittarin kansi asetetaan paikalleen ja mittaus suoritetaan.

Vesipatsasmenetelmässä laite täytetään vedellä (KUVA 3). Vedenpinta nostetaan pystyputkessa alkutasolle ilmahanan ollessa auki. Ilmahana suljetaan, ja paine nostetaan käyttöpaineeseen ilmapumpulla. Mittaputken lukema merkitään muistiin, ja paine vapautetaan laitteesta pois. Betonista pintaan noussut ilma pääsee pois laitteesta. Mittaputken lukema luetaan uudelleen, ja lukemien erotus on betonin ilmamäärä.



KUVA 3. Betonin ilmamäärän mittaus vesipatsasmenetelmällä (SFS-EN 12350-7).

Painemittarimenetelmä on toimintaperiaatteeltaan melko samanlainen. Mittarissa ei ole erillistä vesiputkea, mutta vesi lisätään mittarin sisään kannen ja betonimassan pinnan väliin. Veden lisäyksen jälkeen laitteen ilmanat suljetaan, ja laitteeseen pumpataan painetta. Betonin sisältämä ilma nousee pintaan, jonka jälkeen paine vapautetaan. Manometri osoittaa betonin ilmamäärän.

Tuoreen betonimassan **tiheyden** saa helposti mitattua ilmamäärämittauksen yhteydessä standardin SFS-EN 12350-6 mukaisesti. Kun ilmamäärämittarin säiliön tilavuus on tunnettu, tiivistetystä betonista määritetään sen massa ennen ilmamäärämittausta. Ilmamäärämittari ja sen sisältämä betoni punnitaan, jonka jälkeen säiliön massa vähennetään punnitustuloksesta. Betonin massa jaetaan säiliön tilavuudella, jolloin tulokseksi saadaan betonimassan tiheys yksikössä kg/m^3 . Tulos ilmoitetaan pyöristettynä lähimpään kymmeneen kilogrammaan kuutiolle.

Lämpötilan mittaaminen tuoreesta betonimassasta antaa tärkeää tietoa betonista. Betonin kovettuminen perustuu sementin ja veden välisiin kemiallisiin reaktioihin, jotka tuottavat lämpöä. Lämpötilan mittaaminen auttaa seuraamaan näiden reaktioiden etenemistä ja varmistamaan, että betoni saavuttaa halutun lujuuden.

Betonin lujuudenkehitys riippuu voimakkaasti lämpötilasta. Korkeampi lämpötila nopeuttaa betonin kovettumista, kun taas matalampi lämpötila hidastaa sitä. Tämä vaikuttaa suoraan rakenteen aikatauluun ja turvallisuuteen.

Alhaisissa lämpötiloissa tuore betoni voi jäätyä ennen kuin se saavuttaa riittävän lujuuden kestääkseen jäätyksen aiheuttamat rasitukset. Liian korkea lämpötila tai nopeat lämpötilan muutokset voivat aiheuttaa betonin halkeilua ja lujuuskatoa. Lämpötilan seuranta auttaa hallitsemaan näitä riskejä ja varmistamaan rakenteen kestävyys.

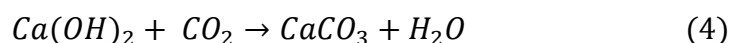
Kovettuneen betonin tärkein ominaisuus on sen lujuus. Lujuus määrittää betonin kyvyn kestää erilaisia kuormituksia ja rasituksia, kuten puristusta, vetoa ja taivutusta. Tämä ominaisuus on ratkaiseva rakenteen turvallisuuden ja kestävyys kannalta.

Puristuslujuus on betonin lujuusominaisuuksista merkittävin. Se kertoo betonin kyvystä vastustaa puristavaa voimaa ja se määritetään standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti kuormittamalla betonia murtumiseen asti. Puristuslujuus ilmoitetaan megapascalina (MPa), ja se lasketaan puristusvoiman suhteena kuormituspinta-alaan (N/mm^2).

Betonin **vetolujuus** on noin kymmenesosan sen puristuslujuudesta. Vetolujuus kertoo betonin kyvystä vastustaa vastakkaisiin suuntiin vetävää voimaa ja se määritetään vetämällä betonista koekappaletta sen päistä murtumiseen asti standardin SFS 5445 mukaisesti. Vetolujuus ilmoitetaan megapascalina, ja se lasketaan vetovoiman suhteena kuormituspinta-alaan (N/mm^2).

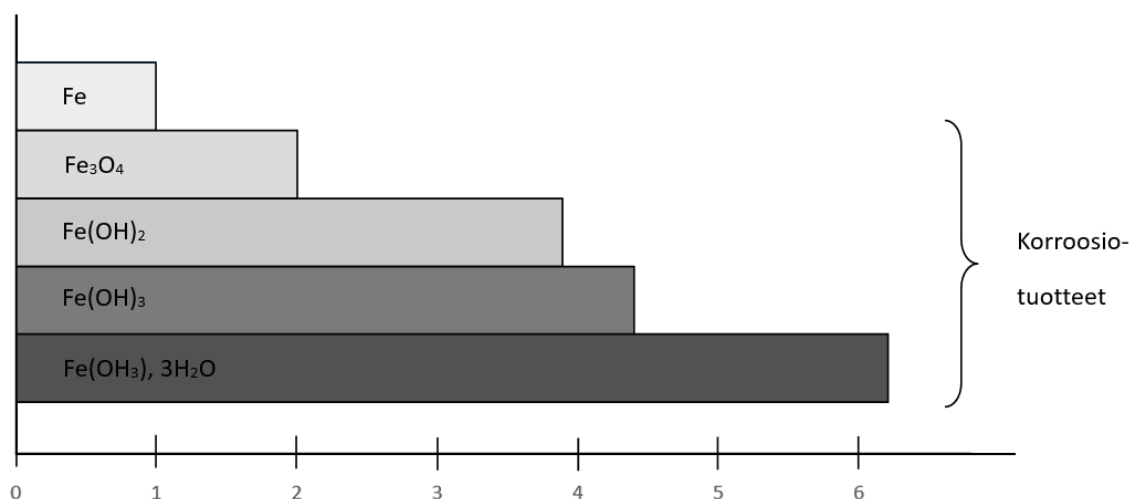
2.5 Betonin karbonatisoituminen

Betonissa tapahtuu karbonatisoitumista koko sen elinkaaren ajan. Tämä tekee betonista hiilinielun. Betoni karbonatisoituu, kun sen sisältämä kalsiumhydroksidi reagoi hiilidioksidin kanssa (KAAVA 4). Reaktiotuotteina muodostuu kalsiumkarbonaattia ja vettä:



Karbonatisoituminen on pitkälle edenneenä haitallinen betonirakenteille. Karbonatisoitunut betoni menettää alkalisuuttaan eli emäksisyyttään, joka suojaa betoniteräksiä korroosiolta. Ilmakehässä olevan hiilidioksidin reagoiessa betonin kalsiumhydroksidin kanssa, karbonatisoitumisrintama etenee betonin pinnasta syvemmälle rakenteeseen. Kun se on edennyt betonin teräsvahvikkeisiin asti, on teräksillä suuri potentiaali ruostua.

Raudan ruostuessa muodostuu korroosiotuotteita, joiden tilavuus on kuusinkertainen verrattuna raudan tilavuuteen (KUVA 4). Tilavuudenmuutos aiheuttaa betoniin sisäisiä jännitteitä, jotka hajottavat betonirakenteen.



KUVA 4. Raudan korroosiotuotteiden tilavuus verrattuna raudan tilavuuteen

Karbonatisoitumisreaktio tapahtuu myös silloin, kun hiilidioksidia lisätään tuoreeseen betonimassaan. Massaan muodostuu kalsiumkarbonaatteja, mutta ilmiö ei ole kovettuvalla betonilla tai sen toiminnalla haitallinen. Tuoreen betonimassan pH laskee hetkellisesti, mutta nousee tavanomaiselle tasolle betonin mikrorakenteen kypsyessä (Fu, X. 2024). Kun normaalissa karbonatisoitumisessa käytännössä kaikki hiilidioksidille altistuvat kalsiumhydraatit ja kalsiumsilikaatit reagoivat muodostaen neutraalia kalsiumkarbonaattia, varhaisessa karbonatisoitumisessa vain minimaalinen osa vapaasta kalkista neutraloituu.

2.6 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on kaasu, jota esiintyy ilmakehässä. Se on väritön ja hajuton kaasu, joka muodostuu hapestä ja hiilestä. Hiilidioksidi on ilmastoa lämmittävä, sillä se absorboi voimakkaasti infrapunasäteilyä. Kun ilmakehään tulleet auringonsäteet heijastuvat Maan pinnasta poistuakseen planeetalta, ne imeytyvät hiilidioksidiin ja jäävät lämmittämään ilmastoa.

Hiilidioksidi on myös välttämätön elinehto elämälle, jonka tunnemme. Kasvit tarvitsevat hiilidioksidia yhteyttämiseen ja se on edellytys myös muiden auringonvaloa hyödyntävien autotrofien elintoiminnoille. Lisäksi ilmakehän hiilidioksidi pitää maapallon lämpötilan elinkelpoisena. Jos hiilidioksidia ei olisi ilmakehässä, maapallon luontainen kasvihuoneilmiö olisi liian heikko pitämään globaalia pintalämpötilaa plussan puolella. (Tykkä 2023a.)

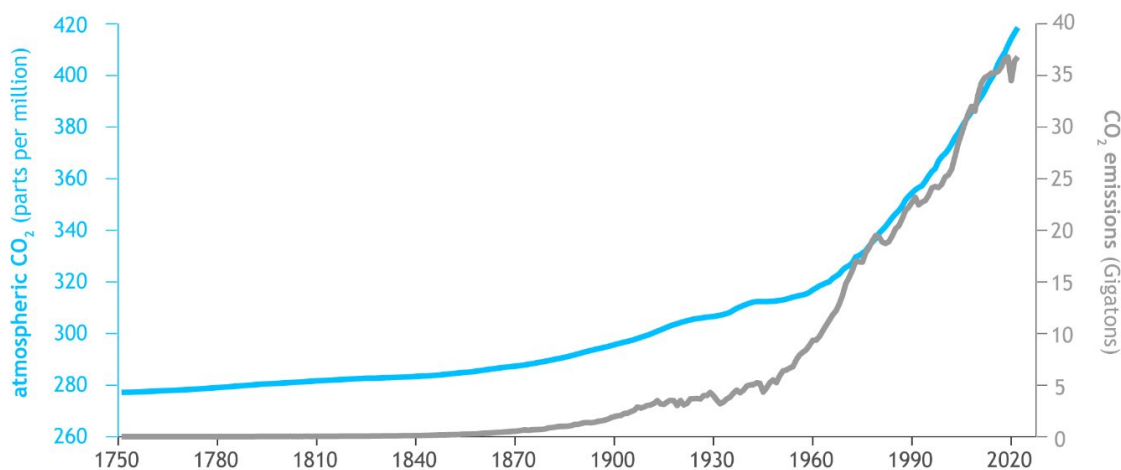
2.6.1 Hiilidioksidi ilmakehässä

Ihmisen toiminta ja teollisuuden päästöt eivät ole ainoa hiilidioksidin lähde. Hiilidioksidia vapautuu ilmakehään kaikesta elämästä, esimerkiksi eliöiden hengityksestä, orgaanisten aineiden mätänemisestä, tulivuoren purkauksista ja kuumista lähteistä. (Tykkä 2023a.)

Maapallolla olisi kyky sitoa takaisin luonnollisesti vapautunut hiili. Ympäristöä kuormittavaa on nykyihmisen elintaso. Merkittävin hiilidioksidipäästöjen lähde on fossiilisten polttoaineiden polttaminen. Niitä käyttävissä voimaloissa tuotetaan maailmanlaajuisesti suurin osa sähköstä. Myös muut ihmisen toimet lisäävät ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Näistä merkittäviä ovat mm. rakentaminen, teollisuus ja liikenne. Betonirakentaminen tuottaa kasvihuonekaasupäästöjä sementin valmistamisen takia sekä poltettavan kalsiumkarbonaatin, mutta myös fossiilisten polttoaineiden käytön takia. Jos ihminen ei toiminnallaan aiheuttaisi hiilidioksidipäästöjä, maapallon oma ekosysteemi riittäisi pitämään hiilidioksidipitoisuuden optimaalisena. (Tykkä 2023a.)

Hiilen kierrolla tarkoitetaan kaasumaisen hiilidioksidin jatkuvaa liikkumista maapallon hiilivarantojen välillä. Sen voi jakaa hitaaseen ja nopeaan kiertoon. Hidas kierto tarkoittaa prosesseja, jotka ajallisesti tarkasteltuna tapahtuvat 100–200 miljoonan vuoden aikana. Nopea kierto puolestaan käsitetään joka vuosi tapahtuvana. Periaate molemmissa on sama: hiiltä sitoutuu, jonka jälkeen se taas vapautuu ilmakehään. Maapallolla pystyi pitämään hiilidioksidipitoisuuden sopivana ennen teollistumista. (Tykkä 2023a.)

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on vaihdellut luontaisesti eri aikakausina. Ennen teollistumista se oli noin 0,028 %, eli 280 miljoonasosaa (ppm) ilmakehän kaasuista (KUVA 5). Tällä hetkellä se on 417 ppm. Pitoisuus on siis noussut lähes puolella. On selvää, että hiilidioksidin määrän lisääntyminen aiheuttaa ilmastonlämpenemistä. Vähemmän tunnustettu tosiasia on, että vaihtelua hiilidioksidin määrässä on ollut aina: esimerkiksi 100 miljoona vuotta sitten liitukaudella pitoisuus on nykytutkimuksen valossa ollut jopa 2 000 ppm. Tuolloin maapallon keskilämpötila oli 5°C–10°C lämpimämpi ja merien pinnat 50–100 metriä korkeammalla, kuin nykyhetkessä. Nyky-yhteiskunta ei pärjäisi vastaavien olosuhteiden vallitessa. (Tykkä 2023a.)



KUVA 5. Maapallon hiilidioksidipitoisuus ja -päästöt 1750-luvulta lähtien (Lindsey 2024).

2.6.2 Hiilidioksidin talteenottomenetelmät

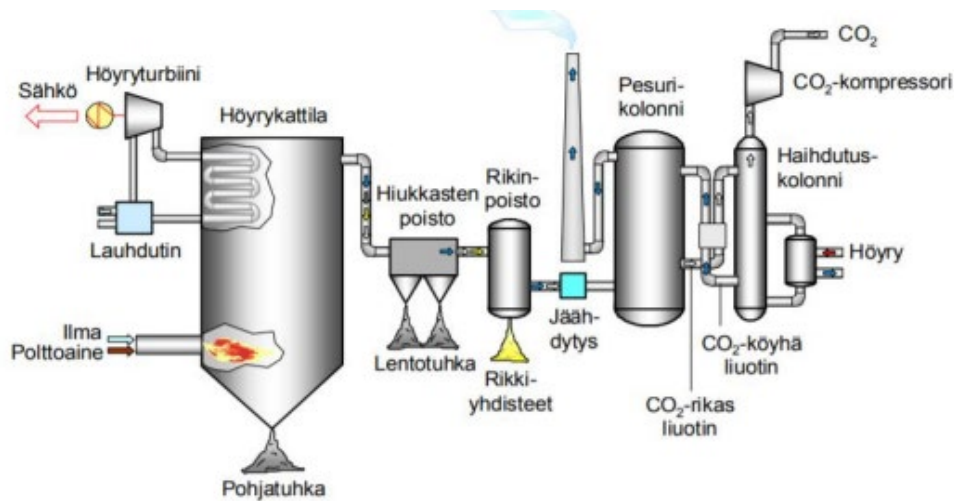
Suomessa hiilidioksidin talteenotto on vähäistä, mutta sen uskotaan tulevaisuudessa tehostuvan. Kolme yleisintä tapaa erottaa hiilidioksidi savukaasuista ovat

absorptio, adsorptio ja membraanisuodatus. Teollisuudessa yleisimmin käytetty menetelmä on kemiallinen absorptio. Absorptiota on käytetty yli 60 vuotta. Adsorptiossa ja membraanisuodatuksessa on potentiaalia kaupalliseen toimintaan. (Syrjälä 2020.)

Kemiallinen absorptio

Amiinipesussa, eli kemiallisessa absorptiossa hiilidioksidi reagoi liuottimen kanssa muodostaen yhdisteitä, joista on mahdollista kerätä hiilidioksidi talteen. Monoetanoliamiini (MEA) on laajasti käytetty amiinipesuliuotin. Sillä on hyvät absorptio-ominaisuudet ja edulliset käyttökustannukset. Amiinipesulla jopa 90 % savukaasujen sisältämästä hiilidioksidista on mahdollista saada kerättyä puhtaana talteen. (Syrjälä 2020.)

Kuvassa 6 esitetään amiinipesun toimintaperiaate. Kaasu puhdistetaan hiukkasista ja rikki- ja typpiyhdisteistä. Puhdistuksen jälkeen savukaasu jäähdytetään 40–50 °C:een. Jäähdytetty savukaasu johdetaan pesurikolonnein. Kolonnein johdetaan liuotinta, joka reagoi hiilidioksidin kanssa muodostaen erilaisia yhdisteitä. Pesurikolonnissa puhdistettu savukaasu johdetaan pois kolonnista, ja hiilidioksidin liuottanut liuotin johdetaan kolonnin pohjasta lämmönvaihtimen kautta haihdutuskolonnein. Lämmönvaihtimessa liuotin lämmitetään. Lämmitys saa aikaan päinvastaisen reaktion, jossa hiilidioksidi ja vesihöyry erottuu liuottimesta. Erottamisen jälkeen höyry ja hiilidioksidi lauhdutetaan erilleen, ja tuotteena saadaan puhdasta hiilidioksidia. Puhdas hiilidioksidi paineistetaan kuljetusta ja varastointia varten. Höyry johdetaan takaisin kolonnein ja myös puhdistettu liuotin kierrätetään takaisin käyttöön. (Syrjälä 2020.)



KUVA 6. Prosessikuvaus amiinipesusta (Syrjälä 2020)

Amiinipesu ei ole ongelmaton, vaikka sitä on käytetty pitkään. Amiinin regeneroinnin energiantensiivisyys ja liuottimen hajoamishäviöiden takia kustannukset kasvavat. Amiinien ympäristöriskejä pitää tutkia vielä lisää, koska hajotessaan amiinin hajoamistuotteita pääsee ilmakehään ja ympäristöön. Amiinien hajoamistuotteet nostavat syöpäriskiä vapautuessaan, mikä saattaa olla riski laitoksen työntekijöille. (Meng et al. 2023.)

Fysikaalinen absorptio

Hiilidioksidi absorboituu fysikaalisessa absorptiossa fyysisesti liuottimeen Henryn lain mukaisesti. Lain mukaan nesteeseen liukenevan kaasun määrä on suoraan riippuvainen kaasun osapaineesta, mutta se toimii vain suhteellisen laimeissa seoksissa. Prosesseissa kemiallisten reaktioiden sijaan käytetään orgaanisia liuottimia fyysisesti absorboimaan hiilidioksidi. Fysikaaliset liuottimet soveltuvat parhaiten maakaasutuotantoon, koska fysikaaliset liuottimet toimivat paremmin korkean paineen sovelluksissa. (Myllyniemi 2021.)

Rectisol-prosessia on käytetty pääasiassa synteetikaasu-, vety- ja kaupunkikaasuvirtojen käsittelyyn. Prosessi poistaa suurimman osan epäpuhtauksista käyttäen metanolia liuottimena. Rectisol-prosessi soveltuu parhaiten tilanteisiin, joissa etaania ja raskaampia komponentteja on rajallisesti. Prosessi on käytössä laajasti maakaasuteollisuudessa hiilidioksidin poistamiseksi. (Olajire 2010.)

Metanoli ei vaahtoudu ja sekoittuu täysin veteen vähentäen siten häviöitä. Korkea lämpö- ja kemiallinen vakaus ovat liuottimen etuja. Rektisolín kompleksinen järjestelmä ja liuottimen jäähdytys aiheuttavat korkeat pääoma- ja käyttökustannukset. (Olajire 2010.)

Fluor-liuotinprosessi on yksi houkuttelevimmista prosesseista kaasun käsitteilyyn syöttökaasun paineen ollessa korkea. Prosessi perustuu propyleenikarbonaattiin, joka on fysikaalinen liuotin. Fluoriliuottimella on korkea liukoisuus hiilidioksidiin, eikä prosessi tarvitse lisävettä. Toiminta periaate on yksinkertainen ja prosessissa käsitellään kuivaa kaasua. Fluoriliuotin on kallista, mikä nostaa kustannustasoa. (Olajire 2010.)

Fluor-liuotinprosessi on kehitetty 1950-luvun jälkipuolella. Prosessissa hiilidioksidi erotetaan absorptiotornissa maakaasusta, joka on korkeapaineinen kontaktori. Reagentti palautetaan paineenmuutosten avulla paisuntahaihdutussäiliössä ja maakaasuhäviön pienentämiseksi ulostulokaasu kierrätetään takaisin systeemiin. (Myllyniemi 2021.)

Vesiabsorptioon on myönnetty patentti Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoululle. Se perustuu fysikaaliseen absorptioon. Prosessin periaate on rikastaa raakakaasun sisältämä hiilidioksidi veteen ja saada mahdollisimman puhdasta hiilidioksidia prosessista ulos. Raakakaasun sisältämä hiilidioksidipitoisuus vaikuttaa lopullisen tuotekaasun puhtauteen. (Korppi 2019.)

Raakakaasu johdetaan pumppaussäiliön kautta ylös jälkidesorptiokolonniin vastavirtaan veden kanssa. Noustessaan täytekappaleiden läpi virtaava kaasu ottaa mukaansa veteen liuenutta hiilidioksidia. Jälkidesorptiokolonnista kaasu johdetaan absorptiokolonniin, missä kaasu nousee kuplina säiliössä ylöspäin imeytyen vastakkaiseen suuntaan virtaavaan veteen. Imeytymätön kaasu, joka sisältää enimmäkseen typpeä, happea ja muita epäpuhtauksia johdetaan absorptiokolonnin yläpäästä pois. Kaasutettu vesi kulkee absorptiokolonnista esidesorptiokolonniin, jossa veteen liuenneista kaasuista poistetaan epäpuhtauksia, typpeä ja happea. Tämän vaiheen jälkeen kaasut lähtevät jälkidesorptiokolonniin, missä ne sekoittuvat raakakaasuun. Veteen liuenut hiilidioksidi lähtee esidesorptiosta desorptioon, missä se otetaan vedestä talteen. (Korppi 2019.)

Adsorptio

Adsorptiomekanismeja on kolme erilaista: PSA (pressure swing adsorption), VSA (vacuum swing adsorption) ja TSA (temperature swing adsorption). Prosessin tehokkuutta voidaan säätää adsorption syklin kestoa muuttamalla. Adsorptiosykliä lyhentämällä voidaan sorbentin massaa pienentää, jolloin saadaan kustannuksia pienennyttyä. Tällä myös vältetään sorbentin kuumenemistä. Sorbentin kuumenemisen seurauksena adsorptiokapasiteetti laskee ja sen mukana myös prosessin tehokkuus laskee. (Syrjälä 2020.)

PSA perustuu voimakkaaseen paineen laskuun, jolla hiilidioksidi saadaan sorbentista irtoamaan. Hiilidioksidi saadaan adsorboitumaan sorbenttiin korkeassa paineessa. Paineen laskun jälkeen sorbentti voidaan kierrättää takaisin prosessiin. (Syrjälä 2020.)

VSA:ssa adsorptio suoritetaan tyhjiön avulla. Hiilidioksidin adsorboituminen tapahtuu ympäristön paineessa, toisin kuin PSA:ssa. Sorbentin regenerointi tapahtuu alle 1 bar:in paineessa. (Syrjälä 2020.)

TSA perustuu lämpötilan muutoksessa tapahtuvaan adsorptioon. Hiilidioksidi adsorboituu matalassa lämpötilassa sorbenttiin. Regenerointi tapahtuu nostamalla lämpöä tyypillisesti 30–50 astetta. (Syrjälä 2020.)

Fysikaalinen adsorptio soveltuu parhaiten hiilidioksidintalteenottoon matalissa lämpötiloissa ja korkeissa paineissa. Soveltuvuus polton jälkeiseen talteenottoon on huono verrattuna kemialliseen absorptioon. (Yu et al. 2012.)

Membraanisuodatus

Membraanisuodatus on suhteellisen uusi tekniikka. Tekniikka perustuu kalvoihin, joilla voidaan erottaa hiilidioksidi ja muita kaasuja kaasuvirrasta. Membraania voidaan käyttää savukaasun puhdistukseen, maakaasun rikastukseen, hiilidioksidin poistoon vedystä tai typen poistoon hapesta. (Olajire 2010.)

Kalvot ovat puoliläpäiseviä ja niitä on eri toimintaperiaatteilla toimivia, kuten liuosdiffuusio, adsorptio-diffuusio, molekyyli-seula ja ionikuljetus. Kalvoja valmistetaan

orgaanisina ja epäorgaanisina. Kalvot voivat olla huokoisia tai ei huokoisia. Kalvon suorituskykyä määrittää kaksi ominaisuutta: kaasun virtaus kalvon läpi ja selektiivisyys. (Olajire 2010.)

Membraanikalvoilla on useita etuja verrattuna absorptio- ja adsorptioprosesseihin. Etuihin kuuluu, ettei regenerointienergiaa tarvita, yksinkertaiset modulaariset järjestelmät ja jätevirtoja ei synny. Kalvojen huonoja puolia ovat suhteellisen matalat erotusasteet, minkä takia prosessi vaatii useita vaiheita tai kierrätystä. Kalvojen haittapuoliin kuuluu myös herkkyys rikkiyhdisteille ja muille hivenaineille. (Olajire 2010.)

Yleisin sovellus polymeeriselle eli **orgaaniselle membraanikalvolle** on liuos-diffuusiomekanismi, muita sovelluksia ovat molekyylliseula ja Knudsenin diffuusiomekanismit. Polymeerikalvot luokitellaan kumimaisiin ja lasimaisiin kalvoihin. (Olajire 2010.)

Kalvon läpäisevyys on kääntäen verrannollinen erottamiseen tarvittavaan kalvoalueeseen. Korkea läpäisevyys alentaa kustannuksia, mutta erittäin läpäisevällä kalvolla on huono selektiivisyys ja päinvastoin. Useimmissa kalvoissa on tehty kompromissi selektiivisyyden ja läpäisevyyden välillä. (Olajire 2010.)

Epäorgaaniset kalvot jakautuvat kahteen pääluokkaan: huokoiset ja ei huokoiset kalvot. Yleensä vedyn erittäin selektiiviseen erottamiseen käytetään ei huokoisia kalvoja. Näissä kuljetus tapahtuu palladiumseosten kautta tai happi kulkee perovskiittijärjestelmien kautta. Huokoiset epäorgaaniset kalvot ovat halvempia mutta vähemmän selektiivisiä. Näissä huokoinen pintakerros on huokoisen metallin tai keraamisen alustan päällä, millä saadaan mekaanista lujuutta. (Olajire 2010.)

2.7 Aiemmat tutkimukset aiheesta

Tuoreen betonin altistamista hiilidioksidille on tutkittu jo pitkään. Hiilidioksidin käyttö tuoreen betonin parantamiseksi on innovatiivinen menetelmä, joka on saanut yhä enemmän huomiota viime vuosikymmeninä. Tutkimukset ovat osoitta-

neet, että tuoreen betonin altistaminen hiilidioksidille voi parantaa betonin ominaisuuksia ja nopeuttaa sen lujudenkehitystä. Tämä prosessi voi lisätä betonin puristuslujuutta, vähentää veden imeytymistä ja parantaa sen kestävyyttä kloridien läpäisyä vastaan.

Erityisesti varhaisen karbonatisoinnin on havaittu parantavan betonin mekaanisia ominaisuuksia ja kestävyyttä, mikä tekee siitä houkuttelevan menetelmän betonin valmistuksessa ja käytössä. Näiden tutkimusten tulokset viittaavat siihen, että hiilidioksidin hyödyntäminen betonin valmistusprosessissa voi edistää kestävästä kehitystä ja vähentää rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeä.

2.7.1 Hiilidioksidi ominaisuuksia parantavana lisäaineena portlandsementtipohjaisessa betonissa

Qian et al. (2018) on tutkinut hiilidioksidin vaikutusta portlandsementtipohjaisessa betonissa. Tutkimuksessa hiilidioksidia käytettiin betonin lisäaineena, jolla pyrittiin partamaan betonin ominaisuuksia.

Tutkimuksessa käytettiin kaksivaiheista sekoittamista. Ensimmäisessä vaiheessa valmistettiin liete kalsiumrikkaasta sideaineesta ja vedestä. Tutkimuksessa valmistettiin lietettä kahdella eri pitoisuudella vedestä ja sammutetusta kalkista. Pitoisuudet olivat 1 ja 3 %. Portlandsementin lisäksi kalsiumia sisältää yleisimmin käytetyt vaihtoehtoiset sideaineet, kuten masuunikuona ja lentotuhka.

Valmistettuun kalsiumpohjaiseen lietteeseen lisättiin hiilidioksidi kaasumaisena. Tämän jälkeen tulee sekoittamisen toinen vaihe, jossa muut betonin osa-aineet lisätään lietteen sekaan ja betoni voidaan valaa. Koska kalsiumkarbonaatti muodostuu jo sekoittamisen ensimmäisessä vaiheessa, on tutkimusryhmä nimennyt menetelmän betonin esikarbonatisoinniksi.

Tutkimuksessa valmistettiin laastimassasta koekappaleita, joista osalle oli tehty esikarbonatisointi ja osalle ei. Esikarbonatisoidut kappaleet kehittivät puristuslujuutta jopa 16 % enemmän kontrollikappaleisiin verrattuna. Vetolujuus parani esikarbonatisoinnin avulla noin 7 %.

Valmistetuille massoille tehtiin sitoutumisaikaa määrittävä Vicat-neulatesti. Testillä määritetään alkuvaiheen sitoutumisaika, eli aika, jolloin sementtipasta muuttuu nestemäisestä plastiseksi. Lopullinen sitoutumisaika taas on aika, jolloin sementtipasta menettää plastisuutensa ja muuttuu kiinteäksi. Neulalla pistetään sementtipastaan, ja sen katsotaan olevan kiinteää siinä vaiheessa, kun neulasta jää vain kevyt jälki pastan pintaan.

Esikarbonointi vaikutti sekä alkuvaiheen, että lopulliseen sitoutumiseen kiihdyttävästi. Suuremmalla kalkkipitoisuudella sitoutuminen oli nopeampaa, kuin pienemällä pitoisuudella (TAULUKKO 2).

TAULUKKO 2. Esikarbonaation vaikutus sementin sitoutumisaikaan (Qian 2018)

Table 3. Set times of cement pastes produced with/without using pre-carbonation method.

Mix	Pre-carbonation	Set times (min)	
		initial set	final set
Control	NO	135	201
1% Slaked lime	YES	126	185
3% Slaked lime	YES	109	160

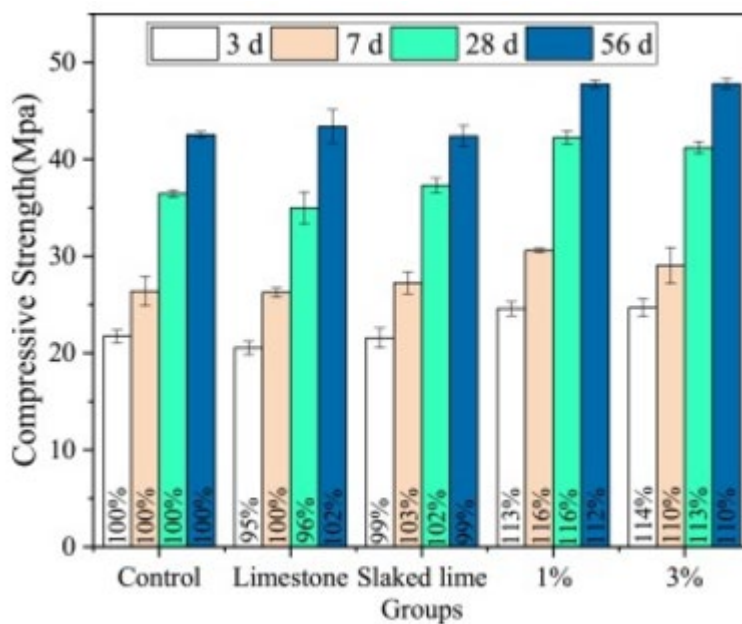
Massojen hydrataatioenergiaa määritettiin isotermisellä kalorimetrillä. Kalorimetri mittaa vapautuvaa lämpöenergiaa sementtipastasta ja piirtää kuvaajan koordinaatistoon watteina sementtigrammaa kohden ajan funktiona. Kalorimetria osoitti, että esikarbonaatio paransi huomattavasti sementin hydrataatiota tuottaen enemmän energiaa.

Kovettuneesta laastista jauhettiin näytteet röntgendiffraktioanalyysiin ja termogravimetriseen analyysiin. Ensimmäisellä määritetään kiteisiä hydrataatiotuotteita, ja jälkimmäisellä määritetään yhdisteitä. Morfologiaa ja mikrorakennetta tutkittiin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Mikroskoopilla ja röntgendiffraktiolla havaittiin muodostuneita kalsiumkarbonaattipartikkeleita.

Betonin esikarbonatisointi vaikuttaa hydratoituneen sementin mineralogiaan kolmella tapaa: ettringiittiä muodostuu enemmän ja se on vakaampaa; monokarboonaattia muodostuu enemmän ja monosulfaatti vähenee tai poistuu kokonaan. Kaikki kolme ilmiötä vaikuttaa suotuisasti betonin lujuuteen. Termogravimetrillä pystyttiin todentamaan röntgendiffraktiolöydökset.

Mekaanisista ominaisuuksista testattiin puristuslujuuden lisäksi taivutuslujuutta ja kuivumiskutistumaa. Kuivumiskutistumaa tutkittiin, sillä on tiedossa, että matalampi kalsium-piisuhde voi aiheuttaa suurempaa kutistumaa. Kalisumsilikaatti-hydraattigeelin muodostumiseen vaadittavaa kalsiumia kuluu karbonatisoitumisreaktiossa, joten on oletettavaa, että kalsiumin ja piin suhde pienenee.

Tutkimuksen parhaat puristuslujuustulokset 56 vuorokauden iässä saatiin betonilla, jolle oli tehty esikarbonatisointi 3 % kalkkilietteellä. Tarkkoja arvoja ei tutkimusraportissa esitetä, mutta kuvaajasta 7 voi nähdä selkeän eron.



KUVA 7. Esikarbonatisoinnin vaikutus betonin lujuuteen (Qian 2018)

Myös taivutuslujuus parani tutkimuksen koekappaleissa esikarbonatisoinnin myötä. Seitsemän vuorokauden iässä parannusta saatiin noin 8 % ja 29 vuorokauden iässä 5 % kontrollibetoniin nähden. Koekappaleiden taivutuslujuus 28 vuorokauden koestusiässä oli hieman alle 6 MPa.

Kuivumiskutistuma ei oletuksista poiketen ollut suurempaa kuin kontrollikappaleilla. Alkuvaiheessa se oli jopa vähäisempää. Olettamus tutkimusryhmällä oli, että hiilidioksidin muodostamat reaktiotuotteet ovat tilavuudeltaan tavanomaisesti muodostuvia suurempia, jolloin koekappale ei kutistu.

Johtopäätöksenä parantuneisiin lujuusominaisuuksiin tutkimusryhmä esitti parantuneen hydrataation. Kalsiumkarbonaatti toimii kiteytymisalustana, joka muodostaa vettä. Muodostunut vesi tarjoaa sementtipartikkeleille mahdollisuuden täydellisempään hydrataatioon.

2.7.2 Kiihdyttävänä lisäaineena käytettävän hiilidioksidin vaikutukset betonin ominaisuuksiin ja kestävyteen

Monkman et al. (2016) sekoittivat hiilidioksidin tuoreen betonimassan sekaan betoniautoon. Hiilidioksidi sekoitettiin massan sekaan kaasuna ja hiilidioksidijäänä. Tutkittavana oli viisi erilaista betonia: referenssimassa; referenssimassa, jossa oli käytetty tavanomaista kiihdytintä ja kolme eri hiilidioksidipitoisuuksilla käsiteltyä betonimassaa. Hiilidioksidin määrät olivat 0,05; 0,15 ja 0,30 painoprosenttia sideaineen painosta.

Suhteitetun betonin tavoitelujuus oli 35 MPa ja siinä oli masuunikuonaa 20 % sideaineen osuudesta. Betoneista testattiin puristuslujuuden lisäksi kloridintunkeuma ja -kestävyys, pakkasenkestävyys ja kutistuma.

Tutkimuksessa hiilidioksidia lisättiin betonimassan sekaan ajanjaksojen 60, 90 ja 120 sekuntia aikana. Betoniauto oli pysähdyksissä lisäämisen ajan, eikä hiilidioksidia sekoitettu massan sekaan. Tutkimuksen betoneissa käytettiin lisäaineena hiilidioksidin tai kiihdyttimen lisäksi hidastavaa notkistinta, tehonotkistinta ja huokostinta (TAULUKKO 3.)

TAULUKKO 3. Tutkimuksessa käytetyt lisäaineet (Monkman 2016)

Table 1. Overview of the admixture loadings in the batches tested during the trial.

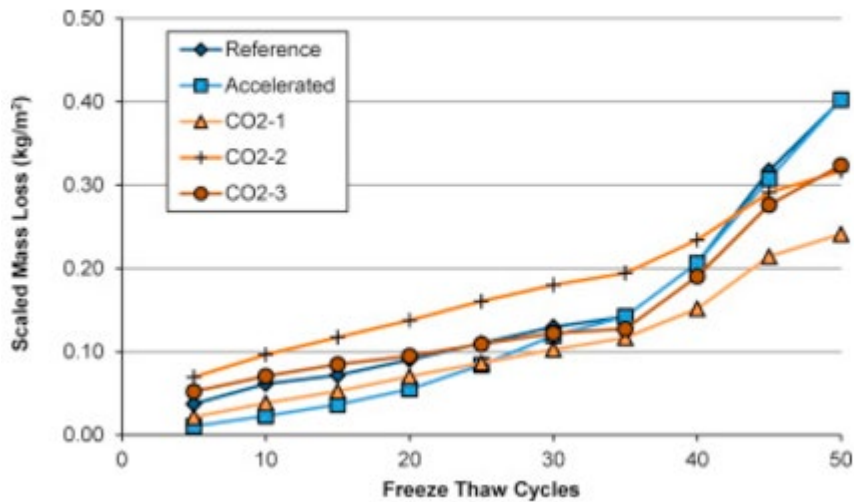
Admixture	Accelerated	Reference	CO2-1	CO2-2	CO2-3
Retarding WR (ml/100kgcm)	125	220	220	125	125
HRWR (ml/100kgcm)	175	200	175	175	175
Air entrainer (ml/100kgcm)	23	23	23	25	25
Set accelerator (ml/100kgcm)	1000	-	-	-	-
CO ₂ (%/cement)	-	-	0.05%	0.15%	0.30%

Betonimassoista testattiin tuoreen massan ominaisuuksia, tehtiin kalorimetriaanalyysi, sekä valettiin koekappaleet puristuslujuuden sekä kestävyysominaisuuksien testausta varten. Hiilidioksidilla käsitellyistä massoista tehtiin tuoreen massan testit ennen ja jälkeen hiilidioksidin lisäyksen.

Kovettuneesta betonista tutkittiin puristuslujuuden lisäksi kloridien tunkeutumista, paisuntaa, pakkasenkestoa, kutistumista ja huokosparametrien määrittämistä. Kutistuma oli vain hieman suurempaa hiilidioksidilla käsitellyissä betoneissa. Vaikutus ei ollut negatiivinen myöskään kloridien tunkeutumisen tai paisumisen osalta.

Pakkasenkestoon hiilidioksidilla oli positiivinen vaikutus (KUVA 8). Betoni, jossa oli vähiten hiilidioksidia, vähensi pakkasvaurion aiheuttamaa pintarapautumaa 40 % verrattuna betoneihin, joissa ei ollut hiilidioksidia.

The data from the salt scaling testing are presented in Fig. 4.



KUVA 8. Pakkasvaurion aiheuttama pintarapautuma (Monkman 2016)

Hiilidioksidin todettiin kiihdyttävän sitoutumisreaktioita, mutta ei samassa laajuudessa, kuin tavanomaisen kiihdyttimen. Paras tulos kiihdyttimenä käytetyllä hiilidioksidilla oli tapauksessa, jossa hiilidioksidia oli annosteltu betonimassaan 0,15 painoprosenttia sideaineen painosta.

Puristuslujuuden osalta tavanomaisesti kiihdytetty betoni oli 9 % lujempaa, kuin referenssibetoni yhden päivän koestusiässä. Hiilidioksidilla kiihdytetyistä massoista parhaiten varhaislujuutta kehitti betoni, johon oli lisätty hiilidioksidia 0,05 painoprosenttia sideaineen painosta. Tämä betoni oli kehittänyt lujuutta 14 % referenssibetonia enemmän. Puristuslujuuden todettiin kehittyvän vähemmän, mitä enemmän hiilidioksidia oli lisätty koestusiästä riippumatta.

3 KOKOAMISEN PROSESSI JA AINEISTOT

3.1 Sisällön kasaus

Työn sisältö on kasattu pitkälti jo aiemmin keräämästäni ja luomastani tiedosta. Olen työskennellyt useamman vuoden jäljempänä esitettävien hankkeiden parissa, joissa tiedonhaku on ollut oleellinen osa. Olen myös luonut paljon uutta tietoa tutkimushankkeissa työskennellessäni.

Sisältö on ollut siis olemassa jo ennen tämän työn kirjoittamista, ja olen sitä soveltuvien osin käyttänyt sisällön kasaukseen. Sisältöön on kasattu tarpeellinen tieto, jotta kokonaisuus on hahmotettavissa.

3.2 Aineisto

Aineisto koostuu kahdesta osasta, jotka on koottu kahdesta eri projektista. Olen työskennellyt näissä kahdessa tutkimus- ja kehityshankkeessa eri nimikkeillä. Kummassakin projektissa on tutkittu betonin altistamista hiilidioksidille. Tavoitteena on ollut parantaa betonin ominaisuuksia, ja edistää sen hiilineutraaliutta.

Kummankin hankkeen päärahoittaja on ollut Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR), ja hankkeiden toteuttaja on ollut Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Hankkeiden tulokset ovat olleet kiinnostavia, ja ne on noteerattu laajamittaisesti. Ensimmäinen tutkimus- ja kehittämishanke palkittiin Kymenlaakson liiton toimesta merkittävästä hanketyöstä *Kestävää kasvua ja työtä 2014–2020 rakennerahasto-ohjelmakaudella*.

4 OSIEN KUVAUKSET, ANALYYSI JA TULOKSET

4.1 BECO-hanke

BECO – betonin rooli hiilineutraalissa yhteiskunnassa oli Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun hallinnoima TKI-hanke. Hanke rahoitettiin Euroopan aluekehitysrahastosta. Hankkeen toteutusajankohta oli 2/2022–8/2023. Toimin BECO-hankkeessa laboratorioinsinöörin nimikkeellä koko hankkeen keston ajan.

Hankkeessa kehitettiin hiilidioksidin hyötykäyttöä betonirakentamisen näkökulmasta. Siinä vertailtiin hiilidioksidille altistetun ja standardinmukaisen betonin ominaisuuksia. Hanke toteutettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kymi-Labs-tutkimusyksikössä

4.1.1 Tausta ja tarve

Hankkeen tarve oli jo hankkeen hakemisen aikoihin vuonna 2021 ilmeinen: ilmastolämpeneminen on puhuttanut jo vuosia. Hankkeen suunnittelun aikoihin alkoi betonialalla nousemaan puheenaiheeksi hiilidioksidin hyödyntäminen betonirakentamisessa. Hankkeen toteuttajaorganisaatiossa osattiin reagoida jopa vähän etupainoisesti tilanteeseen, ja hanke päätettiin toteuttaa.

BECO-hankkeen päätavoitteena oli edistää rakennetun ympäristön ja erityisesti betonirakentamisen vähähiilisyden kehittymistä. Tutkimuksen tavoitteena oli parantaa betonin lujuusominaisuuksia sitomalla siihen hiilidioksidia. Tämä edistäisi betonirakentamisen hiilijalanjäljen pienentämistä kahdella tavalla: hiilidioksidin talteenoton ja hyötykäytön lisäksi sementin määrää betonissa voitaisiin vähentää. Mitä vähemmän sementtiä tarvitsee betonissa käyttää, sitä vähemmän sementtiä tarvitsee valmistaa.

Hankkeen tuloksilla tavoiteltiin mahdollisuuksia vaikuttaa betonirakentamisen hiilijalanjälkeen. Hiilineutraaliutta tavoitellaan kunnallisella, valtakunnallisella ja jopa EU-tasolla. Jotta tavoitteeseen voidaan päästä, merkitsevät pienetkin teot. Koska betonirakentamisen volyyymi on suurta, pienikin ominaispäästösäästö vaikuttaa isossa kuvassa.

4.1.2 BECO-hankkeen tavoitteet

Hankkeen tavoitteena oli luoda betonin hiilidioksidikäsittelystä uutta tietoa, jota voisi hyödyntää kaupallisesti. Tavoitteena oli tutkia hiilidioksidin vaikutusta tuoreen ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin.

BECO-hankkeessa edistettiin rakennetun ympäristön ja erityisesti betonirakentamisen vähähiilisyden kehittymistä. Samalla hanke pyrki edistämään sekä Suomen että Kymenlaakson hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamista.

4.1.3 BECO-hankkeen resurssit ja sidosryhmät

Hankkeen laboratoriotutkimukset suoritettiin KymiLabsin betonilaboratoriossa. Toimin itse suuressa roolissa betonimassojen suunnittelussa, valmistamisessa, sekä lopulta kovettuneen betonin testauksessa.

Lisäksi hankkeessa työskenteli vain projektipäällikkö. Projektipäällikkö vastasi hallinnollisista työtehtävistä, ja minun vastuullani oli tutkimukseen liittyvä käytännön työ. Laadin tutkimussuunnitelman ja toteutin tutkimuksen sen mukaisesti.

Betonialan asiantuntemusta hankkeen tutkimukseen ja sen ohjaamiseen sain ohjausryhmään kuuluvilta edustajilta. Edustajia oli Lujabetoni Oy:stä ja Consolis Parma Oy:stä. Konsulttina toimi TkT Risto Mannonen.

4.1.4 BECO-hankkeen tutkimus

Tutkimuksen alussa tehtiin kirjallisuuskatsaus. Kävin läpi suuren määrän tietoa, jota on tuotettu aiheen tutkimisen parissa ympäri maailmaa. Etsin aiheesta tieteellisiä artikkeleita, joista poimin omassa tutkimuksessani hyödynnettävissä olevaa tietoa.

Tietoperustan keräämisen jälkeen aloitin tutkimisen käytännössä. Alussa oli kaksi erilaista tutkimuslinjaa: valetun ja muotista puretun koekappaleen altistaminen hiilidioksidille ja hiilidioksidin lisäys tuoreeseen betonimassaan. Ensin mainittua

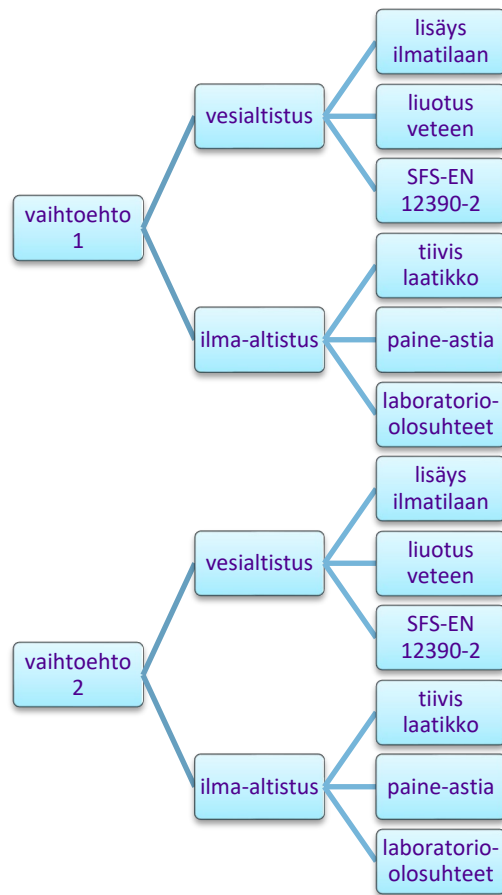
lähdettiin toteuttamaan käytännössä, sillä siitä oli enemmän jo tutkittua tietoa saatavilla.

Betonin hiilidioksidikovetusta on jo aiemmin tutkittu altistamalla valmiita, muotista purettuja betonikappaleita hiilidioksidille säilytysolosuhteessa, jossa on korkea hiilidioksidipitoisuus ja korkea paine. Tällä tutkimusmenetelmällä on saatu kansainvälisestikin tuloksia siitä, että betonin lujuusominaisuudet paranevat. Suomessa tutkimusta on tehnyt muun muassa VTT (Mäkikouri 2019).

Kovettuneen betonin altistaminen hiilidioksidille

Ensimmäisellä tutkimuslinjalla valmistettiin vain vähäisesti koekappaleita. Muotipurkulujuuden saavuttaneet koekappaleet altistettiin hiilidioksidille erilaisissa olosuhteissa. Olosuhteina oli vesialtistus ja ilma-altistus.

Koekappaleet valmistettiin valamalla betonia standardin SFS-EN 206 periaatteiden mukaisesti. Kappaleet valmistettiin standardia SFS-EN 12390-2 noudattaen. Hiilidioksidille altistettavat kappaleet siirrettiin muotista purun jälkeen vertailtaviin säilytysolosuhteisiin, joissa oli hiilidioksidia eri muuttujilla (KUVA 9).



KUVA 9. Hierarkiakuvaaja hiilidioksidialtistuksen olosuhteista keskenään vertailtavilla betoneilla.

Ongelmaksi osoittautui valmistetun betonin resepti. Koekappaleiden hiilidioksidialtistus tulisi aloittaa varhaisen lujittumisen aikana, mutta tutkimuksen kappaleet oli mahdollista poistaa muotista ehjänä vasta valua seuraavana päivänä. Käytössä olleella reseptillä oli siis mahdotonta aloittaa hiilidioksidikövetus riittävän ajoissa aiempien tutkimustulosten valossa, jotta siitä olisi merkittävää hyötyä.

Osa koekappaleista säilytettiin muotista purkamisen jälkeen 48 tuntia stabiilissa kahden barin paineessa hiilidioksidipitoisuuden ollessa lähes 100 %. Osa kappaleista oli laboratorio-olosuhteisiin (20 ± 2 °C, RH 65 ± 5 %) sijoitetussa tiiviissä muovilaatikossa, johon syötettiin hiilidioksidia tietyin väliajoin laatikon kanteen tehtyjen läpivientien kautta. Hiilidioksidia syötettiin yhden vuorokauden ajan koekappaleiden sijoittamisesta lähtien. Tämän jälkeen kappaleet siirrettiin vesisäilytykseen aina koestukseen asti. Koekappaleita säilytettiin myös +20 °C vedessä,

johon liuotettiin hiilidioksidia jatkuvalla syötöllä 48 tunnin ajan. Vertailussa oli mukana myös täysin standardin SFS-EN 12390-2 mukaisesti säilytettyjä koekappaleita ja kappaleita, jotka säilytettiin laboratorio-olosuhteissa.

Hiilidioksidialtistuksen jälkeen kappaleista määritettiin niiden puristuslujuus. Koska luonnollinen karbonatisoituminen on betonin teräksille haitallista, koettiin tutkimuksen tässä vaiheessa tarpeelliseksi määrittää koekappaleista myös karbonatisoitumissyvyys.

Oletettua oli, että etenkin paineenalainen hiilidioksidikövetus tuottaisi koekappaleisiin syvemmän karbonatisoitumisrintaman. Suurin vaikutus paineella ja suurella hiilidioksidipitoisuudella olikin juuri betonin karbonatisoitumiseen. Yllättäen karbonatisoituminen ei kuitenkaan edennyt totuttuun tapaan rintamana, vaan havaittavissa oli rintaman sisäpuolella olevia karbonatisoituneita kohtia (KUVA 10).



KUVA 10. Betonin karbonatisoituminen paineessa hiilidioksidille altistetun koekappaleen poikkileikkauspinnalla. Kuvassa karbonatisoitunut osa näkyy vaaleana ja karbonatisoitumaton purppuranpunaisena.

Hiilidioksidi oli tunkeutunut koekappaleen sisään siten, ettei se ollut reagoinut taiseisesti edeten betonin kanssa. Muissa hiilidioksidikövetuksen variaatioissa ei

karbonatisoitumista ollut tapahtunut, vaan betoni oli pysynyt pinnastaankin samalla tavoin emäksisenä, kuin standardin mukaisesti säilytettynä. Karbonatisoitumissyvyys määritettiin standardin SFS-EN 14630 ohjeella fenoliftaleiini-liuosta indikaattorina käyttäen.

Tuoreen betonin altistus hiilidioksidille

Hankkeen päätutkimuslinjaksi valittiin hiilidioksidin sekoittaminen tuoreen massan sekaan. Kaasumuotoisen hiilidioksidin syöttö osoittautui kuitenkin heti tutkimuksen alussa haasteeksi. Kun hiilidioksidikaasua lisättiin sekoittimeen, betonimassa menetti notkeutensa ja oli käytännössä käyttökelvotonta. Annostellun kaasun määrä vaikutti suoraan betonin viskositeettiin: mitä suuremman määrän kaasua sekoitti massaan, sitä jäykemmäksi betonimassa muuttui. Tämä oli tunnettu asia (Monkman 2016), mutta reaktion voimakkuus oli yllättävä.

Kun hydrataation varhaisessa vaiheessa hiilidioksidi reagoi kalsiumhydroksidin kanssa, muodostuu reaktiotuotteena kalsiumkarbonaattia totutun kalsiumsilikaattihydraattigeelin sijaan. Tämä korvaa sementtigeelin ja aiheuttaa massan kuivumista. Hiilidioksidin määrän kasvaessa kiteytymisalustana toimivia kalsiumkarbonaatteja muodostuu runsaasti, jolloin kalsiumoksidin ja veden välinen eksoterminen reaktio kiihtyy, lämpötila nousee ja hydrataatioreaktio häiriintyy.

Koesarjoja tehtiin eri variaatioilla sideaineen osasuhteita muuttaen. Sementin korvaamiseen käytettiin masuunikuonaa enimmillään 30 % sideaineen määrästä. Kuonaa käytettiin kaikissa tutkimuksen massoissa, joten sen ominaisuuksia ei ole vertailtu pelkkää sementtiä sideaineena sisältävään massaan. Vesi-sideainesuhde oli läpi tutkimuksen 0,50–0,52. Massan työstettävyyttä saatiin aikaiseksi käyttämällä lisäaineena tehonotkistinta. Tavoitenotkeus massalle oli notkeusluokka S4. Täyttääkseen tavoitteen, betonin painuman tulee olla 160–210 mm.

Notkistimen annosteluajankohta osoittautuikin kriittiseksi yksityiskohdaksi hiilidioksidia lisättäessä. Kun hiilidioksidikaasu syötettiin ennen notkistimen annostelua, saatiin massa notkistettua myös kaasua käytettäessä. Massa jäykistyi kaasun reagoidessa, mutta notkistui lisäaineen annostelun jälkeen. Tämän havainnon myötä betonista saatiin työstettävää ja käyttökelpoista. Tavoitenotkeuteen ei

kuitenkaan varhaisessa vaiheessa karbonatisoidulla massalla päästy. Referenssimassa täytti vaatimuksen erästä riippumatta.

Betonimassaan sekoitettavan hiilidioksidin määrä pidettiin maltillisena. Kun hiilidioksidia lisättiin 3 % käytetyn sementin painosta, massa notkistui vielä lisääineella. Mutta kun painoprosentti on lähellä kymmentä, reaktio nopeutuu voimakkaasti ja tuore betoni alkaa kehittää lämpöä runsaasti. Massa muuttuu kuivaksi ja muodostaa paakkuja, eikä sitä enää saa notkistettua.

Sitoutuneen hiilidioksidin määrää ei tutkimuksessa validoitu, mutta oletamus oman kontrolloinnin perusteella oli sitoutumisen olevan lähes täydellistä. Tasosekoitin, jossa massoja valmistettiin, oli muokattu tarpeita palvelevaksi. Siinä oli umpinainen kansi reiällä, josta sai lisättyä veden ja lisäaineet. Sekoittimeen oli tehty kolme läpivientä takaiskuventtiileille, joiden kautta kaasu johdettiin sekoittimeen (KUVA 11). Hiilidioksidipitoisuuden nousemista tarkasteltiin tasosekoittimen sisäpuolella massan sekoituksen aikana. Pitoisuuden pysyessä vakiona voitiin olettaa kaasun sitoutuvan suoraan massaan eikä jäävän ilmatilaan. Annostelun kaasun määrä todennettiin kaasupullon massan muutoksen perusteella.



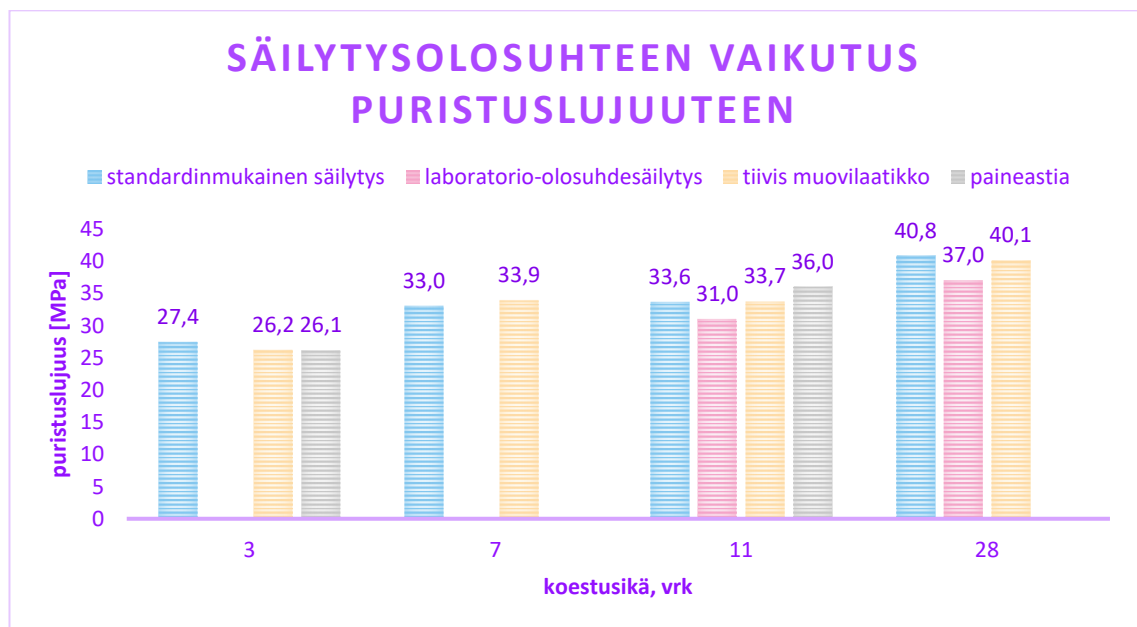
KUVA 11. Hiilidioksidikaasun lisäystapa tasosekoittimeen.

Ominaisuuksiltaan käytettäväksi soveltuvasta hiilidioksidimassasta valmistettiin koekappaleita, jotka säilytettiin standardin mukaisesti testaukseen asti. Kappaleista testattiin puristuslujuus 28 vuorokauden iässä ja jäädytys-sulatuskestävyys suoralla pakkaskokeella teknisen spesifikaation CEN/TS 12390-9 menetelmää noudattaen. Vertailumassana oli samoilla seossuhteilla valmistettu massa ilman hiilidioksidia. Koska tutkimuksen toteutusaika oli verrattain lyhyt, valittiin kovettuneesta betonista testattavaksi vain merkittäviä ominaisuuksia Suomen olosuhteissa.

4.1.5 BECO-hankkeen tulokset

Kovettuneen betonin altistaminen hiilidioksidilille

Valettujen koekappaleiden hiilidioksidikovettamisella havaittiin puristuslujuuteen olevan positiivista vaikutusta (KUVA 12). Koekappaleet koestettiin 3, 11 ja 28 vuorokauden ikäisinä standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti. Varhaislujuus kehittyi parhaiten standardinmukaisesti vedessä säilytetyillä kappaleilla.



KUVA 12. Koebetoniin keskimääräinen puristuslujuus suhteessa koekappaleen kuormitusikään ja hiilidioksidialtistustapaan.

Koekappaleiden ja -sarjojen vähäinen lukumäärä näkyy myös tuloksissa. Koekappaleita ei ollut riittävästi kaikissa säilytysolosuhteissa. Laboratorio-olosuhteissa säilytetyt koekappaleita ei ole koestettu ollenkaan kolmen vuorokauden iässä. Paineastiassa säilytetyt koekappaleita taas ei ole riittänyt standardinmukaisen arvostelun 28 vrk koestukseen.

Kolmen vuorokauden koestusiässä parhaiten on menestynyt standardin mukaisesti vedessä säilytetyt koekappaleet. Niiden keskimääräinen puristuslujuus on ollut 27,4 MPa, kun taas heikoiten pärjänneet, paineastiassa säilytetyt koekappaleet ovat kehittäneet lujuutta kolmessa vuorokaudessa 26,1 MPa.

Olisi ollut mielenkiintoista koestaa kuivana laboratorio-olosuhteissa säilytetyt kappaleita samassa iässä, sillä sitä olisi järkevintä verrata kuivana paineastiassa säilytettyihin kappaleisiin. Betonikoekappaleet säilytetään tyypillisesti vedessä tai yli 95 %:n suhteellisessa kosteudessa, jotta hydrataation ja lujuudenkehityksen jatkuminen varmistetaan. Näin ollen kuivana säilytetyt koekappaleita verrattaessa voisi vetää johtopäätöksiä hiilidioksidin vaikutuksesta lujuudenkehitykseen.

11 vuorokauden koestusiässä paineastiassa säilytetyt kappaleet olivat kehittäneet eniten lujuutta keskilujuuden ollessa 35,9 MPa. Tätä tulosta voi jo kohtuullisen turvallisesti verrata standardinmukaisesti vedessä säilytettyjen kappaleiden lujuuteen. Näiden keskilujuus oli 35,5 MPa. Koska myös paineastiassa altistetut kappaleet on siirretty vesisäilytykseen, on betoni saanut riittävästi kosteutta hydrataatioreaktioiden jatkumiseen. Teoriaa tukee myös laboratorio-olosuhteissa säilytettyjen koekappaleiden keskimääräinen puristuslujuus 11 vuorokauden koestusiässä. Kappaleet säilytettiin kuivana, ja niiden lujuus on 4,5 megapascalia vähemmän kuin vedessä säilytettyjen. Koekappaleiden keskilujuus oli 31,0 MPa.

28 vuorokauden ikään mennessä kuivana muovilaatikoissa säilytetyt, hiilidioksidille altistetut kappaleet olivat kehittäneet lujuutta enemmän, kuin laboratorio-olosuhteissa säilytetyt kappaleet. Näistä tuloksista on varminta päätellä hiilidioksidin lujittava vaikutus betonissa. Hiilidioksidille altistettujen kappaleiden keskimääräinen lujuus oli 40,1 MPa, kun taas altistamattomien oli 37,0 MPa. Merkittävää tutkimuksen kannalta on se, että kuivana säilytetyt, hiilidioksidikövetetyt kappaleet

olivat lähes yhtä lujia kuin standardinmukaisesti säilytetyt koekappaleet. Näiden keskimääräinen puristuslujuus oli 40,8 MPa.

Hiilidioksidille altistettuja koekappaleita valmistettiin vähän, eikä niistä voi vetää pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Tämän lisäksi epävarmuutta tuloksiin tuo johdonmukaisuuden vähäisyys: alussa koesarjoja tehtiin eri muuttujilla, jotta löydettäisiin tutkimuksen kannalta kiinnostavimmat variaatiot. Myös koesarjojen valmistuksen aiheuttama epävarmuus lisääntyi useamman koekappaleiden valmistajan vuoksi.

Hiilidioksidilla käsitelty betonimassa

Puristuslujuuteen hiilidioksidilla näyttäisi olevan oletuksen mukaisesti positiivinen vaikutus. Hiilidioksidi reagoi tuoreessa betonimassassa vapaan kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaatteja. Nämä nanopartikkelit toimivat kiteytymisalustoina muodostaen vettä sementin hydrataatiota varten, mikä johtaa lujuudenkehityksen kiihtymiseen ja siten varhaislujuuden nopeampaan kehittymiseen (Qian et al. 2018).

Koekappaleiden varhaislujuus kehittyi hieman nopeammin plastisessa vaiheessa karbonatisoiduilla kappaleilla (TAULUKKO 4). Kolmessa vuorokaudessa hiilidioksidilla käsitelty betoni oli kehittänyt lujuutta 4,8 megapascalia tavanomaisesti valmistettua betonia enemmän, tavanomaisen betonin lujuuden ollessa 29,3 MPa. Tämä on merkittävää teollisuuden näkökulmasta, sillä valumuotit tulee pysyä purkamaan valun ympäriltä kohtuullisessa ajassa.

TAULUKKO 4. Keskimääräiset puristuslujuudet ja tiheydet referenssi- ja koebetoneilla

	kuormitus 3 vuorokauden iässä		kuormitus 28 vuorokauden iässä	
	puristuslujuus [MPa]	tiheys [kg/m ³]	puristuslujuus [MPa]	tiheys [kg/m ³]
referenssi-betoni	29,3	2350	50,5	2380
CO ₂ -betoni	34,1	2370	55,0	2370

Kuten taulukosta 4 näkee, hiilidioksidilla käsitellyt kappaleet olivat myös standardinmukaisessa arvosteluiässä lujempia kuin referenssimassasta valmistetut kap-

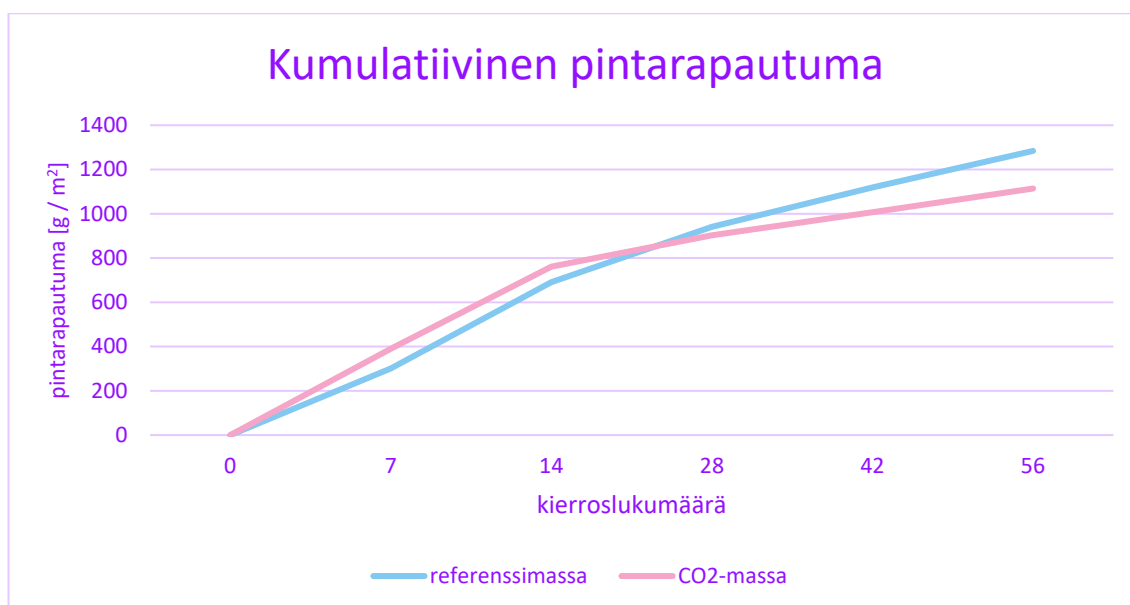
paleet. Hiilidioksidilla käsitelty betoni oli kehittänyt lujuutta arvosteluikään mennessä 55,0 MPa, kun tavanomainen betoni oli kehittänyt 50,5 MPa. Koekappalemäärät olivat kuitenkin pieniä ja epävarmuus sen johdosta suuri.

Puristuslujuuden lisäksi kiinnostava ominaisuus tutkimuksessa oli betonin pakkasenkestävyys. Tämä selvitettiin suoralla pakkaskokeella, eli ns. laattakokeella. Laattakokeessa koekappaleita altistetaan sykleittäin jäätymiselle ja sulamiselle pinnallaan väliaineena joko vettä tai suolaliuosta. Teknisessä spesifikaatiossa määriteltyjen syklien jälkeen kappaleiden pinnalta poistetaan pakkasrapautuman irrottama materiaali, joka punnitaan ja tulos lasketaan kumulatiivisesti. Tulos ilmoitetaan grammoina neliometriä kohden.

Kristallisoivien lisäaineiden tiedetään vaikuttavan betonin vedentiiveyteen. Lisäaineet täyttävät kapillaarihuokosia parantaen betonirakenteen säilyvyyttä (Kähkönen 2019). Kalsiumkarbonaatti mineralisoituu betoniin kiteytyen, joten sen voidaan olettaa toimivan muiden kristallisoivien lisäaineiden tapaan.

Tutkimuksessa väliaineena käytettiin 3 % natriumkloridiliuosta. Koesarja koostuu neljästä koekappaleesta, jotka on kaikki valmistettu samasta massasta. Kappaleissa ei näin ollen ole eroja osa-aineiden suhteen, mutta vaihtelua tuloksiin voi tulla esimerkiksi koekappaleen tiivistämisestä. Minkään tutkimuksen koekappaleen rapautuma ei poikennut huomattavasti koesarjan keskiarvosta, joten testauksen voidaan olettaa olleen sen osalta onnistunut. Betonit valmistettiin ilman huokostinta, jotta sen aiheuttama muuttuja saatiin poistettua. Huokostinta käytettäessä samankin reseptin eri erien välillä voi olla eroa ilmamäärässä, mikäli tiivistämisessä on ollut haasteita.

Hiilidioksidimassasta valmistetut kappaleet näyttävät pakkasenkesto-ominaisuuden osalta pärjäävän verrokkejaan hieman paremmin. Vaikka testin alkupuolella referenssimassasta valmistettujen koekappaleiden pinnalta irtoaa materiaalia vähemmän, 14 syklin jälkeen referenssikappaleiden kumulatiivinen pintarapautuma on suurempaa (KUVA 11). Tulos tukee mahdollisuutta käyttää hiilidioksidimassaa myös betonivaluissa, jotka ovat jäätymis-sulamisrasitukselle alttiita.



KUVA 11. Kumulatiivisen pintarapautuman vertailu tavanomaisen ja hiilidioksidikäsitellyn betonin välillä.

Tutkimuksen tulokset ovat parhaillaankin vain suuntaa-antavia. Pitkälle meneviä johtopäätöksiä niistä ei voi vetää. Etenkin tutkimuksen alkuvaiheessa tutkimussuunnitelma ja dokumentaatio oli erittäin puutteellinen. Koesarjoja olisi pitänyt toistaa, ja kappaleita koestaa useampia kaikkina koestusikinä.

Tulokset antoivat kuitenkin vahvaa indikaatiota siitä, että hiilidioksidilla on mahdollista parantaa betonin ominaisuuksia. Tästä syystä koettiin, että tutkimusta on syytä jatkaa.

4.2 Behi-hanke

Betoni hiilinieluna – ratkaisuja vähähiiliseen rakentamiseen (Behi) -tutkimus- ja kehittämishanke oli suora jatkotutkimus BECO-hankkeelle. Hankkeen päärahoituslähteenä oli EAKR ja hankkeen toteutusajankohta oli 11/2022–10/2024. Behi-hankkeessa toimin projektipäällikön nimikkeellä.

4.2.1 Behi-hankkeen tavoitteet

Tavoitteena hankkeessa oli jatkaa tutkimustyötä, joka oli aloitettu BECO-hankkeen aikana. Behi-hankkeessa tavoiteltiin myös testauksen siirtämistä teolliseen

mittakaavaan. Tavoitteena oli suunnitella betoniteollisuuteen laajamittaisesti sovellettavissa oleva laitteisto, jolla betoninvalmistajat voisivat ottaa kehitetyn prosessin käyttöönsä.

4.2.2 Behi-hankkeen resurssit ja sidosryhmät

Hankkeen laboratoriotutkimukset suoritettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun KymiLabs -tutkimusyksikön betonilaboratoriossa. Toimin tässäkin hankkeessa apuna betonimassojen suunnittelussa, valmistamisessa, sekä lopulta kovettuneen betonin testauksessa.

Lisäksi hankkeessa työskenteli projektityöntekijä. Projektipäällikkönä vastasin hallinnollisista työtehtävistä, ja yhdessä projektityöntekijän kanssa käytännön tutkimuksessa. Laadin tutkimussuunnitelman ja valvoin tutkimuksen etenevän sen mukaisesti.

Ohjausryhmään kokosin tähän hankkeeseen edustajat Lujabetoni Oy:ltä, Rudus Oy:ltä, Joutsenon Elementti Oy:ltä ja Consolis Parma Oy:ltä. Konsulttina tässäkin hankkeessa toimi TkT Risto Mannonen.

Teollisuuteen sopivan ratkaisun ideoinnissa ja suunnittelussa toimijana oli Mecmetal Oy.

4.2.3 Behi-hankkeen tutkimus

Tutkimus aloitettiin tekemällä laastimassoja sementtistandardin SFS-EN 196-1 menetelmän mukaisesti. Reseptin optimoiminen aloitettiin laastimassalla, sillä valmistuvan massan määrä on selvästi pienempi kuin betonimassalla, ja seoksen osasuhteiden muuttajat ovat näin ollen helpommin hallittavissa. Tavoitteena oli löytää sopivat seossuhteet pienessä mittakaavassa, ja sen jälkeen siirtyä betonikokeisiin. Laastimassat valmistettiin sementistä ja vaihtoehtoisista sideaineista, masuunikuonasta, standardihiekasta ja vedestä.

Laastikokeet

Laastimassakokeissa oli tutkittavana 13 erilaista reseptiä. Sementtinä massoissa käytettiin tyyppin I ja II sementtejä. Tutkittavia koesarjoja oli yhteensä 82. Kontrollimassa valmistettiin täysin standardin mukaisesti, ja koemassoja verrattiin sen tuloksiin. Koemassoissa korvattiin osa sementistä masuunikuonalla ja niihin lisättiin eri määriä hiilidioksidia.

Koemassoja tehtiin kolmea erilaista sarjaa (TAULUKKO 5). Ensimmäisessä sarjassa sementistä korvattiin 30 % masuunikuonalla, toisessa 60 % ja kolmannessa 90 %. Sarjoista tehtiin neljää eri versiota eri hiilidioksidipitoisuuksilla. Versiossa 0 ei lisätty lainkaan hiilidioksidia ja kolmanteen versioon lisättiin hiilidioksidia koko sekoituksen keston ajan. Versiossa 3 sekoitetun hiilidioksidin määrät vaihtelevat keskenään koemassojen välillä. Toteutuneet hiilidioksidin massat on dokumentoitu grammoina, ja niiden arvo oli keskimäärin 28 paino% sideaineen painosta.

TAULUKKO 5. Laastimassakoesarjojen osasuhteet.

1-sarja	2-sarja	3-sarja
sementistä korvattu 30 % masuunikuonalla	sementistä korvattu 60 % masuunikuonalla	sementistä korvattu 90 % masuunikuonalla
1_0: ei hiilidioksidia	2_0: ei hiilidioksidia	3_0: ei hiilidioksidia
1_1: 1 % hiilidioksidia	2_1: 1 % hiilidioksidia	3_1: 1 % hiilidioksidia
1_2: 3 % hiilidioksidia	2_2: 3 % hiilidioksidia	3_2: 3 % hiilidioksidia
1_3: max. hiilidioksidia	2_3: max. hiilidioksidia	3_3: max. hiilidioksidia

Lujuudenkehityksen lisäksi sarjoista tutkittiin sementin hydrataation alkuvaiheen reaktioita isotermisellä kalorimetrillä. Kalorimetriaa käytettiin reseptin optimoinnin lisäksi myös hiilensidonnan validointiin. Tutkimuksen kalorimetrianalyysit osoittavat, että useimmissa tapauksissa kaasun lisääminen tuoreeseen massaan nopeuttaa reaktioita ja nostaa sementin hydrataatiotehoa.

Kalorimetrianalyysit toteutettiin isotermisellä kalorimetrillä, joka on suunniteltu sementin ja betonin tutkimiseen. Kalorimetrianalyysillä pystytään arvioimaan samankaltaisten massojen suhteellinen sitoutumisaika käytettäessä eri seos- tai li-

säaineita vertaamalla näytteiden hydrataatioprofiileja. Profiileja vertaamalla nähdään, kuinka paljon nopeammin tai hitaammin toisen massan sitoutuminen tapahtuu.

Kalorimetrian lisäksi hiilensitoutumista tutkittiin erilaisilla analyysimenetelmillä. Menetelminä käytettiin termogravimetristä analyysia, röntgenfluoresenssia sekä mikroskopiaa. Menetelmillä pystyttiin todentamaan hiilen sitoutuneen laastimassaan.

Betonikokeet

Kun laastikokeista saatiin riittävästi indikaatiota, siirryttiin tutkimuksessa seuraavaan vaiheeseen. Betonikokeilla oli tarkoitus testata hiilidioksidin toimintaa, kun valmistettavat massat ovat suurempia ja muuttujia on enemmän. Kaikista tutkimuksen aikana valmistetuista betonimassoista tehtiin vertailubetoni ilman hiilidioksidia ja koebetoni hiilidioksidikäsittelyllä.

Hankkeen aikana valmistettiin useita betonimassoja erilaisilla variaatioilla. Muuttujina tutkimuksessa olivat seoksen osasuhteet, side- ja seosaineet sekä lisäaineet. Tutkimuksen betonit valmistettiin side- ja seosaineesta, runkoaineesta, vedestä ja lisäaineista. Sementtinä käytettiin tyyppien I ja II sementtejä, joista korvattiin osuuksia masuunikuonalla.

Tutkimus toteutettiin valmistamalla betonimassoja, joista pääsääntöisesti valettiin kuusi koekappaletta kustakin puristuslujuuden testausta varten. Jokaisesta valmistetusta massasta testattiin tuoreen betonimassan ominaisuuksia. Testatut ominaisuudet olivat lämpötila (°C), ilmamäärä painemittarimenetelmällä (%), pH, märkätiheys (kg/m³) ja betonin työstettävyys joko painuma- tai leviämämittauksella.

Tutkimuksen ensimmäiset kokeet tehtiin kakkostyyppin pikasementillä CEM II/A-LL 42,5 R joka sisältää portlandklinkkerin lisäksi jauhettua kalkkikiveä. Sementistä korvattiin 30 % masuunikuonalla. Hiilidioksidia lisättiin koesarjoihin 1,5...3,0 %. Betonimassa sitoutui nopeasti, ja betonin työstettävyys heikkeni oleellisesti.

Koska pikasementin reaktio oli liian nopea hiilidioksidin kanssa, vaihdettiin sementti normaalisti kovettuvaksi. Sementiksi valittiin tässä vaiheessa CEM I 42,5

N – SR3. Sementti ei sisällä portlandklinkkerin lisäksi muita side- tai seosaineita. Tällä valinnalla pystyttiin pitämään sideainekoostumus helpommin hallittavana, sillä masuunikuona lisättiin seokseen itse. Sementistä korvattiin joko 50 % tai 30 % kuonalla. Hiilidioksidia lisättiin 1,2 % ja 3,0 % sideaineen painosta.

Yhden vuorokauden koestusiässä puristuslujuus hiilidioksidikäsitellyllä betonilla oli keskimäärin 3,6 MPa ja vertailubetonilla 6,2 MPa. Hiilidioksidilla käsitellyn betonin varhaislujuus oli vain 58 % vertailubetonin lujudesta. Tämän takia kyseisiä koesarjoja ei tutkittu enempää, sillä etenkin betonielementtiteollisuuden näkökulmasta alkulujuuden kehitys on olennaista.

Tutkimusta on tarpeen jatkaa masuunikuonan käytön osalta. Masuunikuonan käytöllä betonin hiilijalanjälkeä saisi pienennettyä tehokkaasti. Markkinoille on tullut runsaasti masuunikuonaa sisältäviä seossementtejä, joten tarve sitoutumisreaktion aktivoimisen onnistumiselle on ilmeinen tulevaisuudessa.

Tutkimuksen tarpeen ja tavoitteet huomioiden käytettävä sideaine vaihdettiin. Sideaineeksi valittiin yleisesti teollisuudessa käytössä oleva portlandseossementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N. Sideainevalinta pidettiin samana tutkimuksen loppuun asti. Koe- ja vertailumassoja valmistettiin 72 käyttäen pelkästään kyseistä sideainetta. Sarjoissa vaihteli lisäaineiden ja hiilidioksidin määrä, sekä muut seossuhteet, tärkeimpänä vesi-sideainesuhde. Hiilidioksidin enimmäismääränä oli 3,5 %.

Tutkintalinjan alkuvaiheessa ei päästy toivottuihin tuloksiin. Koemassojen työstettävyyttä oli huomattavasti heikompaa kuin vertailubetonin. Haastetta pyrittiin ratkaisemaan tehonotkistimen määrää lisäämällä. Kaikkiin tutkimuksen betonimassoihin käytettiin tehonotkistinta, mutta lisäaineen määrä vaihteli.

Koska muuttujat pyrittiin pitämään mahdollisimman vähinä, ei käytössä ollut muita lisäaineita kuin tehonotkistin koemassojen nopean sitoutumisen vuoksi. Kun tuoreen massan ominaisuuksia ei saatu toivotunlaisiksi, päätettiin tutkimuksen loppuvaiheilla ottaa lisäksi käyttöön huokostin. Tehonotkistin lisää nimensä mukaisesti tehokkaasti betonimassan notkeutta ilman veden lisäämistä ja huokostin luo betoniin ilmahuokosia. Huokokset lisäävät tuoreen massan työstettävyyttä ja luovat edellytyksen kovettuneen betonin pakkasenkestävyydelle.

Huokostimen käyttö lisäsi huomattavasti tuoreen massan työstettävyyttä, ja seoksen hiilidioksidipitoisuutta päätettiin lisätä. Kaasun määrä saatiin lisättyä 7 p%:iin ilman, että massan työstettävyys heikkeni hyväksymättömästi.

4.2.4 Behi-hankkeen tulokset

Hiilidioksidi vaikuttaa betonin tiheyteen. Kovettuneen vertailubetonin tiheys tutkimissa sarjoissa oli keskimäärin 2220 kg/m^3 , kun taas koebetoneissa se oli 2280 kg/m^3 (TAULUKKO 6). Betonin tiheyden tiedetään olevan suoraan yhteydessä sen puristuslujuuteen, joten puristuslujuustulokset ovat loogisia. Hiilidioksidi muodostaa sementin sitoutumisvaiheesta lähtien kalsiumkarbonaattipartikkeleita, joiden voidaan arvioida vaikuttavan betonin tiheyteen. Suurempi vaikutus on kuitenkin ilmamäärän pienenemisellä: hiilidioksidi vähentää betonissa olevaa ilmaa jopa puolella.

TAULUKKO 6. Hiilidioksidin vaikutus puristuslujuuteen ja tiheyteen.

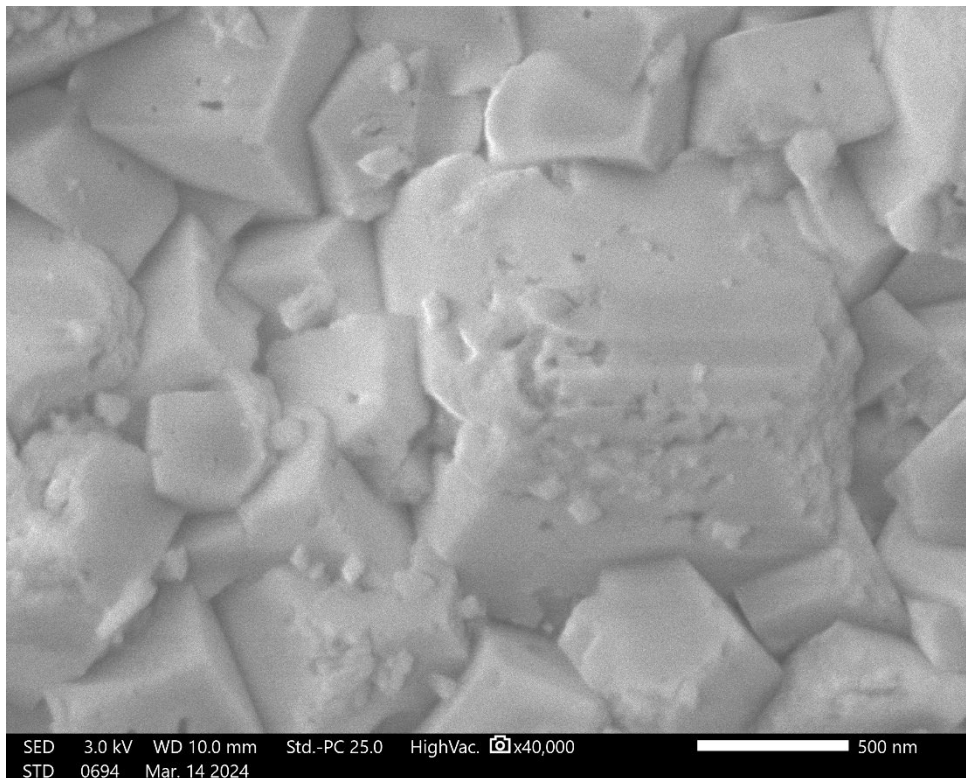
CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeusluokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
			1 d	28 d	
0,0	6,1	F4	7,7	35,5	2220
7,0	3,4	F4	6,7	40,9	2270
CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeusluokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
0,0	6	F3	12,9	38,6	2230
7,3	3,4	F3	11,9	43,9	2280
CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeusluokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
0,0	5,9	F4	11,9	35	2220
7,3	3,4	F3	12,8	42,8	2280
CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeusluokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
0,0	5,8	F5	11,8	35,5	2220
7,1	3,2	F2	15,1	44,1	2300
CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeusluokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
0,0	7	F4	13,7	32,7	2190
7,0	3,6	F3	14,2	39,4	2270

Ilmamäärän pieneneminen ei kuitenkaan yksin selitä lujuudenkasvua. Havaittu tiheyden muutos selittää 7 ja 28 vuorokauden puristuslujuuksien kasvusta noin puolet. Tämän tiedon perusteella voidaan todeta hiilidioksidin hydrataatioreaktioihin aiheuttamien muutosten kasvattavan betonin lujuutta.

Hiilensitoutumisen ja mineralisoitumisen todentaminen on tärkeää, jotta voidaan luotettavasti osoittaa betonin ominaisuuksien muutoksen johtuvan juuri hiilidioksidikäsittelystä. Behi-hankkeessa hiilensitoutumista todennettiin erilaisin analyysimenetelmin, ja niiden tulokset todistavat hiilidioksidin reagoineen sementin kalsiumhydroksidin kanssa.

Kovettuneesta betonista tutkittiin hiilensitoutumista mikroskooppitutkimuksilla. Hiilidioksidin sitoutumisen vaikutus pystyttiin todentamaan optisella valomikroskoopilla satakertaisella suurennoksella. Tämän menetelmän tulos on vain viitteellinen, sillä kalsiumkarbonaattia ei voi nähdä valomikroskoopilla. Mikroskoopilla analysoitiin betonin huokosrakennetta ja huomattiin, että betonin huokosparametrit muuttuvat radikaalisti, mikäli tuoreeseen betonimassaan on lisätty hiilidioksidia. Myös kovettuneen betonin laskennallinen ilmamäärä muuttuu hiilidioksidin vaikutuksesta.

Parempi käsitys hiilidioksidin todellisesta mineralisoitumisesta saatiin kenttäemissio-pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (Field Emission-Scanning Electron Microscope, FE-SEM). Tutkituista laasti- ja betoninäytteistä löytyi selkeitä kiteitä niistä näytteistä, joihin oli lisätty hiilidioksidia tuoreen massan sekoittamisen aikana. (KUVA 13). Havaituista kiteistä määritettiin niiden alkuainekoostumus röntgenanalysaattorin (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) avulla.



KUVA 12. FE-SEM -kuva kalsiumkarbonaattikiteistä.

Teknologia betoniteollisuuden käyttöön

Hankkeen tavoitteena oli suunnitella ja pilotoida laitteisto, joka olisi otettavissa helposti käyttöön olemassa olevilla betoniasemilla. Pilotointikohteeksi suunniteltiin Joutsenon Elementin Joutsenon tehdasta.

Teollisen mittakaavan laitteiston suunnittelussa sidosryhmäyhteistyökumppaneina toimivat Joutsenon Elementti Oy ja Mecmetal Oy. Yritysten arvomaailmassa painotetaan vihreää rakentamista ja vastuullisuutta.

Joutsenon Elementti valmistaa betonielementtejä talonrakennukseen. Elementtituotanto on aloitettu jo 1950-luvulla Joutsenossa, ja myöhemmin toimintaa on laajennettu myös Kaakkois-Suomeen. Joutsenon Elementti on aktiivisesti mukana projekteissa, joissa vähennetään hiilidioksidipäästöjä ja hyödynnetään teollisuuden sivuvirtoja.

Mecmetal on suomalainen tuotantolinjateknologian kehittäjä ja valmistaja. Yritys toimii edelläkävijänä ja suunnannäyttäjänä monilla eri tavoilla, jotka auttavat saavuttamaan jatkuvasti kehittyvät ympäristövaatimukset. Koska Behi-hankkeessa

ei ollut tarkoituksenmukaista rakentaa kokonaan uutta tuotantolinjastoa, hankkeessa hyödynnettiin Mecmetalnin osaamista sähkö-, automaatio- ja ohjelmistosuunnittelun osalta teknologian ohjausjärjestelmän suunnitteluun.

Laitteiston suunnittelu aloitettiin tiedonhauilla. Jo ensimetreistä lähtien oli melko selvää, että suomalainen teollisuus ei ole vielä valmis hiilidioksidin hyötykäyttöön. Hiilidioksidin talteenottomenetelmiä vertailtaessa selvisi, ettei Suomessa juurikaan oteta hiilidioksidia laajamittaisesti talteen hyötykäyttöä varten. Tämä osaltaan hieman jarrutti laitteiston suunnittelua, ja etenkin pilotoinnin suunnittelua.

Hankkeessa suunniteltiin teolliseen mittakaavaan sopivaa laitteistoa, joka olisi helppo integroida betonitehtaan tai -aseman olemassa olevaan kalustoon. Hiilidioksidi syötettäisiin tuoreeseen betonimassaan jo sekoittamisen aikana kaasuna. Olomuotona kaasu on edullisin tapa hyötykäyttää hiilidioksidia, koska sitä ei tarvitse esimerkiksi jäähdyttää tai paineistaa olomuodon muuttamiseksi. Näin ollen investoinnit jäävät käyttäjälle mahdollisimman kevyiksi.

Hankkeen puitteissa tutustuttiin Joutsenon elementtitehtaan tuotantotiloihin, ja pohdittiin mahdollisuutta integroida kaasunsyöttölaitteisto olemassa oleviin tuotantolaitteisiin. Tutkimuslaboratoriossa laitteisto oli toteutettu yksinkertaisesti, ja systeemi olisi mahdollista toteuttaa vastaavasti myös teollisessa mittakaavassa. Betonin hiilidioksidikäsittelyn kaupallinen hyödyntäminen oli kuitenkin tarkkaan selvitettävä asia, sillä vastaavalle teknologialle on tiedettävästi myönnetty patenteja globaalisti (Patenttihaku, sa.).

Jotta kehitettävällä menetelmällä ja teknologialla ei loukattaisi muiden oikeuksia, tuli ennen yksityiskohtaisempaa suunnittelua kartoittaa patentti- ja muut immateriaalioikeudet toimintakentällä. Tätä varten hankkeessa teetettiin tutkimuksen ja tuotekehityksen Innovation on Demand – ohjauspalvelu patenttitietokannasta (KUVA 14).



KUVA 14. Prosessikaavio Innovation on Demand -palvelusta (Leitzinger 2024)

Palvelun aikana selvisi, että varhaisimmat patenttihakemukset aiheen ympärillä ovat jo vuosikymmenien takaa. Patentit ovat voimassa rajoitetun ajan, yleensä 20 vuotta hakemuksen jättöpäivästä. Tämä mahdollistaisi vapauden lisätä hiilidioksidia tuoreeseen betonimassaan.

Vaikka aihepiirin ympärille on myönnetty patenteja, täysin vastaavaa teknologiaa ei kartoituksessa löydetty. Kartoituksen perusteella ei ole syytä epäillä, että toteutustapa loukkaisi kenenkään oikeuksia. Teknologiatrendi on kuitenkin kasvava, joten aihe on selvästi kiinnostava alalla (KUVA 15).

SUMMARY AND CONCLUSIONS				
Technology	Number of identified solutions of interest	Technology trend	Actors	Conclusions / Remarks
CO2 to uncured concrete	49		45	<ul style="list-style-type: none"> recently increasing trend. Earliest publications are filed over 20 ago. Most actors are in Asia and USA. Patents are distributed between a many actors.

Leitzinger

KUVA 15. Yhteenvedo Innovation on Demand -ohjauspalvelun tuloksista (Leitzinger 2024).

Behi-hankkeessa teknologia suunniteltiin toteutettavaksi mahdollisimman yksinkertaisesti. Suunnitelman mukaan betonitehtaalle tulee hiilidioksidisäiliö muiden lisäainesäiliöiden rinnalle, ja siitä syötetään kaasua sekoittimelle. Syöttökanaavassa on mittausanturit, joilla kaasun määrää monitoroidaan. Syöttö tapahtuu automaattisesti, ja lisätyn kaasun määrää hallitaan sopivien venttiilien avulla. Hiilidioksidin lisäys voisi tapahtua aikaperusteisesti, jolloin on tärkeää tunnistaa paineen vaikutus virtausnopeuteen.

Paineen laskiessa virtausnopeus kasvaa ja päinvastoin. Kaasujen yleisen tilanyhtälön mukaan paineen ja tilavuuden tulo jaettuna lämpötilalla on vakio. Tästä johdettuna tiedetään, että jos lämpötila nousee, myös paine kasvaa tilavuuden pysyessä putkistossa samana. Paineen kasvaminen aiheuttaa virtausnopeuden pienenemistä. Joku muuttujista tulisi saada pysyväksi, jotta menetelmä olisi luotettava.

Laboratoriokokeissa hiilidioksidin lisäys tapahtui massaperusteisesti. Tämä on helpoin tapa hallita lisätyn kaasun määrää, kun tavoitteena on lisätä kaasua painoprosentteina. Menetelmä olisi siirrettävissä teolliseen mittakaavaan automatisaation avulla.

Behi-hankkeen puitteissa ei aikataulullisista syistä saatu teknologiaa pilotoitua. Koska tutkimusaihe on erittäin laaja betonin materiaaliominaisuuksien vuoksi, kului reseptin optimointiin oletettua kauemmin aikaa. Teknologian suunnittelu on kuitenkin vahvalla pohjalla sidosryhmäyritysten kanssa.

Aikatauluhaasteiden lisäksi tunnistettiin toinen merkittävä haaste: hiilidioksidia ei tällä hetkellä ole saatavilla Suomesta teolliseen hyötykäyttötarkoitukseen. Suomessa talteenotettu hiilidioksidi käytetään pääasiassa sähköpolttoaineiden valmistamiseen. Jos hiilidioksidia ei voida hyödyntää paikallisesti, se kuljetetaan varastoitavaksi muualla, esimerkiksi Norjaan tai Tanskaan. Hiilidioksidi varastoidaan geologisesti mereen tai maanalaiseen kallioperään.

Vaikka kaikkiin hankkeen tavoitteisiin ei päästy, tuotettiin hankkeen aikana merkittävää tietoa ja kasvatettiin hankehenkilöstön osaamista. Hankkeen tutkimus oli toteutettu laadukkaammin kuin aiemmin esitellyn BECO-hankkeen. Kyseisestä hankkeesta oli opittu ja Behi-hankkeen tutkimus oli johdonmukaisempaa ja luotettavampaa. Toistettavuuden merkitys oli otettu huomioon, eikä suunnanvaihtoja tutkimuksessa tehty harkitsemattomasti.

5 OMAN OSAAMISEN ARVIOINTI

5.1 Osaamisen kehittyminen

Ammatillinen kehittäminen on ollut selkeää ja suoraviivaista ammattikorkeakoulusta valmistumisestani asti. Olen työntekijänä kunnianhimoinen, enkä halua jumiuttua paikalleni. Olen nopea oppimaan, ja osaan hyödyntää oppimiani taitoja laaja-alaisesti. Kehitykseni on nopeaa ja omaksun asioita helposti joustavuuteni ansiosta. Pyrin jatkuvasti kehittämään itseäni ja ammattitaitoani, mikä on huomattavissa kuvasta 16.



KUVA 16. Ammatillisen kehittymisen portaat.

Opiskelin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa (Xamk) rakennusinsinööriksi ja valmistuin vuonna 2020. Työskentelin lähes koko opiskeluajan Xamkin KymiLabs-tutkimusyksikössä betonintestauspalveluissa. Vaikka kävin töissä opiskelujen ohella, valmistuin suunnitellussa neljässä vuodessa.

Valmistuttuani jatkoin työntekoa KymiLabsilla. Sain vakituisen työpaikan laboratoriosinöörinä ja pääasiallinen työtehtäväni ensimmäisen vuoden ajan oli huokosparametrien määrittäminen mikroskoopilla. Vaikka työtehtävä onkin tärkeä, se ei tyydyttänyt jatkuvaa tarveani kehittyä. Tehtävässä ei vaadita ongelmanratkaisukykyä, eikä siinä pääse laajentamaan osaamistaan.

Vuonna 2021 esihenkilöni pisti alulle KymiLabs-yksikön TKI-toiminnan. Ammattikorkeakoulujen tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminnasta (TKI) säädetään Ammattikorkeakoululaissa (932/2014). Laissa todetaan, että ammattikorkeakoulujen tehtävänä on harjoittaa soveltavaa tutkimustoimintaa, kehittämis- ja innovaatiotoimintaa, joka palvelee ammattikorkeakouluopetusta ja edistää työelämää ja aluekehitystä.

Olin innostunut ajatuksesta työskennellä TKI-hankkeessa. Hanketyöskentely tarjoaisi aivan uudenlaisia tapoja työskennellä ja mahdollisuuden oppia uutta. Ilmoitaiduinkin epäröimättä mukaan uuteen haasteeseen. Jatkoin laboratorioinsinöörin nimikkeellä aivan uudenlaisissa tehtävissä.

BEHI-hankkeen aikana osaamiseni kehittyi huimasti. Hankkeen alussa tein paljon tiedonhakua ja tutustuin aiheesta julkaistuihin aiempiin tutkimuksiin. Minulla ei ollut ennakkoon mitään tietoa hiilidioksidin vaikutuksesta betoniin sen elinkaarren varhaisessa vaiheessa. Olin aiemman työurani aikana työskennellyt betonin parissa, ja tiesin betonin karbonatisoitumisreaktiosta. En kuitenkaan ollut koskaan tutustunut varhaisen vaiheen karbonatisoitumiseen.

Hakemani tieto oli kovin pirstaloitunutta, enkä osannut hyödyntää sitä parhaalla mahdollisella tavalla. Minun olisi pitänyt hakea tietoa vielä laajemmin, ja seurata enemmän julkaisuissa olleita lähteitä. Mahdollisesti hyödynnettävät tiedot minuun olisi kannattanut kerätä erilliseen dokumenttiin ja tehdä dokumenttiin kunnolliset lähdeviittaukset ja -luettelo.

Tiedonhaun jälkeen aloin laatia tutkimus- ja testaussuunnitelmaa. Tämäkin oli minulle uutta, sillä en ollut aiemmin tehnyt tutkimusta. Suunnitelmaa laatiessani tein jälkikäteen ajateltuna virheellisiä arviointeja. Myöskin tutkimuksen dokumentointi on ollut hyvinkin puutteellista. Tämän huomasin tätä opinnäytetyötä kirjoittaessani. Tunnistan nämä puutteet ja olen ottanut niistä opikseni.

Jälkeenpäin ajateltuna oli olisi ollut järkevämpää jättää valettujen koekappaleiden hiilidioksidialtistus kokonaan tutkimatta. Tiesin, ettei kyseinen menetelmä sovellu valmisbetonin tuotantoon. Suurin volyyymi betoniteollisuudessa on nimenomaan

valmisbetonin puolella, joten siellä on myös suurin potentiaali päästövähennyksiin. En ole kovettuneen betonin hiilidioksidialtistuksen aikaansaamia tuloksia dokumentoinut jäljitettävästi, joten tämän työn tulosten kasaaminen on ollut haastavaa. Syynä tähän huolimattomuuteen on todennäköisesti tutkimuksen aikainen välinpitämättömyys tai turhautuminen.

Nyt tätä opinnäytetyötä kirjoittaessa minua tutkijana kiinnostaisi erityisesti vedessä säilytettyjen ja altistettujen koekappaleiden lujuudenkehitys. En kuitenkaan löydä tietoa omista dokumentaatioistani. Näistä kappaleista olisi myös ollut äärimmäisen mielenkiintoista selvittää karbonatisoitumissyvyys. En ole tätä kuitenkaan tutkimusta tehdessäni joko osannut ajatella, tai pitää mielenkiintoisena

Kovettuneen betonin hiilidioksidikäsittelyä oli jo jonkin verran tutkittu ja jopa kaupallistettu, eikä menetelmällä päästä käsiksi volyymituotantoon betoniteollisuudessa. Hankeaika oli kohtuullisen lyhyt, joten olisi ollut järkevämpää käyttää kaikki resurssit tuoreen massan hiilidioksidikäsittelyn tutkimiseen.

Kun tutkimuslinjaa vaihdettiin, aloin hakemaan hiilidioksidin lisäyksen rajoja. Aiempien tutkimusten mukaan hiilidioksidin määrä oli hyvinkin maltillinen, mutta kokeilin silti lisätä kaasua enemmän, jotta hyöty ympäristönäkökulmasta olisi suurempi. Pian minulle selvisi, että hiilidioksidi kiihdyttää sementin sitoutumisreaktioita niin paljon, että määrä on aiempien tutkimusten linjaa noudattaen pidettävä alhaisena.

Kokematon tutkija kun olin, aloin turhautua tutkimukseen. Olin varma, että aihetta on turha tutkia enempää tästä näkökulmasta. Hiilidioksidi teki betonimassasta käyttökelvotonta, sillä massa menetti työstettävyytensä kaasua lisättäessä. Rajoja hakiessani onnistuin saamaan betonimassan ”kiehumaan”, jolloin siitä kondensoitui kosteus sekoittimen sisäpinnoille ja betoni kuivui kokkareiksi (KUVA 17).



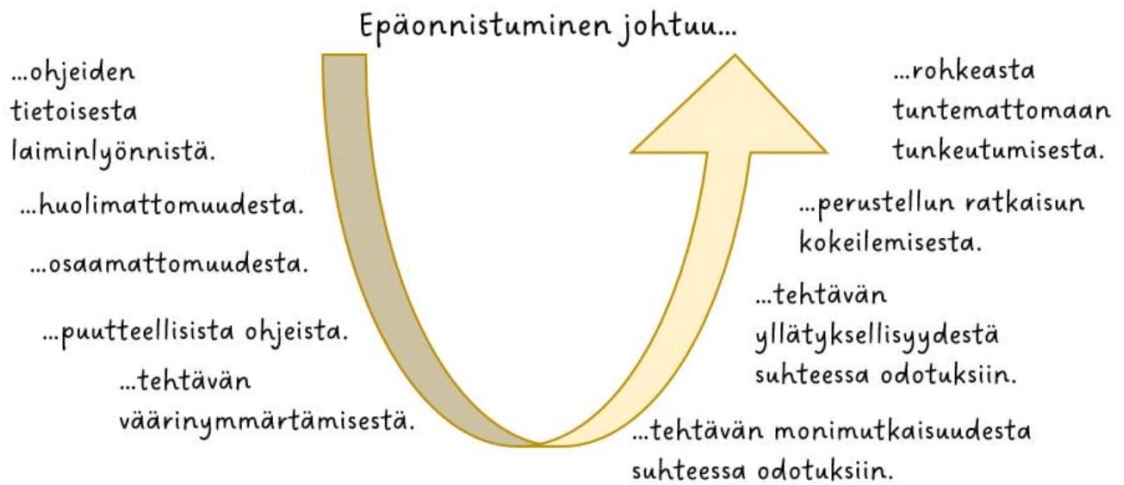
KUVA 17. Liasta hiilidioksidin lisäyksestä kuivunutta betonimassaa sekoittimessa.

Koska en ole luovuttaja, päätin ratkaista tilanteen hankkimalla hankkeeseen kokeneen konsultin. Sainkin konsultiksi tekniikan tohtori Risto Mannosen, joka on erikoistunut betonikemiaan. Konsultti osasi kertoa, kuinka kemialliset reaktiot teoriassa toimivat tutkimusaiheen ympärillä. Tästä sain vahvistuksen sille, että hiilidioksidia on mahdollista sekoittaa tuoreeseen betonimassaan teoriassa enemmän kuin mitä tiedonhakuni perusteella sain ymmärtää.

Mannonen oli isossa roolissa myös oman osaamiseni kehittämisessä. Hänen ansiostaan ymmärsin, että tutkimuksessa myös epäonnistumiset ovat arvokkaita tuloksia. Hän esitteli minulle Thomas Alva Edisonin sitaatin ”*En ole epäonnistunut. Olen vain löytänyt 10 000 tapaa, jotka eivät toimi*”. Tästä ajatuksesta sain rohkeutta jatkaa tutkimusta kokeilevalla ja uteliaalla asenteella.

Ymmärsin, että epäonnistumisista ei kuitenkaan kannata lannistua, vaan niistä on paljon palkitsevampaa oppia. Professori Amy Edmondson on asettanut epäonnistumisen tarkempaan syyniin (2011). Hänen loistavan havaintonsa mukaan,

epäonnistumiset voi laittaa paremmuusjärjestykseen. Huonoimmillaan epäonnistuminen johtuu ohjeiden tietoisesta laiminlyönnistä, mutta parhaimmillaan rohkeasta tuntemattomaan tunkeutumisesta (KUVA 18).



KUVA 18. Epäonnistumisen syitä Amy C. Edmondsonin mukaan. (Tykkä 2023b)

Jatkoin siis tutkimustani valmiina sietämään vastoinkäymisiä ja oppiakseni niistä. Loppujen lopuksi en saavuttanut hankkeen aikana kaikkia hankkeelle asetettuja tavoitteita. Tämä ei kuitenkaan lannistanut minua, sillä olin omaksunut uuden asenteen, joka on tutkijalle tärkeä.

Hankkeen loppuvaiheilla esihenkilöni kysyi minulta, olisiko syytä hakea rahoitusta jatkohankkeelle. Vastatessani myöntävästi, esihenkilöni ehdotti, että toimin mahdollisessa jatkohankkeessa projektipäällikkönä. Ehdotus tuntui suurelta kunian- ja luottamuksenosoitukselta, sillä olinhan vain AMK-tason insinööri. Ajattelin, että pitäisi olla diplomi-insinööri voidakseen toimia projektipäällikkönä.

Olin kuitenkin tehnyt BECO-hankkeessa paljon myös hallinnollisia töitä, joten uskalsin ottaa haasteen vastaan. Tiesin, että minun ei tarvitse kaikkea osata, vaan apua on saatavilla. Olin erittäin otettu minulle tarjotusta nimikkeestä.

Jatkotutkimusta varten haettiin rahoitusta Euroopan alueellisesta kehitysrahastosta. Rahoitus myönnettiin, ja tutkimus jatkui heti aiemman hankkeen päätyttyä.

Kun Behi-hanke alkoi, minut nimettiin siihen projektipäälliköksi. En ollut aiemmin toiminut projektipäällikkönä, joten olin täysin uuden haasteen edessä. En kokenut olevani riittävän kokenut hoitamaan tehtävää, joten tiesin oman osaamiseni kehittymisen olevan väistämätöntä.

Vaikka olin aiemmassa hankkeessa tehnyt joitakin projektipäällikön tehtäviä, uusien asioiden opetteluun määrä yllättämään. Sain opetella tekemään erilaisia viestintämateriaaleja, muun muassa hankkeen verkkosivut. Hallinnollisia työtehtäviä oli paljon jo heti hankkeen alkuvaiheessa, kuten ohjausryhmän kokoaminen, hankintapäätösten tekeminen ja hankintojen kilpailutus.

Projektipäällikön tehtävien lisäksi kehityin paljon myös tutkijan roolissa. Minulla oli vastuullani hankkeessa projektin hallinnollisen johtamisen lisäksi myös tutkimuksen suunnittelu ja toteutus. Tutkijana olin jo lähtökohtaisesti tehokkaampi, kuin BECO-hankkeen alussa. Kanssani hankkeessa työskenteli yksi laboratorio-työntekijä, jota saan kiittää monesta oivalluksesta.

Laadin Behi-hankkeessa tutkimussuunnitelman aiemmasta hankkeesta poiketen perustuen askeliin. Kun ensimmäisessä hankkeessani minulla oli selkeä suunnitelma alusta loppuun, tässä hankkeessa osasin ottaa huomioon ei-toivotunlaisten tulosten vaikutuksen tutkimussuunnitelmaan. Ensimmäisessä hankkeessa toistettavuutta ei edes testattu, vaan reseptiä muokattiin heti, jos jokin ei tuottanut toivotunlaisia tuloksia. Jälkimmäisessä myös epäonnistuneita betoneita valmistettiin useamman massan verran, jotta voitiin varmistua sen toimimattomuudesta.

Tein aluksi pienen mittakaavan kokeita laastimassoilla, joilla pyrin löytämään lujuudenkehityksen ja hiilineutraaliuden tavoittelun kannalta optimaalisen betonireseptin. Hiilineutraaliutta edistin käyttämällä vaihtoehtoisena sideaineena granuloitua masuunikuonaa ja lisäämällä hiilidioksidikaasua laastimassaan sen verran, ettei se vaikuta heikentävästi tuoreen tai kovettuneen laastin ominaisuuksiin.

Kun olin tyytyväinen reseptiin, aloitin hiilensitoutumisen validoinnin kalorimetri-analyseilla. Isoterminen kalorimetri oli hankittu tätä tarkoitusta varten. Laite oli

siis aivan uusi, eikä minulla ollut laitteen käytöstä kokemusta. Tulosten aikaansaaminen etenikin virheiden kautta voittoon. Koska minulla ei ollut testaukseen minkäänlaista rutiinia, jouduin tehdä useamman ajon ennen luotettavia tuloksia. Ennen kalorimetrin käyttöönottoa minun piti laatia analyysimenetelmälle menetelmäohje. Ohjeen laadin soveltuvien eurooppalaisten ja amerikkalaisten standardien perusteella. Kalorimetri tuli myös kalibroida ennen analyysien aloittamista. Laitteen mukana tuli laitetoimittajalta pieni määrä kalibrointisementtiä. En kuitenkaan onnistunut kalibroinnissa ensimmäisellä kerralla, ja kalibrointisementtiä ei ollut enää toiseen kalibrointiin.

Ensimmäisen kalibrointikokeiluni jälkeen minun piti saada käsiini sementtiä, jolla kalibroinnin voisi suorittaa. Kalibrointia varten pitää tietää tarkalleen käytetyn sementin hydrataatioenergia eli sen kyky tuottaa lämpöä hydrataation aikana. Olin yhteydessä suomalaiseseen sementinvalmistajaan, ja kysyin, mikä on käytössäni olevan sementin hydrataatioenergia. Asia ei ollutkaan niin yksinkertainen. Minulle selvisi, että energia vaihtelee eräkohtaisesti, joten sementinvalmistajalla oli tarjottavana vain tieto haarukasta, johon kyseisen sementin hydrataatioenergia sijoittuu. Kalibrointia varten kuitenkin tarvitsee tietää tarkalleen, kuinka monta joulea lämpöä kehittyy sementtigrammaa kohden. Lopulta päädyin lähettämään näytteen sementistä valmistajalle, ja siitä mitattiin tarkka lämmöntuotto.

Kalibroinnin onnistuttua pääsin aloittamaan kalorimetrianalyysit. Analyysien avulla sain arvokasta tietoa hiilidioksidin reaktioista massoissa, ja sen vaikutuksesta myös masuunikuonan reaktioihin. Päätökseeni aloittaa kalorimetrianalyysit tässä vaiheessa olin tyytyväinen. Tästä oli minulle hyötyä siirryttäessä betonikokeisiin. Tiesin, miten hiilidioksidi vaikuttaa sementin hydrataatiolämpöön, ja pystyin hyödyntämään tietoa myöhemmissä kokeissa. Pystyin myös osoittamaan hiilidioksidin sitoutuvan, sillä sideaineen reaktiot hiilidioksidilla tai ilman sitä olivat selvästi toisistaan poikkeavia.

Aloitin betonikokeet nopeasti kovettuvalla sementillä, sillä siinä on sideaineena vain portlandklinkkeriä. En halunnut käyttää seosementtiä, sillä niissä vaihtoehtisten sideaineiden määrä vaihtelee tietyllä vaihteluvälillä erittäin. Poistin siis yhden muuttujan muutenkin herkässä kokeessa. Seostin sementtiä itse korvaamalla osan sementistä masuunikuonalla, jolloin tiesin sen tarkan määrän. Pysin

pitämään muuttujat minimissä. Aiemmassa tutkimushankkeessa tein nopeita muutoksia, enkä pystynyt sen takia tekemään johtopäätöksiä muuttujien vaikutuksesta. Nykyään ymmärrän toistettavuuden ja toistamisen merkityksen.

Erinäisten kokeilujen jälkeen otin huomioon hankkeen keston luomat realiteetit. Päätin kysyä suoraan betoniteollisuuden edustajalta, että minkälaisella reseptillä hänen edustamallaan tehtaalla valmistetaan betonia. Näin pääsin käsiksi siihen, minkä kanssa todellisuudessa työskentelen. Tajusin, että on turhaa käyttää tutkimusaikaa johonkin, millä ei loppupeleissä ole merkitystä betoniteollisuuden volyymituotantoa ajatellen.

Samasta syystä päätin keskittyä tutkimaan hiilidioksidin vaikutusta yleisimmin käytössä olevan seossementin reaktioihin. Vakioin vesi-sideainesuhteen ja muokkasin muita reseptin ominaisuuksia tarpeen vaatiessa. Näin kaikki tutkimuksen aikana vertailtavat betonit pysyivät paremmin hallittavissa, sillä suurin vaikutus betonin lujuteen on vesi-sideainesuhteella.

Koska olin jo aiemmin saanut tietoa hydrataatioreaktioiden tuottamasta lämmönkehityksestä kalorimetrianalyyseillä, kokeilin hyödyntää saamaani tietoa. Koska reaktiot nopeutuvat toisinaan hallitsemattomasti lämpötilan kasvaessa, oli tarpeen kokeilla betonimassan viilentämistä työstettävyyden säilymisen takaamiseksi. Tätä kokeiltiin viilentämällä osa-aineiden lämpötilaa ennen massan sekoittamista.

Kokeilin myös osa-aineiden sekoitusjärjestyksen ja kokonaissekoitusajan muuttamista. Koska en kokeilemillani toimenpiteillä päässyt haluttuihin lopputuloksiin, minun oli pakko lisätä uusi muuttuja reseptiikkaan. On yleisesti tiedossa, että huokostimen käyttäminen betonimassassa lisää sen notkeutta. Muodostuvat il-mahuokokset toimivat ikään kuin kuulalaakereina, jolloin massan liikkuvuus on suurempaa.

Huokostimen lisäys olikin tutkimuksen kannalta ratkaiseva asia. Massa muuttui selkeästi työstettävämmäksi ja täytti sille asetetut vaatimukset. Hiilidioksidi kuitenkin muuttaa jo tuoreen massan ominaisuuksia paljon, mutta muutokset olivat

hyväksyttäviä. Ilmamäärä tuoreessa massassa puolittui, ja sama oli havaittavissa kovettuneessa betonissa.

Jälkikäteen ajateltuna minun olisi pitänyt tarkastella enemmän betonin ilmamäärää. Olisi ollut tärkeää tavoitella hiilidioksidikäsitellyssä betonissa samaa ilmamäärää kuin kontrollibetonissa. Tiedän, että betonin lujuus kasvaa sen tiheyden kasvaessa. Minun ei tutkijana olisi pitänyt pelkästään iloita parantuneista lujuuksista, vaan selvittää, mitä lujuudelle tapahtuu, mikäli ilmamäärää kasvatetaan koebetonissa.

Hiilidioksidin lisäys aiheuttaa huokosrakenteeseen muutoksia. Pieniä suojahuokosia muodostuu vähemmän, mutta ne ovat tilavuudeltaan suurempia. Suoritin mikroskoopilla huokosparametrien määrittämisen By72-ohjeen mukaisesti sekä hiilidioksidikäsitellyille, että tavanomaisesti valmistetulle betonille. Parametrien mukaan suojahuokoksen lävistäjä on 0,2...0,8 mm.

Varmaa tietoa ei ole siitä, miksi hiilidioksidi vaikuttaa niin radikaalisti betonin ilmamäärään. Tutkimuksessa valmistetuissa betoneissa ilmamäärä puolittuu. Hiilidioksidin vaikutuksen on kuitenkin huomannut myös muut tutkijat, kuten Monkman kumppaneineen vuonna 2016. Selitystä en kuitenkaan havainnolle löytänyt. Oman hypoteesini mukaan on kaksi vaihtoehtoa:

- pienemmät suojahuokokset yhdistyvät muodostaen tilavuudeltaan suurempia huokosia
- kalsiumkarbonaattikiteitä muodostuu suojahuokosiin, jolloin pienimmät huokokset täyttyvät. Näin ollen vain tilavuudeltaan suuremmat huokokset analysoidaan

Jälkimmäistä ajatusta tukee se, että huokosten välinen etäisyys lähes kaksinkertaistuu. Mikäli pienimmät huokokset täyttyvät kalsiumkarbonaatilla, analyysissä huomioidaan vähemmän huokosia.

Mikäli en olisi kehittynyt tutkijana, en olisi osannut analysoida asiaa. Aiemmin olisin vain todennut, että hiilidioksidi vaikuttaa betonin huokosrakenteeseen. Olen

aina uskonut olevani tiedonjanoinen ja kaipaavani selitystä ilmiöille, mutta tiedonjano tuntuu kasvavan tietomäärän lisääntyessä.

Aion jatkaa itseni ammatillista kehittämistä läpi työurani. Tutkimus betonin hiilidioksidikäsittelyn parissa jatkuu Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoululla, vaikka itse jatkankin kehittymistäni toisenlaisen hankkeen projektipäällikkönä. Tutkimuksesta en kuitenkaan aio luopua, sillä tulevaisuudessa tavoitteenani on hakeutua tohtoriohjelmaan. Aihe saattaa hyvinkin olla tuoreen betonin hiilidioksidikäsittely.

5.2 Johtopäätökset

Olen kehittynyt viimeisen neljän vuoden aikana työssäni enemmän kuin olisin uskaltanut tuoreena tutkijana edes toivoa. Tietoni sementin ja betonin kemiasta on ollut lähes nolla aloittaessani, mutta nyt osaan selittää jo monia ilmiöitä itselleni ja muille. Lisäksi huomasin aineistoa kasatessani raportointini kehittyneen. Kerätessäni tietoa BECO-hankkeesta, tajusin hankkeesta kirjoittamani loppuraportin olevan todella suppea.

Tutkimustulokseni ovat luotettavia ja uskottavia. Olen saanut tunnustusta sekä hankkeiden ohjausryhmissä olleilta betoniteollisuuden edustajilta, että betonikemiaan erikoistuneelta tekniikan tohtorilta. Erityisen ylpeä olen jälkimmäisestä.

Osaan myös myöntää, jos en jostain asiasta tiedä. Mielestäni hyvän tutkijan ominaisuus onkin se, ettei pelkää epäonnistumisia, vaan jatkaa uteliaalla asenteella ilmiöiden selvittelyä. Minulla on myös muita hyvän tutkijan ominaisuuksia, kuten pitkäjänteisyys ja tarkkuutta yksityiskohdille.

Jatkuva tiedonjano on toisinaan myös huono ominaisuus. Minulle ei useinkaan riitä pintaraapaisu minua kiinnostavien ilmiöiden mekanismeista, vaan haluan tietää asian tarkalleen. Tämä saattaa toisinaan aiheuttaa haasteita aikataulun hallintaan ja turhauttaa muita kanssani asian parissa työskenteleviä.

Ikäväkseni joudun kuitenkin toteamaan olevani hedonisti. Onnistumisen tunteen tuoma riemu kiilaa toisinaan uteliaisuuteni edelle. Saadessani haluamiani tuloksia nautin vain onnistumisesta, enkä halua syvällisemmin edes ajatella syitä onnistumiselleni. Tämä on toiminnassani ehdottomasti haitaksi, sillä ilmiöt tulisi ymmärtää niin toivottujen, kuin ei-toivottujenkin tulosten kohdalla.

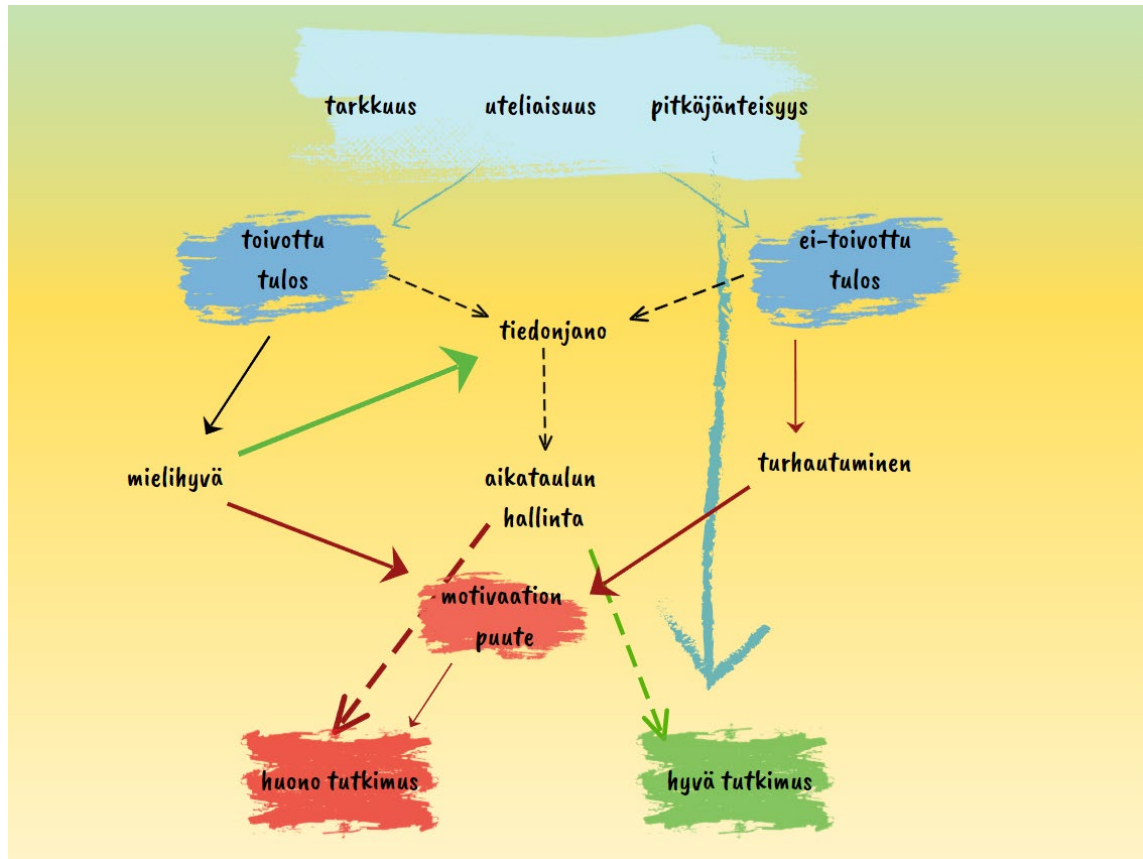
Huono puoleni ja ammatillista kehittymistäni jarruttava ominaisuuteni onkin kärsimättömyys. Kun tulokset eivät ole haluamani suuntaisia, turhaudun ja menetän helposti motivaationi. Kun taas tulokset ovat hyviä, innostun enkä koe tarpeelliseksi selvittää asiaa perin juurin. Onnistuessanikin siis koen tavallaan motivaation puutetta.

Hyvän tutkijan ominaisuuksia ovat tarkkuus, uteliaisuus ja pitkäjänteisyys. Näillä ominaisuuksilla on mahdollista tehdä hyvää tutkimusta. Omalla kohdallani olen kuitenkin huomannut, että tutkimustulosten laatu vaikuttaa lopputulokseen pääsemiseen. Kuvassa 19 olen esittänyt oman prosessini tutkimustuloksien luonteesta riippuen.

Vaikka olisin tyytyväinen saamiini tuloksii, ei se automaattisesti tarkoita, että tekisin hyvää tutkimusta. Parhaimmillaan toivottu tulos ruokkii tiedonjanoani. Tiedonjanoa tyydyttäessäni vastaan tulee aikataulu. Mikäli ymmärrän tyytyä tutkimuksen kannalta riittävään tietoon, on mahdollista pitäytyä aikataulussa ja tehdä hyvää tutkimusta. Jos taas uppoudun aivan liian syvällisesti tiedon hankkimiseen, aikataulu pettää, ja tutkimus kärsii.

Toivottujen tulosten kääntöpuoli minulla taas on mielihyvän tunne. Mikäli toteutan hyvää tutkimusta, analysoin tulosta ja se kasvattaa tiedonjanoani. Huonommassa tapauksessa iloitsen onnistumisesta, ja jätän analysoimatta tulokseen johtaneet ilmiöt. Jos minulla ei ole motivaatiota tutkia asiaa, on se lopputuloksen kannalta huono juttu.

Ei-toivottujen tulosten myötä kärsimätön luonteeni saa minut usein tuntemaan turhautumista. Hyvä tutkija ei lannistu tuloksista, vaan hyödyntää uteliaisuuttaan ja tarkkuuttaan tutkimalla asiaa. Lopputulos tutkimuksen kannalta voi olla joko hyvä tai huono, riippuen ajankäytön suunnittelusta ja hallinnasta (KUVA 19).



KUVA 19. Prosessikuvaaja tutkijan ominaisuuksista tutkimuksen lopputulokseen.

Tätä opinnäytetyötä kirjoittaessani tulin erityisen tietoiseksi kehityksestäni ja ominaisuuksieni hyödyntämisestä ja kehittamisestä työssäni. Näiden asioiden analyttinen pohtiminen kannustaa minua jatkuvaan parantamiseen ja tarkempaan työsuunnitteluun. Osaan jatkossa myös kiinnittää huomiota eri tavalla huonoihin ominaisuuksiini. Olen onnekaassa asemassa, koska olen päässyt toteuttamaan merkittävää tutkimus- ja kehittämistyötä.

LÄHTEET

Betonitieto n.d. Sementti. Verkkosivu. Viitattu 21.8.2024. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aiheet/sementti.html>

Emondson, A. 2011. Strategies for Learning from Failure. Verkkosivu. Viitattu 17.11.2024. <https://hbr.org/2011/04/strategies-for-learning-from-failure>

Fu, X. & al. 2024. Storing CO₂ while strengthening concrete by carbonating its cement in suspension. Communications material 5 (109). Verkkolehti. Viitattu 31.10.2024 <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00546-9>

Global Cement and Concrete Association s.a. About Cement & Concrete. Verkkosivu. Viitattu 11.10.2024. <https://gccassociation.org/our-story-cement-and-concrete/>

Illikainen, M. 2019. Sementin valmistus on suurin ihmisen aiheuttamien CO₂-päästöjen lähde... Verkkosivu. Viitattu 31.10.2024. <https://tekniikanmaailma.fi/sementin-valmistus-on-suurin-ihmisen-aiheuttamien-co2-paastojen-lahde-teollisuuden-jatteista-voidaan-valmistaa-betonia-joka-ei-sisalla-ollenkaan-sementtia/>

Korppi, S. 2019. Hiilidioksidin talteenottolaitteisto. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Prosessitekniikan tutkinto-ohjelma. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 17.11.2024. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/161651/oppari.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Kähkönen, M. 2019. Betonin vedenpaineeneristys kristallisoivilla lisäaineilla. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Kandidaatintyö. Viitattu 19.11.2024. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201906232173>

Lindsey, R. 2024. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. Verkkosivu. Viitattu 17.11.2024. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>

Meng, F., Meng, Y., Ju, T., Han, S., Lin, L & Jiang, J. 2022. Research progress of aqueous amine solution for CO₂ capture: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 168. Viitattu 15.11.2024. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122007845?casa_token=dG0t4oKfgy-IAAAAA:IC9GaH4dP94Azb-d3YilW8qEgWieZaBNR4iG39Kz42pClswA-QEd3LcnNKuMawALBQG7QirUYJgg

Monkman, S., MacDonald, M., Hooton, R. & Sandberg, P. 2016. Properties and durability of concrete produced using CO₂ as an accelerating admixture. Cement and Concrete Composites 74. Viitattu 10.11.2024 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095894651630614X?via%3Dihub>

Myllyniemi, A. 2021. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta. Tampereen yliopisto. Kandinaatintyö. Viitattu 17.11.2024. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/134571/MyllyniemiAleksi.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Mäkikouri, S. 2019. Muutetaan betonin ongelmat ratkaisuksi. Verkkosivu. Viitattu 8.11.2024. <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/muutetaan-betonin-ongelmat-ratkaisuksi>

Olajire, A. 2010. CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications: A review. Energy 35. Viitattu 17.11.2024. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544210000848?casa_token=OWrYkA1O_ZYAAAAA:hfLS9jiELLWcxPpy8RqeCU1QIXcIOAHyEky0hfh-cfpfZVNS3HMwiVhudKLzxlZIS7cKNB8xNIU

Qian, X. 2018. Carbon dioxide as an admixture for better performance of OPC-based concrete. Journal of CO₂ Utilization 25. Viitattu 10.11.2024.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212982017308508?via%3Dihub>

SFS 5445. 1988. Betoni. Vetolujuus. Viitattu 4.12.2024.

SFS 7022. 2024. Betoni. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa. Viitattu 24.11.2024.

SFS-EN 12350-2. 2019. Tuoreen betonin testaus. Osa 2: Painuma. Viitattu 4.12.2024.

SFS-EN 12350-6. 2019. Testing fresh concrete. Part 6: Density. Viitattu 4.12.2024.

SFS-EN 12350-7. 2019. Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. Painemenetelmät. Viitattu 4.12.2024.

SFS-EN 12390-2. 2019. Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten. Viitattu 24.11.2024.

SFS-EN 12390-3. 2019. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. Viitattu 24.11.2024.

SFS-EN 14630. 2007. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. Viitattu 24.11.2024.

SFS-EN 196-1. Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength. Viitattu 24.11.2024.

SFS-EN 206. 2014. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus. Viitattu 24.11.2024.

SSAB. 2022. SSAB suunnittelee uutta tuotantojärjestelmää... Verkkosivu. Viitattu 24.11.2024. <https://www.ssab.com/fi-fi/uutiset/2022/01/ssab-suunnittelee-uutta-tuotantojarjestelm-pohjoismaisille-toiminnoilleen-ja-aikaistaa-vihre-siirtymn>

Syrjälä, J. 2020. Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista. Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta. Tampereen yliopisto. Kandidaatintyö. Viitattu 11.11.2024. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/119301/SyrjalaJoni.pdf?sequence=2>

Tykkä, E. 2023a. Hiilidioksidi - hiljainen tuhoaja... Verkkosivu. Viitattu 20.9.2024. <https://www.xamk.fi/hiilidioksidi-hiljainen-tuhoaja-vai-valttamaton-elinehto/>

Tykkä, E. 2023b. Yrityksen ja erehdyksen kautta... Verkkosivu. Viitattu 22.9.2024. <https://www.xamk.fi/yrityksen-ja-erehdyksen-kautta-kohti-uusia-epaonnistumisia/>

Wang, Y. 2022. The Capture and Transformation of Carbon Dioxide in Concrete: A Review. *Symmetry* 14 (12), 2615. Viitattu 19.11.2024. <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/12/2615>

Yu, C., Huang, C & Tan, C. 2012. A review of CO₂ capture by absorption and adsorption. *Aerosol Air Qual Res.* 12: 745–769. Viitattu 17.11.2024 <https://aaqr.org/articles/aaqr-12-05-ir-0132>