

Oliver Andre Lenes  
Vebjørn Strypet

# Biocrete - Karbonfangst og -lagring ved bruk av biokull i betong

Masteroppgave i Konstruksjonsteknikk  
Veileder: Sverre Smeplass  
Medveileder: Terje Kanstad  
Juni 2022



Oliver Andre Lenes  
Vebjørn Strypet

# **Biocrete - Karbonfangst og -lagring ved bruk av biokull i betong**

Masteroppgave i konstruksjonsteknikk  
Veileder: Sverre Smeplass  
Medveileder: Terje Kanstad  
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for konstruksjonsteknikk





## MASTEROPPGAVE 2022

|                   |                  |  |
|-------------------|------------------|--|
| FAGOMRÅDE: Betong | DATO: 09.06 2022 | ANTALL SIDER: 80 sider + 42 sider appendix |
|-------------------|------------------|--|

TITTEL:

### **Biocrete – Karbonfangst og -lagring ved bruk av biokull i betong**

Biocrete – Carbon capture and storage using biochar in concrete

UTFØRT AV:

Oliver Andre Lenes og Vebjørn Strypet



SAMMENDRAG:

Biocrete er et FoU-prosjekt i regi av Snøhetta og konseptet er betong med tilsatt biokull. Biokull produseres ved pyrolyse, en teknologi som baserer seg på termisk nedbryting av organisk materiale med minimal oksygentilførsel. Råstoffet som er tiltenkt produksjon av biokull er avfallstrevirke fra byggebransjen. Ved å tilsette biokull i betongen vil man kunne lagre karbonet som er bundet i biokullet, og dermed forhindre utslipp fra forbrenning. For å kunne dokumentere karbonlagringen ønsket aktørene i prosjektgruppa dokumentasjon på Biocrete som inkluderer den positive effekten lagringen gir. En foreløpig løsning er å kombinere en EPD for betongen med en LCA-analyse for biokullet. Dette lar utførende part dra nytte av karbonlagringen i det totale klimagassregnskapet. Denne løsningen vil være gjeldende frem til EPD-standardene skal revideres i 2024.

Gjennom våren ble det gjennomført flere laboratorieforsøk for å kartlegge den nye betongens struktur og fukttekniske egenskaper. Resultatene var gode og viser at Biocrete ser ut til å være en tettere og mer bestandig betong enn normalbetong i tilsvarende fasthetsklasser. Dette gir større bruksområde da biokullet også tilfører betongen tekniske egenskaper og Biocrete fungerer dermed ikke bare som karbondeponi.

Kapasiteten til Biocrete ble testet hos Con-Form og Betong Øst på Orkanger. Resultatene viser lavere trykkfasthet og E-modul i forhold til normalbetong. Det førte til at Biocrete hadde lavere kapasitet i det gjennomførte bruddforsøket, men forskjellen var ikke stor. Dette var et godt resultat som følge av at verdiene ikke ble lavere enn forventet. Biocrete hadde god sikkerhetsmargin i forhold til beregnet momentkapasitet etter Eurokode 2.

FAGLÆRER(E): Terje Kanstad (Institutt for konstruksjonsteknikk)

VEILEDER(E): Sverre Smeplass (Skanska Norge AS), Terje Kanstad (Institutt for konstruksjonsteknikk)

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk

---

## Forord

Denne rapporten er en besvarelse på masteroppgaven i emnet TKT4950 ved institutt for konstruksjonsteknikk med fordypning i betong. Oppgaven er skrevet våren 2022 ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU).

Oppgaven er en videreføring av masteroppgaven om Biocrete skrevet våren 2021 av 3 studenter ved NTNU, samt vår egen prosjektoppgave fra høsten 2021. Arbeidet som har blitt utført det siste året har gitt positive resultater og avdekket flere nye positive egenskaper ved bruk av biokull i betongen. Motivasjonen var derfor høy til å fortsette arbeidet innenfor dette tema etter prosjektoppgaven og gjennom masteroppgaven.

Rapporten tar utgangspunkt i et FoU-prosjekt ledet av Snøhetta og ser på mulighetene knyttet til tilsetning av karbonholdig biokull i betong for å forhindre karbonet i å slippe ut i atmosfæren som CO<sub>2</sub>. I tillegg undersøkes ulike bruksområder for en slik betong. Arbeidet er utført i samarbeid med Snøhetta, Skanska, Con-Form, Betong Øst, Norsk Biokullnettverk og Oplandske Bioenergi og NTNU.

Vi vil gjerne takke Sverre Smeplass fra Skanska for god veiledning og oppfølging gjennom hele semesteret. Det har vært spennende og lærerikt å jobbe med en av Norges aller beste betongteknologer. Hans kunnskap har vært avgjørende for funnene i denne oppgaven. Vi vil også takke Terje Kanstad ved NTNU for god veiledning i forbindelse med konstruksjonsdelen av oppgaven. Videre vil vi takke Snøhetta og prosjektgruppa for muligheten til å bidra og å få være en del av et sterkt faglig miljø. Tilgang på eksisterende dokumenter, god oppfølging ved behov og gode diskusjoner har vært viktig for oppgavens kvalitet. En stor takk rettes også til behjelpelige aktører fra næringslivet som stilte opp til intervju og bidro med innspill. Per Øystein Nordtug fra NTNU og Ola Skjølvold fra SINTEF må også takkes for lån av utstyr og god hjelp med laboratoriearbeid.

Til slutt vil vi takke hverandre for godt samarbeid og et perfekt siste semester, både på lesesal og på fritid.

---

## Abstrakt

Tallene fra LCA-analysen gjennomført av Accend viser at lagringspotensialet er noe lavere enn tidligere antatt. Biokullet har brutto lagringspotensial på 3,275 tonn CO<sub>2</sub> per tonn biokull. Avviket fra tidligere antakelser, der det har blitt konkludert med brutto lagringspotensial på henholdsvis 3,45 og 3,49 tonn CO<sub>2</sub>, skyldes hovedsakelig en liten forskjell i biokullets karboninnhold og en sikkerhetsfaktor på 2,5 % som ble brukt i analysen. Med dette lagringspotensialet vil det likevel være mulig å kompensere for utslipp knyttet til produksjon av betongen.

For å dokumentere karbonlagringen ønsket aktørene i prosjektgruppa å få en EPD på Biocrete som inkluderte lagringseffekten og dermed sørger for at betongen, avhengig av mye biokull som tilsettes, vil nærme seg karbonnøytral, eller til og med karbonnegativ. Det foreløpige svaret fra EPD Norge er at de ikke vil etterkomme aktørenes ønske. De begrunner dette med at prinsippet for å lage en EPD for betong tar utgangspunkt i summen av alle delkomponenter og bidrag fra produksjon. Hvis biokull skulle ha blitt regnet inn på denne måten måtte man ha hatt en EPD for biokullet med negativ verdi, noe som ikke lar seg gjøre med dagens regneregler og standarder for EPD. Den midlertidige løsningen, som presenteres i oppgaven, er en kombinasjon av to dokumenter i det totale klimagassregnskapet. En EPD for betongen kombinert med en LCA-analyse for biokullet lar utførende part dra nytte av karbonlagringen i form av at den negative GWP-verdien fra biokullet kompenserer for den positive GWP-verdien fra betongproduksjonen. Til tross for at den midlertidige løsningen kan gi ønsket effekt i det totale klimagassregnskapet, er den ikke optimal, en EPD som inkluderer lagringseffekten er fremdeles å foretrekke. EPD-standardene skal revideres i 2024, og med CCS som en høyaktuell, raskt voksende teknologi, er det svært sannsynlig at det kan komme endringer som tillater at karbonlagring snart kan regnes med negativ verdi.

Gjennom våren ble det gjennomført flere laboratorieforsøk for å kartlegge den nye betongens struktur og fukttekniske egenskaper. Resultater fra forsøk på vannabsorpsjonsevnen til biokullet viste at vannabsorpsjonstallet ligger på rundt 150 % og partikkeldensiteten på ca. 475 kg/m<sup>3</sup>. Selv om disse resultatene stemmer bra med funn gjort i oppgaven, kan det være forskjell på ulike produksjoner av biokull. Dette som følge av mulige variasjoner i råstoff og pyrolyseringsprosessen. Ulik nedmaling kan også gi utslag. Det vil derfor bli viktig at produsentene med tid kan levere nøyaktige data for biokullet slik at betongreseptene blir best mulig. Fra vannabsorpsjonsforsøket gikk det også frem at initielt fuktnivå i biokullet ikke påvirket støpeligheten nevneverdig. Resultatet gir en god indikasjon på at vannabsorpsjonen til biokullet foregår spontant og at det derfor er uviktig om fuktigheten allerede befinner seg i biokullet eller tilsettes ved blanding. Det viste seg dog at forfukting kan ha positiv innvirkning på trykkfastheten.

Resultater fra innledende uttørkingsforsøk impliserte veldig lang uttørkingstid, og at den store restfuktigheten i betongen kunne by på problemer i flere av byggets faser. Det ble videre utført RF-målinger som viste at RF i betongen var vesentlig lavere enn forventet med gjennomsnittlig

---

RF midt i prøvestykkene på ca. 75 %. Resultatene ga tro på at biokull har veldig fin porøsitet og følgelig bidro til at betong med biokull var en tett betong som tørket ut svært langsomt. Antagelsene om en tett betong ble bekreftet gjennom kapillærabsorpsjonsforsøk gjennomført av SINTEFs avdeling på Gløshaugen. Gjennomsnittlig motstandstall for Biocrete med 60 kg biokull per m<sup>3</sup> betong og proporsjonert masseforhold på 0,4 var 1,05E+08 s/m<sup>2</sup> og er i samme område som en ordinær konstruksjonsbetong med tilsvarende masseforhold. Det ser med andre ord ikke ut til at biokullet påvirker transporthastigheten og må følgelig, som antatt, ha veldig fin porøsitet. Sementforbruket til en Biocrete i fasthetsklasse B30 er noe lavere enn en ordinærbetong med tilsvarende fasthet som følge av at biokullet er en veldig god filler. I tillegg til dette bidrar biokullet til å senke masseforholdet til 0,4, sammenlignet med en vanlig B30 som typisk har masseforhold 0,54. Dermed er Biocrete en vesentlig tettere og mer bestandig betong enn normalbetong i tilsvarende fasthetsklasser. Biocrete, som tidligere har vært tiltenkt innendørs bruk, ser dermed ut til å være en svært bestandig betong som også kan brukes utendørs og i utsatte miljøer.

Kapasiteten til Biocrete ble testet hos Con-Form og Betong Øst på Orkanger. Det ble støpt ut to dekker, ett med biocretepåstøp og ett med normalbetong for å sammenligne kapasiteten til de to. Laboratorieforsøk utført av SINTEF på de to dekkene resulterte i en trykkfasthet på 30,9 MPa og en E-modul på 24 GPa for Biocrete. Til sammenligning lå normalbetongens trykkfasthet på 36,9 MPa og E-modulen på 31,3 GPa. Momentkapasiteten ble undersøkt ved å plassere en punktlast midt på de fritt opplagte dekkene. På grunn av lavere trykkfasthet og E-modul hadde dekket med Biocrete litt større nedbøying underveis og gikk til brudd noe tidligere enn normalbetongdekket. Det var som forventet og et godt resultat siden forskjellen mellom dekkene ikke oversteg forventet verdi. Momentkapasiteten ble i tillegg teoretisk beregnet ved hjelp av Eurokode 2 for å undersøke om standarder for normalbetong kan overføres til Biocrete. Biocretedekket hadde en kapasitet fra forsøk som var godt over beregnet kapasitet. Et forholdstall på 1,22 mellom  $M_{Ed}/M_{Rd}$  for dekket er dog litt mindre enn forholdstallet for normalbetongen som var på 1,32. På grunn av dette kan det være nødvendig med en korreksjonsfaktor for å oppnå samme sikkerhetsmargin som normalbetongen dersom man bruker eksisterende standarder for Biocrete. Videre ble et enkelt heftforsøk på sylindereprøver fra dekkene med biocretepåstøp også gjennomført. Her kom det frem at heftstyrken mellom Biocrete og normalbetong var større enn strekkfastheten til Biocrete med 60 kg biokull per m<sup>3</sup>. En strekkfasthet på 2,05 MPa for Biocrete er 6,6 % av trykkfastheten, noe som er ganske lavt sammenlignet med korresponderende prosentandel for vanlig betong.

En konstruksjonsanalyse av veggelementer med Biocrete ble gjort ved å konstruere et M-N diagram for en standard Con-Form skallvegg. I analysen ble det brukt Biocrete med 60 kg/m<sup>3</sup> biokull i vangene og 90 kg/m<sup>3</sup> i senter. Trykkfastheten til de to biocreteblandingene ble testet i laboratoriet av fjorårets masterstudenter til 37,65 MPa for vangebetongen og 22,5 MPa for senterbetongen. M-N diagrammet viste at en skallvegg med Biocrete vil ha lavere kapasitet enn minimumskravet til Con-Form som ligger på B30 kvalitet i både senter og vangene. Det vil altså si at Biocrete med 90 kg/m<sup>3</sup> biokull ikke oppfyller kravet til Con-Form på minimum B30 kvalitet, mens Biocrete med 60 kg/m<sup>3</sup>



---

biokull vil ligge akkurat innenfor grensa. Minimumskravet til Con-Form er veldig konservativt, spesielt for innvendige boligvegger. Det vil derfor være mulig å senke kravet for trykkfasthet til senterbetongen for å tillate større mengder biokull og dermed kunne lagre mer karbon.

---

## Abstract

Results from the LCA analysis conducted by Accend shows that the storage potential is slightly lower than previously assumed. The biochar used in the analysis has a gross storage potential of 3,275 tons CO<sub>2</sub> for every ton of biochar. The deviation from previous assumptions, which has concluded with a gross storage potential of respectively 3,45 and 3,49 tons CO<sub>2</sub> for every ton of biochar, is mainly due to a minor difference when presuming the content of carbon in the biochar and a safety factor of 2,5 % which was used in the analysis. With the presented storage potential, it is possible to compensate for greenhouse gas emissions from the concrete production.

To document the carbon storage, the participants in the project group desired an EPD for Biocrete which included the storage effect and thus ensures that the concrete, depending on the amount of added biochar, will get close to being carbon neutral, or even carbon negative. The preliminary answer from EPD Norway is that they will not comply to the request. They justify this decision by clarifying that the principle for making an EPD is based on the sum of every subcomponent and contribution from production. If biochar was to be calculated equally, one would need to have an EPD for the biochar with negative value, which is not possible because of current standards and calculation rules. The temporary solution, which is presented in the report, is a combination of two documents in the greenhouse gas accounts. An EPD for the concrete combined with a LCA analysis for the biochar will allow entrepreneurs to benefit from the negative GWP-values the biochar provides and use this effect to compensate for the positive GWP-values from concrete production. Even though the temporary solution can give the desired effect in the greenhouse gas accounts, it is not optimal, and an EPD that includes the storage effect is still preferred. EPD standards are to be revised in 2024, given the fact that CCS is a highly relevant, quickly growing technology, it is very likely that there will be alterations that permits carbon storage to be calculated with negative value.

During the spring, several laboratory tests were conducted to learn about the properties of Biocrete, concerning moisture and structure. The results from the water absorption test showed that the water absorption capacity for biochar is approximately 150 % and the particle density about 475 kg/m<sup>3</sup>. Although these values seem to be correct for the biochar used in the tests, they might differ from other biochar productions. This may be due to possible variations in the materials used for the pyrolysis and the pyrolysis process itself. Different grinding of the biochar might also affect the properties. Because of these uncertainties, the producers will have to present exact data for the biochar in order for the concrete recipes to be as exact as possible. The water absorption tests also showed that initial moisture content in the biochar did not seem to notably affect the concretes castability. The results indicate that the water absorption in the biochar occurs spontaneously, which again indicates that it is not important whether the moisture is already in the biochar or added when mixing the concrete. Although, it did show that the compressive strength could benefit from use of pre-moistened biochar.

---

Results from introductory dehydration test implied a very long dehydration time. Further, RH measurements were carried out. The results showed a RH of approximately 75 % in the middle of the concrete samples. This value was, because of the high water content, a lot lower than expected. The findings indicate that biochar has fine porosity and hence contributes to make Biocrete a very dense concrete which dehydrates extremely slow. The assumptions regarding the density of the concrete were confirmed when SINTEF conducted a capillary absorption test in their laboratories at Gløshaugen. The average resistant number for Biocrete with 60 kg biochar per m<sup>3</sup> concrete, with proportioned mass ratio of 0,4, was 1,05E+08 s/m<sup>2</sup>. This is the same value as for an ordinary construction concrete with equivalent mass ratio. In other words, it seems like the biochar doesn't affect the transport speed and hence, must have very fine porosity. The cement consumption for a Biocrete with strength class B30 is slightly lower than an ordinary concrete with equivalent strength because biochar is a good filler. In addition to this, the biochar contributes to lower the mass ratio to 0,4 compared to an ordinary concrete which typically has a mass ratio of 0,54. Hence, Biocrete seem to be a significantly denser and more durable concrete than concrete without biochar with corresponding strength classes. Biocrete, which previously has been intended for indoor use, does now look to have the necessary durability properties to handle exposed environments.

The Biocrete's capacity was tested at Con-Form and Betong Østs facilities at Orkanger. Two precast formwork slabs were casted, one with an additional cast of Biocrete and one with ordinary concrete to compare the capacity of the two. Laboratory tests carried out by SINTEF showed that Biocrete had a compression strength of 30,9 MPa and E-modulus of 24 GPa. The corresponding values for the ordinary concrete was 36,9 MPa and 31,3 GPa. The moment capacity was investigated by placing a point load centered on the freely supported slabs. During the test, it became clear that the slab with Biocrete experienced greater deflection than the slab with ordinary concrete due to lower E-modulus and compressive strength. As for the ultimate load, this was also lower for the slab with Biocrete, but the difference was not big. This was as expected, and a positive result because the difference did not exceed the expected value. The moment capacity was theoretically calculated by following the steps in Eurocode 2 to see whether standards for ordinary concrete was possible to transfer to Biocrete. Tests showed that the capacity of the slab with Biocrete was well above calculated capacity. A ratio of 1,22 between  $M_{Ed}/M_{Rd}$  for the slab is, however, a little lower than the corresponding number for the ordinary concrete of 1,32. Because of this, it might be necessary to apply a correction factor if using existing standards when calculating Biocrete. Further, a bond capacity test of cylinders from the Biocrete slab was conducted. The results from the test showed that the bond strength between the Biocrete and the ordinary concrete was greater than the bond strength of a Biocrete with 60 kg biochar per m<sup>3</sup>. A bond strength of 2,05 MPa for Biocrete is 6,6 % of its compressive strength. This is quite low compared to the corresponding percentage for an ordinary concrete.

A construction analysis of wall elements with Biocrete was carried out by constructing a M-N diagram for a standard Con-Form shell wall. In the analysis, a Biocrete with 60 kg biochar per

---

$\text{m}^3$  in the leaves and 90 kg biochar per  $\text{m}^3$  in the center was used. The compressive strength of the two different concretes was tested in the laboratory by the master students from last year and resulted in 37,65 MPa for the leaves and 22,5 MPa for the center. The M-N diagram showed that a shell wall with the Biocrete combination described above would have insufficient capacity. This is because Con-Forms minimum requirement for their shell walls requires a B30 quality. To fulfill this requirement, one would have to use Biocrete with 60 kg biochar per  $\text{m}^3$  both in the leaves and in the center of the wall. This requirement is, however, very much on the safe side, meaning it is possible to lower the compressive strength for the center concrete in order to add larger amounts of biochar and thus be able to store more carbon.

---

# Innhold

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Forord</b>                                | <b>i</b>    |
| <b>Abstrakt</b>                              | <b>iv</b>   |
| <b>Abstract</b>                              | <b>vii</b>  |
| <b>Innhold</b>                               | <b>viii</b> |
| <b>Figurer</b>                               | <b>xii</b>  |
| <b>Tabeller</b>                              | <b>xiii</b> |
| <b>1 Introduksjon</b>                        | <b>1</b>    |
| 1.1 Oppgavebeskrivelse . . . . .             | 1           |
| 1.2 Oppgavens oppbygging . . . . .           | 2           |
| 1.3 Begrepsavklaring . . . . .               | 2           |
| 1.4 Samarbeid med eksterne aktører . . . . . | 2           |
| <b>2 Mål og hensikt</b>                      | <b>3</b>    |
| <b>3 Biocrete</b>                            | <b>4</b>    |
| 3.1 Biokull . . . . .                        | 4           |
| 3.2 Biokull i betong . . . . .               | 4           |
| 3.3 Global og nasjonal motivasjon . . . . .  | 5           |
| <b>4 Sammendrag av tidligere arbeid</b>      | <b>7</b>    |
| 4.1 Masteroppgave 2021 . . . . .             | 7           |
| 4.1.1 Karbonregnskap . . . . .               | 7           |
| 4.1.2 Reseptutvikling . . . . .              | 7           |
| 4.1.3 Fullskalaforsøk . . . . .              | 8           |
| 4.1.4 Øvrige funn og konklusjon . . . . .    | 10          |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.2      | Prosjektoppgave 2021 . . . . .   | 10        |
| 4.2.1    | Intervju med aktører . . . . .   | 11        |
| 4.2.2    | Laboratoriearbeid . . . . .  | 11        |
| 4.2.3    | Nedbøyningsforsøk . . . . .  | 12        |
| 4.2.4    | EPD . . . . .  | 13        |
| 4.2.5    | Konklusjon . . . . .   | 13        |
| <b>5</b> | <b>EPD og LCA</b>  | <b>15</b> |
| 5.1      | Karbonfangst . . . . .   | 15        |
| 5.2      | Dokumentasjon . . . . .  | 16        |
| 5.2.1    | LCA-analyse biokull . . . . .  | 17        |
| 5.2.2    | Videre arbeid . . . . .  | 20        |
| 5.3      | Råstoff . . . . .  | 21        |
| 5.3.1    | Tilgjengelighet . . . . .  | 21        |
| 5.3.2    | Anvendelse . . . . .   | 22        |
| 5.4      | Intervjuer . . . . .   | 23        |
| 5.4.1    | Christofer Skaar. Seniorforsker, SINTEF . . . . .                          | 23        |
| 5.4.2    | Oddbjørn Dahlstrøm Andvik. Energi- og miljørådgiver, Asplan Viak . . . . . | 24        |
| 5.4.3    | Stein Stoknes. Prosjektleder, FutureBuilt . . . . .                        | 25        |
| <b>6</b> | <b>Fukt og struktur</b>  | <b>27</b> |
| 6.1      | Struktur og uttørking . . . . .  | 27        |
| 6.1.1    | Betongens oppbygging og struktur . . . . .                                 | 27        |
| 6.1.2    | Porøsitet og struktur . . . . .  | 29        |
| 6.1.3    | Egenuttørkings- og uttørkingssvinn . . . . .                               | 29        |
| 6.2      | Vannabsorpsjonsevne biokull . . . . .                                      | 30        |
| 6.2.1    | Mål og hensikt . . . . .   | 30        |
| 6.2.2    | Fremgangsmåte . . . . .  | 31        |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 6.2.3    | Resultat . . . . .                                 | 33        |
| 6.2.4    | Diskusjon . . . . .                                | 34        |
| 6.3      | Uttørkingsforsøk . . . . .                         | 36        |
| 6.3.1    | Fremgangsmåte . . . . .                            | 36        |
| 6.3.2    | Resultater . . . . .                               | 37        |
| 6.3.3    | Diskusjon . . . . .                                | 39        |
| 6.4      | DexorBond . . . . .                                | 40        |
| 6.5      | RF-målinger . . . . .                              | 41        |
| 6.5.1    | Fremgangsmåte . . . . .                            | 41        |
| 6.5.2    | Resultater . . . . .                               | 42        |
| 6.5.3    | Diskusjon . . . . .                                | 42        |
| 6.6      | Struktur og bestandighet . . . . .                 | 43        |
| 6.6.1    | Kapillærabsorpsjon . . . . .                       | 43        |
| 6.7      | Kapillærabsorpsjonsforsøk . . . . .                | 45        |
| 6.7.1    | Resultater . . . . .                               | 46        |
| 6.7.2    | Teoretisk beregning av faststoffdensitet . . . . . | 47        |
| 6.7.3    | Diskusjon . . . . .                                | 49        |
| <b>7</b> | <b>Konstruksjonsanalyse</b>                        | <b>52</b> |
| 7.1      | Mål og hensikt . . . . .                           | 52        |
| 7.2      | Teori . . . . .                                    | 52        |
| 7.2.1    | Momentkapasitet . . . . .                          | 53        |
| 7.2.2    | Risskapasitet . . . . .                            | 53        |
| 7.2.3    | Skjærkapasitet . . . . .                           | 54        |
| 7.2.4    | M-N diagram . . . . .                              | 55        |
| 7.3      | Fremgangsmåte . . . . .                            | 58        |
| 7.3.1    | Kapasitetforsøk dekker . . . . .                   | 58        |
| 7.3.2    | Kapasitet vegger . . . . .                         | 61        |

---

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 7.4      | Resultat . . . . .                             | 62        |
| 7.4.1    | Momentkapasitet dekker . . . . .               | 62        |
| 7.4.2    | Risskapasitet dekker . . . . .                 | 64        |
| 7.4.3    | Skjærkapasitet dekker . . . . .                | 66        |
| 7.4.4    | Heft dekker . . . . .                          | 67        |
| 7.4.5    | M-N diagram vegg . . . . .                     | 67        |
| 7.5      | Diskusjon . . . . .                            | 74        |
| 7.5.1    | Dekker . . . . .                               | 74        |
| 7.5.2    | Vegger . . . . .                               | 76        |
| <b>8</b> | <b>Konklusjon</b>                              | <b>78</b> |
| 8.1      | LCA og EPD . . . . .                           | 78        |
| 8.2      | Fukt og struktur . . . . .                     | 78        |
| 8.3      | Konstruksjonsanalyse . . . . .                 | 79        |
| <b>9</b> | <b>Videre arbeid</b>                           | <b>80</b> |
|          | <b>Referanser</b>                              | <b>81</b> |
|          | <b>Appendix</b>                                | <b>84</b> |
| A        | Blandeskjema . . . . .                         | 84        |
| A.1      | Blandeskjema Biocrete60 . . . . .              | 84        |
| A.2      | Blandeskjema Biocrete90 . . . . .              | 85        |
| B        | Reseptkorleksjon . . . . .                     | 86        |
| B.1      | Resptkorleksjon 0 % initiell fukt . . . . .    | 86        |
| B.2      | Reseptkorleksjon 50 % initiell fukt . . . . .  | 86        |
| B.3      | Reseptkorleksjon 100 % initiell fukt . . . . . | 87        |
| C        | Prøving Sintef . . . . .                       | 88        |
| C.1      | Blandeskjema biocrete 60 . . . . .             | 88        |



---

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| C.2 | Trykkfasthet Orkanger . . . . .                    | 89  |
| C.3 | Kapillærabsorpsjon skive A . . . . .               | 89  |
| C.4 | Kapillærabsorpsjon skive B . . . . .               | 90  |
| C.5 | Kapillærabsorpsjon skive C . . . . .               | 90  |
| C.6 | Kapillærabsorpsjon skive D . . . . .               | 91  |
| C.7 | Kapillærabsorpsjon skive E . . . . .               | 91  |
| C.8 | Kapillærabsorpsjon skive F . . . . .               | 92  |
| C.9 | Kapillærabsorpsjon skive A-F . . . . .             | 92  |
| D   | Teoretisk beregning av faststoffdensitet . . . . . | 93  |
| D.1 | Regneark . . . . .                                 | 93  |
| D.2 | Resept . . . . .                                   | 93  |
| E   | LCA-rapport biokull . . . . .                      | 94  |
| F   | EPD Biocrete . . . . .                             | 117 |

## Figurer

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | Sammenheng mellom mengde biokull, GWP-verdi og fasthetsklasse . . . . . | 5  |
| 4.1 | Siktekurve . . . . .  | 9  |
| 5.1 | Systemgrenser . . . . .   | 18 |
| 5.2 | Karbonlagringsformel . . . . .  | 19 |
| 5.3 | CO <sub>2</sub> -regnskap . . . . .                                     | 20 |
| 6.1 | Betongfaser . . . . .   | 28 |
| 6.2 | Forfukting av biokull . . . . .   | 32 |
| 6.3 | Våtblanding mørtler . . . . .   | 33 |
| 6.4 | Sammenheng mellom initiell fukt og vannabsorpsjon til biokull . . . . . | 35 |
| 6.5 | Fukttap . . . . .   | 38 |
| 6.6 | Protimeter og sensorer . . . . .  | 41 |
| 6.7 | Absorpsjonsforløp . . . . .   | 44 |

---

|      |  |    |
|------|--|----|
| 6.8  | Regresjonslinjer for absorpsjonsforløp . . . . .             | 44 |
| 6.9  | Regresjonslinjer for skive A-F . . . . .                     | 46 |
| 7.1  | Skjærarmering . . . . .                                      | 54 |
| 7.2  | Tøyningstilstand 1 . . . . .                                 | 55 |
| 7.3  | Tøyningstilstand 2 . . . . .                                 | 56 |
| 7.4  | Tøyningstilstand 3 . . . . .                                 | 57 |
| 7.5  | Tverrsnittet til dekket på Orkanger . . . . .                | 58 |
| 7.6  | Fritt opplagt dekke på Orkanger . . . . .                    | 59 |
| 7.7  | Pålasting av punktlast på dekket . . . . .                   | 60 |
| 7.8  | Sylinderprøve til heftforsøk . . . . .                       | 61 |
| 7.9  | Tverrsnitt veggelement . . . . .                             | 62 |
| 7.10 | Tøyningstilstand 1 veggelement . . . . .                     | 68 |
| 7.11 | Tøyningstilstand 2 veggelement . . . . .                     | 69 |
| 7.12 | Tøyningstilstand 3 veggelement . . . . .                     | 71 |
| 7.13 | M-N diagram veggelement i Biocrete og normalbetong . . . . . | 73 |
| 7.14 | Spenning/tøyningskurve for armeringsstål . . . . .           | 75 |

## Tabeller

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.1 | Synk, utbredelse, luftinnhold og densitet . . . . . | 12 |
| 6.1 | Vannabsorpsjonsforsøk . . . . .                     | 33 |
| 6.2 | Reseptkorreksjon vannabsorpsjonsforsøk . . . . .    | 34 |
| 6.3 | Fukttap . . . . .                                   | 38 |
| 6.4 | Kapillærabsorpsjonsverdier skive A-F . . . . .      | 46 |
| 6.5 | Teoretisk beregning av faststoffdensitet . . . . .  | 48 |
| 7.1 | Momentkapasitet Dekker . . . . .                    | 64 |
| 7.2 | Risskapasitet Dekker . . . . .                      | 66 |
| 7.3 | Resultater heftforsøk . . . . .                     | 67 |

---

|     |                                       |    |
|-----|---------------------------------------|----|
| 7.4 | Kontrollpunkter M-N diagram . . . . . | 73 |
|-----|---------------------------------------|----|

---

# 1 Introduksjon

Bruken av betong har eksplodert de siste årene, og vil mest sannsynlig fortsette å øke i fremtiden [1]. En viktig bestanddel i betong er sement og det er anslått at sementproduksjon står for hele 7-8 % av verdens klimagassutslipp [2]. Klimafokuset i byggebransjen og betongindustrien har aldri vært større, og det er stor motivasjon for å finne gode løsninger som kan redusere aktørens klimagassavtrykk. Norge har gjennom Parisavtalen signert en forpliktelse om å redusere klimagassutslippet med 50-55 % innen 2030 sammenlignet med nivået i 1990 [3]. Biocrete er et produkt som baserer seg på tilsette biokull i betong. Biokull er forkullet biomasse og produseres ved ufullstendig forbrenning ved høye temperaturer med liten eller ingen tilgang på oksygen [4]. Denne forbrenningsmetoden kalles pyrolysing og gir et karbonrikt materiale med stabil struktur som tillater lang tids lagring i blant annet betong. På denne måten bidrar betongen til å fange og lagre karbon, på engelsk omtalt som Carbon Capture and Storage (CCS). I rapporten FNs klimapanel publiserte i 2018 i forbindelse med 1,5-gradersmålet i Parisavtalen, konkluderes det med at tre av fire scenarier viser at klimamålene ikke kan nås uten CCS [5].

For å kunne ta i bruk et helt nytt materiale som Biocrete kreves det kartlegging og forståelse av tekniske egenskaper. Med bakgrunn i resultater fra tidligere arbeid, som antyder at biokullet har en vannabsorpsjonsverdi på 150 % er det nærliggende å tro at en betong med biokull vil inneholde mer vann enn en ordinær konstruksjonsbetong. Dersom byggfukt i betong ikke får mulighet til å tørke ut kan det gi store problemer i forbindelse med videre arbeid. Ofte stenges denne fuktigheten inne i konstruksjoner, hvilket kan gi en rekke uheldige konsekvenser som forringet innelima, bygningsskader og forsinkelser i fremdrift [6].

Kontroll på den nye betongens kapasitet og konstruksjonstekniske egenskaper er helt nødvendig for at produktet kan realiseres. Porøsiteten i biokullet vil kunne påvirke styrke, men også bidra til en lettere betong.

## 1.1 Oppgavebeskrivelse

Rapporten vurderer mulighetene som ligger i betong med tilsatt biokull. Innholdet er et resultat av litteraturstudie, intervjuer, feltarbeid og laboratoriearbeid, og er en videreføring av masteroppgaven fra 2021 og prosjektoppgaven som ble skrevet i perioden august 2020 til desember 2021 [7][8]. Rapporten omfatter, i korte trekk, kartlegging av hensiktsmessige måter for å dokumentere miljøeffektene av karbonlagring i betong, hvilken påvirkning tilsetning av biokull har på betongens tekniske egenskaper og i hvilken grad Biocrete er egnet som konstruksjonsmateriale.

---

## 1.2 Oppgavens oppbygging

Rapporten er delt inn i 9 kapitler som tar for seg ulike aspekter ved bruk av biokull i betong. Kapittel 1 aktualiserer produktet og presenterer oppgaven, bidragsytere, begrepsavklaring og oppgavens struktur. Kapittel 2 beskriver mål og hensikt med arbeidet knyttet til rapporten. Kapittel 3 gir en kort, men informativ, beskrivelse av Biocrete, samt motivasjon for å anvende produktet i reelle prosjekter. Kapittel 4 oppsummerer tidligere arbeid, som har lagt grunnlaget for jobben som er gjort i forbindelse med denne masteroppgaven. Kapittel 5 beskriver produktets fordeler og utfordringer knyttet til miljøgevinst, med særlig fokus på dokumentasjon i form av Environmental Product Declaration (EPD) og Life Cycle Assessment (LCA). Kapittel 6 belyser egenskaper forbundet med biokullbetongens struktur og fokuserer spesielt på fukt- og bestandighetsegenskaper. Kapittel 7 presenterer konstruksjonsanalyse for Biocrete. Det er tatt utgangspunkt i vegg- og dekkeelementer fra Con-Form, og de gjennomførte analysene er utført med mål om danne grunnlag for anvendelse av Biocrete i reelle prosjekter. Avslutningsvis, i kapittel 8 og 9, kommer konklusjon og forslag til videre arbeid.

## 1.3 Begrepsavklaring

”Karbonnegativ” er betong som lagrer mer karbon enn den slipper ut under produksjon. Motsatt vil en ”karbonpositiv” betong ha større utslipp knyttet til produksjon enn det den evner å lagre. En ”karbonnøytral” betong lagrer like mye som den slipper ut.

”CO<sub>2</sub>e” beskriver i hovedsak det globale oppvarmingspotensialet til alle klimagasser. Med andre ord, virkningen av ulike klimagasser uttrykkes i form av mengden CO<sub>2</sub> som ville resultert i samme mengde oppvarming. Enkelt sagt, CO<sub>2</sub>e samler alle drivhusgasser på ett sted [9].

## 1.4 Samarbeid med eksterne aktører

Masteroppgaven er et bidrag til arbeidet som gjøres i FoU-prosjektet Biocrete. Øvrige bidragsytere i prosjektet er Con-Form, Skanska, Norsk Biokullnettverk, Oplandske Bioenergi, Betong-Øst og NTNU. Satsingen er i tillegg støttet av Innovasjon Norge. I tillegg til overnevnte har SINTEF ved seniorforsker Ola Skjølvold, på oppdrag fra prosjektgruppa, bidratt med testing og utstyr. Heft-, bruddlast- og nedbøyingsforsøk ble gjennomført ved Con-Form og Betong Østs fasiliteter på Orkanger med god hjelp av representanter fra Con-Form og SINTEF. Alt laboratoriearbeid ble utført ved NTNUs materialtekniske laboratorier på Gløshaugen, assistert av overingeniør Per Øystein Nordtug. Øvrige aktører i prosjektgruppa har bidratt med relevante data, dokumentasjon, innsikt og ikke minst kunnskap og gode diskusjoner. Spesielt representert ved hovedveileder Sverre Smeplass fra Skanska som har bidratt med særs god veiledning.

---

## 2 Mål og hensikt

Målet med prosjektet var å undersøke mulighetene for å produsere en karbonnøytral betong ved å tilsette biokull og kartlegge nye egenskaper for denne betongen. Oppgaven er en videreføring av tidligere arbeid [8][7]. Å få et nytt produkt inn i bransjen krever god dokumentasjon og aksept. Følgelig har rapporten tatt sikte på å avdekke hvilke dokumenter som må presenteres og hvordan det er mulig å få godkjent dokumentasjon på et nytt produkt. Intervjuer og litteraturstudie er gjennomført i den hensikt å se på mulige løsninger i forbindelse med industrialiseringsprosessen.

Hensikten med laboratorieforskene var å kartlegge de tekniske egenskapene til Biocrete og se hvilke muligheter og utfordringer som kommer med denne nye betongen. Målet med forsøkene som ble gjort på fukt og struktur ble gjennomført for å se hvordan biokullet påvirker blant annet uttørkingshastighet, vannabsorpsjonsevne, partikkeldensitet, porøsitet og bestandighet. Alle disse egenskapene er viktige parametre som påvirker bruksområdet til Biocrete.

Målet med konstruksjonsanalysen var hovedsakelig å kontrollere at betong med biokull ikke ga overraskende dårlige resultater. Fullskalaforsøk av dekker med Biocrete ble utført for å sammenligne styrke med ordinær konstruksjonsbetong. Her var spesielt trykkfasthet og E-modul interessante parametre.

---

## 3 Biocrete

Biocrete er et pågående prosjekt ledet av initiativtager Snøhetta i samarbeid med Skanska, Con-Form, Norsk biokullnettverk, Oplandske Bioenergi, Betong Øst og NTNU. Målet er å fremstille og industrialisere en karbonnøytral betong. Prosjektet er støttet av Innovasjon Norge og prosjektgruppen håper med tid å kunne presentere Biocrete for bransjen som et kvalitetssikret produkt som kan redusere klimagassavtrykk i byggeprosjekter. Prinsippet for Biocrete er karbonfangst i betong ved å tilsette og lagre karbonholdig biokull.

### 3.1 Biokull

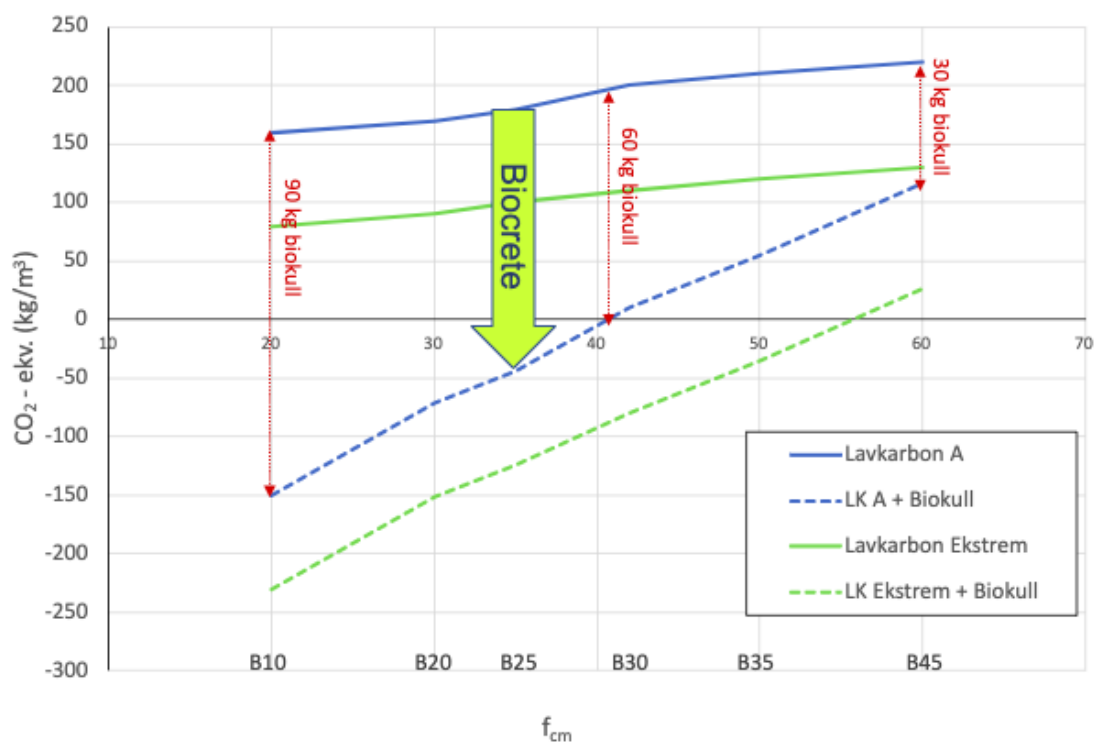
Biokull er forkullet biomasse og produseres ved ufullstendig forbrenning ved høye temperaturer med liten eller ingen tilgang på oksygen [4]. Denne forbrenningsmetoden kalles pyrolysing og gir et karbonrikt materiale med stabil struktur som tillater lang tids lagring i blant annet betong og jord. I teorien kan så godt som alt organisk materiale pyrolyseres, men råstoffets kvalitet har stor innvirkning på biokullets, og følgelig er enkelte typer råstoff bedre egnet enn andre. Med dagens teknologi og tilgjengelighet er de mest brukte råstoffene treflis og jordbruksavfall som halm, kornavrens og fast husdyrgjødsel [10]. Råstoffene varmes opp til 400-700°C og prosessens sluttprodukt blir ca. 50 % biokull og 50 % bioenergi i form av varme som blant annet kan brukes i fjernvarmeanlegg. Biokullet kan inneholde så mye som 95 % rent karbon. Ved forbrenning vil 1 kg karbon oksideres til 3,67 kg CO<sub>2</sub>. Altså har 1 kg biokull potensiale til å binde 3,49 kg CO<sub>2</sub> [11].

Biokull har til nå hovedsaklig blitt brukt som jordforbedringsmateriale og er i tillegg en naturlig del av jordtyper rundt om i verden som følge av skogbrann [12]. Det porøse biokullet reduserer næringstap, binder giftige forbindelser som tungmetaller, gir økt mikrobiell aktivitet og øker jordas karboninnhold, filtrerings- og vannhusholdningsevne og rotvekst [4]. I forbindelse med bruk av biokull i betong er målet, i tillegg til å redusere klimagassavtrykk, å skape verdi av det som i dag ansees som avfall. Ved å pyrolysere sortert treavfall fra byggeplasser vil bransjen både kutte forbrenningsutslipp og kompensere gjennom karbonlagring slik at man får dobbel miljøgevinst. Videre vil biokullet kunne tilføre betongen andre egenskaper, som bedre isoleringsevne og bestandighet.

### 3.2 Biokull i betong

Biocrete er et produkt som baserer seg på tilsette biokull i betong. På denne måten bidrar betongen til å fange og lagre karbon, på engelsk omtalt som Carbon Capture and Storage (CCS). I rapporten FNs klimapanel publiserte i 2018 i forbindelse med 1,5-gradersmålet i Parisavtalen, konkluderes det med at tre av fire scenarier viser at CCS er en nødvendighet dersom klimamålene skal nås [5]. Til tross for at det er svært mange tiltak som kan iverksettes for å effektivisere, erstatte og ikke minst redusere dagens ressursbruk, forventes det at betonggetterspørselen kommer til å øke [1]. Dermed er

viktigheten av karbonfangst og lagring stor, både i forbindelse med sement- og betongproduksjon. Målet med Biocrete er å utnytte avfallstrevirke fra byggeplass og slik bryte en avfallsyklus gjennom å pyrolysere virke som ellers ville ha gått til forbrenning og ført til CO<sub>2</sub>-utslipp. Karbonet allokeres i betongen og kompenserer dermed for utslippene knyttet til produksjon. I tidligere arbeid har det, gjennom teoretiske vurderinger og testing, blitt utviklet resepter med tilpasset sammensetning av delmaterialer for ulike mengder biokull [7][8]. Biokullet er lett og mekanisk svakt. Dette må kompenseres for med en litt sterkere bindemiddelfase. Til tross for dette vil betongdensiteten reduseres noe, avhengig av mengde tilsatt biokull. Figur 3.1 viser sammenheng mellom mengde biokull, GWP-verdi og fasthetsklasse. GWP-verdi defineres som ”akkumulert oppvarmingseffekt sammenlignet med effekten av CO<sub>2</sub> over en valgt tidshorison, gjerne mellom 20 og 500 år” [13].



Figur 3.1: Sammenheng mellom mengde biokull, GWP-verdi og fasthetsklasse

Source: Smeplass (2021) [14].

### 3.3 Global og nasjonal motivasjon

Bruken av betong har eksplodert de siste årene, og vil mest sannsynlig fortsette å øke i fremtiden [1]. Gode egenskaper som fleksibilitet, høy fasthet og god anvendelighet gjør at det benyttes enorme mengder betong over hele verden [15]. En viktig bestanddel i betong er sement, men sementproduksjon er en av de største CO<sub>2</sub>-synderne. Det er anslått at sementproduksjon står for hele 7-8 % av verdens klimagassutslipp [2]. Klimafokuset i byggebransjen og betongindustrien har aldri vært



---

større, og det er stor motivasjon for å finne gode løsninger som kan redusere aktørenes klimagassavtrykk. Samtidig blir miljøkravene for nye byggeprosjekt stadig strengere, og å tilfredsstille disse kravene blir med tid helt avgjørende for å vinne prosjekter.

Norge har gjennom Parisavtalen signert en forpliktelse om å redusere klimagassutslippet med 50-55 % innen 2030 sammenlignet med nivået i 1990 [3]. Dette er et krav regjeringen ønsker å oppfylle i samarbeid med EU. Klimagasser i atmosfæren fører til global oppvarming. Det innebærer smelting av snø og is, stadig stigende havnivåer og hyppigere tilfeller av ekstremvær. Alvorlige konsekvenser er ventet om verden ikke lykkes i å kutte utslippene innen fastsatt tid [3]. Siden byggebransjen står for en stor del av nasjonalt og internasjonalt utslipp bør arbeidet med å redusere klimagassutslippet være av høy prioritet for byggherrer i sine prosjekter.

Det forskes og testes stadig på en mer klimavennlig betong. Biocrete tar som nevnt sikte på å utnytte treavfall fra byggeplass og allokere dette i betongen. Industrielt treavfall utgjør, bare i Norge, 1,0 million tonn per år, som videre produserer 1,8 millioner tonn CO<sub>2</sub>. Til sammenligning er dette 40 % mer enn sementindustrien genererer og av denne prosentandelen står byggebransjen for 30 % [14]. Det meste av avfallet forbrennes eller råtner slik at CO<sub>2</sub> slippes ut i atmosfæren. Det er derfor et stort potensial i å pyrolysere treavfallet og støpe det inn i betongen slik at karbonet lagres og ikke får reagere med oksygen. Ved hjelp av pyrolysing og karbonfangst vil det være mulig å kompensere for utslippene fra betongproduksjon, og til og med armering i betongen. Biocrete er CCS i liten skala, en teknologi som blir stadig mer aktuell og nødvendig.

---

## 4 Sammendrag av tidligere arbeid

### 4.1 Masteroppgave 2021

Våren 2021 gjennomførte tre studenter ved institutt for konstruksjonsteknikk sin masteroppgave innenfor temaet Biocrete [8]. Fjorårets studenter var blant annet delaktig i reseptutvikling og et vellykket fullskalaforsøk med Biocrete hos Con-Form og Betong-Øst på Orkanger, der verdens første karbonnegative betongveggelement ble produsert. I det følgende skal de viktigste resultatene og erfaringene fra denne masteroppgaven sammenfattes som grunnlag for videreutvikling.

#### 4.1.1 Karbonregnskap

Karbonregnskapet er en essensiell del av prosjektet og godkjenning til å kunne regne biokullet som negative CO<sub>2</sub>-ekvivalenter er helt avgjørende for å på papiret kunne levere en karbonnøytral betong. Forbrenning av 1 kg karbon gir et utslipp på 3,67 kg CO<sub>2</sub> til atmosfæren dersom det binder seg med oksygen. Biokullets karboninnhold ligger på omtrent 94 % karbon, hvilket betyr at 1 kg biokull vil kunne binde 3,45 kg CO<sub>2</sub> som ellers ville ha sluppet ut i atmosfæren. Med denne muligheten til å lagre karbon vil man kunne kompensere for utslippene tilknyttet betongproduksjon og dermed minske det totale klimagassavtrykket. Et gunstig scenario er at biomassen som blir til biokull hovedsakelig stammer fra treavfall i byggeindustrien. Dette er et restprodukt som ellers ville ha råtnet eller blitt brent og dermed ført til utslipp av CO<sub>2</sub>. En essensiell del av industrialiseringsprosessen av Biocrete er LCA og EPD. Uten godkjenning til å regne biokullet som negative CO<sub>2</sub>-ekvivalenter er mye av gevinsten borte og produktet vil bli mindre attraktivt for aktuelle kjøpere. Lagring av biogent karbon kan regnes som negativt siden den kan lagres lenge nok til at utslippet som en gang vil komme allerede er tatt ut av karbonkretsløpet. Grunnen til at denne tankegangen per nå ikke tillates er at de nåværende reglene ikke tar hensyn til den lange lagringstiden som karbonet i biokull har. For å kunne utføre klimaregnskapet på ønsket måte må det en regelendring til.

#### 4.1.2 Reseptutvikling

Masterstudentene fra i fjor utviklet betongresepter med biokull som er tilpasset Con-Forms skallveggelementer. Med krav om ønsket styrke i vangebetongene og støpelighet tilsvarende selvkomprimerende betong i senterbetongen ble det utviklet to ulike betonger. Det ble eksperimentert med ulike parametere i NTNUs laboratorier og etter mange timers arbeid ble det presentert to loven- de resepter som skulle brukes i fullskalaforsøket. For å perfektionere disse reseptene ble det gjort mange forsøk. For de første betongene var fokuset å finne riktig vannabsorpsjon for biokullet. Med 200 % vannabsorpsjon ble blandingene våte, noe som tydet på at den faktiske absorpsjonen måtte være lavere. Gjennom flere forsøk på både 100 % og 150 % ble det konkludert med at 150 % var

---

den sannsynlige vannabsorpsjonen for biokullet. Verdier for vannabsorpsjon og partikkeldensitet måtte bestemmes indirekte. Det er en utfordring at det per nå ikke finnes prøvingsmetoder for disse egenskapene som kan brukes på finmalt biokull. En annen viktig observasjon var at en stor andel av biokullpartiklene ble knust under blanding, hvilket førte til avvik fra den antatte siktekurven. Det har etter hvert vist seg å være en gunstig effekt og mest mulig nedmaling av biokullet er nå ønskelig. Tester som ble gjort av betongene var blant annet slump og utbredelse for å måle støpeliget, densitetsmåling, fuktinnhold og trykktester. Det ble konkludert med at resepter som inneholdt 63 kg og 78 kg biokull per kubikk var best egnet til henholdsvis vanger og senterbetong i fullskalaforsøket.

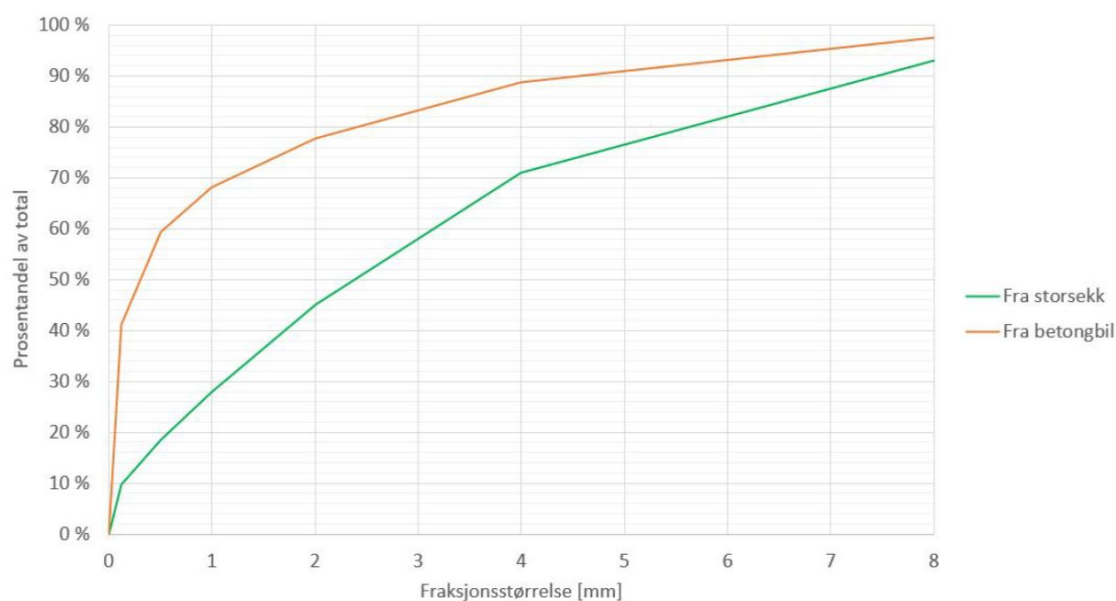
#### 4.1.3 Fullskalaforsøk

I fullskalaforsøket ble det produsert skallveggelementer med utstøpt kjernebetong. Til tross for at disse tok utgangspunkt i reseptene fra laboratoriet ble det gjort flere modifikasjoner som følge av tilgang på materialer og endret materialoppførsel under fullskalaproduksjon. Vannabsorpsjonsverdien til biokullet var fra laboratorieforskene antatt å ligge i rundt 150 %, men viste seg å være avhengig av biokullets fuktinnhold. Under utstøpingen av veggene i fullskala ble det brukt biokull fra Oplandske Bioenergi, og ikke Carbofex som leverte biokullet til NTNUs laboratorier. Biokullet fra Oplandske Bioenergi hadde vesentlig lavere fuktinnhold og det ble som følge av dette besluttet å øke vannabsorpsjonsverdien til 180 %. Det viste seg svært viktig å kontrollere det initiale fuktinnholdet i biokullet, da dette har stor betydning for vannabsorpsjonen. Ved å ha kontroll på opprinnelig fuktinnhold kan man finne ut hvordan dette påvirker resultatet og utelukke følgefeil tilknyttet vannabsorpsjonsverdien.

Som følge av resultatene fra forsøkene i laboratoriet var det også knyttet usikkerhet til hvor stor mengde biokull som kunne blandes inn i senterbetongen uten at den separerte. Siden senterbetongen skulle fungere som selvkomprimerende betong og det i laboratorieforskene ble oppdaget tilløp til blødning, ble det bestemt å øke mengden silikastøv fra 2-5 % for å bedre stabiliteten. Etter vellykkede prøveblandinger på fabrikk ble mengden biokull økt fra 78 til 90 kilo uten at det oppstod separasjonsproblemer. Hvor stor effekt økningen på 3 % silikastøv i betongen hadde på stabiliteten ble ikke testet i laboratoriet av tidshensyn, men basert på eksisterende teorigrunnlag er det nærliggende å tro at dette bedret stabiliteten.

En annen viktig egenskap som endret seg fra laboratorieresultater til fullskala var betongens trykkfasthet. Prøver tatt fra de utstøpte veggelementene viste en gjennomsnittlig trykkfasthet for vangerne på 35 MPa etter 28 døgn og for senterbetongen på ca. 22 MPa etter 28 døgn, hvilket er forbedring sammenlignet med forventet trykkfasthet fra laboratoriet. Disse verdiene viser at vangebetongen tilfredsstiller styrkeklasse B25, mens senterbetongen tilfredsstiller styrkeklasse B10 med god margin. Under blandeprosessen på fabrikk i Orkanger ble hele sekker biokull fylt på betongbilen og blandet med pukk av fraksjoner 8/16 mm og 16/22 mm. Tilslaget ble tromlet i 10 minutter før

matriksen ble tilført og betongen blandet i ytterligere 10 minutter. Fra siktekurven vist i figur 4.1 kan man se at nedknusingen av biokullet var betydelig og at dette høyst sannsynlig er grunnen til økt trykkfasthet. Det ble i ettertid av fullskalaforsøket observert i laboratoriet at biokullet brukt i nevnte forsøk var mer kantete og porøst enn kullet som ble brukt under arbeidet med reseptene og dermed var lettere å knuse ned. Det antas i masteroppgaven at finmalt biokull har noe høyere partikkeldensitet enn større partikler og at nedmalingsgraden vil påvirke matriksvolumet. Videre ble det observert at finmalt biokull ga bedre styrkeutvikling som resulterte i større trykkfasthet. Det ble også spekulert i om finere partikler bidrar til å senke luftinnholdet i betongen. Til slutt antas finmalt biokull å tilføre betongen stabilitet og bedre pumpbarheten. Dette er viktige egenskaper i forbindelse med å unngå separasjon og problemer tilknyttet støp på byggeplass.



Figur 4.1: Resultat fra sikteforsøk

Source: Biocrete-Biokull i betong [8].

Ekstra bruk av SP-stoff ble under fullskalaforsøket manuell tilsatt ved behov. Det viste seg at betongen kunne ha behov etter en bestemt tid (ved fylling av flere elementer) for å bevare støpelighet, men at tilsetning av SP-stoffer ga samme oppførsel som rett etter blanding. Behovet for etterdosering av SP-stoff kommer av at vannabsorpsjonen i biokullet ikke er helt spontan ved blanding av betongen, men vil til en viss grad fortsette etter blanding.

Det ble tatt kjerneprøver av de ferdigstøpte veggelementene og disse viste en useparert og svært homogen betong. Det ble boret gjennom hele veggen for så å dele prøven inn i to vanger og én senterbetong. Det ligger en viss usikkerhet i nøyaktighet av inndelingen av de ulike betongene, og om det finnes armering i prøven som kan påvirke densitet, men det ble konkludert med at det her er snakk om neglisjerbar usikkerhet. Vangebetongens densitet ble fra kjerneprøvene målt til ca.  $2153 \text{ kg/m}^3$  (det antas at de to vangene har omtrent samme densitet), mens senterbetongens

---

densitet ble målt til omtrent  $2047 \text{ kg/m}^3$ . SINTEF utførte også en tynnslipsanalyse av den utborede betongen for å kartlegge mikrostrukturen. Analysen ga gode resultater og konkluderte med at biokullbetongen hadde en svært homogen sementpasta og at ”endring i porøsitet mellom grove partikler av naturlig opprinnelse og sementpastaen ikke ble observert”. Videre ble det observert svært lite riss, og så godt som ingen mikroriss i betongen. ”Biokullpartikler ble observert både i grov- og finfraksjonen der sistnevnte partikler er jevnt fordelt og godt integrert i sementpastaen”. Den eneste bemerkningen fra analysen var at det ble observert anrikning av luftbobler i varierende omfang rundt noen av de større biokullpartiklene.

#### 4.1.4 Øvrige funn og konklusjon

Det ble også konstatert at fersk betong med biokull inneholder betydelig mer vann enn en normalbetong som følge av det vannet biokullet absorberer. At betongen vil være nedfuktet over lengre tid vil muligens være gunstig på grunn av langtids herdig, men kan by på problemer i forbindelse med fremdrift i prosjekter som krever at betongen skal dekket med andre materialer innen rimelig tid. I tillegg til å binde vann har biokullet også en annen effekt enn fillerene som i dag finnes på markedet. Mettet biokull bidrar til at man kan oppnå et stort og lite tyktflytende matriksvolum med lavere mengde fritt vann når biokull brukes som filler. Dermed vil man kunne lage en selvkomprimerende betong med mindre sement og vann enn det som benyttes i dag.

Masteroppgaven oppsummerer arbeidet med å anbefale  $63 \text{ kg}$  biokull per  $\text{m}^3$  for vangene og  $90 \text{ kg}$  for senterbetongen. Etter beregninger for å estimere biokullets densitet og vannabsorpsjon er virkelig masseforhold til henholdsvis vangene og senterbetongen anslått til å være  $0,44$  og  $0,41$  og ikke  $0,35$  som foreslått i laboratoriet. Den reelle vannabsorpsjonsverdien antas å ligge mellom  $145\text{-}150 \%$  med biokullets partikkeldensitet i intervallet  $350\text{-}400 \text{ kg/m}^3$ .

Under forslag til videre arbeid pekes det på mer testing for å opparbeide et bedre vurderingsgrunnlag. Det pekes også på kartlegging av egenskaper som krymp og svinn, brannmotstand, hefteegenskaper, frost- og tineprosesser og langtids styrkeegenskaper. Videre påpekes det at ferdig pulverisert biokull på siloer må testes da dette vil bidra til å effektivisere støpeprosessen og at regelverk og standarder må følges opp og gjennomgås i forbindelse med LCA og EPD.

## 4.2 Prosjektoppgave 2021

Arbeidet med prosjektoppgaven, et forprosjekt til vår egen masteroppgave, ble påbegynt og ferdigstilt høstsemesteret 2021 ved NTNU. Oppgaven tilsvarer  $7,5$  studiepoeng og ga en god introduksjon til Biocrete. Oppgaven ble skrevet med god hjelp av veiledere Sverre Smeplass fra Skanska og Terje Kanstad ved NTNU, samt gode synspunkter og hjelpsomme tips fra bidragsytere i prosjekt Biocrete.

---

### 4.2.1 Intervju med aktører

I forbindelse med prosjektoppgaven ble det gjennomført intervjuer med Carsten Løddesøl fra Snøhetta, Einar Stuve fra Oplandske Bioenergi, Silje Gystad Ytterdal og Stefan Skjæret fra Betong Øst og Bjørn Ole Rasmussen fra Con-Form som alle er deltagere i prosjekt Biocrete. Den unisone oppfatningen fra aktørene var at byggebransjen så positivt på prosjektet og at det både fantes betalingsvilje og motivasjon til å redusere bransjens klimagassavtrykk. Aktørene er delte når det kommer til hva som er det beste bruksområdet for biokull, men er enige om at byggebransjen er den eneste som per nå har betalingsevne og en god plan for implementering av kullet. I forbindelse med produksjon blir etterspørsel viktig. I dag finnes det alt for få pyrolyseanlegg og eventuell utvidelse må kunne forsvares økonomisk gjennom høy etterspørsel. Råstoffet som brukes til produksjon av biokull er i dag hovedsakelig gran, men planen for Biocrete er å kunne utnytte avfallsmateriale fra byggeplass. Det endelige produktet produsert av avfallsmateriale vil, ifølge Stuve, antakeligvis ikke kunne brukes andre steder enn i Biocrete på grunn av høyt innhold av dioksin og tungmetaller, hvilket kan løse problemet med at det eventuelt finnes bedre bruksområder.

Ferdigbetongprodusenten Betong Øst trekker frem den store interessen fra flere tunge aktører som stor motivasjon for å delta i prosjektet. Forsøkene gjort i forbindelse med masteroppgaven fra 2021 ble utført på en måte som ikke er gjennomførbar dersom det skal produseres i stor skala. Høsten 2021 gjorde Betong Øst et vellykket forsøk der de blåste biokull på vanlig sementsilo, for så å skru det inn på blander. Selv om de poengterer at det fremdeles er mye upløyd mark er de svært optimistiske til selve industrialiseringsprosessen og har tro på at det ikke er i denne delen av prosjektet problemene vil oppstå. Con-Forms representant, Bjørn Ole Rasmussen, var på sin side opptatt av å få testet uttørkingstid, brannegenskaper, fryse-tineprosesser og eventuell emmisjon som kan påvirke inneklima og utenpåliggende materialer.

### 4.2.2 Laboratoriearbeid

I laboratoriet ble to ulike resepter støpt ut og testet. En med 60 kg biokull per m<sup>3</sup> betong og en med 90 kg biokull per m<sup>3</sup> betong. Se Appendix A for resepter og blandeskjema. Det ble støpt 12 terninger til trykktesting etter henholdsvis 7 og 28 dager. Biokullet som ble brukt i prosjektoppgaven var mer finmalt enn det som hadde blitt brukt tidligere, men til tross for indikasjoner om at dette trolig ville gi sterkere betong viste resultatene noe svakere verdier enn de som ble presentert i masteroppgaven. Gjennomsnittlig bruddspenning ble målt til 20 MPa etter 28 døgn for terningene med 90 kg biokull per m<sup>3</sup> og 32,5 MPa for terningene med 60 kg biokull per m<sup>3</sup>. I forbindelse med avforming av terningene oppsto det geometriske ujevnheter som kan ha påvirket terningenes styrke. Det er sannsynlig at formene burde ha blitt oljet en ekstra gang før støp og at avforming burde ha vært utsatt noen timer slik at man hadde oppnådd en herdetid på minimum ett døgn. Til tross for at terningene med minst ujevnheter ble prioritert til testing etter 28 døgn er det nærliggende å tro

---

at dette påvirket gjennomsnittlig trykkfasthet. Det ble også testet synk, utbredelse, luftinnhold og densitet som vist i tabell 4.1. Betongblandingene fremviste meget god støpelighet og blandingen var jevn og fin. Målt densitet for betongene viste seg å være noe lavere enn verdiene fra masteroppgaven, men en forklaring kan være at det ble brukt en annen type biokull.

Tabell 4.1: Synk, utbredelse, luftinnhold og densitet

| Blanding                      | Synk [cm] | Utbredelse [cm] | Luftinnhold [%] | Densitet [kg/m <sup>3</sup> ] |
|-------------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| Biocrete 60 kg/m <sup>3</sup> | 24        | 48              | 3,3             | 2145                          |
| Biocrete 90 kg/m <sup>3</sup> | 23        | 53              | 4,9             | 1938                          |

I forbindelse med laboratorieforsøket ble det i tillegg støpt ut to elementer på 40·40·10 cm til uttørkingsforsøk. Ett med 60 kg biokull per m<sup>3</sup> betong og ett med 90 kg biokull per m<sup>3</sup> betong. Elementene ble, etter avforming, satt i klimarom med konstant temperatur på 20°C og relativ fuktighet på 65 %. Prøvestykkene hadde mulighet til uttørring fra alle overflater. Resultatene fra ukentlige veiinger ble loggført i egen tabell og plottet sammen med elementenes fuktbalanse for å overvåke uttørkingstiden. Fuktbalansen er beregnet etter total vannmengde som skal tørkes ut. Denne vannmengden består av sementlimets overskuddsvann og absorbert vann i biokullet. Fra plottet ble det observert at den tydelige tendensen for begge elementene er at de tørker raskt i begynnelsen, for så å tørke veldig sakte. Kurvene indikerte en uttørkingstid på mange år. Biokullets absorpsjonsevne og et lavere effektivt masseforhold ble identifisert som mulige årsaker til den lange uttørkingstiden sammenlignet med ordinær konstruksjonsbetong.

### 4.2.3 Nedbøyningsforsøk

Utenfor Con-Forms fabrikk på Orkanger ble det støpt to dekker til et nedbøyningsforsøk. Dekkene er plattendekker der ett element har normalbetong i både dekke og påstøp mens det andre har normalbetong i dekke og Biocrete i påstøp. Målet var å finne ut om deformasjonene i biocretedekket var akseptable sammenlignet med normalbetongen da deformasjonsbegrensning var identifisert som dimensjoneringskriteriet i følge Rasmussen fra Con-Form. Nedbøying måles ved hjelp av en oppspent line og påskrudd tommestokk. Egenvekt ble påført etter 34 dager og lodd tilsvarende 1 m<sup>3</sup> betong etter 45 dager. Ved måling etter 79 døgn ble det observert 2 mm differanse mellom de to dekkene og det ble konkludert med at styrken i biocreteelementet er tilstrekkelig.

Det ble også utført kontrollberegninger av nedbøyningen etter Eurocode 2. Forskjell i målt og beregnet nedbøyningsverdi var på henholdsvis 2,37 mm og 2,62 mm for biocrete- og normalbetongdekket. Det ble for effektivitetens skyld gjort små forenklinger knyttet til dekkenes armering. Dette ga litt lavere armeringsmengde i beregningene enn reell mengde. Forenklingen har nok ført til at beregnet nedbøying er noe større enn målt, uten at dette burde gi store utslag. Kryptallet for Biocrete er også regnet etter Eurocode 2 på samme måte som en normalbetong og kan ha ført til at differansen i målt og beregnet verdi er mindre for biocretedekket. Personlig kommunikasjon med

---

Sverre Smeplass gir grunn til å tro at kryptallet til Biocrete er noe høyere enn for en normalbetong, hvilket ser ut til å stemme bra. Med mer data fra lignende forsøk vil vurderingsgrunnlaget bli bedre og det vil kanskje være mulig å identifisere en korreksjonsfaktor som tillater beregning av kryptall for Biocrete etter Eurocode 2.

#### 4.2.4 EPD

Å få en EPD på Biocrete som viser lagringen av CO<sub>2</sub> i biokullet ble trekt frem av flere som en av de største utfordringene. Den nyeste informasjonen i forbindelse med dette er gjennom muntlig dialog mellom EPD Norge og Sverre Smeplass. Den foreløpige konklusjonen er at EPD Norge ikke vil etterkomme aktørenes ønske om å få en EPD for Biocrete. De begrunner dette med at prinsippet for å lage en EPD for betong tar utgangspunkt i summen av alle delkomponenter og bidrag fra produksjon. Dersom man skulle ha regnet inn biokullet på denne måten måtte man ha hatt en EPD for biokullet med negativ verdi, noe som ikke lar seg gjøre. Løsningen som er foreslått for å likevel kunne inkludere biokullet i karbonregnskapet er at betongprodusentene, i denne oppgaven representert ved Betong Øst, må lage en egen EPD for betongen før tilsetning av biokull. Etter dette må EPD-en videreføres som dokumentasjon ved at det blir utført en LCA-analyse for biokullet som muliggjør negativ verdi for biokullet som vil gi et positivt bidrag til det totale regnskapet. Dette betyr at betongleverandøren må overlevere to dokumenter: en EPD for betongen uten biokull som har en positiv GWP-verdi og en LCA for biokullet med negativ GWP-verdi. En GWP-verdi defineres som ”akkumulert oppvarmingseffekt sammenlignet med effekten av CO<sub>2</sub> over en valgt tidshorisont” [13]. Sluttbruker, her entreprenørene, mottar da to dokumenter som legges inn i sluttregnskapet for prosjektet. På denne måten får entreprenørene med seg effekten av biokull og vil kunne bruke produktet til å levere et mer miljøvennlig sluttprodukt. Det negative med denne løsningen, som man håper er midlertidig, er at betongprodusenten ikke får samme fordeler. I praksis må de selge to produkter: betong og biokull. Målet og håpet er at man med tid klarer å få betongens EPD til komme ut med en gunstig verdi slik at alle bidragsytere kan dra nytte av Biocrete.

#### 4.2.5 Konklusjon

Fra informative samtaler med bidragsytere i utviklingen av Biocrete ble det gitt tydelige indikasjoner på at dette er en høyaktuell satsing som bransjen ser et stort potensiale i og er villig til å betale for. Store steg er tatt i forbindelse med industrialisering og store deler av manglene i denne prosessen hviler på realisering av produktet og etterspørsel. De nye reseptene ga relativt like resultater som de i masteroppgaven til tross for to ulike typer biokull. Mye tyder på at proporsjoneringen av de to ulike biocreteblandingene nærmer seg optimal. Fra jevnlig veiinger av elementene brukt i uttøringsforsøket indikerte kurven mot slutten av prosjektoppgaven veldig lang uttørkingstid for elementene med et estimat på ca. 2 år før oppnåelse av estimert fuktbalanse.



---

Gode resultater i forbindelse med nedbøyingsforsøket ga grunnlag for å konkludere med at dekket med Biocrete foreløpig viser seg å være tilstrekkelig sterkt. Tallene viser også at forskjellen mellom beregnet og målt nedbøyning er relativt lik for begge elementene. Til tross for noe usikkerhet knyttet til de fysiske målingene er derfor rimelig å anta at nedbøyingsberegninger og kryptall for Biocrete etter Eurocode 2 er en god tilnærming, og som med korreksjonstall for kryp, muligens kan implementeres i Norsk Standard i fremtiden.

Det ble konkludert med at separate EPD'er for biokull og betong er den beste midlertidige løsningen. EPD'en for en betong uten tilsatt biokull må videreføres som dokumentasjon slik at det kan gjennomføres en LCA-analyse av biokullet. For sluttbrukere vil dette være en god nok løsning da begge dokumentene kan presenteres i det endelige klimaregnskapet for prosjektet. På denne måten får man utnyttet de negative GWP-verdiene til biokullet.

---

## 5 EPD og LCA

En EPD (Environmental Product Declaration) defineres som ”et kortfattet tredjeparts verifisert og registrert dokument med transparent og sammenlignbar informasjon om produkters miljøprestasjon gjennom hele livssyklusen”, og er enkelt forklart en kortfattet oppsummering av miljøprofilen til et produkt på en standardisert og objektiv måte [16]. Miljøinformasjonen i deklarasjonene er spesifisert i ISO-standarden 14025 (Environmental Labels and Declarations Type III) og tar utgangspunkt i de fire kravene objektivitet, sammenlignbarhet, adderbarhet og troverdighet. Informasjonen utvikles på grunnlag av produkters livsløpsanalyse, også kjent som LCA eller Life Cycle Assessment). LCA er standardisert, systematisk kartlegging av produkters miljø- og ressurspåvirkning gjennom hele livsløpet. På denne måten inkluderes alle faser i miljøregnskapet, fra råmaterialuttak til avhending, via transport, produksjon og bruk [17]. Livsløpsfasene deles igjen inn i mer detaljerte poster og tar for seg produktets eller bygningens reise fra ”vugge-til-grav”. A1-A3 beskriver produksjonsstegene, A4-A5 omhandler konstruksjonsstegene, B1-B7 beskriver bruksstegene, C1-C4 avfallssyklus og sluttsteg, mens D vurderer fordeler og ulemper ved bruk av produktet etter endt livssyklus. Produktet går ut av sin egen avfallssyklus i denne fasen [18]. Både EPD og LCA er basert på internasjonale standarder og det finnes over 1500 EPDer fra over 220 bedrifter som er offentlig publisert og tilgjengelig hos EPD-Norge [16].

### 5.1 Karbonfangst

Norcem har ved sin fabrikk i Brevik satt i gang bygging av et fullskala anlegg for karbonfangst som er planlagt ferdigstilt i 2024. Teknologien som brukes vil kunne fange opptil 90 % av karbondioksidutslippene fra produksjonen og dermed hindre det fra å nå ut i atmosfæren. Gassen blir deretter gjort flytende før den fraktes med skip til et mellomlager der den pumpes gjennom rør ut på sokkelen og lagres trygt 2600 meter under havbunnen [19]. I oppstartsfasen vil reservoaret kunne lagre 1,5 millioner tonn CO<sub>2</sub> per år, men målet er, gjennom flere utbyggingsfaser, å kunne øke kapasiteten til 5 millioner tonn. Anlegget er en viktig brikke i satsingen på CCS (Carbon Capture and Storage) og er en del av det norske Langskip-prosjektet som ble vedtatt av Stortinget i desember 2020. Kostnadene knyttet til Langskip er de største norske myndigheter og norsk industri har investert sammen i ett enkelt klimaprojekt noen gang [20]. Dette tankesettet rundt karbonlagring, som har vesentlige likhetstrekk med Biocrete, omtales som en helt nødvendig klimateknologi av Norcem og har blitt gjenstand for internasjonal interesse. Påstanden underbygges av flere rapporter utgitt av FNs klimapanel og Det internasjonale energibyrået (IEA) som antyder at det vil være så godt som umulig å nå målene i Paris-avtalen uten karbonfangst og lagring [19][5]. Teknologien har nådd det internasjonale næringslivet og kort tid etter lanseringen av Langskip signerte Equinor en intensjonsavtale med Microsoft som blant annet omhandlet lagring av CO<sub>2</sub> i det norske reservoaret. I tillegg er Northern Lights JV DA, transport- og lagringsaktøren i Langskip, i dialog med over 60 europeiske selskaper som vurderer å benytte seg av det norske CO<sub>2</sub>-lageret.

---

Norcems eier, HeidelbergCement, har sagt at de ønsker å bygge videre på prosjektet i Brevik og besluttet å bygge et nytt fullskala fangstprosjekt på Gotland. Dette anlegget har fangstpotensiale på 1,8 millioner tonn CO<sub>2</sub> i året, hvilket tilsvarer fire ganger Norcems planlagte fangstmengde.

Karbon som er bundet til en biomasse kalles biogent karbon. Som følge av at karbonet slippes ut igjen når biomassen råtner eller brennes er biogent karbon en del av karboncyklussen, hvilket betyr at utslippene ikke påvirker CO<sub>2</sub>-nivået i atmosfæren [8]. Effekten midlertidig eller permanent lagring av biogent karbon har på utslipp av CO<sub>2</sub>, skal ikke inkluderes i GWP og gjør at miljøgevinsten karbonlagringen gir, per nå ikke kan tas med i produktets LCA-analyse [18]. Dersom det biogene karbonet inkluderes i begynnelsen av livsløpscyklussen til et produkt som -1 kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per kg CO<sub>2</sub> vil det måtte tas ut som +1 kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per kg CO<sub>2</sub> etter endt livsløpscyklus [18]. Som følge av at opptak og utslipp av karbon utjevner hverandre vil det ikke ha innvirkning på produktets totale miljøavtrykk. I Biocrete vil karbonet som er lagret i biokullet stenges inne i betongen og hindre det fra å reagere med oksygen i luften og danne CO<sub>2</sub>. Biokullets stabilitet og betongens behandling vil forhindre utslipp gjennom betongens livsløp og også ved eventuell nedknusing og gjenbruk (personlig kommunikasjon med Sverre Smeplass 1. mars 2022). På denne måten vil karbonet kunne lagres i mange hundre år og følgelig bli tatt ut av karbonkretsløpet som følge av den lange lagringstiden. Slik vil karbonet i biokull i praksis redusere CO<sub>2</sub>-utslippet til atmosfæren selv om det per definisjon vil være biogent karbon når det til slutt slippes ut. Per dags dato er det ikke mulig å få en negativ EPD for biokullet og dermed legge den inn i betongens EPD etter adderbarhets-prinsippet. Det vil derimot være mulig å gjennomføre en LCA-analyse for produksjonen av biokull, og bruke verdien for bundet biogent karbon til å gi et negativt bidrag til byggeprosjektets miljøregnskap.

## 5.2 Dokumentasjon

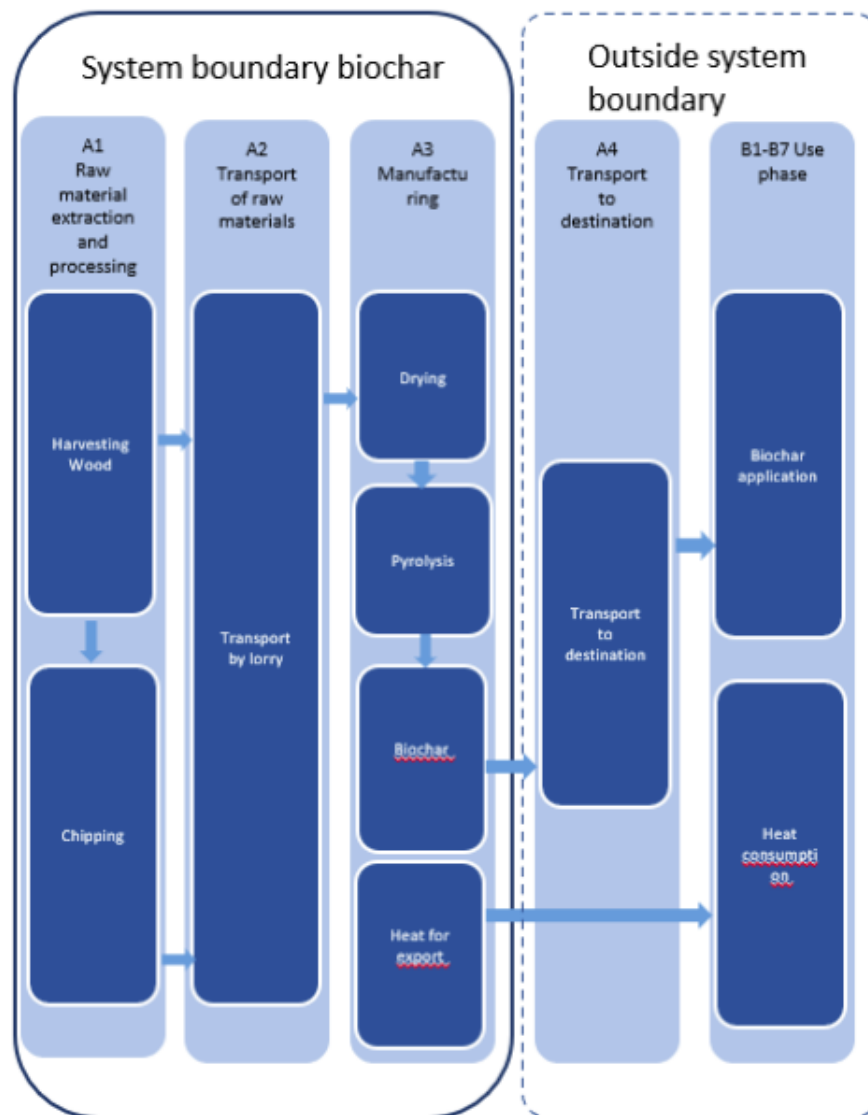
Å kunne dokumentere miljøgevinsten Biocrete gir, er en veldig viktig del av arbeidet i forskningsprosjektet. Hvis karbonet i biokullet ikke kan regnes som negativt er det, på papiret, få fordeler med å lagre biokull i betongen. Å regne karbonavtrykket til biokull som negativt har aldri blitt gjort før. Det er en helt ny måte å tenke på og går utenfor dagens regelverk. Denne omstillingen vil naturlig nok ta tid, men med initiativer som Biocrete og andre former for CSS vil man, med fokus på Parisavtalens mål, kunne få gjennomslag for denne måten å tenke på. Den nyeste informasjonen tilknyttet dette tema er tilegnet gjennom muntlig dialog mellom EPD Norge og Sverre Smeplass. Den foreløpige konklusjonen er at EPD Norge ikke vil etterkomme aktørenes ønske om å få en EPD for Biocrete. De begrunner dette med at prinsippet for å lage en EPD for betong tar utgangspunkt i summen av alle delkomponenter og bidrag fra produksjon. Dersom man skulle ha regnet inn biokullet på denne måten måtte man ha hatt en EPD for biokullet med negativ verdi, noe som ikke lar seg gjøre. Løsningen som er foreslått for å likevel kunne inkludere biokullet i karbonregnskapet er at betongprodusentene, i denne oppgaven representert ved Betong Øst, må

---

lage en egen EPD for betongen før tilsetning av biokull. Etter dette må EPD-en videreføres som dokumentasjon ved at det blir utført en LCA-analyse for biokullet som gjør det mulig å tilegne kullet en negativ verdi, noe som vil gi en positiv effekt på det endelige klimagassregnskapet. Dette betyr at betongleverandøren må overlevere to dokumenter: en EPD for betongen uten biokull som har en positiv GWP-verdi og en LCA for biokullet med negativ GWP-verdi. En GWP-verdi defineres som ”akkumulert oppvarmingseffekt sammenlignet med effekten av CO<sub>2</sub> over en valgt tidshorisont” [13]. Sluttbruker, her entreprenørene, mottar da to dokumenter som legges inn i sluttregnskapet for prosjektet. På denne måten får entreprenørene med seg effekten av biokull og vil kunne bruke produktet til å levere et mer miljøvennlig sluttprodukt. Et eksempel for denne måten å dokumentere på er presentert i Appendix E og F. Det negative med denne løsningen, som man håper er midlertidig, er at betongprodusenten ikke får samme fordeler. I praksis må de selge to produkter: betong og biokull. Målet er at man med tid klarer å få betongens EPD til komme ut med en gunstig verdi slik at alle bidragsytere kan dra nytte av Biocrete.

### 5.2.1 LCA-analyse biokull

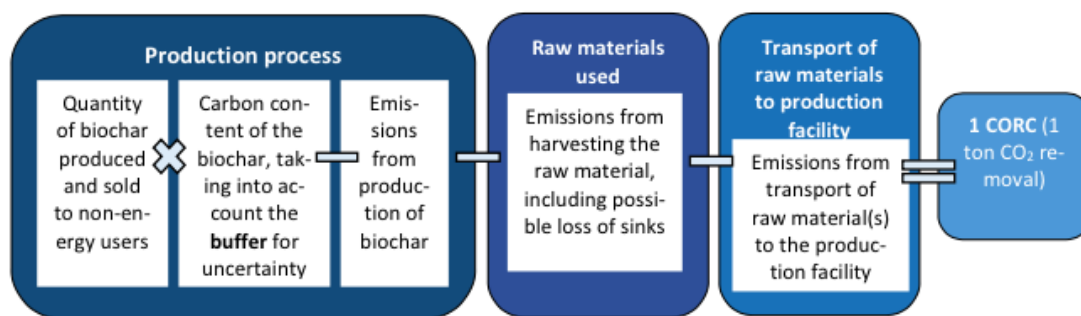
Oplandske Bioenergi har i perioden 1. januar 2021 til 31. august 2021 fått utført en LCA-analyse på sitt biokull. Ansvarlig aktør for analysen er konsulentfirma Accend. Accend har hovedkontor i Fredrikstad og har som mål å hjelpe innovative bedrifter med å nå målene sine knyttet til karbonhåndtering og bærekraft. Arbeidet gjort i forbindelse med LCA-analysen er presentert i en rapport publisert 19. oktober 2021 [21]. Det presiseres at rapporten kun tar for seg biokullets potensiale i forbindelse med lagring av karbon og påvirkningen dette har for utslipp av drivhusgasser. Analysen inkluderer heller ikke transport ut til kunden fra Oplandskes fasiliteter. Den tar for seg modulene A1-A3 og defineres som ”cradle-to-gate” [21]. Systemgrensene for produksjon av biokull er presentert i figur 5.1. Rapporten skal verifiseres av sveitsiske Inspecta 21. april 2022.



Figur 5.1: Bildet viser systemgrenser og moduler i forbindelse med produksjon av biokull

Source: Accend (2021) [21].

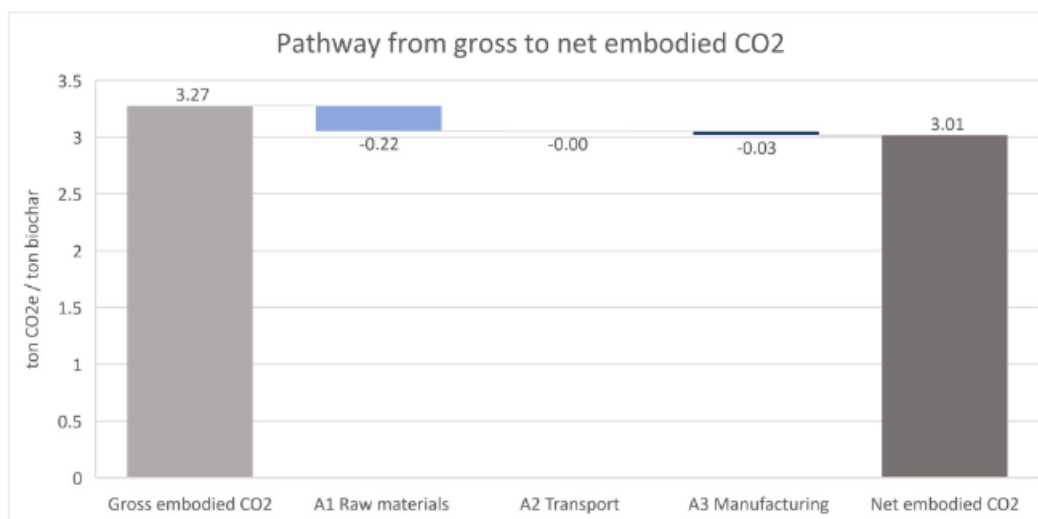
Produksjonen utføres i samsvar med retningslinjene i Puro-metodikken og EBC (European Biochar Company). Siden produksjonsstart i 2021 har Oplandske hovedsaklig brukt treflis fra gran som råstoff og det er følgelig dette som er lagt til grunn for analysen presentert i rapporten fra Accend. Treflisa leveres hovedsaklig av Glommen Mjøsen Skog SA, lokalisert mindre enn 2 km fra Oplandskes egne lokaler. Siden en vesentlig del av Biocrete er å få utnyttet avfallstrevirke fra byggeplass vil det kunne gi små utslag, som for eksempel lengre transportavstand og høyere krav til bearbeiding av trevirket. Det blir altså viktig å få en egen LCA-analyse på biokull produsert av avfallstrevirke for å sammenligne med biokull produsert av treflis. Figur 5.2 viser formelen som er brukt til å beregne hvor mye CO<sub>2</sub> biokullet kan allokere.



Figur 5.2: Karbonlagringsformel

Source: Accend (2021) [21].

Det endelige resultatet fremstilles i figur 5.3 og viser bruttoverdien av lagret CO<sub>2</sub>, utslipp fra modulene A1-A3 og nettoverdien av lagret CO<sub>2</sub>. Analyser av 141 tonn biokull som ble produsert i løpet av tidsrommet for rapporten viste gjennomsnittlig fuktighet i biokullet på 8 % og karboninnhold på 92 %. Stabiliteten til karboninnholdet kan konstanteres ved hjelp av molar O/Corg ratio. Maksimalt oksygeninnhold ble kalkulert ved å utelukke andre elementer, og følgelig ble det bestemt en maksimal molar O/C ratio på 0,03. På grunnlag av dette ble en nedre sikkerhetsfaktor på 2,5 % bestemt. Denne gir stabilt CO<sub>2</sub>-innhold på 3,275 kg/kg. Videre viser analysene at det kreves 5,1 tonn tørr treflis for å produsere 1 tonn tørt biokull. Produksjonen av treflis utgjør 211 kg CO<sub>2</sub>e/enhet mens 12,6 kg CO<sub>2</sub>e/enhet kommer fra sekkene av polypropylen som biokullet pakkes og transporteres i. Til sammen utgjør disse utslippene modul A1 og står for et totalt utslipp på 223 kg CO<sub>2</sub>e/enhet. I forbindelse med transport er både frakt fra Glommen Mjøsen Skog SA til Oplandske Bioenergi og utslipp knyttet til frakt av polypropylensekker inkludert. Denne verdien, som utgjør modul A2, er mer eller mindre neglisjerbar og bidrar med 0,002 tonn CO<sub>2</sub>e per enhet biokull. Modul A3 omfatter utslipp knyttet til pyrolyseringsprosessen. Pyrolyseringsreaktoren gjenbraker syntetisk gass for å opprettholde varme, men bruker i tillegg noe elektrisitet til mekanisk drift. Det konkluderes med at 458 kWh kreves for å produsere 1 tonn tørt biokull. Sammen med nesten neglisjerbare metanutslipp og en dieseldrevet laster som over en periode på 5 måneder brukte 939 liter diesel, utgjør utslippene fra modul A3 34,5 kg CO<sub>2</sub>e/enhet biokull. Nettoverdien for lagret CO<sub>2</sub> i biokullet blir da 3,01 tonn CO<sub>2</sub>e per tonn biokull etter å ha trekt utslippene fra modul A1-A3 fra bruttoverdien.



Figur 5.3: Veien fra brutto til netto lagret CO<sub>2</sub>

Source: Accend (2021) [21].

Resultatene viser at tallene presentert i innledningen stemmer godt overens med tallene fra rapporten. Konklusjoner om at biokullet inneholder mellom 92-95 % karbon bekreftes og til tross for at brutto lagringspotensial på 3,275 tonn CO<sub>2</sub> per tonn biokull er noe mindre enn verdien på 3,45 tonn, som ble brukt i masteroppgaven fra 2021. Denne forskjellen vil hovedsaklig skyldes antatt karboninnhold i biokullet og bruk av sikkerhetsfaktoren på 2,5 %. Fullstendig rapport presenteres i Appendix E.

### 5.2.2 Videre arbeid

Accends LCA-analyse av biokull er et stort steg i riktig retning i forbindelse med å fremskaffe nødvendig dokumentasjon for å få aksept for Biocrete. Analysen viser tydelig de mulighetene som ligger i biokull og håndfaste tall gjør det enklere for miljørådgivere å vurdere effekten biokull i betong har på prosjekters totale klimagassregnskap. Videreutvikling av analysen er dog nødvendig og det blir spesielt viktig å kartlegge eventuelle endringer i materialoppførsel når avfallstrevirke fra byggeplass erstatter treffis som råstoff. Må avfallstrevirket først omgjøres til treffis, eller er det uproblematisk å pyrolysere det slik det er? Selv om det sannsynligvis ikke vil utgjøre en stor del av de totale utslippene må også transport fra Oplandske Bios fasiliteter på Rudshøgda kartlegges og dokumenteres. Til sammenligning utgjør modul A2 beskjedne 1 % av de totale utslippene knyttet til produksjon [21]. Selv om man må kunne forvente lengre avstander enn 2 km fra byggeplass til produksjonsfasiliteter og motsatt, vil det ofte finnes byggeprosjekter i nærheten av pyrolyseanlegg, og da spesielt dersom interessen øker og det bygges fler. Videre blir det viktig å analysere og inkludere modulene B1-B7, C1-C4 og D for å få oversikt over hele livsløpet. Her må biokullets oppførsel som delmaterial i Biocrete undersøkes og muligheter og eventuelle begrensninger må

---

belyses. Dokumentasjon som viser at karbonet faktisk kan lagres over anslått tidsperiode er viktig for at kullet skal kunne tas ut av egen livsløpszyklus. Dersom det plutselig slippes ut etter 80 år vil det kunne være på et enda verre tidspunkt enn nå. Gode argumenter må presenteres for å overbevise bransjen om at Biocrete er hensiktsmessig bruk av biokull og at bruken ikke går på bekostning av bedre bruksområder. Her vil både miljøgevinst, bruksverdi, tilgang, logistikk, økonomi og konkrete planer være kritiske faktorer.

## 5.3 Råstoff

### 5.3.1 Tilgjengelighet

Til nå er det stort sett brukt trevirke fra norske skoger, men målet med Biocrete er, som tidligere nevnt, å bruke avfallstrevirke fra byggeplass som råstoff. Per i dag produser norsk industri ca. 1 million tonn avfallstrevirke per år, og av dette står byggebransjen for om lag 40 % (personlig kommunikasjon med Sverre Smeplass 16. mars 2022). I Norge produseres det ca. 5 millioner m<sup>3</sup> betong årlig. Fra Accends LCA-analyse går det fram at det 1 tonn tørt biokull krever 5,1 tonn treflis. I fjorårets masteroppgave konkluderes det med at det trengs ca. 60 kg biokull per m<sup>3</sup> for å oppnå B30-kvalitet og ca. 90 kg biokull per m<sup>3</sup> for B20 [8]. Disse påstandene forsterkes av funnene i høstens prosjektoppgave [7]. Dette betyr at man ved å pyrolysere alt avfallstrevirke kan produsere ca. 3,3 millioner m<sup>3</sup> Biocrete med 60 kg biokull per m<sup>3</sup> og ca. 2,2 millioner m<sup>3</sup> Biocrete med 90 kg biokull per m<sup>3</sup>, hvilket utgjør henholdsvis 66 og 44 % av total betongproduksjon i Norge per år.

Selv om det i dag brukes treflis fra norsk skogbruk er det store mengder som ikke utnyttes (personlig kommunikasjon med daglig leder i Oplandske Bioenergi, Einar Stuve, 16. mars 2022). Ressursen Stuve trekker frem er treets grener og toppe (GROT). GROT er hogstavfall som ofte etterlates i skogen etter avvirkning og i mange tilfeller slipper ut klimagasser som følge av råtning [22]. Hogstavfallet kan flises opp i skogen eller fraktes som bunter og flises opp på fabrikk.

På sikt vil det også være interessant å se på alternative råstoffer. Vil det for eksempel være mulig å pyrolysere plast og hvor mye karbon vil dette kullet i så fall binde? Pyrolysing representerer en miljøvennlig forbrenningsprosess, og betongen, gitt at biokullet oppfører seg stabilt, en god og varig måte å lagre dette på. Det arbeides i tillegg med å redusere svinn på byggeplass. Dette vil naturligvis føre til at mindre avfall må brennes, men ved pyrolysing er utslippene uansett små. En svinnreduksjon vil også kreve nøye planlegging, som igjen krever større ressurser og midler, spesielt for plassbygde konstruksjoner. Tatt i betraktning at avfall fra byggeplass ofte bare står for 5-10 % av et prosjekts totale utslipp og sammenligner dette med utslipp fra betong, som kan utgjøre en vesentlig høyere prosentandel, er det rimelig å anta at klimapotensialet til biokull er større enn gevinsten fra redusert svinn. Det skal også nevnes at de 5-10 % som representerer avfall fra byggeplass omfatter alt avfall og ikke bare treavfall. Den reelle utslippsverdien for denne ressursen vil derfor antakeligvis være godt under 5 %.



---

### 5.3.2 Anvendelse

De positive effektene lagring av karbon i biokull gir har tiltrukket flere interessenter og bruksområder for både biokull og råstoffene er tema som stadig er oppe til diskusjon. Et av argumentene mot bruk av biokull i betong er at betongen i praksis kun fungerer som deponi for en ressurs som kan utnyttes bedre. Som nevnt tidligere er biokull et godt jordforbedringsmiddel og det kan i tillegg bidra til bedre dyrehelse og innemiljø i fjøs når det brukes som fôrtilskudd [23]. Med dagens stillestående priser på kjøtt- og meieriprodukter og kraftige prisøkning på drivstoff, gjødsel, rundballplast, bygningsarbeider og strøm er det lite sannsynlig at landbruket i nær fremtid vil ha kjøpekraft til å nyttегjøre et relativt dyrt produkt som biokull. Eventuelle statlige subsidier vil i første omgang måtte tilfalle mer kritiske problemområder. Det er også verdt å nevne at biokull sees på som et godt jordforbedringsmiddel på grunn av sin evne til å absorbere og lagre vann. I nedbørsrike deler av verden som Skandinavia vil man sjelden få bruk for denne egenskapen og i mange land finnes biokull naturlig i jorda som følge av skogbrann. Det er likevel viktig å påpeke at kullet utvilsomt vil være fordelaktig i sandholdig jord. Her vil det igjen stilles krav til økonomiske midler og en konkret plan, noe svært få, om ikke noen andre enn byggebransjen har per dags dato. Et annet argument som taler for at bruken av biokull i betong ikke går på bekostning av de overnevnte bruksområdene er kvaliteten på kullet som er tiltenkt Biocrete. Som følge av at biokullet skal produseres av avfallstrevirke vil det kunne inneholde rester av andre produkter enn tre og følgelig produsere tungmetaller og dioksiner som gjør kullet uegnet for bruk andre steder. Dersom man i fremtiden finner gode løsninger for å pyrolysere plast er det stor sannsynlighet for at også dette kullet vil inneholde uheldige biprodukter for flere bransjer.

Det stilles også spørsmål rundt hvordan avfallstrevirke fra byggeplass kan utnyttes best mulig. Her er det spesielt avfallstrevirke som energikilde til fjernvarme og gjenbruk i form av nye treprodukter som er de mest utviklede alternativene. Fjernvarme utnytter overskuddsvarme fra blant annet avfallsforbrenning, industriproduksjon og annen økonomisk virksomhet [24]. Målet er å gjenvinne denne varmen som ellers ville blitt sluppet ut i omgivelsene. Det argumenteres også med at det ved avfallsforbrenning produseres CO<sub>2</sub> fremfor den kraftigere klimagassen metan som ville ha utgjort omformingsproduktet dersom nedbrytbart avfall hadde blitt deponert. Videre poengteres det at gjenvinning av denne varmen er svært klimavennlig, siden det ikke innebærer bruk av primærenergi. Samtidig fastslår rapporten fra oppdragsgiver Norsk Fjernvarme at forbrenningen utvilsomt medfører utslipp av både klimagasser og andre forurensende stoffer og at problemer med langtidslagring gjør det problematisk å utnytte all spillvarmen sommerstid. Dette, sammen med det faktum at mye av varmen fra avfallsforbrenning ikke utnyttes overhodet, gjør pyrolyseringsprosessen, som har et veldig lite klimaavtrykk, enda mer attraktiv. Prosessen kan på samme måte som avfallsforbrenningen utnytte overskuddsvarme, men har lavere ressursutnyttelse knyttet til varmeproduksjon. Der man ved avfallsforbrenning kan utnytte ca. 80-90 % av avfallstrevirket vil tilsvarende tall for pyrolyseringsprosessen ligge på rundt 20 % [24][21]. Avfallstrevirke er bare

---

en av flere energikilder som brukes til fjernvarme. Dersom det kan dokumenteres godt nok, vil det da være fordelaktig å avse denne ressursen til fordel for en forbrenningsprosess med større miljøgevinst.

Materialgjenvinning av trevirke er en teknologi på fremmarsj, og aktører melder om solid vekst innen behandling og eksport av avfallstrevirke [25]. Fingerskjøtte bjelker og sponplater er blant de mest vanlige produktene fra gjenvinningen og vil på samme som biokullet kunne tas ut av livsløpszyklusen dersom det kan gjenbrukes og dermed lagres i flere hundre år. Det blir viktig å sammenligne klimagassavtrykket fra gjenvinningsprosessen med pyrolysing, og ikke minst dokumentere de ulike produktenes bestandighetsegenskaper. Gjenvinningen og pyrolysingen er prosesser som krever både energi og penger, så produktenes levetid vil være en kritisk faktor. I forbindelse med brannegenskaper og motstandsdyktighet i aggressivt og vått klima har betong unektelig et fortrinn. Det skal også nevnes at treprodukter kan være svært bestandig i tørre miljøer. Med de nye oppdagelsene gjort i forbindelse med porestrukturen i Biocrete, er det også sannsynlig å anta at man med tid kan levere et svært bestandig produkt. I tillegg til dette vil betong og Biocrete være mer gunstig som lydisolator enn treprodukter, men dette og andre byggetekniske egenskaper utover bestandighet diskuteres ikke i denne rapporten.

## 5.4 Intervjuer

### 5.4.1 Christofer Skaar. Seniorforsker, SINTEF

*Gjennomført i Microsoft Teams 23. februar 2022.*

Christofer Skaar er blant annet materialforsker for SINTEF og jobber tett opp mot EPD Norge. Han tror volum biokull blir avgjørende. Hvis det går på bekostning av bedre bruksområder vil det være uheldig, men et godt alternativ dersom man evner å produsere nok til alle interessenter. Han presiserer at EPD Norge følger standarder som utvikles på europeisk og internasjonalt nivå. EPD Norge bidrar i noen grad til utvikling av disse, men følger standarder og har liten innflytelse internasjonalt. Han sier at lagringseffekten ikke kan tas direkte med i en EPD, men inkluderes som tilleggsinformasjon. Regelverket tillater med andre ord ikke at biokull blir tillagt en negativ verdi som veier opp for utslippene knyttet til øvrige komponenter i betongproduksjonen, men gir aktører mulighet til å bevise hvordan karbon lagres, for så å inkludere dette i det totale klimagassregnskapet. Han sier at man for Biocrete kan se en viss likhet med biokull i asfaltbransjen. Her er det blitt diskutert hvordan EPD'er skal utformes og brukes inn i klimaregnskapet, og hvordan vektas inn i anskaffelser. Skaar påpeker at denne diskusjonen er viktig å ta før produktet kommer på markedet, slik at man unngår uenigheter og dokumentasjonsproblematikk i senere faser.

Skaar nevner Eco Platform, som er paraplyorganisasjonen til EPD-programmene i Europa. Han sier at en omforent praksis som gjør det lettere for ferdigbetongprodusentene å dokumentere bidraget

---

fra biokull har vært oppe til diskusjon i organisasjonen. En slik endring kommer til å ta tid, men kan være aktuell når kjernestandardene skal revideres rundt 2024. Det er egne komiteer som utarbeider europeiske og internasjonale standarder. Egne representanter fra flere nasjonale standardiseringsbyråer går igjennom forslag og kommer med innspill før de til slutt møtes og stemmer over aktuelle endringer og tillegg. Konsensusprosessen er tidkrevende, men det ferdige produktet er et resultat av nøysomme vurderinger og enighet. I mellomtiden kan dette omgås, men da må innkjøpere og byggherrer være enige om hvordan karbonlagringen skal inkluderes i klimaregnskapet. Man må regne uten negative verdier i EPD, men får en effekt inn i markedet.

Av andre muligheter nevner han børs for karbonsertifikater. Altså en vanlig EPD samt sertifisering om at man lagrer CO<sub>2</sub>. Hva EPD'en sier og hva man velger å regne inn i klimaregnskapet står man fritt til å velge selv. Man kan omgå standarder, men da må det dokumenteres og begrunnes tilstrekkelig. For å oppnå aksept i bransjen kan det være aktuelt å få det inn i NS 3720 eller få sertifisering fra BREAM eller FutureBuilt. Han er også tydelig på at alle steiner må snus hva gjelder bruk av råstoffer og det ferdige biokullet. Skaar påpeker at en god start vil være å presentere CO<sub>2</sub>-tall for Biocrete med bakgrunn i en LCA-analyse for biokullet. Han foreslår ulike følsomhetsanalyser der utførende part er veldig transparente og presise på hva analysen dekker og ikke dekker. Avslutningsvis er han positiv til konseptet og ser klimaverdien i å innovere et så populært produkt som betong, men er tydelig på at mange faktorer må gjennomgås før produktet realiseres.

#### **5.4.2 Oddbjørn Dahlstrøm Andvik. Energi- og miljørådgiver, Asplan Viak**

*Gjennomført i Microsoft Teams 7.mars 2022.*

Dahlstrøm Andvik har ikke så tro på gjennomslag med FutureBuilt siden deres kriterier stort sett baserer seg på EPD'er. Han presiserer at det er mulig å undersøke hvilke muligheter man har forbundet med dokumentasjon og spørre om det er mulig å få et prosjekt godkjent innenfor kriteriene. I likhet med Skaar påpeker han viktigheten av å presentere konkrete CO<sub>2</sub>-tall fra LCA-analyser for å få ballen til å rulle. Han sier at miljørådgivere bruker materialmengder og informasjon gitt i EPD'er til å dokumentere totalt klimagassutslipp. I en slik kontekst er en EPD et svært nyttig hjelpemiddel siden det er et objektivt dokument som er regnet med ekstern verifikasjon. Slik kan man være sikker på at denne informasjonen stemmer. Dahlstrøm Andvik påpeker at man raskt mister troverdighet dersom man ikke kan vise til en EPD, men ser positivt på midlertidige løsninger frem til man har en EPD på Biocrete og lignende produkter. Han påpeker viktigheten av god dokumentasjon og advarer mot ukritisk bruk av verdier fra ikke-verifiserte kilder. Det er relativt enkelt å fremstille et produkt slik man selv ønsker. LCA kan manipuleres til å fremme eget synspunkt og innhentning av selektive resultater fra ulike studier kan i sum få et produkt til å fremstå langt bedre enn det er i realiteten. LCA baserer seg i stor grad på antakelser og forutsetninger, så man kan til en viss grad farge analysens svar. Andvik sier at gode forskningsartikler eller en

---

god LCA-analyse selvsagt er bedre enn ingenting, men er klar på at grundig kvalitetssikring er grunnen til at det tar lang tid å endre eller anskaffe en EPD. Med det sagt, har han god tro på midlertidige løsninger frem til denne typen karbonlagring eventuelt innlemmes i standardene. Han sier at det må gås grundig til verks og at alt dokumentasjonsarbeid må kunne presenteres på en transparent og oversiktlig måte slik at leseren kan forstå beregningsgangen som danner grunnlaget for det endelige regnskapet. Han er også tydelig på at det må gjøres innledende beregninger for å gi utbyggere en indikasjon på hvor stor klimagevinst de kan forvente ved bruk av Biocrete.

I forbindelse med avfall i byggeprosjekter anslår Andvik at dette vanligvis utgjør ca. 5-10 % av de totale utslippene, men dette er ikke faste tall og inkluderer alt avfall, ikke bare det som er trebasert. Han sier at man kan redusere avfall betraktelig med god planlegging og gjenbruk, men det vil likevel gi større miljøgevinst å bruke Biocrete enn å redusere mengde avfall. Videre poengterer han at transportavstand også kan påvirke totalregnskapet. Frakt fra fabrikk til byggeplass kan utgjøre opp mot 10 % av det totale summen. Avslutningsvis sier Andvik at man ved å bruke avfall fra byggeplasser pyrolyserer trevirke som ellers ville ha sluppet ut i atmosfæren som CO<sub>2</sub> ved forbrenning. En avfallssyklus blir brutt og man har med en gang bedre forhandlingskort. Problemet med alt som binder biogent karbon er likevel at det endrer veldig på regnereglene. Siden biokull lages av trerester antar man at disse restene ville blitt forbrent dersom de ikke ble brukt til biokull, men hva hvis vi hadde utnyttet restene på annet vis? Altså at det ikke er avfall, men ses på som et biprodukt av treproduksjon med verdi. Dette kan påvirke hvor bra biokull er i kilo CO<sub>2</sub> per kilo biokull produsert. Han konkluderer med at man må se på hele veien fra vugge til grav og alle muligheter man har knyttet til bestanddelene i biokull.

### **5.4.3 Stein Stoknes. Prosjektleder, FutureBuilt**

*Gjennomført i Microsoft Teams 14.mars 2022.*

Stoknes liker prosjektet og sier at man må prøve seg fram når man skal innovere produkter. Som Skaar og Andvik er han opptatt av om det finnes det bedre bruksområder for biokull og om det finnes andre råstoffer som kan erstatte treavfall. Han sier at av gjenbruk og anvendelse av treavfall står høyt hos han og at de jobber med prosjekter som tar sikte på å beholde som trevirke i bygningsmassen lenger. Stoknes mener at råstoffene som skal pyrolyseres til biokull burde være trevirke som ikke kan brukes noe annet sted enn forbrenning. Han tror tilgang på treavfall som råstoff vil bli mindre i fremtiden som følge av økt popularitet i bransjen. Levetiden til Biocrete sammenlignet med treprodukter synes han blir vanskelig å sammenligne. I tørre omgivelser kan trematerialer stå i 1000 år og betongbalkonger kan falle ned etter 15 år ved uheldig eksponering.

Han sier at Biocrete kan tilfredsstillere FutureBuilt Zero-kriteriene og er positiv til å løfte fram produktet når det eventuelt er et realisert produkt. FutureBuilt dyrker nytenking og da er det naturligvis noe upløyd mark. Stoknes påpeker at de på ingen måte driver grønnvasking og at

---

det er nødvendig med så god dokumentasjon som mulig. Klimadokumentasjon for biokullet blir viktig og det samme med kulletts påvirkning på det totale regnskapet for betongen. FutureBuilt Zero-kriteriene åpner for å inkludere effekten av biogen lagring, unngått forbrenning av materialer og ombruk. Alle er faktorer som kan utnyttes i Biocrete og han avslutter med å si at håndfaste, oversiktlige og verifiserte tall må ligge på bordet før det første FutureBuilt-prosjektet med Biocrete kan realiseres.

---

## 6 Fukt og struktur

De fleste materialer inneholder mer fukt i byggefasen sammenlignet med driftsfasen der materialene etter hvert oppnår fuktlikevekt med omgivelsene. Dette overskuddet kalles byggfukt og må tørkes ut for å oppnå nevnte likevekt. For en nystøpt betong vil relativ luftfuktighet i poreluften fremdeles ligge opp mot 100 % etter én uke, og selv om betongen vil binde noe av fuktigheten i herdeprosessen vil det være behov for å tørke ut betydelige mengder [6]. SINTEF anslår at fuktrelaterte skader står for minst 75 % av byggskader i og utgjør følgelig en meget høy kostnadspost [26].

Dersom byggfukt i betong ikke får mulighet til å tørke ut kan det gi store problemer i forbindelse med videre arbeid. Ofte stenges denne fuktigheten inne i konstruksjoner, hvilket kan gi en rekke uheldige konsekvenser som forringet inneklima, bygningsskader og forsinkelser i fremdrift. Dimensjonsendringer, i form av krymp og utvidelse, genererer betydelige krefter som kan være store nok til å gi permanente skader som sprekker, delaminering eller varig formendring. Selv om betong i seg selv er svært lite utsatt for mikrobiologisk vekst som følge av høy pH-verdi, vil den ofte kles inn med utsatte materialer. Dersom det er høy restfuktighet i betongen vil muggsopp og bakterier kunne vokse på disse og gi helseplager, sjenerende lukt og misfarging. Videre vil høy fuktighet kunne bidra til spalting av kjemiske forbindelser. Dette er spesielt kritisk for lim og gulvbelegg som kan produsere lukt og avgasser, i tillegg til at limet kan miste vedheft og det kan oppstå blæredannelse i belegget. Til slutt vil forsinkelser i fremdrift kunne være svært kostbart. Dette i form av at byggeprosjektet stopper opp som følge av langsom uttørking, eller som følge av at man må gjøre opp igjen arbeid som ble påbegynt før byggfukten hadde tørket ut tilstrekkelig [6].

Med bakgrunn i resultater fra tidligere arbeid, som antyder at biokullet har en absorpsjonsverdi på 150 % og dermed er en god absorbent, er det nærliggende å tro at en betong med biokull vil inneholde mer vann enn en ordinær konstruksjonsbetong. Derfor er det av stor interesse å kartlegge de fukttekniske egenskapene til biokull og Biocrete.

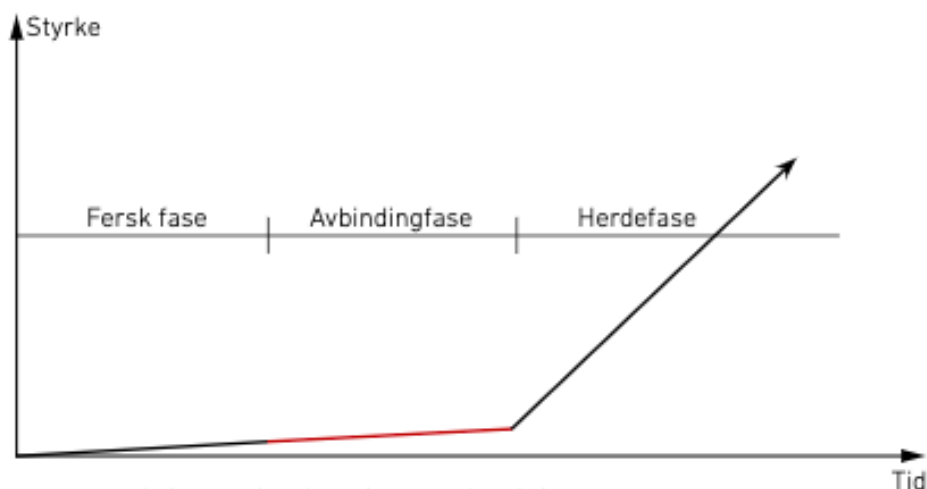
### 6.1 Struktur og uttørking

#### 6.1.1 Betongens oppbygging og struktur

Betong betraktes gjerne som en kompositt sammensatt av sementlim og steinmaterialer. Det er samvirket mellom disse som danner grunnlaget for betongens komposittoppførsel og gjør den egnet som konstruksjonsmateriale. Betongens materialegenskaper styres delvis av funksjonskrav og delvis av konkrete krav til sammensetning. Sementen er betongens bindemiddel, men har ingen bindingsegenskaper før den blandes med vann og danner sementlim. Denne reaksjonen kalles hydratasjon og er en eksoterm reaksjon. Reaksjonen styrer på mange måter betongens støpelighet. Ved nedmaling av portlandssement tilsettes ca. 5 % gips for å hindre spontan avbinding ved blanding av betong. Gipsmengden er tilpasset en ønsket åpningstid på ca. 2 timer ved 20 graders temperatur. I perioden

---

betongen er støpbar befinner den seg i fersk fase, før den senere går over til avbindings- og herdefasen der betongen går fra flytende til fast materiale og styrke- og varmeutviklingen intensiveres, som illustrert i figur 6.1.



Figur 6.1: Fersk fase, avbindingfase og herdefase

Source: Smeplass (2015) [27].

Hydratasjonens reaksjonsprodukter er kalsiumsilikathydrat (CSH) og kalk (CH). Disse har et noe mindre volum enn reaktantene vann og sement. T. C. Powers fant ut at denne volumreduksjonen, kjent som kjemisk svinn, tilsvarer 25,4 % av volumet av den reagerte vannmengden. Kjemisk svinn fører ikke til at betongen mister ytre volum, men gir utslag i at det dannes indre porer, også kjent som kontraksjonsporer, som følge av at sementlimet får en fast struktur allerede i avbindingfasen. Disse utgjør normalt ca. 2 % av betongen og er i teorien tomme. At volumendringen skjer internt i faststoffstrukturen er en veldig viktig egenskap og denne volumstabiliteten er helt nødvendig for betong som konstruksjonsmateriale. Overskuddsvann er vann som ikke reagerer med sement. Dette vannet danner et kontinuerlig poresystem med samme form og størrelse som kontraksjonsporene og kalles kapillærporer. Kapillærkreftene mellom vann og porer vil alltid føre vannet til de minste porene, hvilket medfører at de største kontraksjons- og kapillærporene alltid er tomme. De trangeste porene i sementlimet kalles gelporer og har en størrelse på omtrent 2 nanometer. Disse er fylt av vann som er fysisk bundet til CSH-overflatene som oppstår når sementpartikler reagerer med vann. Hver partikkel kapsles inn av nåleformede CSH-krystaller som som igjen flettes inn i hverandre i et komplekst nettverk. Hulrommene i dette nettverket dannes av kapillær- og kontraksjonsporene. Vannet i gelporene er på sin side så sterkt bundet til overflatene ved adsorpsjon at det i praksis ikke er tilgjengelig for videre hydratasjon og gjør, sammen med gradvis fortetning av CSH-strukturen, at man i virkeligheten aldri oppnår 100 % hydratasjon. Så lenge det dannes nok hydrat til å forbinde uhydratiserte sementkorn, har lavere hydratasjonsgrad likevel ingenting å si, da uhydratisert sement har vesentlig større styrke enn reaksjonsproduktene. Med tilstrekkelig hydrat vil fastheten øke med avtagende masseforhold som følge av at kapillærporøsiteten avtar.

---

Ved herding vil kapillærporevolumet reduseres, porestrukturen bli finere og CSH-strukturen mer kompakt. På denne måten får betongen større styrke og tetthet - to svært gunstige egenskaper [27].

### 6.1.2 Porøsitet og struktur

Normale norske tilslagstyper består av bergarter med trykkfasthet i størrelsesorden 150-350 MPa. Altså er tilslagets fasthet 5-10 ganger større enn tilsvarende tall for en konstruksjonsbetong, og det er følgelig bindemiddelets fasthet og interaksjon med tilslaget som er begrensende faktorer i betongen. Bindemiddelets fasthet er igjen avhengig av porestørrelsesfordeling og totalporøsitet, og fasthetsnivå øker med avtagende porøsitet. Sementlim har et meget høyt fasthetsnivå i forhold til porevolum som følge av porestørrelsesfordelingen. Betong har som regel lavere fasthet enn sementlimet alene, til tross for at tilslaget er betraktelig sterkere enn sementlimet. Grunnen til dette er hovedsaklig betongens indre struktur. Heftsonen mellom tilslag og bindemiddel har grovere porøsitet enn sementlimet og inneholder i tillegg en større andel kalk-krystaller (CH) med svak styrke. Over halvparten av sementlimet befinner seg i et område mindre enn 40 mikrometer fra en tilslagsoverflate. Det er dermed tydelig at heftsonen påvirker betongens mekaniske egenskaper i stor grad og at opprissing og sprekkutvikling ofte foregår i denne sonen dersom betongen lastes til brudd. Tilsetningen av biokull, som er et mer porøst materiale, vil gi en noe svakere betong som følge av at det dannes flere hulrom i strukturen, men bestandigheten vil bedres [27]. Dette drøftes i kapittel 6.7.

### 6.1.3 Egenuttørkings- og uttørkingssvinn

Til tross for at det meste av volumendringen skjer internt som beskrevet i kapitlet om betongens oppbygning og struktur, er ikke betongen 100 % volumstabil. Store deler av porevolumet i betongen er veldig fint (mindre enn 1 mikrometer) og i disse porene kan det oppstå kapillæreffekter som et resultat av overflatespenning mellom luft og vann. Ved hydratisering vil kontraksjonsporevolumet øke og kapillærporevolumet reduseres. Disse effektene gir et stadig større kapillært undertrykk i betongen, og det oppstår et volumtap som omtales som autogent svinn. I tillegg til dette vil den relative fuktigheten i det luftfylte porevolumet synke som følge av det kapillære undertrykket, og denne effekten kalles egenuttørking i betongen. Volumtapet er størst i betonger med lavt masseforhold som følge av at disse betongene har svært fine poresystemer. Likevel utgjør ytre volumtap en veldig liten del sammenlignet med det interne svinnet. En betong med masseforhold 0,4 har normalt et volumtap på om lag 0,6-0,9 %. Dersom masseforholdet i betongen overgår ca. 0,6 er poresystemet i de fleste tilfeller for grovt til at det oppstår egenuttørkingssvinn av betydning [27].

Uttørking mot omgivelsene vil på samme måte som egenuttørking forårsake svinn. Ved å utsette betongen for miljøer med lavere RF enn i betongens porevolum vil den tørke inntil det oppstår



---

fuktligevekt. Som følge av at RF i omgivelsene ofte kan ligge rundt 50 % er uttørkingssvinnet ofte vesentlig større enn egenuttørkingssvinnet fordi den når fuktligevekt på et mye lavere fuktnivå. Tøyningene som skapes av svinntas i all hovedsak av armering. Mengde beror på blant annet på bruksområde, opplagerbetingelser og dimensjoner. Høyere fasthetsklasser gir større minimumsarmering som følge av at økt fasthet alltid gir økt E-modul, og dermed større spenninger i betongen dersom svinntøyningen holdes tilbake. I tillegg er slanke og tynne konstruksjoner mer utsatt da grovere konstruksjoner i realiteten aldri tørker helt ut. Som følge av at betongen alltid vil ha lavere fuktinnhold nær overflaten kan dette være spesielt utfordrende for tynne gulv. Forskjellen i fuktinnhold mellom kjerne og overflate gjør at betonggulvet har en tendens til å krumme oppover og vi får effekten kjent som ”kantreising”. Reisingen kan bli over 10 mm og byr på praktiske problemer siden gulvet ikke lenger er rett. Den øker også faren for brudd og opprissing dersom gulvet belastes slik at kantene trykkes ned. Det er umulig å fullstendig forhindre opprissing som følge av fastholdt svinntøyning ved bruk av armering, men denne vil sikre at rissviddene blir små og jevnt fordelt. På denne måten bevares konstruksjonens bestandighet og det oppstår ikke estetiske problemer. Tøyningene som forårsaker denne krumningen er så godt som uavhengig av tykkelsen på gulvet. Dermed vil tykke golv ha større motstandskapasitet som følge av at stivhet øker kraftig med økende tykkelse. I forbindelse med kantreising frarådes gulvtykkelser mindre enn 100 mm. For tykkelser større enn 120 mm vurderes problemer knyttet til kantreising som liten eller ubetydelig. Egenuttørkingssvinn gir ikke kantreising. Dette fordi svinnet er jevnt fordelt over betongens tykkelse [27].

## 6.2 Vannabsorpsjonsevne biokull

Vannabsorpsjonsevnen er mengden vann i prosent av tørr masse som kan absorberes. En tørr masse har porer som er tilgjengelig for absorpsjon og kan ta opp vann. Vannabsorpsjonsevnen til biokull har ikke blitt fastsatt tidligere, men har blitt estimert til 150 % fra laboratorieforsøk. Det vil si at biokullet kan absorbere vann tilsvarende 150 % av sin egen partikkeldensitet, som tidligere har blitt anslått å være på ca. 375 kg/m<sup>3</sup>.

### 6.2.1 Mål og hensikt

Hensikten med å gjennomføre et vannabsorpsjonsforsøk er å fastslå om biokullets totale absorpsjon blir den samme uavhengig av initiell fukt. Dersom det er tilfellet vil det gi betongprodusenter større fleksibilitet i forbindelse med hvor mye initiell fukt som er ønsket i biokullet. En stor del av arbeidet med å kartlegge de fukttekniske egenskapene til Biocrete er å forstå oppførselen til biokullet. Det er derfor interessant å etterprøve tidligere antagelser om den estimerte totale absorpsjonen på 150 %, og om initiell fuktighet påvirker densitet og trykkfasthet.

---

## 6.2.2 Fremgangsmåte

Forsøket for å finne sammenhengen mellom initiell fukt i biokullet og vannabsorpsjonen ble gjennomført ved NTNUs materialtekniske laboratorium på Gløshaugen i mai 2022. Med utgangspunkt i resepten med 60 kg biokull per m<sup>3</sup> som er brukt i SINTEFs forsøk ble det totalt produsert 3 mørtelblandinger, en blanding med 0 % initiell fukt i biokullet, en med 50 % og en med 100 %. Det ble støpt ut tre terninger fra hver blanding. Disse ble avformet og veid etter ett døgn, deretter lagt i vannbad i sju døgn. Terningene ble til slutt veid og trykktestet etter sju døgn. Ved hjelp av reseptkorreksjonsmal gitt av veileder Sverre Smeplass ble sammenhengen mellom luftinnhold, densitet og vannabsorpsjon undersøkt for alle 3 blandingene.

I proporsjoneringen av mørtlene ble andelen Årdal 8/16 mm satt til 0. Som følge av denne volumreduksjonen måtte volumandelen Årdal 0/8 mm og biokull skaleres opp. Volumandelen Årdal 8/16 i den opprinnelige resepten (vedlagt i Appendix C) er gitt i ligning 6.2.1.

$$Volumandel\ 8/16 = \frac{532,4\ kg/m^3}{2670\ kg/m^3} = 0,1994. \quad (6.2.1)$$

Her er 532,4 kg/m<sup>3</sup> vekten av 8/16 tilslag per m<sup>3</sup> betong og 2670 kg/m<sup>3</sup> tilslagetts densitet. Siden mengden biokull per m<sup>3</sup> er skalert opp må også matriksvolumet skaleres opp for å få samme forholdstall mellom sement og biokull. Matriksvolumet fra den opprinnelige resepten er 377 L/m<sup>3</sup>. Skalert matriksvolum kan nå beregnes på følgende måte.

$$Matriksvolum = \frac{377\ L/m^3}{1 - 0,1994} = 471\ L/m^3. \quad (6.2.2)$$

Luftinnhold ble skalert fra 2 % til 2,5 % siden det forventes at mørtelen har et høyere luftinnhold enn biocreten fra den opprinnelige resepten. I reseptene med 50 og 100 % initiell fukt ble densiteten økt med 50 % og 100 %. Vektandelen ble justert slik av volumandelene til de to fraksjonene ble lik som i referanseresepten med 0 % initiell fukt. Absorbent fukt ble deretter satt til henholdsvis 100 % og 50 % av densiteten til biokullet ved 0 % fukt. Med utgangspunkt i biokullet sin nye densitet etter forfukning kan prosentvis absorbert fukt for de to gitte reseptene beregnes på følgende måte:

$$Absorbent\ fukt\ (50\ \% \text{ initiell fukt}) = \frac{100\ \% \cdot 375\ kg/m^3}{562,5\ kg/m^3} = 66,7\ \%. \quad (6.2.3)$$

Her er verdien på 100 % antatt absorbert fukt av densiteten til biokullet med 0 % fukt, 375 kg/m<sup>3</sup> er densiteten til biokullet ved 0 % fukt og 562,5 kg/m<sup>3</sup> er densiteten til biokullet ved 50 % initiell fukt. Tilsvarende fremgangsmåte ble brukt for resepten med 100 % initiell fukt:

$$Absorbent\ fukt\ (100\ \% \text{ initiell fukt}) = \frac{50\ \% \cdot 375\ kg/m^3}{750\ kg/m^3} = 25\ \%. \quad (6.2.4)$$

Forfuktingen av biokullet ble gjort med å veie opp samme mengde biokull ved 0 % initiell fukt som i referanseresepten. For å oppnå 50 % fukt ble det tilsatt en mengde vann som tilsvarer 50 % av vekten til biokullet. Vannet ble veid opp og tilsatt biokullet kontrollert ved hjelp av en

---

sprayflaske under kontinuerlig blanding i en Hobart, illustrert i figur 6.2. Det forfuktede biokullet ble kontrollveid for å forsikre at riktig densitet var oppnådd, og dermed også riktig fuktinnhold. Biokullet ble deretter lagt i tette poser over natten for å oppnå en homogen blanding, og hindre fuktighet fra å slippe ut. Fremgangsmåten ble gjentatt for biokullet med 100 % initiell fukt, men i dette tilfellet ble det tilsatt vann tilsvarende 100 % av vekten til referansen.



Figur 6.2: Forfukting av biokullet

Første steg i blandedprosessen av de tre mørtlene var å plassere tilslag, biokull, sement, flyveaske og silikastøv, i betongblanderen. Tilslaget ble tilsatt kort tid etter biokullet for å forhindre støving under tørrblandingen. For vanlig betong er det normalt å kjøre tørrblandingen i ett minutt, men med tidligere erfaringer fra blant annet fjorårets prosjekt- og masteroppgave, ble det bestemt å kjøre tørrblandingen i fire minutter. Dette anses som hensiktsmessig for å knuse biokullet enda mer og jevne ut eventuelle klumper i de andre bestanddelene. De neste stegene var å tilsette vann og det plastifiserende stoffet Mapei Dynamon SX-23 gradvis i løpet av 30 sekunder, la våtblandingen gå i ca. to minutter, etterfulgt av ett minutt henstilling. Etter dette ble biocreten blandet i ytterligere ett minutt. Figur 6.3 viser blandingen av mørtlene. Tre terninger ble til slutt støpt ut fra hver mørtelblanding.



Figur 6.3: Våtblanding av mørtler

### 6.2.3 Resultat

Tabell 6.1: Tabellen viser densitet og trykkfasthet for de tre mørtelblandingene

| Initiell fukt | Prøvestykke | Densitet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] |        | Trykkfasthet [MPa] |
|---------------|-------------|-------------------------------------|--------|--------------------|
|               |             | 1 døgn                              | 7 døgn |                    |
| 0 %           | 1           | 1968,9                              | 1994,1 | 21,4               |
|               | 2           | 1944,5                              | 1970,3 | 21,3               |
|               | 3           | 1965,8                              | 1991,4 | 21,5               |
| 50 %          | 1           | 2010,6                              | 2035,4 | 22,2               |
|               | 2           | 2020,5                              | 2044,4 | 22,8               |
|               | 3           | 2014,0                              | 2038,3 | 22,6               |
| 100 %         | 1           | 2003,8                              | 2028,2 | 23,2               |
|               | 2           | 2030,1                              | 2055,4 | 23,0               |
|               | 3           | 2031,4                              | 2056,4 | 23,4               |

Resultatene som er gitt i tabell 6.1 viser at initiell fukt påvirker både densitet og trykkfasthet, men denne forskjellen er relativt liten. 0 % initiell fukt gir en gjennomsnittlig densitet på  $1985 \text{ kg}/\text{m}^3$  og en trykkfasthet på 21,4 MPa. For blandingen med 50 % fukt viser resultatene  $2039 \text{ kg}/\text{m}^3$  og 22,5 MPa, mens for 100 % blir gjennomsnittlig verdi  $2047 \text{ kg}/\text{m}^3$  og 23,2 MPa. Det er altså en betydelig densitetsforskjell mellom Biocrete med tørt biokull og Biocrete med forfuktet biokull.

---

Endringen i densitet fra 1 døgn til 7 døgn er relativt lik for alle terningene, en økning på rundt 25 kg/m<sup>3</sup>. Resultatene gir dermed sterke indikasjoner på at det er en sammenheng mellom initiell fukt og trykkfasthet, da trykkfasthen øker med stigende initiell fukt.

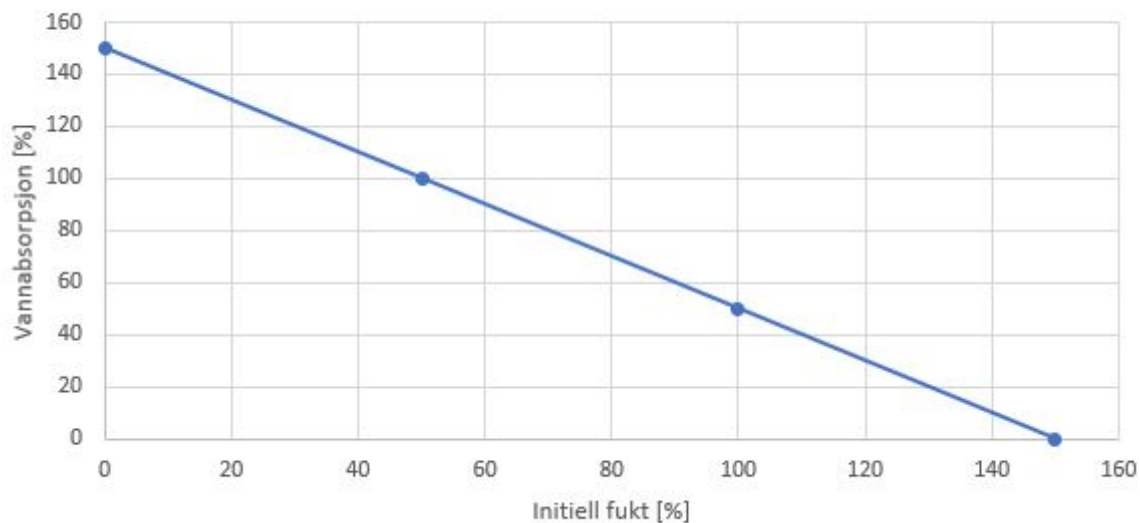
Reseptkorreksjonsmalen som ble brukt er vedlagt i Appendix B. Resultatene er gjengitt i tabell 6.2. Ved å bruke en korrigert densitet på 475 kg/m<sup>3</sup> for biokullet fremfor 375 kg/m<sup>3</sup> som først antatt, ser resultatene svært gode og sammenfallende ut. Teoretisk densitet og vannabsorpsjon stemmer godt overens med målt densitet og antatt vannabsorpsjon i resepten. Resultatene indikerer videre at det er relativt stor forskjell i luftinnhold for blandingene med forfuktet biokull og blandingen med tørt biokull.

Tabell 6.2: Tabellen viser teoretisk sammenheng mellom luftinnhold, densitet og vannabsorpsjon

| Initiell fukt [%] | Luftinnhold [%] | Densitet [kg/m <sup>3</sup> ] | Vannabsorpsjon [%] |
|-------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------|
| 0                 | 4,4             | 1985                          | 155                |
| 50                | 1,8             | 2040                          | 69                 |
| 100               | 1,5             | 2047                          | 27                 |

#### 6.2.4 Diskusjon

Underveis i forsøket kunne det observeres at støpeligheten var veldig lik for de tre blandingene. Det gir en god indikasjon på at vannabsorpsjonen til biokullet foregår spontant, og at det derfor ikke spiller noen stor rolle om fuktigheten ligger initielt i biokullet eller tilsettes under blanding. I tillegg er trykkfastheten ganske lik for de tre blandingene, bare 2 MPa forskjell. Lik støpelighet og tilnærmet lik trykkfasthet for alle blandingene indikerer at total vannabsorpsjon ligger i området rundt den estimerte verdien på 150 %. Med utgangspunkt i disse resultatene er det mulig å lage en kurve som viser sammenhengen mellom initiell fukt i biokullet og vannabsorpsjon. Figur 6.4 viser denne sammenhengen. Grafen presenterer tydelig målet ved forsøket. Informasjon om forventet vannabsorpsjon ved gitt initiell fukt kan enkelt tilegnes ved å gå inn i grafen og lese av verdier. I vårens forsøk ble det ikke produsert en blanding med 150 % fukt, men som følge av grafens linearitet kan den enkelt forlenges til 150 % initiell fukt. I dette punktet vil altså forventet vannabsorpsjon være 0 %.



Figur 6.4: Grafen viser sammenhengen mellom initiell fukt i biokullet og vannabsorpsjonen til biokullet

Angående densiteten til terningene er det som nevnt en forskjell mellom prøvene med og uten forfuktet biokull. Det kan tyde på at det er ulikt luftinnhold i blandingene. Tørt tilslag kan gi en skummingseffekt under blanding. Det vil si at vannet som trenger inn i biokullet fortrenger lufta i biokullets poresystem. Lufta vil da presses ut og danne luftporer i biocreten. Dette vil føre til at betongen tar inn mer luft som igjen vil gi større porøsitet og lavere densitet.

I utgangspunktet bør det ikke være forskjell i trykkfasthet mellom de ulike blandingene. Resultatene viser likevel at det er en liten forskjell i trykkfasthet. Trykkfastheten er lavest ved 0 % og størst ved 100 % initiell fukt. Disse funnene indikerer at det er en systematisk forskjell i trykkfasthet som følge av forfuktingen av biokullet. Høyere initiell fuktighet ser ut til å gi større trykkfasthet. Forskjellen er som nevnt veldig liten, men verdt å merke seg, og kommer mest sannsynligvis av det ulike luftinnholdet i terningene. Lavere densitet gir lavere trykkfasthet.

Resultatene fra forsøket er gode nyheter for betongprodusenter som skal produsere Biocrete i fullskala. Forfukting fra 10 % og høyere ser ut til å gi relativt små utslag og gir produsentene valgfrihet ved blanding. Det vil da være lettere for produsentene å håndtere fuktigheten, og uansett hvilken initiell fukt som velges vil støpeligheten og trykkfastheten være tilnærmet lik. Forfukting er i tillegg positivt i forbindelse med eksplosjonsfare. Biokullet er fullstendig nedmalt og brennbart i tørr tilstand. Statisk elektrisitet og gnister kan være tilstrekkelig for at blandingen utgjør eksplosjonsfare. Produsentene kan derfor velge å produsere med 10 % fukt slik at det ikke er like antennbart. Det vil forbedre sikkerheten under produksjon. Det vil også la seg gjøre å blande inn helt tørt biokull, men da med forbehold om høyere luftinnhold, lavere fasthet og til en viss grad eksplosjonsfare.

---

I analysen av sammenheng mellom luftinnhold, densitet og vannabsorpsjon er det en usikkerhet som følge av at én ligning brukes til å bestemme to parametre. Fra korreksjonene ble det valgt å bruke  $475 \text{ kg/m}^3$  som partikkeldensitet for biokullet fremfor  $375 \text{ kg/m}^3$  som er brukt i resepten. Resultatene med denne justeringen gir veldig godt samsvar mellom teori og praksis og gir sterke indikasjoner på at reell partikkeldensitet på biokullet er rundt  $475 \text{ kg/m}^3$ . Det er en økning på nesten 27 % fra den opprinnelige antagelsen på  $375 \text{ kg/m}^3$ . Med andre ord ser det ut til at man tidligere har underestimert partikkeldensiteten til biokullet ganske kraftig. Det er fortsatt viktig å huske på at biokullet som vi får bestilt ikke alltid vil ha samme partikkeldensitet. Selv om vi har truffet veldig bra på resultatene ved å bruke  $475 \text{ kg/m}^3$  i denne resepten, er det sannsynlig at densiteten er en annen ved andre forsøk, men vi kan anta at densitet ligger nærmere  $475 \text{ kg/m}^3$  enn  $375 \text{ kg/m}^3$ . Det samme gjelder total absorpsjonsevne, det kan også forventes å endre seg fra bestilling til bestilling av biokull. Til tross for det kan vi anslå at det en vannabsorpsjonsverdi på omkring 150 % ikke er langt fra sannheten. Det er dog essensielt i fremtidige bestillinger å få presise målinger for både partikkeldensitet og vannabsorpsjonsevne slik at resepten blir best mulig.

Målet med forsøket var først og fremst å undersøke effekten av forfukning. Det viser seg at biokullets vannabsorpsjon skjer spontant og at initielt fuktinnhold har liten betydning i forbindelse med støpelighet. Det kan faktisk være en fordel å forfukte fordi man får lavere luftinnhold og dermed en sterkere betong. Det har tidligere blitt antatt at det var lurt å blande med tørt biokull, men det ser faktisk ut til å være motsatt. Dette er et meget godt resultat siden det forenkler produksjonen av både biokull og Biocrete.

### 6.3 Uttørkingsforsøk

Resultatene presentert i forrige kapittel viser at biokullet etter alt å dømme har en ekstremt høy vannabsorpsjonsverdi (ca. 150 %). Dette utgjør 90 liter ekstra vann per  $\text{m}^3$  i en Biocrete som er tilsatt 60 kg biokull per  $\text{m}^3$ , som vil si samme størrelsesorden som vannet i kapillærporene. Med dette som utgangspunkt er det svært interessant å studere hvordan dette vannet påvirker betongens uttørkingshastighet. Det har i perioden november 2021 til april 2022 blitt utført laboratoriearbeid ved NTNUs laboratorier for å kartlegge den nye betongens fuktegenskaper, og få en formening om porestrukturen. Målet med arbeidet var å bli kjent med Biocrete og se hvordan denne typen betong oppfører seg sammenlignet med vanlig konstruksjonsbetong, samt kartlegge hvor lang uttørkingstid man kan forvente for betonger med ulik mengde biokull.

#### 6.3.1 Fremgangsmåte

For å teste uttørkingstid ble det i november 2021 støpt to biocreteelementer på  $40 \times 40 \times 10 \text{ cm}$  som tilsvarer et volum på  $0,016 \text{ m}^3$ . Elementene ble støpt med henholdsvis  $60 \text{ kg/m}^3$  og  $90 \text{ kg/m}^3$  biokull før de ble plassert i et klimarom med konstant temperatur på  $20^\circ\text{C}$  og 65 % relativ fuktighet (RF).

---

Gjennom ukentlig veiing av elementene ble uttørkingen loggført over en lengre periode med mål om å finne ut hvor lang tid det tar før elementene med ulik mengde biokull oppnår fuktbalanse.

### 6.3.2 Resultater

Tabell 6.3 på side 38 viser ukentlig vekt og fukttap for de to prøvene. Resultatene viser at vekten til elementene ble betydelig redusert den første uka, men denne tendensen avtar raskt. Fullstendig uttørking er fullført når elementene når fuktbalanse. En verdi som ligger på henholdsvis 2,23 og 2,95 kg for Biocrete 60 kg/m<sup>3</sup> og Biocrete 90 kg/m<sup>3</sup>. Fuktbalansen til elementene er beregnet etter total vannmengde som skal tørkes ut. Total vannmengde er summen av overskuddsvann i sementlimet og absorbert vann i biokullet. Overskuddsvann og absorbert vann for de to elementene er beregnet på følgende måte:

#### Biocrete 60 kg/m<sup>3</sup>:

$$\text{Overskuddsvann} = \frac{144 \text{ kg/m}^3 - (280 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,7 \cdot 0,23)}{2} \cdot 0,016 \text{ m}^3 = 0,79 \text{ kg}, \quad (6.3.1)$$

der 144 kg/m<sup>3</sup> er mengden fritt vann, 280 kg/m<sup>3</sup> er sementmengden, 0,7 er hydrasjonsgraden og 0,23 er kjemisk bundet vann. [28]

$$\text{Absorbert vann} = (60 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,5) \cdot 0,016 \text{ m}^3 = 1,44 \text{ kg}, \quad (6.3.2)$$

der 60 kg/m<sup>3</sup> er mengden biokull og 1,5 er teoretisk vannabsorpsjon. Den totale vannmengden blir dermed

$$\text{Total vannmengde} = 0,79 \text{ kg} + 1,44 \text{ kg} = 2,23 \text{ kg}. \quad (6.3.3)$$

#### Biocrete 90 kg/m<sup>3</sup>:

Samme fremgangsmåte følges for Biocrete med 90 kg/m<sup>3</sup>

$$\text{Overskuddsvann} : \frac{144 \text{ kg/m}^3 - (279 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,7 \cdot 0,23)}{2} \cdot 0,016 \text{ m}^3 = 0,79 \text{ kg}, \quad (6.3.4)$$

der sementmengden er 279 kg/m<sup>3</sup>,

$$\text{Absorbert vann} : (90 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,5) \cdot 0,016 \text{ m}^3 = 2,16 \text{ kg}, \quad (6.3.5)$$

der 90 kg/m<sup>3</sup> er mengden biokull. Total vannmengde for dette biocreteelementet beregnes til

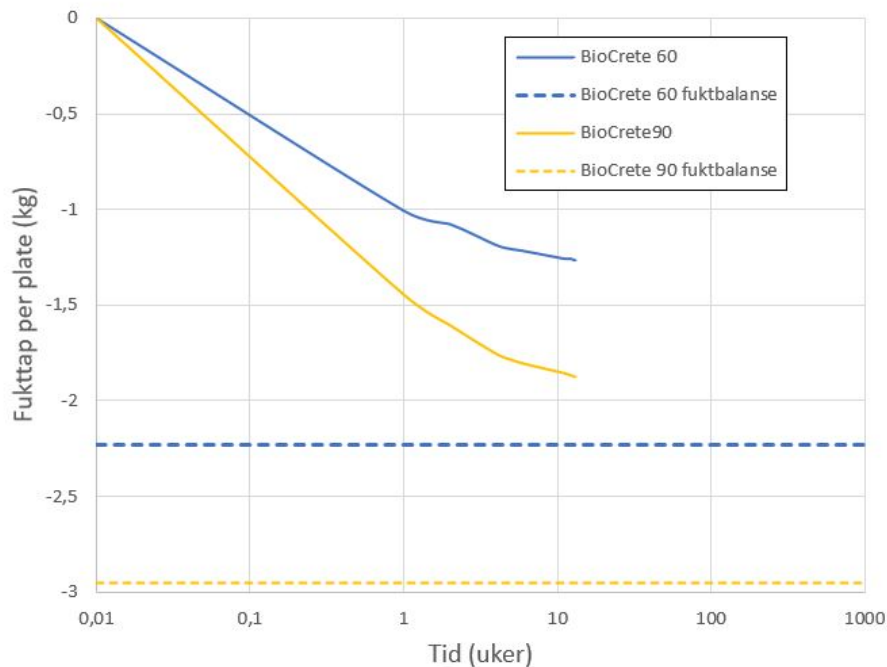
$$\text{Total vannmengde} : 0,79 \text{ kg} + 2,16 \text{ kg} = 2,95 \text{ kg}. \quad (6.3.6)$$



Tabell 6.3: Tabellen viser ukentlig vekt og fukttap

| Uke  | Biocrete 60 kg/m <sup>3</sup> |              |                  | Biocrete 90 kg/m <sup>3</sup> |              |                  |
|------|-------------------------------|--------------|------------------|-------------------------------|--------------|------------------|
|      | Vekt [kg]                     | Fukttap [kg] | Fuktbalanse [kg] | Vekt [kg]                     | Fukttap [kg] | Fuktbalanse [kg] |
| 0,01 | 34,58                         | 0            | -2,23            | 30,91                         | 0            | -2,95            |
| 1    | 33,57                         | -1,01        | -2,23            | 29,46                         | -1,45        | -2,95            |
| 2    | 33,5                          | -1,08        | -2,23            | 29,3                          | -1,61        | -2,95            |
| 4    | 33,39                         | -1,19        | -2,23            | 29,15                         | -1,76        | -2,95            |
| 5    | 33,37                         | -1,21        | -2,23            | 29,12                         | -1,79        | -2,95            |
| 6    | 33,36                         | -1,22        | -2,23            | 29,1                          | -1,81        | -2,95            |
| 11   | 33,32                         | -1,26        | -2,23            | 29,05                         | -1,86        | -2,95            |
| 12   | 33,32                         | -1,26        | -2,23            | 29,04                         | -1,87        | -2,95            |
| 13,5 | 33,31                         | -1,27        | -2,23            | 29,03                         | -1,88        | -2,95            |
| 14   | 33,24                         | -1,27        | -2,23            | 28,94                         | -1,88        | -2,95            |
| 15,5 | 33,22                         | -1,29        | -2,23            | 28,92                         | -1,90        | -2,95            |

Resultatene fra tabell 6.3 utgjør referansepunktene til grafene som er presentert i figur 6.5. De stripete linjene representerer fuktbalansen for de to elementene, mens de heltrukne linjene representerer vektreduksjonen i form av fukttap. Grafen viser at det vil ta veldig lang tid før biocreteelementene oppnår fuktbalanse.



Figur 6.5: Grafen viser fukttap som funksjon av tid

---

### 6.3.3 Diskusjon

Resultatene fra uttørkingsforsøket, illustrert i figur 6.5, indikerer svært lang uttørkingstid for begge elementene. Etter stor vektnedgang i den første fasen, flater kurvene ut og ser ut til å stabilisere seg. Biocreteelementene som er brukt til forsøket er 100 mm tykke og ser ut til å ha en uttørkingstid på godt over 2 år. Vanlig tykkelse for en betongvegg i et boligbygg er typisk 200 mm, og en dobling i tykkelse vil gi minimum 4 ganger så lang uttørkingstid. Uttørkingstiden baserer seg som tidligere nevnt på estimert fuktbalanse og det er viktig å påpeke at dette er nettopp det, et estimat. Som følge av at vi ikke kjenner desorpsjonsisotermene for disse betongene. Antagelsen om at balansen tilsvarer at 50 % av det fri vannet i sementlimet er tørket ut er derfor ganske grov. Det som ut ifra beregningene ble antatt som sikkert, var at all fukt i biokullet er tørket ut ved fuktbalanse ved 65 % RF. Dette ser ikke ut til å stemme med RF-målingene. Disse presenteres og drøftes i kapittel 6.5.

Det er også knyttet en viss usikkerhet til veiingen av elementene, og da spesielt de to første veiingene da det ble observert avskalling langs rendene i forbindelse med håndtering. Prøvene ble i tillegg veid i et rom utenfor klimarommet som gjorde at de måtte transporteres og dermed befinne seg i annen temperatur og RF i korte perioder. Med tid ble elementene svært robuste og usikkerhet knyttet til avskalling vurderes som ubetydelig fra og med tredje måling. Det ble antatt i prosjektoppgaven at den lange uttørkingstiden hovedsaklig skyldtes den store mengden vann som skal tørke ut på grunn av absorbert vann i biokullet, og at Biocrete har lavere effektivt masseforhold enn vanlig konstruksjonsbetong, som igjen betyr at selve sementlimet har en tett struktur med stor damptrykkmotstand. Det ble også antatt at biokullet har vesentlig grovere porøsitet enn sementlimet.

En fersk betong inneholder en betydelig mengde vann og kan være avhengig av at store deler av dette tørker ut dersom betongen skal kles med andre materialer. Når en nystøpt betong begynner å tørke vil det oppstå en fuktighetsfordeling der betongens render vil tørke raskest, avhengig av muligheter for uttørkning. Selv om overflaten virker tørr kan det fremdeles være lagret mye vann i kjernen. Betongdekker i bygninger har ofte bare mulighet til ensidig uttørking, og dersom denne overflaten dekkes til, av for eksempel gulvbelegg, vil uttørkingsmuligheten forsvinne og fuktigheten i kjernen vil bevege seg mot overflaten der den konsentreres i underkant av ovenpåliggende material [29]. Dersom det legges tregulv kan det oppstå formforandring i form av at treet utvider seg. I forbindelse med dette kan gulvet "bule" opp og i verste fall deformere veggene dersom bevegelsesfugen mellom gulv og vegg forsvinner. Et annet scenario er at svinnspenninger kan gi oppsprekking ved betongoverflaten. Tynne gulvplater er mer utsatt enn store og her er skjøter et viktig virkemiddel for å unngå riss. Uttørkningen vil gå raskest i begynnelsen, for så å stabilisere seg over tid rundt en lavere hastighet [28]. Enda mer relevant er kanskje fuktskader i lim og belegg som beskrevet i kapitlets innledning. Byggforskserien 541.304 og 541.505 angir 85 % og 60-65 % RF som maksimalt tillatt fuktnivå i betong uten golvvarme før legging av henholdsvis belegg og parkettgulv [30] [31].

---

Som følge av indikasjonen om svært lang uttørkingstid og høy RF, ble flere produkter undersøkt som kompenserende tiltak for den svært høye restfuktigheten i betongen. Ett av produktene som virket lovende i forbindelse med å håndtere fuktproblematikken; DexorBond, presenteres i påfølgende kapittel.

## 6.4 DexorBond

For å løse fuktproblematikk i betong har Dexor, Weber, Bostik og Casco gått sammen og utviklet undergulv i et system. Påstrykningsmembranen DexorBond er den avgjørende komponenten og muliggjør, som delvis diffusjonsåpen fuktsperre, langsom uttørking [32]. DexorBond takler høy fuktighet i betongen og kan brukes ved opptil 99 % RF. Gjennom å stoppe fukt, alkalisk fukt og emisjoner er DexorBond med på å sikre et godt inneklima til tross for høy restfuktighet. Når RF overstiger 85 %, avhengig av RF i innelufta, vil alkaliene kunne vandre oppover i betongen og ”spise opp” lim og mykner i overliggende gulvbelegg. Denne prosessen vil kunne føre til forringing av innemiljø som følge av emisjon. DexorBond forhindrer alkaliene i å trenge igjennom, men tillater gjennomgang av pH-nøytral fukt. Membranen bremser uttørkingshastigheten betraktelig slik at lim og ulike gulvmaterialer absorberer fukt uten å ta skade [32]. DexorBond kan med ett strøk stoppe alkalievandringen og med to strøk også stoppe lukt. Gulv kan legges 10 timer etter at DexorBond er påført, og gir utbyggere mulighet til å spare tid og kostnader uten å gå på kompromiss med innemiljø og byggeteknisk kvalitet [32].

I boligprosjekter vil det være et stort pluss å kunne legge tregolv på betongdekket. På oppdrag fra gulvprodusenten Kährs, limprodusenten Casco og Dexor, produsenten av DexorBond, gjennomførte Tekn.Dr. Anders Sjögren ved Lunds Tekniske Högskola teoretiske beregninger på fuktbelastning fra undergulv i forbindelse med direkteliming av tregolv på betongunderlag [33]. Fuktnivået som presenteres i resultatene er middelveidien av nederste beregningsdel i tregulvet, en 4 mm tykk celle. Valgt risikonivå i denne cellen ble valgt til 65 % RF og avhenger av treets dampgjennomgangsmotstand, RF i betongoverflaten og rommets RF. Disse funnene stemmer godt med grenseverdiene i byggforskserien [31]. Resultatene i rapporten viser at bruk av DexorBond som sperresjikt vil sørge for at fuktnivået i nederste del av tregulvet i de aller fleste tilfeller ikke vil overstige det valgte risikonivået. Til sammenligning vil risikonivået overskrides ved 90 % RF i betongen når RF i innelufta er 40 % og ved 80-85 % dersom RF i innelufta er 60 % [33]. Dexor har med DexorBond løst fuktproblematikk i flere store byggeprosjekter og leverte blant annet 45 000 m<sup>2</sup> til første byggetrinn ved nye Ahus. Undergulvsystemet muliggjorde gulvlegging av pvc og gummi omgående uten å få problemer med fukt, til tross for at betongunderlaget hadde en RF på rundt 99 % [32].

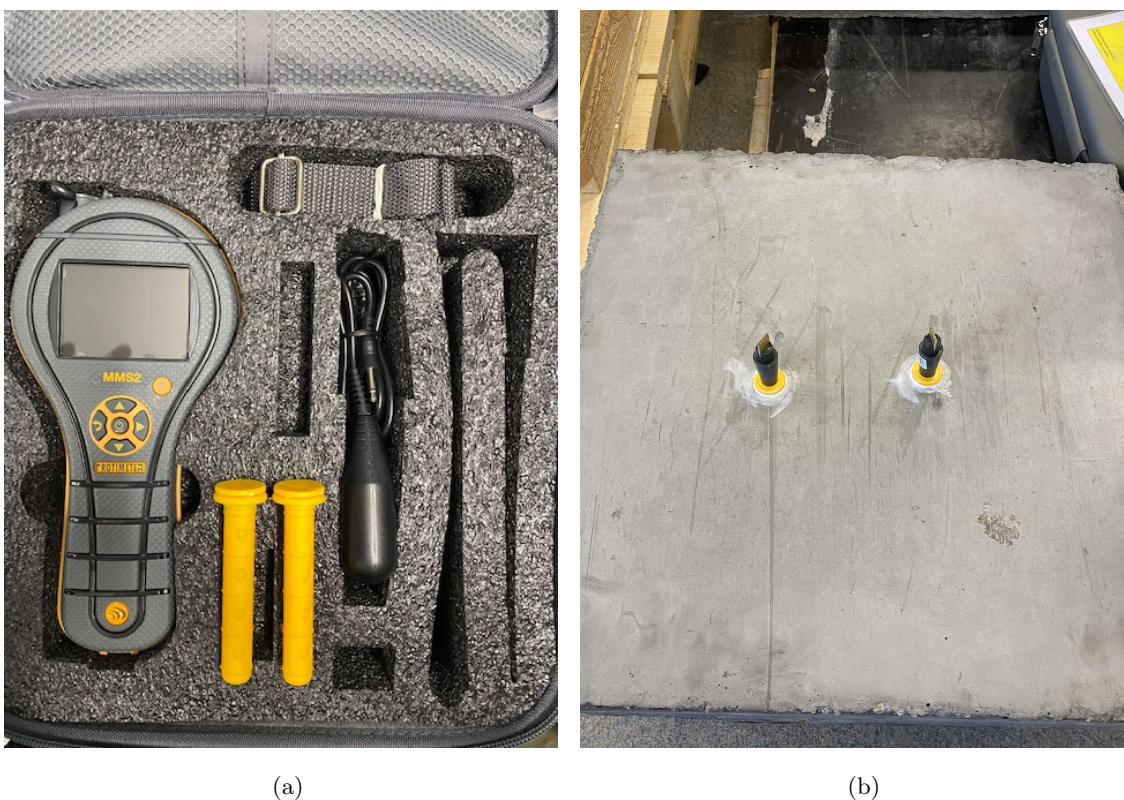
---

## 6.5 RF-målinger

Resultatene fra veiingene gjort i forbindelse med uttørkingsforsøket ga sterke indikasjoner på at RF i betongen ville ligge et sted mellom 95-99 %. Som påpekt er den praktiske betydningen av RF i betongen svært stor og det ble bestemt at RF-målinger skulle gjennomføres for å kontrollere og forstå resultatet fra uttørkingsforsøket.

### 6.5.1 Fremgangsmåte

RF-målingene ble gjennomført ved hjelp av borhullsmetoden på de samme elementene som ble brukt til uttørkingsforsøket. Dette er den dominerende metoden for å måle fukt i betonggulv i Skandinavia per nå [34]. Før testen ble elementene tatt ut av klimarommet for å stabiliseres ved romtemperatur. Det ble plassert to foringsrør tilpasset forborede hull på 50 mm i hvert av elementene. Rørene ble deretter forseglet med silikon for å forhindre luftgjennomgang og dermed få best mulige resultater. Etter ett døgn ble sensorer tilhørende Protimeteret plassert i målesylindrene for å måle RF. Avlesning av resultater ble gjort påfølgende dag. Protimeteret er vist i figur 6.6.



Figur 6.6: (a) Protimeter: måler relativ fuktighet (b) Sensorer som er plassert i forseglede foringsrør

---

## 6.5.2 Resultater

Målingene ble gjennomført 18. februar 2022, ca. 3 måneder etter at elementene ble støpt og viste en relativ fuktighet mellom 72 og 75 % i de fire sensorene. De samme elementene ble senere overlevert til SINTEF for verifikasjon. Her ble det brukt fuktmåler av typen Vaisala. Resultatene fra SINTEF viste en relativ fuktighet mellom 74 og 79 % for prøvene tatt i avstand 50 mm fra overflaten og samsvarte godt med tallene fra Protimeteret. SINTEF foretok også målinger 25 mm fra overflaten. Disse viste relativ fuktighet på ca. 65 % for begge elementene.

## 6.5.3 Diskusjon

Med funnene fra uttørkingsforsøket som utgangspunkt, var det nærliggende å tro at RF i betongen ville ligge på godt over 90 % og kanskje så mye som 95-99 %. De lave verdiene fra målingene tyder derimot på at antagelsen om at biokull har grov porøsitet er helt feil, og at den i realiteten er veldig fin. Antagelsen om at alt absorpsjonsvann er tørket ut ved oppnådd fuktbalanse på 65 % RF ser også ut til å være feil. Fra veiingene er det ingen tvil om at det fremdeles er lagret mye vann i elementene. Siden tilstedeværelsen av dette vannet ikke gir forventet utslag ved måling av relativ fuktighet er det rimelig å anta at porøsiteten i biokullet er så fin at uttørkingen går svært sakte. Etter alt å dømme så sakte at det vil være uproblematisk å dekke til betongen med fuktsensitive materialer til tross for den høye restfuktigheten i betongen. Dette kan vise seg å være en svært nyttig egenskap med tanke på bruk i boligprosjekter der bygningskropper i betong ofte dekkes med tre- eller pvc-materialer og man sparer mye penger på å minimere tid mellom støp og videre arbeid. Som et resultat av langsom uttørking og at RF-målingene viste RF under 85 % vil det for eksempel etter alt å dømme ikke være nødvendige med fukttiltak i forbindelse med legging av gulvbelegg. Det vil derimot fortsatt måtte tas forbehold ved legging av parkett og andre trematerialer da RF ser ut til å overstige grenseverdien på 65 %. Fordelen med parkett er at gulvtypen i de fleste tilfeller legges som flytende golv og dermed kan kombineres med vanlig PE-folie som tillater legging av parkett på betongdekker med opp til 90 % RF [31]. Med andre ord vil den langsomme uttørkingen og høye restfuktigheten sannsynligvis løse utfordringene knyttet til byggfukt som ble problematisert i innledningen til kapittel 6. De overraskende resultatene betyr også, etter alt å dømme, at betong med biokull gir en meget tett betong. Dermed ser det ut til at biokull i betong vil kunne gi flere fordeler enn bare miljøgevinst, og større bruksområde enn først antatt. Blant annet vil den tette strukturen ha svært positiv innvirkning på betongens bestandighet. Dette diskuteres i kapittel 6.6.

Til tross for at den fine porøsiteten gir mange fordeler, vil det være usikkerhet knyttet til den store vannmengden i betongen i forbindelse brannbestandighet. Det vil potensielt kunne bygge seg opp stort damptrykk som igjen vil kunne føre til avskalling. Det pågår dialog mellom prosjektgruppa og RISE Fire Research AS i forbindelse med branntesting av Biocrete, men prosjektgruppa har enda ikke fått bekreftet dato, og det ser ikke ut til at testene lar seg gjennomføre før sommeren.

---

Resultatene fra prøvingen vil gi nødvendig informasjon om hvordan den nye betongen oppfører seg når den eksponeres for høy temperatur. Dersom det viser seg at damptrykk blir en utfordring vil polypropylenfiber kunne brukes som tiltak for å forhindre avskalling og også tilegne betongen andre gunstige egenskaper. Polypropylenfiber har vært i bruk i Norge som brannsikring siden 2004 og drenerer damptrykket i betongen [35]. Fibrene smelter ved 160°C og fordampes ved ca. 340°C. Restproduktet er en porøsitet som legger til rette for at damptrykket dreneres gjennom små ganger i betongstrukturen [36]. Polypropylenfiber er relativt lite kostbart og fremstår som et godt alternativ dersom ekstra branntiltak blir nødvendig.

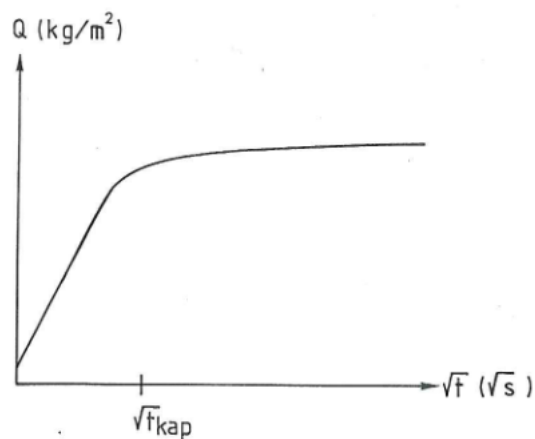
## 6.6 Struktur og bestandighet

Betongens hovedparameter knyttet til bestandighet er motstandsevnen til å transportere fukt og aggressiver, eller enklere forklart, betongens tetthet. Betongens tetthet avhenger av poresystemet og styres i vesentlig grad gjennom valg og komponering av delmaterialer [37]. En bestandig betong kan brukes i de fleste miljøer og vil kunne forhindre kjente problemer som armeringskorrosjon og alkaliereaksjoner, samt bedre frostbestandighet og kjemisk bestandighet. De positive funnene gjort i kapittel 6.5 indikerer at tilsetning av biokull gir en svært tett og derav bestandig betong. Disse resultatene etterprøves ved hjelp av et kapillærabsorpsjonsforsøk som presenteres i påfølgende kapittel.

### 6.6.1 Kapillærabsorpsjon

Kapillær vannabsorpsjon som metode for å vurdere betongens kvaliteter ble presentert i 1988. Tidligere var trykkfasthet det vanligste kvalitetskriteriet, men et økt utvalg sementer og bruk av pozzolaner og tilsetningsstoffer førte til behov for enkle prøvingsmetoder som også kan presentere informasjon knyttet til betongens bestandighetsegenskaper [38].

Kapillær absorpsjonsevne er målt ved at betongskiver uthentet av støpte sylindere eksponeres ensidig for et fritt vannspeil etter å ha blitt fukt kondisjonert etter en fastlagt prosedyre beskrevet i rapporten [38]. Vannabsorpsjonens vektøkning registreres som funksjon av eksponeringstid. Videre uttrykkes absorpsjonen i prøvestykkene som vannmengde absorbert per areal enhet av eksponeringsflaten. Denne størrelsen er tilnærmet proporsjonal med kvadratroten av tiden frem til vannfronten når overflaten til prøvestykket, som illustrert i figur 6.7.



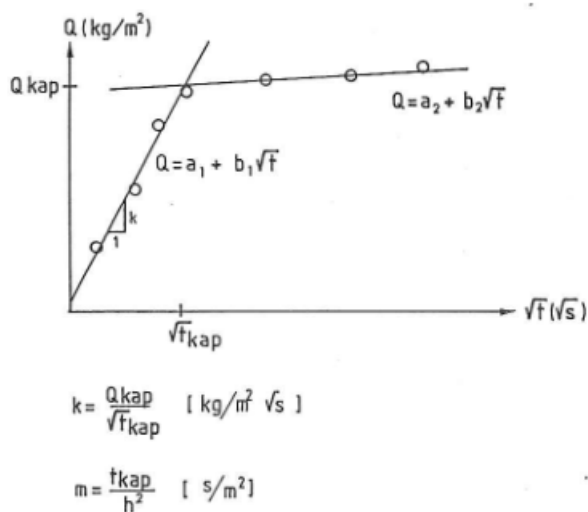
Figur 6.7: Prinsipielt absorpsjonsforløp

Source: Smeplass (1988) [38].

Fuktfrontens bevegelse beregnes empirisk etter ligning 6.6.1.

$$h = \sqrt{\frac{t}{m}}, \quad (6.6.1)$$

der  $h$  er lik avstanden i [m] fra fuktfronten til eksponeringsflaten,  $t$  lik tid og  $m$  lik motstandstall. Videre vil sammenhengen mellom  $Q_{kap}$  og  $\sqrt{t_{kap}}$  kunne uttrykkes ved hjelp av lineær regresjonsanalyse, der det skilles mellom måleverdiene før og etter at vannfronten har nådd overflaten. Regresjonsanalysen resulterer dermed i matematiske uttrykk for to rette linjer, som vist i figur 6.8.



Figur 6.8: Regresjonslinjer for absorpsjonsforløpet

Source: Smeplass (1988) [38].

---

Skjæringspunktet mellom regresjonslinjene kan finnes ved visuell vurdering eller uttrykkes ved de tilhørende verdiene for  $Q_{kap}$  og  $t_{kap}$ . Kapillaritetstallet,  $k$ , uttrykker hastigheten på vannabsorpsjonen og er illustrert i figur 6.8 som stigningen til regresjonslinjen som uttrykker vannabsorpsjonen før vannfronten når prøvens overflate. Kapillaritetstallet bergnes følgelig etter ligning 6.6.2:

$$k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}}. \quad (6.6.2)$$

Videre beregnes motstandstallet,  $m$ , etter ligning 6.6.3:

$$m = \frac{t_{kap}}{h^2}, \quad (6.6.3)$$

der  $h$  beskriver prøvestykkets tykkelse. Motstandstallet er følgelig et uttrykk for den relative tiden vannfronten bruker på å oppnå en høyde  $h$  og gjenspeiler friheten i kapillærporesystemet. Som følge av dette forventes motstandstallet derfor å ha god korrelasjon til betongens masseforhold mellom vann og bindemiddel. Motstands- og kapillaritetstall er innbyrdes avhengige størrelser for en gitt betongsammensetning, men i motsetning til motstandstallet er kapillaritetstallet i tillegg avhengig porevolumet i betongen, og dermed også volumrelasjonene mellom tilslags- og pastafasen. Som følge av dette antas det at motstandstallet er mer anvendelig som måleparameter for betongkvalitet. Dette fordi vurdering av måleresultatene ikke nødvendigvis krever fullstendig kontroll på materialsammensetningen.

Siste del av prøvingsmetodikken beskrevet i rapporten er fuktmetning [38]. Etter endt absorpsjonsforsøk lagres prøvestykkene i vannbad ved 20°C og atmosfæretrykk. Metningsnivået gir et mål for betongens åpne poresystem som følge av at oppnådd metningsnivå antas å tilsvare en tilnærmet verdi for fullstendig kapillær metning. For å oppnå fullstendig vannmetning, plasseres prøvestykkene i trykktank. Dette gir vurderingsgrunnlag for betongens totale porevolum bestående av blant annet gelporer, kapillærporer og makroporer. Betongens fuktinnhold ved de to metningsnivåene angis i prosent av tørrvekt (konstant vekt ved 105°C).

## 6.7 Kapillærabsorpsjonsforsøk

I perioden januar 2022 til mai 2022 har det ved SINTEFs laboratorier på Gløshaugen i Trondheim blitt testet kapillærabsorpsjon av totalt seks prøvestykker etter beskrevet prøvingsmetodikk. Hovedmålet med testingen var å kartlegge den nye betongens bestandighetegenskaper for å verifisere resultatene fra uttørkings- og RF-forsøk. Det var spesielt betongens motstandstall som var av stor interesse, da dette kunne bekrefte eller avkrefte at tilsetning av biokull bidrar til å gi en svært tett betong.



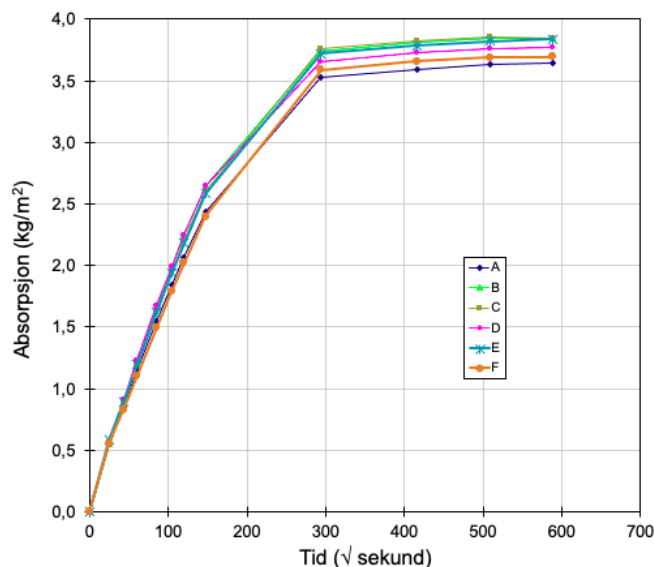
### 6.7.1 Resultater

Gjennomsnittlig motstandstall for de seks skivene ble  $1,05E+08$  [s/m<sup>2</sup>]. Videre viser resultatene at skivenes gjennomsnittlige kapillaritetstall og sugporøsitet ligger på  $1,78E+02$  [kg/m<sup>2</sup>] og 18,7 [% vol.]. Åpen og lukket makroporøsitet ble målt til 0,6 og 4,6 [% vol.], mens fast- og tørrstoffdensitet ble målt til 2672,4 og 2033,3 [% vol.]. Resultatene er presentert i tabell 6.4.

Tabell 6.4: Middelerverdier for skive A-F

| Størrelse             | Middelerverdier                 | var. koeff. / std.av.    |
|-----------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Motstandstall         | $1,05E+08$ [s/m <sup>2</sup> ]  | 7,9 %                    |
| Kapillaritetstall     | $1,78E+02$ [kg/m <sup>2</sup> ] | 5,2 %                    |
| Sugporøsitet          | 18,7 [% vol.]                   | 2,6 %                    |
| Åpen makroporøsitet   | 0,6 [% vol.]                    | 6,8 %                    |
| Lukket makroporøsitet | 4,6 [% vol.]                    | 5,4 %                    |
| Faststoffdensitet     | 2672,4 [kg/m <sup>3</sup> ]     | 8,7 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Totalporøsitet        | 23,9 [% vol.]                   | 9,1 %                    |

Som vist i tabellen er variasjonen liten, med største variasjon i standardavvik på 7,9 % (totalporøsitet er et resultat av øvrige porøsiteter). De små forskjellene mellom skivene kan skyldes størrelsen på prøvestykkene. Prøver med så lavt volum er utsatt for små endringer i sammensetning og et lite ekstra tilslagskorn kan slå ut i samme størrelsesordenen som variasjonene fra kapillærabsorpsjonsforsøket. Figur 6.9 viser tilpassede regresjonslinjer for prøvestykke A-F.



Figur 6.9: Regresjonslinjer for skive A-F

Eget regneark med resultater for hvert prøvestykke og gjennomsnittlige verdier er vedlagt i Appendix C.

---

## 6.7.2 Teoretisk beregning av faststoffdensitet

For å kontrollere resultatene fra kapillærabsorpsjonsforsøket har det blitt utført teoretiske beregninger av faststoffdensitet. Den anvendte tilnærmingen tar utgangspunkt i Powers' modell og brukes til å beregne volumet av kontraksjonsporer, kapillærporer og gelporer [27]. Regnemethoden har lite variasjonsområde og anses som sikker dersom betongsammensetningen er kjent og hydratasjonsgrad kan anslås med relativt stor sikkerhet. Beregningene for biocreteskvivene som ble brukt i kapillærabsorpsjonsforsøket er tilpasset den nye betongsammensetningen med tilsatt biokull, partikkeldensitet for biokullet på  $475 \text{ kg/m}^3$  og vannabsorpsjonstall på 150 %. Nevnte moderasjoner medfører større usikkerhet, men metoden antas likevel å gi gode indikasjoner som muliggjør kontroll av resultatene fra kapillærabsorpsjonsforsøket.

Regnemethoden tar utgangspunkt i de følgende av Powers' resultater [27].

1. Massen av det kjemisk bundne vannet er 23 % av den hydratiserte sementens masse
2. Det kjemiske svinnet utgjør 25,4 % av det kjemisk bundne vannets opprinnelige volum
3. Det fysiske bundne vannet utgjør 18 % av den hydratiserte sementens masse
4. Det ytre volumet endrer seg ikke når sementlimet hydratiserer

Beregningene er vedlagt som regneark i Appendix D og tar utgangspunkt i resepten SINTEF brukte til kapillærabsorpsjonsforsøket, men korrigert i forbindelse med endring av biokullets partikkeldensitet. Denne er også vedlagt i Appendix D. Som følge av funnene i kapittel 6.2 er biokullets partikkeldensitet satt til  $475 \text{ kg/m}^3$ . Med korrekt resept og partikkeldensitet beregnes følgelig betongens masse som alle faste materialer pluss vann medgått til hydratasjon og summeres til  $2166 \text{ kg/m}^3$ . Videre er betongens tørrstoffdensitet denne massen pluss bundet vann, minus fritt og absorbert vann og summeres til  $1962,1 \text{ kg/m}^3$ . Den hydratiserte sementens masse er tilsatt sementmengde ganger hydratasjonsgrad og summeres til  $180,18 \text{ kg/m}^3$ . Øvrige beregninger presenteres i det følgende.

Tilslagsporøsiteten beregnes ved summering av tilslaget, i dette tilfellet Årdal 0/8, Årdal 8/16 og biokull, ganget med sine respektive vannabsorpsjonstall på 0,8, 0,5 og 150 %.

$$\text{Tilslagsporer} = (949,3 \text{ L/m}^3 \cdot 0,008) + (544,2 \text{ L/m}^3 \cdot 0,005) + (61,4 \text{ L/m}^3 \cdot 1,5) = 102,5 \text{ L/m}^3. \quad (6.7.1)$$

Gelporene er det fysisk bundne vannet og utgjør 18 % av den hydratiserte sementens masse.

$$\text{Gelporer} = 277,2 \text{ L/m}^3 \cdot 0,65 \cdot 0,18 = 32,4 \text{ L/m}^3. \quad (6.7.2)$$

Kontraksjonsporene er det kjemisk bundne vannet multiplisert med kjemisk svinn, pluss pozzolanene silika og flyveaske ganget med hydratasjonsgrad og verdien 0,12 som representerer kjemisk svinn for pozzolaner. Dette antas å være dobbelt så stort som sementens kjemiske svinn:

$$\text{Kontraksjonsporer} = (277,2 \text{ L/m}^3 \cdot 0,65 \cdot 0,254 \cdot 0,23) + ((14,6 + 73,0) \text{ L/m}^3 \cdot 0,65 \cdot 0,12) = 17,4 \text{ L/m}^3. \quad (6.7.3)$$

Kapillærporene består av alt fritt vann minus kjemisk og fysisk bundet vann.

$$Kapillærporer = 143 \text{ L/m}^3 - (277,2 \text{ L/m}^3 \cdot 0,65 \cdot 0,23) - (277,2 \text{ L/m}^3 \cdot 0,65 \cdot 0,18) = 69,1 \text{ L/m}^3. \quad (6.7.4)$$

Avslutningsvis settes andel luftporer til  $46 \text{ L/m}^3$  eller  $4,6 \%$ . Denne verdien representerer middelverdien fra funnene gjort i kapillærabsorpsjonsforsøket. Ved å summere alle porøsitetene får vi en totalporøsitet på  $267,4 \text{ L/m}^3$  eller  $26,74 \%$ .

$$Totalporøsitet = (102,5 + 32,4 + 17,4 + 69,1 + 46,0) \text{ L/m}^3 = 267,4 \text{ L/m}^3. \quad (6.7.5)$$

Sugporøsiteten er porøsiteten i tilslagsporer, gelporer, kontraksjonsporer og kapillærporer og summeres til  $118,9 \text{ L/m}^3$  eller  $11,89 \%$ .

$$Sugporøsitet = (102,5 + 32,4 + 17,4 + 69,1) \text{ L/m}^3 = 221,4 \text{ L/m}^3. \quad (6.7.6)$$

Faststoffdensiteten kan nå bestemmes som faststoff (faste materialer + bundet vann) ganger 1000 delt på 1000 minus totalporøsitet.

$$Faststoffdensitet = \frac{1000 \text{ L} \cdot 1962,1 \text{ kg/m}^3}{(1000 - 267,4) \text{ L}} = 2678 \text{ kg/m}^3. \quad (6.7.7)$$

Resulterende verdier er presentert i tabell 6.5. Her er resultatene omgjort fra  $\text{L/m}^3$  til  $\%$  vol. for enklere sammenligning med resultatene fra SINTEFs forsøk som er presentert med samme benevning.

Tabell 6.5: Resulterende verdier

| Størrelse         | Verdi                      |
|-------------------|----------------------------|
| Tilslagsporer     | 10,25 [% vol.]             |
| Gelporer          | 3,24 [% vol.]              |
| Kontraksjonsporer | 1,74 [% vol.]              |
| Kapillærporer     | 6,91 [% vol.]              |
| Luftporer         | 6,00 [% vol.]              |
| Totalporøsitet    | 26,74 [% vol.]             |
| Sugporøsitet      | 22,14 [% vol.]             |
| Faststoffdensitet | 2678,0 [ $\text{kg/m}^3$ ] |

---

### 6.7.3 Diskusjon

Resultatene indikerer at tilsetningen av biokull har liten innvirkning på motstandstallet til betongen. Motstandstallet til Biocrete med proporsjonert masseforhold på 0,4 ligger i samme område som en ordinær konstruksjonsbetong med masseforhold 0,4 [38]. Dette betyr at biocreteporene ikke bidrar til transporthastigheten. Med andre ord ser det ut til at samme hastighet oppnås uavhengig av tilstedeværelsen av biokull i betongen. Dette resultatet gjør det også rimelig å anta at ulike mengde biokull vil ha minimal påvirkning på betongens motstandstall. Høyt motstandstall betyr at summen av tilslags-, kapillær-, gel- og kontraksjonsporer er fine porer med høy vannbindingskapasitet. Dersom biokullet hadde hatt grov porøsitet ville motstandstallet ha endret seg betydelig i forbindelse med tilsetning av biokull. Ingen endring betyr, som antydnet, at biokullet ikke påvirker transporthastigheten vesentlig. Dette indikerer igjen at biokullet i seg selv må ha en veldig fin porestruktur, antageligvis i samme størrelsesorden som den fine delen av kapillærporene i betongen, og følgelig bidrar til en tett betong. Biocrete i kvalitet B30 ser fra forsøkene ut til å tetthetsegenskapene til en M40- eller M60-betong, hvilket tyder på at denne typen betong ikke vil få problemer knyttet til bestandighet, klorider eller karbonatisering. Betong med biokull gir altså en veldig tett betong - et resultat som etter alt å dømme tlegner Biocrete tekniske egenskaper som gjør produktet egnet til bruk i utsatte miljøer.

De avgjørende resultatene fra forsøkene gir tydelige indikasjoner på at betong med biokull gir veldig høye motstandstall og veldig tett struktur. Biokullet påvirker med andre ord ikke betongen negativt, men viser seg faktisk å tilføre positive egenskaper. Til tross for at betongens styrke svekkes noe som følge av økt porøsitet, vil bestandighetsegenskapene forbli svært gode. Styrkereduksjonen vil, for de fleste formål, ikke være utslagsgivende, og de positive egenskapene vil veie tyngre. Sementforbruket til en B30 med biokull er i samme størrelsesorden som en vanlig B30, men likvel litt lavere som følge av at biokullet er en god filler. I tillegg til dette bidrar biokullet til å få masseforholdet ned til 0,4, sammenlignet med en vanlig B30-betong som typisk har et  $v/c$ -tall på 0,54. Det vil si helt tilpasset kravet til masseforhold for M60 for CEM II B/M-sement (Standard FA). Biocrete er dermed en vesentlig tettere og mer bestandig betong enn normalbetong i tilsvarende fasthetsklasser. SINTEF vil som siste steg i bestandighetstesting av Biocrete ferdigstille karboniseringsforsøk for tilsvarende biocreteblanding som ble brukt i kapillærabsorpsjonsforsøket. Forsøket vil gi svar på om Biocrete B30 faktisk er tettere enn en normalbetong i tilsvarende fasthetsklasse, noe som vi forventer. Målet er at Biocrete med  $60 \text{ kg/m}^3$  biokull skal tilfredsstille fasthetsklasse B30 og bestandighetsklasse M60. De avsluttende forsøkene blir derfor viktig for å få bekreftet eller avkreftet denne teorien. Dersom Biocrete responderer som forventet vil dette, kombinert med redusert sementforbruk og kjente miljøgevinster gjøre at Biocrete ikke lenger bare er et karbondeponi. Dermed er det både tekniske og miljømessige grunner til å bruke biokull i betong. De nye resultatene i forbindelse med bestandighet har også gitt stor tro på at Biocrete kan brukes overalt, og ikke er forbeholdt innendørs bruk, som til nå har vært en forutsetning.

---

Verdiene fra forsøket viser et avvik mellom forventet og målt luftinnhold i betongen. SINTEFs målinger av ferskbetongen viste luftinnhold på 3,2 %, mens analysene fra trykktanken viser et gjennomsnittlig luftinnhold på 4,6 %. I lys av disse resultatene kan det se ut som at porøsiteten i biokullet ikke nås ved vannabsorpsjon, men må trykkes inn. Det kan tyde på biokullet har en lukket porøsitet som kommer i tillegg til vannabsorpsjonen som måles. Dette som følge av at trykkmeteren på herdet betong indikerer høyere luftporevolum enn det som ble målt i fersk betong. Dersom dette ikke stemmer er det nærliggende å tro at vannabsorpsjon går senere enn forventet, slik at den trekkes inn etter måling av luft og densitet i fersk betong. I en slik prosess fortrenses luft inne i partikkelen og slippes deretter ut i betongen. Denne antakelsen sammenfaller godt med funnene gjort i vannabsorpsjonsforsøket, som ga tydelige indikasjoner på at fuktinnhold i biokullet påvirker luftinnhold i betongen.

Beregnet og målt faststoffdensitet stemmer godt overens med beregnet verdi lik  $2678 \text{ kg/m}^3$  og målt verdi på  $2672,4 \text{ kg/m}^3$ . Beregnet totalporøsitet på 26,74 % stemmer derimot ikke like godt med målt verdi lik 23,90 %. Beregnet sugporøsitet på 22,14 % avviker også noe fra målt verdi på 18,70 %. Grunnen til dette er antakeligvis usikkerheten knyttet til implementasjonen av biokull og pozzolaner i beregningsmodellen. Antakelsen om at hydratasjonsgraden er 65 % kan avvike fra reell hydratasjonsgrad. Det kan for eksempel tenkes at hydratasjonsgraden kan være høyere for Biocrete som følge av den høye restfuktigheten. Det er også mulig at biokullet i seg selv kan være en reaktant og dermed påvirke sementhydratasjonen direkte. Videre vil det være usikkerhet knyttet til kjemisk svinn som inngår i beregningen av kontraksjonsporene. Det er antatt at det kjemiske svinnet i pozzolaner er dobbelt så stort som svinnet i sementen. Som følge av at en stor prosentandel av betongblandingen er pozzolaner (flygeaske og silika), vil et usikkerhetsmoment være i hvor stor grad disse reagerer. Det er kjent at pozzolanene ikke reagerer 100 % og dermed vil heller ikke tallet 0,12 være helt nøyaktig. Den siste usikre beregningsparameteren er luftporene. Påvirkningen fra pozzolanene antas å være liten, men tilsetningen av biokull vil, på grunnlag av tidligere funn, kunne gi utslag av betydning. Luftporene som brukes i regnearket for å beregne faststoffdensitet tar kun hensyn til lufta i sementlimet. Som diskutert ovenfor, er det nærliggende å tro at det også ligger luftporer i både biokullet og betongen. Tallet på 4,6 % som er brukt i beregningene er tatt fra SINTEFs resultater og representerer det totale luftporevolumet i betongen med biokull. Dersom biokullet og betongen bidrar med luftporer må altså tallet som brukes i beregningene senkes som følge av at luftporene i sementlimet, biokullet og betongen tilsammen skal utgjøre 4,6 %. Differansen mellom målt og beregnet sugporøsitet indikerer i enda sterkere grad at deler av biokullets porer ikke er vannmettet. Til slutt er det også en liten usikkerhet knyttet til biokullets porøsitet, men sterke indikasjoner fra vannabsorpsjonsforsøket forsvarer antakelsen om at denne ligger på rundt 150 %.

Ved å eksperimentere litt med tallene i regnearket for faststoffdensitet er det mulig å oppnå tilnærmet korrekt totalporøsitet. Ved å bruke vurderingene gjort i diskusjonen, er det naturlig å forsøke med høyere hydratasjonsgrad, lavere verdi for pozzolanenes kjemiske svinn og lavere luftporevolum.

---

Justering av hydratasjonsgraden til 75 %, kjemisk svinn for pozzolanene lik 0,06 og luftporevolum lik 3,2 % resulterer i en totalporøsitet på 24,6 %, som er veldig i nærheten av målt totalporøsitet på 23,9 %. Disse verdiene resulterer dog i en noe lavere faststoffdensitet enn målt med 2610 mot 2672,4 kg/m<sup>3</sup>.

Til tross for moderate differanser mellom enkelte verdier samsvarer det relativt godt med tanke på at biokull og flygeaske utgjør en stor prosentandel av betongblandingen. Det er ikke urimelig å anta at differansen mellom målt og beregnet verdi så og si ligger innenfor usikkerheten i de overnevnte beregningsparametrene. Det er likevel viktig å påpeke at metoden er utviklet for ren portlandsement. Biocrete inneholder som sagt betydelige mengder pozzolaner og biokull, noe som utvilsomt påvirker metodens treffsikkerhet. Det vil derfor være fornuftig å anse de teoretiske beregningene som indikasjoner på at man ligger i riktig område heller enn resultater å jobbe videre etter. Målingene gjort av SINTEF etter beskrevet prøvingsmetodikk er etter alt å dømme presise målinger med mindre usikkerhet enn den modererte beregningsmetoden. Dermed vil det være naturlig å tilpasse teorien etter resultatene. For å få enda bedre kunnskap om korrelasjonen mellom beregnet og målt verdi ville det ha vært fordelaktig å inkludere en skive med ordinær konstruksjonsbetong. Dette ble dessverre ikke gjort, men anbefales ved videre arbeid for å kartlegge likheter og forskjeller.

---

## 7 Konstruksjonsanalyse

### 7.1 Mål og hensikt

Biocrete sin styrke og konstruksjonstekniske egenskaper er kvaliteter som ikke er blitt testet i stor nok grad. For å kunne realisere Biocrete er det nødvendig å få kartlagt materialet sin kapasitet og oppførsel under pålastning. Denne rapporten kartlegger Biocrete for bruk i innvendige vegger og dekker i boligblokker. Målet med konstruksjonsanalysen på nettopp dekker og vegger med Biocrete er å finne ut om materialet har tilstrekkelig kapasitet til sitt formål.

Med hjelp av Con-Form på Orkanger har det over det siste året blitt gjort kapasitetforsøk på to plattendecker ved Con-Forms fasiliteter på Orkanger. Hensikten med forsøket var å sammenligne deformasjon og bruddkapasitet for et plattendekkedekke med biocretepåstøp og et dekke med normalbetongpåstøp. Det ble gjort for å bestemme hvor mye kapasiteten blir redusert ved å tilsette biokull i betongen. Beregninger på risslast, skjærkapasitet og momentkapasitet ble også utført med utgangspunkt i Eurokode 2 for å se på avviket mellom beregnet og faktisk kapasitet ved forsøk. Hensikten er å se om forskjellen er stor nok til at det trengs egne regnemetoder og standarder for Biocrete. Det kan også være aktuelt å identifisere en korreksjonsfaktor som gjør det mulig å bruke eksisterende formler og standarder.

Det ble i ettertid også testet heft i utborede sylindere fra dekket med Biocrete. Målet med forsøket var å finne heftkapasiteten mellom normalbetongen i plattendekket og påstøpen med Biocrete, og samtidig finne ut om heft mellom de to betongtypene eller strekkapasiteten til Biocrete er dimensjonerende.

### 7.2 Teori

Betong er mye brukt på grunn av sin gode trykkfasthet og lange levetid. For dimensjonering av betongkonstruksjoner i Norge skal Eurokode 2 - Dimensjonering av betongkonstruksjoner brukes som grunnlag i prosjekteringen [39]. Å verifisere at kontrollpunkter som for eksempel momentkapasitet er større enn momentbelastning er essensielt i dimensjoneringen av en konstruksjon. For Biocrete finnes det ikke egne standarder for å regne kapasiteten til materialet. Det er fortsatt en usikkerhet i hvor redusert bæreevnen til Biocrete er i forhold til vanlig betong, og derfor usikkert knyttet til om vanlige betongstandarder kan brukes for beregninger av konstruksjoner med Biocrete.

I det følgende presenteres beregningsmetoder for momentkapasitet, risskapasitet og skjærkapasitet. Samt fremgangsmåten for beregning av M-N diagram.

---

### 7.2.1 Momentkapasitet

Momentkapasiteten i trykksonen til en forspent bjelke med slakkarmering i bruddgrensetilstand er beregnet etter formelark i betongkonstruksjoner 2 ved NTNU. Formelen for kapasitet er avhengig av om tverrsnittet er over- eller underarmert. Balansert armering  $A_{pb}$  er derfor det første som må beregnes.

$$\alpha_b = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} \left( \frac{f_{pd}}{E_p} - \epsilon_{p0} \right)}, \quad (7.2.1)$$

der  $\epsilon_{cu} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  fra tabell 3.1 Eurokode 2 [39],  $f_{pd}$  og  $E_p$  er flytespenningen og E-modulen til spennarmeringen.  $\alpha_b$  settes deretter inn i formelen for det balanserte tverrsnittet.

$$A_{pb} = 0,8 \alpha_b b d_m \frac{f_{cd}}{f_{pd}} - A_s \frac{f_{yd}}{f_{pd}}, \quad (7.2.2)$$

der  $b$  er bredden av bjelken,  $d_m$  er den effektive høyden,  $f_{cd}$  er dimensjonerende trykkfasthet for betong og  $f_{yd}$  er flytespenningen til slakkarmeringen.  $f_{cd}$  bestemmes ut fra den karakteristiske trykkfastheten til betongen.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \quad (7.2.3)$$

der  $\gamma_c$  er materialfaktoren til betong og  $\alpha_{cc}$  er en koeffisient som tar hensyn til virkninger av langtidslast på trykkfastheten samt ugunstige virkninger som er en følge av måten lasten påføres. For underarmert tverrsnitt ( $A_p < A_{pb}$ ) er  $\alpha$  gitt ved:

$$\alpha = \frac{f_{pd} A_p + f_{yd} A_s}{0,8 f_{cd} b d_m}, \quad (7.2.4)$$

der  $A_p$  er arealet av spennarmeringen. For overarmert tverrsnitt ( $A_p > A_{pb}$ ) er  $\alpha$  gitt ved:

$$0,8 f_{cd} b d_m \alpha^2 + (\epsilon_{cu} - \epsilon_{p0}) E_p A_p \alpha - \epsilon_{cu} E_p A_p = 0 \quad (7.2.5)$$

$M_{Rd}$  er så beregnet ved å bruke følgende formel.

$$M_{Rd} = 0,8 \alpha (1 - 0,4 \alpha) f_{cd} b d_m^2. \quad (7.2.6)$$

### 7.2.2 Risskapasitet

Riss er sprekker i betongen og kan bidra til å redusere betongens bestandighet, og dermed også konstruksjonens levetid. Betongen vil risse opp hvis spenningene i strekksonen overskrider  $f_{ctm}$ , som tilsvarer middelverdien av betongens aksialtrekkfasthet. Strekkspenningen  $\sigma$  i underkant av bjelken kan regnes ved å kombinere spenningen fra bøyemomentet og forspenningen.

$$\sigma = \frac{M_{Ed} - P \cdot e}{I_y} z_{uk} - \frac{P}{A_c}, \quad (7.2.7)$$



der  $M_{Ed}$  er bøyemomentet,  $I_y$  er andre arealmoment,  $z_{uk}$  er avstanden fra nøytralaksen til underkant av bjelken,  $P$  er forspenningskraften,  $e$  er avstanden fra forspenningskraften til nøytralaksen av den forspente betongen og  $A_c$  er arealet av den forspente betongen. Minustegnet før forspenningskraften  $P$  kommer fordi den vil gi trykk i betongen. Ved å sette  $\sigma = f_{ctm}$  kan man regne ut max bøyemoment  $M_{riss}$  før bjelken vil få rissdannelse.

$$f_{ctm} = \frac{M_{Ed} - P \cdot e}{I_y} z_{uk} - \frac{P}{A_c}, \quad (7.2.8)$$

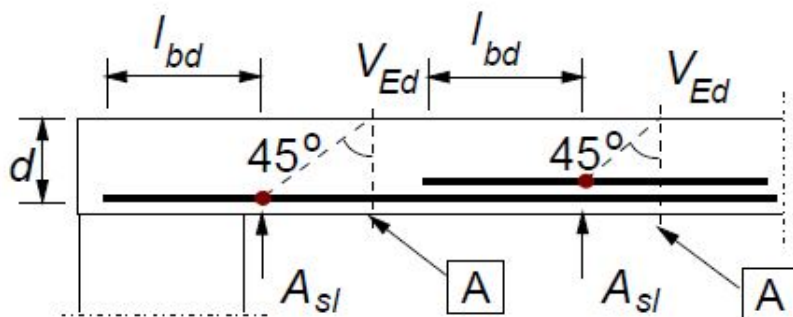
$$M_{riss} = M_{Ed} = \frac{(f_{ctm} + \frac{P}{A_c})}{z_{uk}} I_y + P \cdot e. \quad (7.2.9)$$

### 7.2.3 Skjærkapasitet

Konstruksjonsdeler uten skjærarmering kontrolleres i henhold til punkt 6.2.2 i Eurokode 2 [39]. Følgende formler bestemmer skjærkapasiteten til betongtverrsnittet, og avgjør behovet for skjærarmering. Dimensjonerende skjærkraftkapasitet  $V_{Rd,c}$  uten aksialkraft er gitt ved:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}}] b_w d \geq \nu_{min} b_w d, \quad (7.2.10)$$

der  $f_{ck}$  er sylindertykkfastheten til betongen,  $b_w$  er den minste bredden av tverrsnittet i strekksonen,  $d$  er den effektive høyden, se figur 7.1.



Figur 7.1: Viser strekkarmering og lengden  $d$  ved kontroll av skjærkapasitet

Source: Eurokode 2-prosjektering av betongkonstruksjoner [39]

Formler for  $k$ ,  $\rho_l$ ,  $C_{Rd,c}$  og  $\nu_{min}$  er

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0, \quad (7.2.11)$$

der  $d$  er i mm.

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02, \quad (7.2.12)$$

der  $A_{sl}$  er tverrsnittsarealet av strekkarmeringen.

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}, \quad (7.2.13)$$

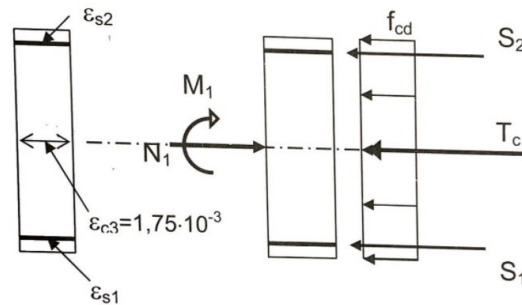
der  $\gamma_c$  er materialfaktor for betong

$$\nu_{min} = 0,035k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}. \quad (7.2.14)$$

#### 7.2.4 M-N diagram

I forbindelse med det pågående prosjektet på gartnersletta er det interessant å se på kapasiteten til de planlagte veggene i punkthusene. Det er da naturlig å se på kapasiteten for kombinasjon av moment og aksialkraft. For et tverrsnitt med armering kan kapasiteten bestemmes ved å se på forskjellige tøyningstilstander, og forlange at momentlikevekt og aksiallikevekt er oppfylt. Resultatene av disse beregningen kan fremstilles i et M-N diagram. For vegger med symmetrisk slakkarmering kan fremgangsmåten for M-N diagram gitt i eksempel 4.13 i Betongkonstruksjoner brukes [40].

**Tøyningstilstand 1** er rent trykk, se figur 7.2. I denne tilstanden settes bruddkriteriet til  $\epsilon_c = \epsilon_{c3} = 1,75 \cdot 10^{-3}$



Figur 7.2: Viser tøyningstilstand 1: rent trykk

Source: Betongkonstruksjoner [40]

I denne tøyningstilstanden vil det ikke være flyt i armeringen fordi tøyningen  $\epsilon_{c3}$  ikke overskrider dimensjonerende flyetøyning  $\epsilon_{yd}$ :

$$\epsilon_{yd} = \frac{f_y d}{E_s} = \frac{434}{200000} = 0,00217 > \epsilon_{c3}, \quad (7.2.15)$$

der  $f_{yd}$  er dimensjonerende flytespenning og  $E_s$  er E-modulen til armeringen.  $T_C$  fra figur 7.2 beskriver trykkresultanten fra betongen.

$$T_c = f_{cd} b h, \quad (7.2.16)$$

der  $f_{cd}$  er dimensjonerende trykkfasthet for betong,  $b$  er bredden til tverrsnittet og  $h$  er høyden.

$S_1$  og  $S_2$  er trykkresultanten i armeringen. I denne tøyningstilstanden blir resultatene like store.

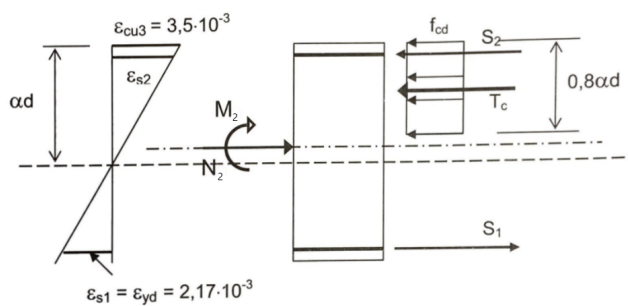
$$S_1 = S_2 = \sigma_{sd} \cdot A_{s1} = E_s \epsilon_{c3} A_{s1}, \quad (7.2.17)$$

der  $A_{s1}$  er tverrsnittsarealet til armeringen. Fra figur 7.2 kan vi nå regne ut likevektene for  $N_1$  og  $M_1$ :

$$N_1 = T_c + S_1 + S_2, \quad (7.2.18)$$

$$M_1 = 0. \quad (7.2.19)$$

**Tøyningstilstand 2** er trykkbrudd i betongen samtidig med flyt i armeringen, se figur 7.3. I denne tilstanden settes bruddkriteriet til  $\epsilon_c = \epsilon_{cu3} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  for betongen, og  $\epsilon_s = \epsilon_{yd} = 2,17 \cdot 10^{-3}$  for armeringen.



Figur 7.3: Viser en tøyningstilstand 2: trykkbrudd i betong samtidig med flytning i armering

Source: Betongkonstruksjoner [40]

Her må høyden av trykksonen  $\alpha d$  beregnes først. Høyden i denne tøyningstilstanden er gitt ved følgende formel:

$$\alpha d = \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{cu3} + \epsilon_{yd}} \cdot d = \frac{3,5}{3,5 + 2,17} \cdot d = 0,617d, \quad (7.2.20)$$

der  $d$  er effektiv høyde fra armeringen til overkant av betongen. Betongens trykkresultant  $T_c$  vil i dette tilfellet være gitt ved

$$T_c = f_{cd} b \cdot 0,8 \cdot \alpha d, \quad (7.2.21)$$

der  $f_{cd}$  er dimensjonerende trykkfasthet for betong,  $b$  er bredden til tverrsnittet og  $h$  er høyden. Armeringene sine resultanter  $S_1$  og  $S_2$  er i dette tilfellet også lik siden både trykkarmeringen og strekkarmeringen flyter.

$$S_1 = S_2 = f_{yd} A_{s1} \quad (7.2.22)$$

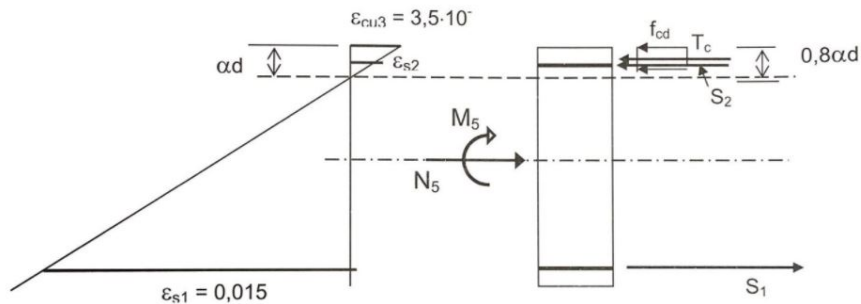
Aksiell likevekt og momentlikevekt om tyngdepunktsaksen gjør at formelen for  $N_2$  og  $M_2$  blir

$$N_2 = T_c + S_2 - S_1, \quad (7.2.23)$$

$$M_2 = T_c \cdot (0,5h - 0,4\alpha d) + S_1 \cdot h', \quad (7.2.24)$$

der  $h'$  er lengden mellom trykkarmeringen og strekkarmeringen.

**Tøyingsstilstand 3** er trykkbrudd i betongen og stor armeringstøyning, se figur 7.4. I denne tilstanden settes bruddkriteriet til  $\epsilon_c = \epsilon_{cu3} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  for betongen, og  $\epsilon_{s1} = 0,015$  for strekkarmeringen.



Figur 7.4: Viser tøyingsstilstand 3: Trykkbrudd i betong og stor armeringstøyning

Source: Betongkonstruksjoner [40]

På samme måte som i tøyningstilstand 2 er trykksonehøyden det første som må beregnes. I dette tilfellet blir  $\alpha d$

$$\alpha d = \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{cu3} + \epsilon_{s1}} \cdot d = \frac{3,5}{3,5 + 15} \cdot d = 0,189d, \quad (7.2.25)$$

Med en så liten trykksone vil det ikke være flyt i trykkarmeringen siden tøyningnen er mindre enn flytetøyningen. Nøyaktig tøyning for trykkarmering  $\epsilon_{s2}$  er

$$\epsilon_{s2} = \frac{\alpha d - c}{\alpha d} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}, \quad (7.2.26)$$

der  $c$  er overdekningen til armeringen. Spenningen i trykkarmeringen  $\sigma_{sd}$  blir dermed

$$\sigma_{sd} = E_s \epsilon_{s2}. \quad (7.2.27)$$

Formelen for betongens trykkresultant bli den samme som i tøyningstilstand 2,

$$T_c = f_{cd} b \cdot 0,8 \cdot \alpha d. \quad (7.2.28)$$

kraftresultanten fra strekkarmeringen  $S_1$  blir

$$S_1 = f_{yd} A_{s1}. \quad (7.2.29)$$

For kraftresultanten fra trykkarmeringen  $S_2$  må spenningen  $\sigma_{sd}$  fra ligning 7.2.27 brukes,

$$S_2 = \sigma_{sd} A_{s2}. \quad (7.2.30)$$

Ved å beregne aksiell likevekt og momentlikevekt ut i fra figur 7.4 kommer vi fram til følgende ligninger for  $N_3$  og  $M_3$ :

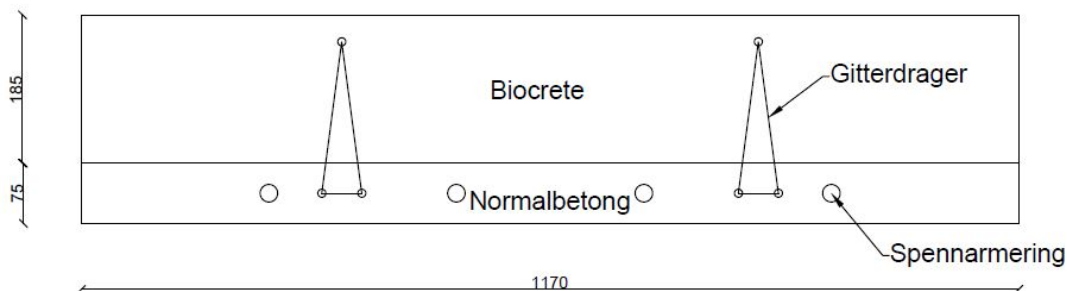
$$N_3 = T_c + S_2 - S_1, \quad (7.2.31)$$

$$M_3 = T_c(0,5h - 0,4\alpha d) + \frac{S_1 h'}{2} + \frac{S_2 h'}{2}. \quad (7.2.32)$$

## 7.3 Fremgangsmåte

### 7.3.1 Kapasitetforsøk dekker

I løpet av juli 2021 støpte Con-Form to betongelementer på sine fabrikker på Orkanger. I begge elementene ble det brukt prefabrikkerte, forspente plattendekker i normalbetong med betongkvalitet B35. Det ene elementet ble produsert med biocretepåstøp, mens det andre med normalbetong for å sammenligne egenskapene til de to.



Figur 7.5: Figuren viser tversnittet av dekket støpt på Orkanger

Dekkene har et spenn på 7,5 m og er 1,17 m brede. Plattendekket med normalbetong er 75 mm høyt og har en forspenningskraft på 120 KN/line, totalt 4 liner, se i figur 7.5. I tillegg til spennarmeringen er det også plassert 2 gitterdragere i dekket. Medregnet strekkarmering for dragerne er 78 mm<sup>2</sup>. Påstøpen med Biocrete og normalbetong er 185 mm høyt som vil si at hele dekket har en høyde på 260 mm. Betongen i påstøpen er av kvalitet B25 for både Biocrete og den vanlige betongen. Dekkene er fritt opplagt på konstruksjonsvirke, og det ble plassert et lodd på 2,4 tonn som punktlast midt på bjelken for å fremprovosere nedbøying, se figur 7.6



Figur 7.6: Bildet viser de fritt opplagte dekkene på Orkanger med et lodd på 2,4 tonn på midten. Dekket med Biocrete er til høyre

I løpet av våren ble det påført ekstra last på dekkene for å fremprovosere brudd. Lasten ble påført ved hjelp av et stålfak med betonglodd som ble holdt av en truck. For å få en konsentrert punktlast midt på bjelken ble det brukt strø i form av trevirke for å overføre lasten. Vekt ble overført ved å gradvis senke stålfaket ned på trevirket. Fra førerhytten var det mulig å følge med på hvor mye vekt som ble holdt av trucken og dermed beregne hvor mye last som ble overført til dekket. Lasten ble gradvis påført frem til det ble observert riss i underkant. Deretter ble pålastningen økt til det ble momentbrudd i dekket, se figur 7.7



Figur 7.7: Bildet viser hvordan pålastningen til brudd ble gjennomført

Dekket med Biocrete ble, etter å ha gått til brudd, brukt til heftforsøk. Metoden som ble brukt for å teste heft var avtrekksprøver. Før avtrekk ble det boret 6 sylinderformede hull med 60 mm i diameter. Overflaten av betongen ble vasket og deretter tørket med varmluftpistol. På ferdig rensset betong ble en stålskive for avtrekk pålimt med epoksyim. Da avtrekk 3 dager senere skulle gjennomføres var limet fortsatt noe klissete og det ble enten brudd mellom lim og stålskiven eller brudd i Biocrete. Bruddene i Biocrete var ved så lav kraft at det var grunn til å tro at de var oppstått ved boring.



Figur 7.8: Bildet viser et eksempel på sylindervervene som ble brukt for heftforsøk på SINTEF laben.

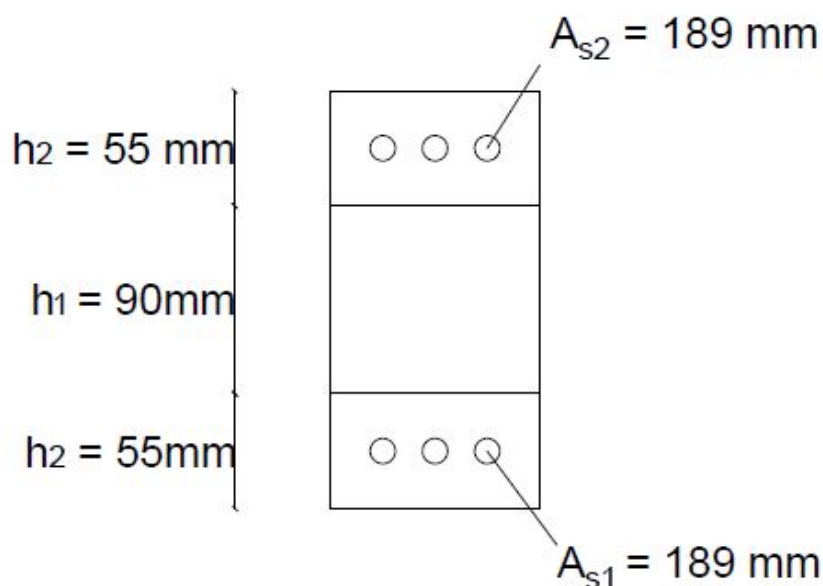
Siden forsøket mislyktes ble det medbrakt 3 utborede sylinderkjerner tilbake til SINTEFs laboratorium på Gløshaugen, se figur 7.8. Her ble enden med biocrete slipt ned for å få en jevn og fin flate. Stålskiver ble limt på kjernene med epoksy Wurth ESK 50 og fikk herde i 1 døgn før avtrekk.

### 7.3.2 Kapasitet vegger

Konstruksjonsanalysen av vegger med Biocrete ble som nevnt gjennomført ved å konstruere et M-N diagram. Veggene som er analysert er skallvegger produsert av Con-Form. En skallvegg kombinerer fordelene med prefabrikkert og plasstøpt betong. Hver vegg består av to vanger med armeringsnett som tilsvarer  $189 \text{ mm}^2/\text{m}$  ( $A_{s1} = A_{s2} = 189 \text{ mm}^2$ ), og en senterbetong som er støpes på byggeplass.

Tverrsnittet til veggene er vist i figur 7.9, sett ovenfra. Her er  $h_2$  høyden til vane, mens  $h_1$  er høyden til senterbetongen. Bredden settes til  $b = 1 \text{ m}$ . For å beregne kapasiteten trengs trykkfastheten til både senter- og vangebetong. Fjorårets masterstudenter gjennomførte et fullskalaforsøk på nettopp denne typen Con-Form vegg produsert med Biocrete. Fra forsøk fikk de en gjennomsnittlig trykkfasthet for vane på  $f_{cv} = 37,65 \text{ MPa}$ , og en trykkfasthet for senterbetongen på  $f_{cs} = 22,5 \text{ MPa}$ . Her ble det altså brukt Biocrete med  $60 \text{ kg/m}^3$  biokull i vane og med  $90 \text{ kg/m}^3$  biokull i senter. For å se på forskjellen i kapasitet for en vegg med Biocrete og en vegg med normalbetong blir det i det følgende beregnet M-N diagram for hvert av tilfellene. Diagram beregnes etter fremgangsmåten gitt i kapittel 7.2.4





Figur 7.9: Viser tverrsnittet av veggene som er planlagt på Gartnersletta

## 7.4 Resultat

### 7.4.1 Momentkapasitet dekker

For å beregne momentkapasiteten i trykksonen til biocreteelementet ble ligning 7.2.6 brukt. Flytespenningen til spennarmeringen brukt i plattendeckket er  $1550 \text{ N/mm}^2$ , og tverrsnittarealet  $A_p = 400 \text{ mm}^2$ . Siden trykksonen til dekket bare består av Biocrete er det naturlig å bruke Biocrete sin trykkfasthet ved beregning av momentkapasiteten,  $f_{ck} = 30,9 \text{ N/mm}^2$  (Appendix C). Denne trykkfastheten ble funnet etter prøving hos SINTEF. I formelen for momentkapasitet skal egentlig dimensjonerende trykkfasthet  $f_{cd}$  brukes, men siden resultatene skal sammenlignes med virkelige forsøk utelates sikkerhetsfaktorer for å evaluere beregningsmodellen. Det samme gjelder for slakkarmeringen i form av gitterdragere. Her settes  $f_{yd} = f_{yk} = 500 \text{ MPa}$  som flytespenning for dragerne. Med  $A_s = 78 \text{ mm}^2$ ,  $b = 1170 \text{ mm}$  og  $d = 230 \text{ mm}$  får vi:

$$\alpha = \frac{1550 \text{ N/mm}^2 \cdot 400 \text{ mm}^2 + 500 \text{ N/mm}^2 \cdot 78 \text{ mm}^2}{0,8 \cdot 30,9 \text{ N/mm}^2 \cdot 1170 \text{ mm} \cdot 230 \text{ mm}} = 0,0991, \quad (7.4.1)$$

fra ligning 7.2.4. Momentkapasiteten kan videre beregnes til

$$M_{Rd} = 0,8 \cdot 0,0991 \cdot (1 - 0,4 \cdot 0,0991) \cdot 30,9 \text{ N/mm}^2 \cdot 1170 \text{ mm} \cdot 230^2 \text{ mm}^2 = 145,6 \text{ kNm}. \quad (7.4.2)$$

Momentkapasiteten til dekket med Biocrete er altså  $M_{Rd} = 145,6 \text{ kNm}$ , og representerer den teoretiske kapasiteten til dekket beregnet etter Eurokode 2. Videre undersøkes belastningsmomentet

som gir brudd. Punktlast og egenlast er de to ytre lastene som vil gi bøyemoment i dekket. Den fordelte egenlasten,  $q$ , som er forårsaket av egenvekten til dekket beregnes som følger

$$q = (2400 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,075 \text{ m} \cdot 1,17 \text{ m} + 2185 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,185 \text{ m} \cdot 1,17 \text{ m}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 6,706 \text{ kN/m}, \quad (7.4.3)$$

her er  $2400 \text{ kg/m}^3$  og  $2185 \text{ kg/m}^3$  densiteten til henholdsvis normalbetongen i plattendeckket og påstøpen med Biocrete. Dimensjonene på komposittverrsnittet er hentet fra figur 7.5, og  $9,81 \text{ m/s}^2$  er tyngdeakselerasjonen ved jordoverflaten. Formelark gir max bøyemoment for en fritt opplagt bjelke med fordelt last

$$M_{egenvekt} = \frac{qL^2}{8} = \frac{6,706 \text{ kN/m} \cdot (7,5 \text{ m})^2}{8} = 47,2 \text{ kNm}, \quad (7.4.4)$$

her er  $l = 7,5 \text{ m}$  spennet av den fritt opplagte bjelken. Gjennomføringen av bruddforsøket på Orkanger gikk bra og dekket med Biocrete gikk til brudd når punktlasten var på  $7100 \text{ kg}$ . Dette tilsvarer  $7100 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 69,65 \text{ kN}$ . For å finne bøyemomentet forårsaket av denne punktlasten brukes formelark fra betongkonstruksjoner:

$$M_{punktlast} = \frac{PL}{4} = \frac{69,65 \text{ kN} \cdot 7,5 \text{ m}}{4} = 130,6 \text{ kNm}. \quad (7.4.5)$$

Totalt bøyemoment som ga momentbrudd i dekket blir dermed:

$$M_{Ed} = M_{egenlast} + M_{punktlast} = 47,2 \text{ kNm} + 130,6 \text{ kNm} = 177,8 \text{ kNm}. \quad (7.4.6)$$

Dekket med Biocrete hadde med andre ord en kapasitet som var godt over beregnet kapasitet etter Eurokode 2.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{177,8 \text{ kNm}}{145,6 \text{ kNm}} = 1,22. \quad (7.4.7)$$

Den faktiske momentkapasiteten ved forsøk var altså  $1,22$  ganger så stor som den teoretiske momentkapasiteten for dekket med Biocrete. For dekket med normalbetong ble samme regneprosedyre fulgt. Forskjellen er at trykksonen i dette dekket består av normalbetong B25 og ikke Biocrete. Denne betongens trykkfasthet ble også testet av SINTEF og resultatet ble  $f_{cd} = 36,9 \text{ N/mm}^2$ . Dette gir følgende utregninger:

$$\alpha = \frac{1550 \text{ N/mm}^2 \cdot 400 \text{ mm}^2 + 500 \text{ N/mm}^2 \cdot 78 \text{ mm}^2}{0,8 \cdot 36,9 \text{ N/mm}^2 \cdot 1170 \text{ mm}^2 \cdot 230 \text{ mm}^2} = 0,083, \quad (7.4.8)$$

etter ligning 7.2.4.

$$M_{Rd} = 0,8 \cdot 0,083 \cdot (1 - 0,4 \cdot 0,083) \cdot 36,9 \text{ N/mm}^2 \cdot 1170 \text{ mm} \cdot 230^2 \text{ mm}^2 = 146,6 \text{ kNm}. \quad (7.4.9)$$

Den fordelte lasten  $q$  på grunn av egenvekt på dekket med normalbetong blir:

$$q = (2400 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,26 \text{ m} \cdot 1,17 \text{ m}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 7162,1 \text{ kN/m}, \quad (7.4.10)$$

her er hele tversnittet i ordinær betong med densitet  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Bøyemoment på grunn av egenvekt blir da:

$$M_{\text{egenvekt}} = \frac{qL^2}{8} = \frac{7162,1 \text{ kN/m} \cdot (7,5 \text{ m})^2}{8} = 50,4 \text{ kNm}. \quad (7.4.11)$$

Dekket med normalbetong gikk til brudd når punktlasten var  $7800 \text{ kg}$ , som tilsvarer  $7800 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 76,52 \text{ kN}$ . Resulterende bøyemoment beregnes til:

$$M_{\text{punktlast}} = \frac{PL}{4} = \frac{76,52 \text{ kN} \cdot 7,5 \text{ m}}{4} = 143,5 \text{ kNm}. \quad (7.4.12)$$

Totalt bøyemoment som forårsaket momentbrudd på dekket med normal betong blir dermed:

$$M_{Ed} = M_{\text{Egenlast}} + M_{\text{Punktlast}} = 50,4 \text{ kNm} + 143,5 \text{ kNm} = 193,9 \text{ kNm}. \quad (7.4.13)$$

Dette dekket hadde også kapasitet ved forsøk som var større enn beregnet.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{193,9 \text{ kNm}}{146,6 \text{ kNm}} = 1,32. \quad (7.4.14)$$

Resultater for begge dekkene er presentert i tabell 7.1. Man kan se at dekket med normalbetong har et større forholdstall mellom faktisk momentkapasitet ved forsøk og teoretisk momentkapasitet.

Tabell 7.1: Tabellen viser bøyemoment ved brudd og momentkapasitet etter Eurokode 2 for begge dekkene.

| Dekke        | $M_{Ed}$  | $M_{Rd}$  | $M_{Ed}/M_{Rd}$ |
|--------------|-----------|-----------|-----------------|
| Biocrete     | 177,8 kNm | 145,6 kNm | 1,22            |
| Normalbetong | 193,9 kNm | 146,6 kNm | 1,32            |

#### 7.4.2 Risskapasitet dekker

Opprissing av biocretedekket vil inntreffe når bøyemomentet  $M_{Ed} \geq M_{riss}$ .  $M_{riss}$  beregnes etter ligning 7.2.9. Rissdannelse vil først skje i strekksonen, det vil si i plattendekket som er av normalbetong.  $f_{ctm} = 3,2 \text{ N/mm}^2$  for B35 betongen (tabell 3.1 i Eurokode 2 [39]).  $P = 480 \text{ kN}$ ,  $A_c = 1170 \text{ mm} \cdot 75 \text{ mm} = 87750 \text{ mm}^2$ . Her brukes  $75 \text{ mm}$  som høyde av betongtversnittet fordi det er bare plattendekket som er oppspent.

$$I_y = \frac{bh^3}{12} = \frac{1170 \text{ mm} \cdot 260^3 \text{ mm}^3}{12} = 1,7137 \cdot 10^9 \text{ mm}^4, \quad (7.4.15)$$

her brukes  $h = 260 \text{ mm}$  fordi nå ser vi på hele tversnittet som inkluderer plattendekket med normalbetong og påstøp med Biocrete.  $z_{uk} = 130 \text{ mm} - 13,27 \text{ mm} = 116,72 \text{ mm}$ , dette tilsvarer

---

lengden fra det transformerte tverrsnittets nøytralakse til underkant av bjelken.  $M_{riss}$  blir dermed

$$M_{riss} = \frac{(3,2 \text{ N/mm}^2 + \frac{480 \cdot 10^3 \text{ N}}{87750 \text{ mm}^2}) \cdot 1,7137 \cdot 10^9 \text{ mm}^4}{116,72 \text{ mm}} + 480 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 7,5 \text{ mm} = 130,9 \text{ kNm}, \quad (7.4.16)$$

her er  $e = 7,5 \text{ mm}$  siden det bare er plattendekket med normalbetong som er oppspent. Avstanden fra spennarmeringen til plattendekkets nøytralakse er  $7,5 \text{ mm}$ . Standardene sier videre at det vil oppstå rissdannelse når bøyemomentet til dekket overskrider  $130,9 \text{ kNm}$ . På samme måte som for momentkapasitet kan vi finne det faktiske bøyemomentet som forårsaket rissdannelse på dekket. Under gradvis pålastning på dekket med Biocrete ble det observert riss når punktlasten var på  $6000 \text{ kg}$ . Moment på grunn av egenvekt vil være det samme som før, beregnet i likning 7.4.4 til  $M_{egenvekt} = 47,2 \text{ kNm}$ . Punktlasten blir  $6000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 58,86 \text{ kN}$ . Dette resulterer i et bøyemoment på:

$$M_{punktlast} = \frac{PL}{4} = \frac{58,86 \text{ kN} \cdot 7,5 \text{ m}}{4} = 110,4 \text{ kNm}. \quad (7.4.17)$$

Totalt bøyemoment ved opprissing blir:

$$M_{Ed} = M_{egenlast} + M_{punktlast} = 47,2 \text{ kNm} + 110,4 \text{ kNm} = 157,6 \text{ kNm}. \quad (7.4.18)$$

Forholdstallet mellom bøyemoment som førte til riss  $M_{Ed}$  og beregnet risskapasitet  $M_{Rd}$  kan videre beregnes til:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{157,6 \text{ kNm}}{130,9 \text{ kNm}} = 1,20. \quad (7.4.19)$$

For dekket med normalbetong blir risskapasiteten den samme fordi opprissing vil foregå i underkant der betongtypen er lik for begge dekkene,  $M_{Rd} = 130,9 \text{ kNm}$ . Normalbetongdekket risset opp når punktlasten var på  $6900 \text{ kg}$ . Moment på grunn av egenvekt er beregnet i likning 7.4.11 til  $M_{Rd} = 50,4 \text{ kNm}$ . Punktlasten blir  $6900 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 67,69 \text{ kN}$ . Dette resulterer i et bøyemoment på:

$$M_{punktlast} = \frac{PL}{4} = \frac{67,69 \text{ kN} \cdot 7,5 \text{ m}}{4} = 126,9 \text{ kNm}. \quad (7.4.20)$$

Totalt bøyemoment som førte til opprissing blir:

$$M_{Ed} = M_{egenlast} + M_{punktlast} = 50,4 \text{ kNm} + 126,9 \text{ kNm} = 177,4 \text{ kNm}. \quad (7.4.21)$$

Forholdstallet mellom faktisk bøyemoment som førte til riss  $M_{Ed}$  og risskapasitet  $M_{Rd}$  beregnes til:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{177,4 \text{ kNm}}{130,9 \text{ kNm}} = 1,35. \quad (7.4.22)$$

Resultatene for begge dekkene er fremstilt i tabell 7.2.

Tabell 7.2: Tabellen viser bøyemoment ved rissdannelse og risskapasitet etter Eurokode 2 for begge dekkene.

| Dekke        | $M_{Ed}$    | $M_{Rd}$    | $M_{Ed}/M_{Rd}$ |
|--------------|-------------|-------------|-----------------|
| Biocrete     | 157,6 $kNm$ | 130,9 $kNm$ | 1,20            |
| Normalbetong | 177,4 $kNm$ | 130,9 $kNm$ | 1,35            |

### 7.4.3 Skjærkapasitet dekker

Dimensjonerende skjærkraft til dekket med Biocrete er funnet ved å bruke formler fra Eurokode 2 om dimensjonerende skjærkapasitet uten skjærarmering, ligning 7.2.10.  $k$ ,  $\rho_l$  og  $C_{Rd,c}$  for dekket blir:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{230}} = 1,9325 < 2, \quad (7.4.23)$$

her brukes  $d = 230 \text{ mm}$  siden armeringen har en overdekning på 30mm.

$$\rho_l = \frac{400 \text{ mm}}{1170 \text{ mm} \cdot 230 \text{ mm}} = 1,486 \cdot 10^{-3} < 0,02, \quad (7.4.24)$$

her er  $A_{sl} = 400 \text{ mm}^2$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = 0,18, \quad (7.4.25)$$

her brukes  $\gamma_c = 1$ . Materialfaktoren settes for å evaluere beregningsmodellen. Skjærkapasiteten for dekket blir dermed:

$$V_{Rd,c} = [0,18 \cdot 1,9325(100 \cdot 1,486 \cdot 10^{-3} \cdot 30,9 \text{ N/mm}^2)^{\frac{1}{3}}]1170 \text{ mm} \cdot 230 \text{ mm} = 155,6 \text{ kN}. \quad (7.4.26)$$

Minimumskapasiteten blir funnet ved å beregne  $\nu_{min}$

$$\nu_{min} = 0,035 \cdot 1,9325^{\frac{3}{2}} \cdot 30,9^{\frac{1}{2}} \text{ N/mm}^2 = 0,5337 \text{ N/mm}^2. \quad (7.4.27)$$

$$\nu_{min} b_w d = 0,5337 \text{ N/mm}^2 \cdot 1170 \text{ mm} \cdot 230 \text{ mm} = 140,6 \text{ kN} < 155,6 \text{ kN}. \quad (7.4.28)$$

Siden minimumskapasiteten er mindre enn beregnet kapasitet blir den neglisjert og vi står igjen med skjærkapasitet på  $V_{Rd,c} = 155,6 \text{ kN}$ . Dekket gikk, som nevnt, til momentbrudd og ikke skjærbrudd. Det vil si at denne skjærkapasiteten ikke er dimensjonerende. Vi kan likevel beregne skjærkraften i dekket ved brudd for å se utnyttelsesgrad:

$$V_{egenlast} = \frac{q \cdot L}{2} = \frac{6,706 \text{ kN/m} \cdot 7,5 \text{ m}}{2} = 25,1 \text{ kN}, \quad (7.4.29)$$

her er  $6,706 \text{ kN/m}$  den fordelte lasten på grunn av egenvekten til dekket med Biocrete. Dekket gikk til brudd ved en punktlast på  $P = 69,65 \text{ kN}$ . Skjærkraften i dekket som følge av punktlasten blir:

$$V_{\text{punktlast}} = \frac{P}{2} = \frac{69,65 \text{ kN}}{2} = 34,8 \text{ kN}. \quad (7.4.30)$$

Total skjærkraft i dekket blir  $V_{Ed} = V_{\text{egenlast}} + V_{\text{punktlast}} = 25,1 \text{ kN} + 34,8 \text{ kN} = 59,9 \text{ kN}$ . Utnyttelsesgraden kan nå beregnes til:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c}} = \frac{59,9 \text{ kN}}{155,6 \text{ kN}} = 0,38. \quad (7.4.31)$$

Dekket er godt inne på sikker side når det kommer til skjærbrudd. Momentbruddet inntreffer når dekket er på 38 % av skjærkapasiteten.

#### 7.4.4 Heft dekker

Resultatene fra heftforsøket er presentert i tabell 7.3. Tabellen viser at det ble brudd i selve Biocreten på to av prøvestykkene. Det er verdt å merke seg at det ikke ble brudd i skjøten mellom normalbetongen og påstøpen med Biocrete. Lav strekkfasthet for Biocrete var det som ga brudd. På prøvestykke nummer 2 holdt ikke limet, og det ble brudd mellom lim og stålskive.

Tabell 7.3: Tabellen viser resultater fra heftforsøket

| Prøve | Bruddspenning [MPa] | Kommentar                     |
|-------|---------------------|-------------------------------|
| 1     | 2,2                 | Brudd i Biocrete              |
| 2     | 1,4                 | Brudd mellom lim og stålskive |
| 3     | 1,9                 | Brudd i Biocrete              |

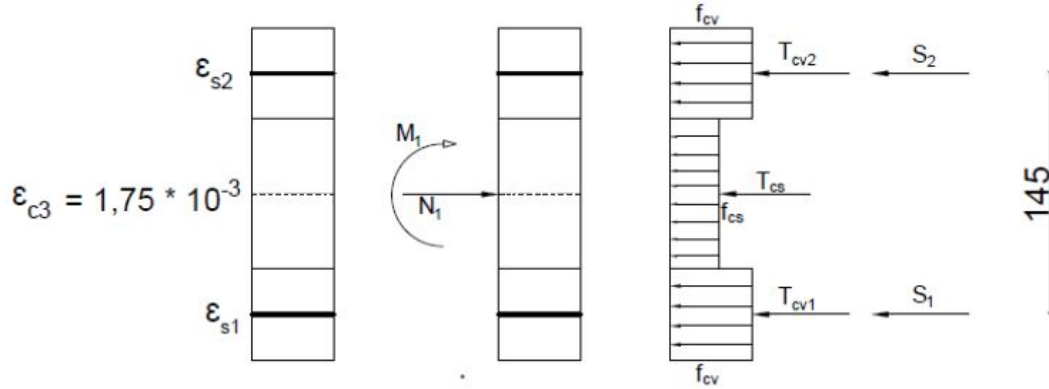
Resultatene viser en gjennomsnittsverdi i aksial strekkfasthet på  $f_{ctm} = 2,05 \text{ MPa}$ . For biocreten vil den karakteristiske verdien for aksial strekkfasthet derfor være  $f_{ctk,0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 1,44 \text{ MPa}$ .

#### 7.4.5 M-N diagram vegg

Diagrammet er konstruert ved hjelp av fire kontrollpunkter som hver har en egen tøyningstilstand. I det følgende er M-N diagram for en vegg med Biocrete og en vegg med ordinær betong beregnet. Fremgangsmåten er presentert i kapittel 7.2.4

## Biocretevegg

**Tøyningstilstand 1** er rent trykk, se figur 7.10. I denne tilstanden settes bruddkriteriet til  $\epsilon_c = \epsilon_{c3} = 1,75 \cdot 10^{-3}$



Figur 7.10: Viser tøyningstilstand 1 for veggene

I denne tøyningstilstanden vil det ikke oppstå flyt i armeringen fordi tøyningen  $\epsilon_{c3}$  ikke overskrider dimensjonerende flyetøyning  $\epsilon_{yd}$ :

$$\epsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434 \text{ N/mm}^2}{200000 \text{ N/mm}^2} = 0,00217 > \epsilon_{c3}, \quad (7.4.32)$$

her er dimensjonerende flytespenning for armeringen  $f_{yd} = 434 \text{ MPa}$  og E-modulen  $E_s = 200000 \text{ MPa}$ . Trykkresultanten til senterbetongen  $T_{cs}$  og vangene  $T_{cv1}$  og  $T_{cv2}$  blir dermed:

$$T_{cs} = f_{cs}bh_1 = 22,5 \text{ N/mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 90 \text{ mm} = 2025 \text{ kN}, \quad (7.4.33)$$

$$T_{cv1} = T_{cv2} = f_{cv}bh_2 = 37,65 \text{ N/mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 55 \text{ mm} = 2070,7 \text{ kN}. \quad (7.4.34)$$

$S_1$  og  $S_2$  er trykkresultanten i armeringen. I denne tøyningstilstanden blir resultatene like store som følge av at spenningene i armeringene er like store.

$$S_1 = S_2 = \sigma_{sd} \cdot A_{s1} = 200000 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 189 \text{ mm}^2 = 66,15 \text{ kN}. \quad (7.4.35)$$

$N_1$  og  $M_1$  kan nå bli funnet ved å ta aksiallikevekt og momentlikevekt om nøytralaksen.

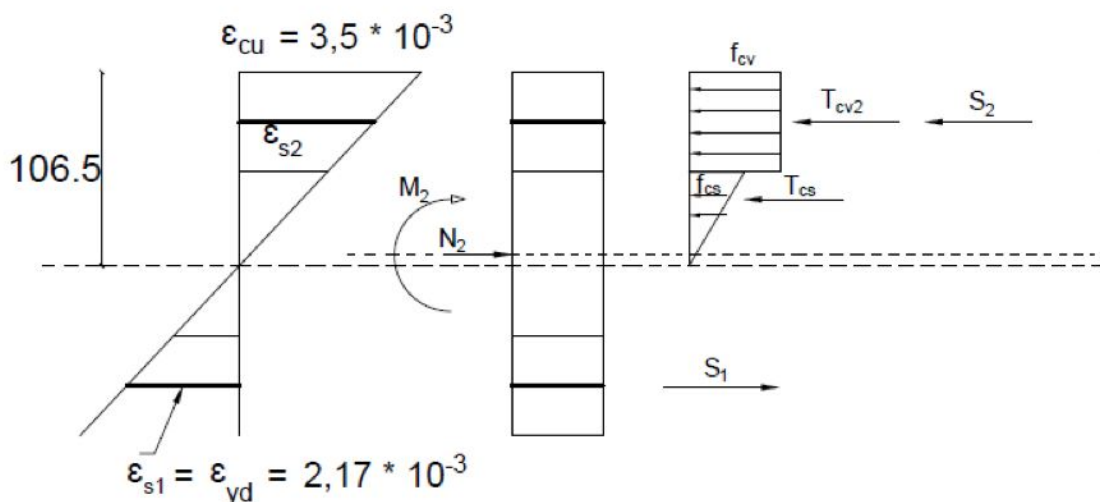
$$N_1 = T_{cs} + T_{cv1} + T_{cv2} + S_1 + S_2 = 2025 \text{ kN} + 2 \cdot 2070,7 \text{ kN} + 2 \cdot 66,15 \text{ kN} = 6298,6 \text{ kN}, \quad (7.4.36)$$

$$M_1 = 0. \quad (7.4.37)$$

**Tøyningstilstand 2** er trykkbrudd i betongen samtidig med flyt i armeringen, se figur 7.11. I denne tilstanden settes bruddkriteriet til  $\epsilon_c = \epsilon_{cu3} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  for betongen, og  $\epsilon_s = \epsilon_{yd} = 2,17 \cdot 10^{-3}$  for armeringen. Her må høyden av trykksonen  $\alpha d$  beregnes først. Høyden i denne tøyningstilstanden er gitt ved ligning 7.2.20:

$$\alpha d = \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{cu3} + \epsilon_{yd}} \cdot d = \frac{3,5}{3,5 + 2,17} \cdot 172,5 = 106,5 \text{ mm}, \quad (7.4.38)$$

her er  $d = h_2 + h_1 + \frac{h_2}{2} = 172,5 \text{ mm}$ .



Figur 7.11: Viser tøyningstilstand 2 for veggene

I dette tilfellet vil betongens trykkresultant være en kombinasjon av  $T_{cs}$  og  $T_{cv2}$ , se figur 7.11. For å finne trykkresultanten må tøyningen og de resulterende spenningene i skillet mellom vangene og senterbetongen beregnes. Tøyningen i dette punktet kan beregnes på følgende vis:

$$\epsilon_b = \frac{\alpha d - h_2}{\alpha d} \cdot \epsilon_{cu} = \frac{106,5 \text{ mm} - 55 \text{ mm}}{106,5 \text{ mm}} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 1,69 \cdot 10^{-3}, \quad (7.4.39)$$

her er  $\epsilon_b$  tøyningen i skillet mellom senterbetongen og den øvre vangen. For å finne spenningen i det gitte punktet må vi se på spenning- tøyningkurven for betong. Når  $0 < \epsilon_c < \epsilon_{c2}$  er spenningen gitt ved:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right], \quad (7.4.40)$$

der  $\epsilon_c$  er tøyningen i det gitte punktet på kurven,  $\epsilon_{c2}$  og  $n$  er parametre som finnes i (tabell 3.1 EC2) og  $f_{cd}$  er dimensjonerende trykkfasthet. For senterbetongen vil da spenningen bli:

$$\sigma_{cs} = 22,5 \text{ N/mm}^2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1,69 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \right] = 21,96 \text{ N/mm}^2, \quad (7.4.41)$$



Fra vangbetongen sin side vil spenningen bli:

$$\sigma_{cv2} = 37,65 \text{ N/mm}^2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1,69 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \right] = 36,7 \text{ N/mm}^2, \quad (7.4.42)$$

Forskjellen mellom de utregnede spenningene og trykkfasthetene  $f_{cv}$  og  $f_{cs}$  er minimale og kan dermed neglisjeres.  $T_{cv2}$  blir derfor det samme som i tøyningstilstand 1 siden hele den øvre vangen ligger i trykksonen:  $T_{cv2} = 2070,7 \text{ kN}$ . Høyden av trykksonen som treffer senterbetongen vil være  $h_s = 106,5 \text{ mm} - h_2 = 51,5 \text{ mm}$ . Trykkresultanten fra senterbetongen blir da:

$$T_{cs} = \frac{f_{cs} b h_s}{2} = \frac{22,5 \text{ N/mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm}^2 \cdot 51,5}{2} = 579 \text{ kN}, \quad (7.4.43)$$

her velges en konservativ løsning ved å regne spenningsfordelingen som en trekant. For å finne resultantkreftene fra armeringen må først  $\epsilon_{s2}$  beregnes for å finne ut om armeringen flyter eller ikke:

$$\epsilon_{s2} = \frac{\alpha d - \frac{h_2}{2}}{\alpha d} \cdot \epsilon_{cu} = \frac{106,5 \text{ mm} - \frac{55 \text{ mm}}{2}}{106,5 \text{ mm}} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 2,6 \cdot 10^{-3}. \quad (7.4.44)$$

Siden  $\epsilon_{s2} > \epsilon_{yd}$  fra ligning 7.4.32 vil armeringen flyte. Når armeringen flyter brukes dimensjonerende flytespenning  $f_{yd}$  i beregningen av resultatene.  $S_1$  og  $S_2$  er derfor lik i dette tilfellet siden begge overgår flytespenningen:

$$S_1 = S_2 = f_{yd} A_{s1} = 434 \text{ N/mm}^2 \cdot 189 \text{ mm}^2 = 82 \text{ kN}. \quad (7.4.45)$$

Siden tverrsnittet er et komposittverrsnitt, må ligning 7.2.23 og 7.2.24 modereres. Ved å bruke aksiell likevekt og momentlikevekt om tyngdepunktsaksen får vi beregnet  $N_2$  og  $M_2$  på følgende måte:

$$N_2 = T_{cv2} + T_{cs} + S_2 - S_1 = 2070,7 \text{ kN} + 579 \text{ kN} = 2649,7 \text{ kN}, \quad (7.4.46)$$

$$M_2 = T_{cv2} \cdot (0,5h - 0,5h_2) + T_{cs} \cdot (0,5h - (h_2 + \frac{h_s}{3})) + S_1 \cdot h', \quad (7.4.47)$$

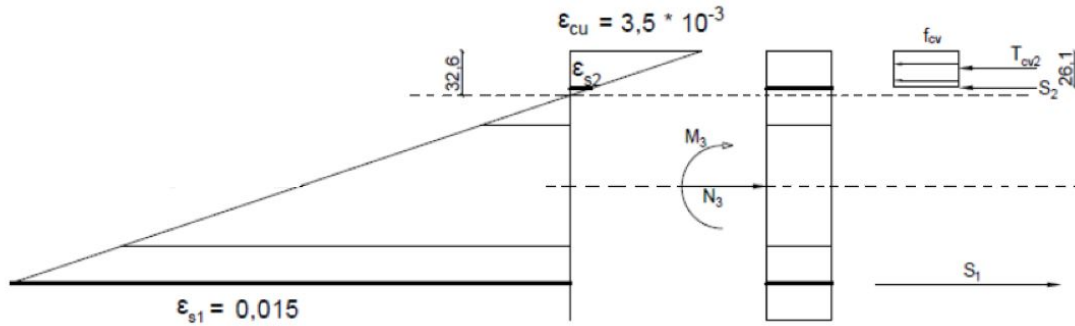
her er  $h$  høyden av tverrsnittet  $h = 200 \text{ mm}$  og  $h'$  er lengden mellom armeringsnettene  $h' = 200 \text{ mm} - 55 \text{ mm} = 145 \text{ mm}$ .  $M_2$  blir dermed:

$$M_2 = 2070,7 \text{ kN} (0,5 \cdot 0,2 - 0,5 \cdot 0,055) \text{ m} + 579 \text{ kN} (0,5 \cdot 0,2 - (0,055 + \frac{0,0515}{3})) \text{ m} + 82 \text{ kN} \cdot 0,145 \text{ m} = 178,1 \text{ kNm}. \quad (7.4.48)$$

I **tøyningstilstand 3** er det trykkbrudd i betongen og stor armeringstøyning, se figur 7.12. I denne tilstanden settes bruddkriteriet til  $\epsilon_c = \epsilon_{cu3} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  for betongen, og  $\epsilon_{s1} = 0,015$  for strekkarmeringen. På samme måte som i tøyningstilstand 2 beregnes trykksonehøyden først.  $\alpha d$  blir i dette tilfellet beregnet fra ligning 7.2.25:

$$\alpha d = \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{cu3} + \epsilon_{s1}} \cdot d = \frac{3,5}{3,5 + 15} \cdot 172,5 = 32,6 \text{ mm}, \quad (7.4.49)$$

$$0,8\alpha d = 0,8 \cdot 32,6 \text{ mm} = 26,1 \text{ mm}. \quad (7.4.50)$$



Figur 7.12: Viser tøyningstilstand 3 for veggene

Trykksonen ligger kun i vangen i denne tøyningstilstanden. Det vil si at kun  $f_{cv2}$  brukes når betongens trykkresultant skal beregnes:

$$T_{cv2} = f_{cv2}b \cdot 0,8 \cdot \alpha d = 37,65 \text{ N/mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 26,1 \text{ mm} = 982,7 \text{ kN}, \quad (7.4.51)$$

beregnet etter ligning 7.2.28. Kraftresultanten fra strekkarmeringen  $S_1$  forblir uendret fra tøyningstilstand 2 siden armeringen fortsatt flyter:

$$S_1 = f_{yd}A_{s1} = 434 \text{ N/mm}^2 \cdot 189 \text{ mm}^2 = 82 \text{ kN}. \quad (7.4.52)$$

I denne tøyningstilstanden vil det ikke være flyt i trykkarmeringen siden tøyningen er mindre enn flytetøyningen. Nøyaktig tøyning for trykkarmering  $\epsilon_{s2}$  er

$$\epsilon_{s2} = \frac{32,6 \text{ mm} - 0,5 \cdot 55 \text{ mm}}{32,6 \text{ mm}} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 5,47 \cdot 10^{-4}, \quad (7.4.53)$$

beregnet etter ligning 7.2.26. For kraftresultanteten fra trykkarmeringen  $S_2$  må spenningen  $\sigma_{sd}$  fra ligning 7.2.27 brukes. beregningen av  $S_2$  blir dermed:

$$S_2 = \sigma_{sd}A_{s2} = E_s\epsilon_{s2}A_{s2} = 200000 \text{ N/mm}^2 \cdot 5,47 \cdot 10^{-4} \cdot 189 \text{ mm}^2 = 20,7 \text{ kN}. \quad (7.4.54)$$

Ved å ta i bruk ligning 7.2.31 og 7.2.32 beregnes verdier for  $N_3$  og  $M_3$ :

$$N_3 = T_{cv2} + S_2 - S_1 = 982,7 \text{ kN} + 20,7 \text{ kN} - 82 \text{ kN} = 921,4 \text{ kN}, \quad (7.4.55)$$

$$M_3 = 982,7 \text{ kN}(0,5 \cdot 0,2 \text{ m} - 0,4 \cdot 0,0326 \text{ m}) + \frac{82 \text{ kN} \cdot 0,145 \text{ m}}{2} + \frac{20,7 \text{ kN} \cdot 0,145 \text{ m}}{2} = 86,2 \text{ kNm}. \quad (7.4.56)$$

**Tøyningstilstand 4** er et ekstra punkt som kan være interessant å undersøke. Her er det er strekk i hele betongen og kapasiteten vil kun være avhengig av strekkfastheten til armeringen:

$$N_4 = -S_2 - S_1 = -434 \text{ N/mm}^2 \cdot 189 \text{ mm}^2 - 434 \text{ N/mm}^2 \cdot 189 \text{ mm}^2 = -164 \text{ kN}. \quad (7.4.57)$$

Siden det er symmetrisk tverrsnitt og strekk over hele veggen vil momentet  $M_4 = 0$  MPa.

### Normalbetong vegg

I en standard vegg levert av Con-Form er det brukt normalbetong med minimum B30 kvalitet i både vangene og i senterbetongen, se figur 7.9. For å se på forskjellen i kapasitet mellom Biocrete og normalbetong brukes middelveidien til trykkfastheten som dimensjonerende trykkfasthet for normalbetongen. Dette er fordi beregningen av kapasiteten til Biocrete baserer seg på gjennomsnittlig trykkfasthet ved forsøk. En B30 betong har i dette tilfellet  $f_{cd} = f_{cm} = 38$  MPa.

**Tøyningstilstand 1** er rent trykk, se figur 7.2.

$$T_c = f_{cd}bh = 38 \text{ N/mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm} = 7600 \text{ kN}. \quad (7.4.58)$$

$S_1$  og  $S_2$  er bare avhengig av tøyningen i armeringen og er derfor det samme som for biocretebetongen:

$$S_1 = S_2 = \sigma_{sd} \cdot A_{s1} = 200000 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 189 \text{ mm}^2 = 66,15 \text{ kN}. \quad (7.4.59)$$

Ved å bruke ligning 7.2.18 får vi dermed  $N_1 = 7732,3$  kN.  $M_1 = 0$ .

**Tøyningstilstand 2** er trykkbrudd i betongen samtidig med flyt i armeringen, se figur 7.3. Her er trykkhøyden av trykksonen  $\alpha d = 106,5$  mm som beregnet i ligning 7.4.38. trykkresultanten  $T_c$  blir dermed:

$$T_c = f_{cd}b \cdot 0,8 \cdot \alpha d = 38 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8 \cdot 106,5 \text{ mm} = 3238 \text{ kN}. \quad (7.4.60)$$

Resultater  $S_1$  og  $S_2$  blir som beregnet i ligning 7.4.45.

$$S_1 = S_2 = f_{yd}A_{s1} = 434 \text{ N/mm}^2 \cdot 189 \text{ mm}^2 = 82 \text{ kN}. \quad (7.4.61)$$

Ved å bruke ligning 7.2.23 og 7.2.24 blir  $N_2 = 3238$  kN og  $M_2 = 197,75$  kNm.

I **tøyningstilstand 3** er det trykkbrudd i betongen og stor armeringstøyning, se figur 7.12. Her blir trykksonen  $\alpha d = 32,6$  mm som beregnet i ligning 7.4.49.

$$T_c = f_{cb}b \cdot 0,8 \cdot \alpha d = 38 \text{ N/mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 0,8 \cdot 32,6 \text{ mm} = 991 \text{ kN}. \quad (7.4.62)$$

Tøyningen i trykkarmeringen blir  $\epsilon_{s2} = 5,47 \cdot 10^{-4}$  slik at  $S_2 = 20,7$  kN beregnet etter ligning 7.4.54. Siden tøyningen i strekkarmering flyter vil  $S_1 = 82$  kN. Ved å bruke ligning 7.2.31 og 7.2.32 blir  $N_3 = 930,5$  kN og  $M_3 = 93,7$  kNm.

**Tøyningstilstand 4** vil gi samme strekkapasitet som for veggen med Biocrete. Det som følge av at betongen ikke vil ta opp strekkrefter og dermed vil strekkapasiteten kun styres av armeringen.

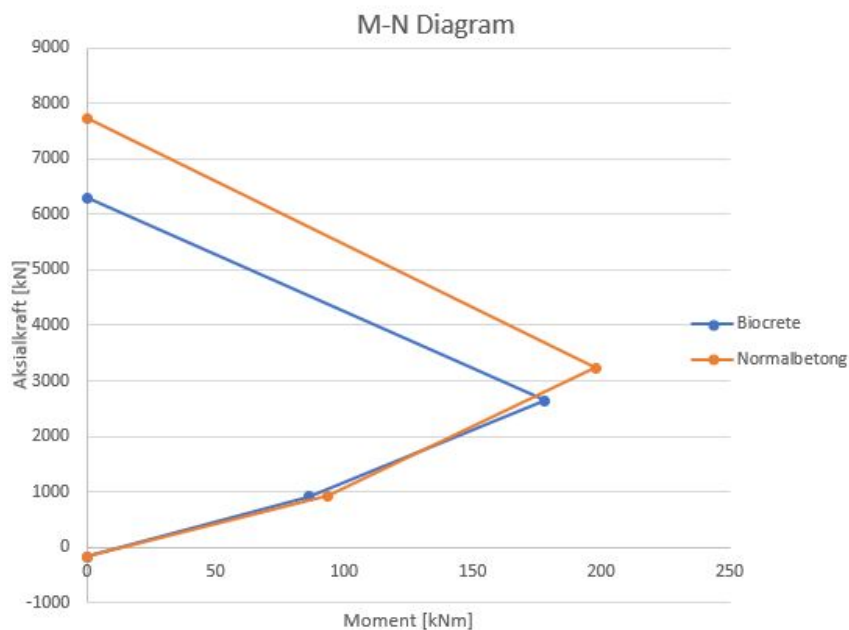
$$N_4 = -S_2 - S_1 = -434 \text{ N/mm}^2 \cdot 189 \text{ mm}^2 - 434 \text{ N/mm}^2 \cdot 189 \text{ mm}^2 = -164 \text{ kN} \quad (7.4.63)$$

Siden tverrsnittet er symmetrisk med strekk over hele veggen vil momentet  $M_4 = 0$  MPa.

Tabell 7.4: Tabellen viser Aksialkraft og moment ved ulike tøyningstilstander for veggelementer med biocrete og normal betong

| Tøyningstilstand | Biocrete         |              | Normal betong    |              |
|------------------|------------------|--------------|------------------|--------------|
|                  | Aksialkraft [kN] | Moment [kNm] | Aksialkraft [kN] | Moment [kNm] |
| 1                | 6298,6           | 0            | 7732,3           | 0            |
| 2                | 2649,7           | 178,1        | 3238,0           | 197,8        |
| 3                | 921,4            | 86,2         | 930,5            | 93,7         |
| 4                | -164             | 0            | -164             | 0            |

Resultatene viser at kapasiteten til en skallvegg med normalbetong er høyere enn en vegg produsert med Biocrete. I tabell 7.4 kan man se sammenhengen mellom kapasitet for aksialkraft og moment for begge veggelementene. I figur 7.13 er de samme resultatene presentert i et M-N diagram der moment er plassert langs x-aksen og aksialkraft langs y-aksen. Med null moment på veggen vil altså en vegg bestående av normalbetong tåle over 23 % mer enn en vegg med Biocrete, og når det gjelder maks moment vil betongveggen tåle 11 % mer.



Figur 7.13: Viser M-N diagram for skallvegger i Biocrete og i normalbetong

---

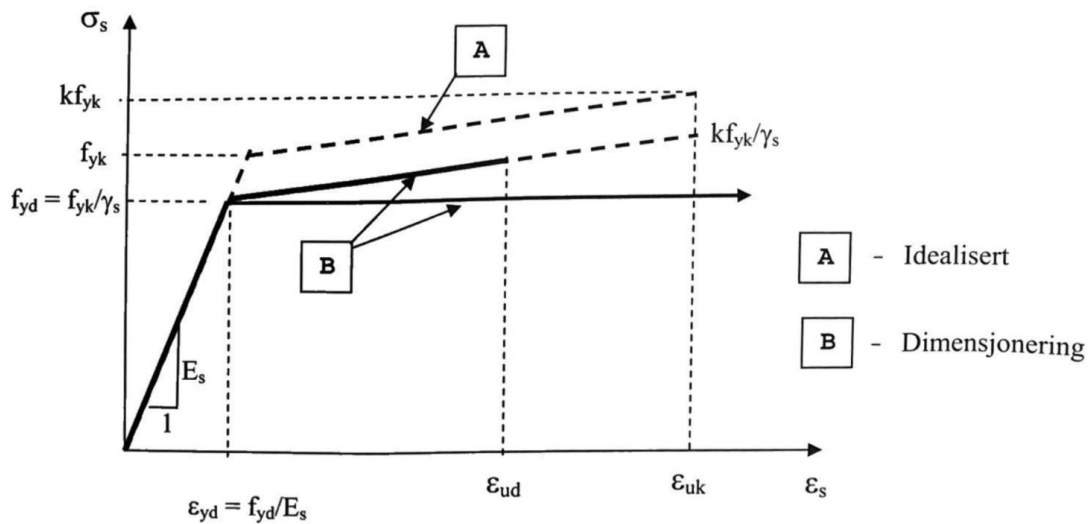
## 7.5 Diskusjon

### 7.5.1 Dekker

Resultatene fra Orkanger viser at kapasiteten til biocretedekket er god. Som forventet var ikke skjærkapasiteten dimensjonerende, og det ble et momentbrudd i begge dekkene. Dekket bestående av Biocrete viste seg å tåle 1,22 ganger så mye som beregnet momentkapasiteten fra eksisterende standarder. Til sammenligning var forholdstallet 1,32 for dekket med normalbetong. Altså ser det ut til at man kan foreta kapasitetsberegninger på Biocrete etter Eurokode 2 og fortsatt være på sikker side hva gjelder momentkapasitet. Sikkerhetsmarginen til dekket med normalbetong er som nevnt noe større, derfor kan bruk av korreksjonsfaktor for beregningene på Biocrete være en løsning for å oppnå samme sikkerhetsmargin. Fra forsøkene finnes det dessverre ikke nok resultater til å identifisere en slik korreksjonsfaktor. Det viktigste resultatet fra bruddforsøket er at det ikke har bydd på overraskelser. Det var forventet at lavere trykkfasthet og E-modul ville gi lavere kapasitet for dekket med Biocrete. Til tross for noe lavere verdier vil Biocrete kunne brukes til de aller fleste formål, alt etter som hvor mye biokull som tilsettes betongen. For vegger og dekker i boliger og andre ”normale” bygg har den vist seg å ha tilstrekkelig kapasitet.

Fra tabell 7.1 går det fram at beregnet momentkapasitet etter eksisterende formler for betong gir like verdier for begge dekkene. Dette fordi beregningen av momentkapasitet ved underarmert tverrsnitt er mest avhengig av strekkarmeringen. I dette tilfellet var det både slakkarmering og spennarmering. For et underarmert tverrsnitt vil armeringen flyte før betongen går til brudd. Beregnet kapasitet vil derfor hovedsakelig avhenge av strekkfastheten til armeringen. Siden dekkene har samme mengde armering vil det føre til at momentkapasitetene også er ganske like, selv om trykkfastheten til Biocrete er lavere enn normalbetongens.

Forsøkene viser som nevnt at bøyemomentet som ga brudd var en del større enn beregnet momentkapasitet. Hovedårsaken til de konservative verdiene kan forklares med at i beregningene av momentkapasitet har det blitt brukt karakteristisk fasthet (flytegrense”) for armeringene. Karakteristisk fasthet vil alltid ligge i nedre grense av faktiske fastheten til armeringen. Det vil si at i nesten alle tilfeller vil armeringen tåle mer enn oppgitt karakteristisk verdi. Figur 7.14 viser at den faktiske bruddspenningen til armeringen vil ligge godt over den karakteristiske flytegrensen.



Figur 7.14: Figuren viser idealisert og dimensjonerende spenning- tøyningkurve for armeringsstål

Source: Betongkonstruksjoner [40]

Ved å bruke karakteristiske verdier for både slakkarmeringen og spennarmeringen blir momentkapasiteten en del lavere enn faktisk kapasitet, noe som gjenspeiles i resultatene. Grunnen til at dekket med normalbetong tåler mer bøyemoment enn dekket med Biocrete ser kun ut til å være høyere trykkfasthet og E-modul. Arbeidsdiagrammet for Biocrete vil ligge under arbeidsdiagrammet for normalbetongen, noe som gjør at den kan ta opp mindre spenninger før brudd. Underveis i forsøket på Orkanger ble det observert at nedbøyingen ved pålastning var betydelig større for dekket med Biocrete. Det understreker at E-modulen er en god del lavere for Biocrete, som også var konklusjonen i høstens prosjektoppgave. Testing av E-modul utført av SINTEF har på de to ulike betongene understreker også dette.

Tabell 7.2 viser at beregnet risskapasitet også avviker en god del fra faktisk risskapasitet ved forsøk. I utregningen av risslast er det blitt brukt midlere aksial strekkfasthet for normalbetongen av kvalitet B35. Det er mange faktorer som spiller inn i støpeprosessen som gjør at det kan bli store forskjeller i faktisk strekkfasthet og midlere strekkfasthet hentet fra Eurokode 2. Hver betongblanding vil også kunne variere noe selv om det i utgangspunktet ikke skal gjøre det. Denne usikkerheten i strekkfasthet kan derfor gi avvik mellom beregnet og faktisk risskapasitet. Som nevnt var det vanskelig å se nøyaktig ved hvilken vekt betongen risset. Mest sannsynlig var det tendenser til riss i underkant før vi klarte å observere det. Det er en faktor som vil gjøre at forskjellen mellom beregnet og observert risskapasitet vil minke.

Grunnen til at den faktiske risskapasiteten er mindre for biocretedekket kan være fordi stivheten er mindre for påstøpen med Biocrete. Midlere E-modul av hele dekket blir mindre, som fører til større deformasjoner underveis. Større deformasjoner vil gi større spenninger i underkant og dermed vil rissdannelse skje på et tidligere stadium. For begge dekkene var det rundt 1000 kg punktlast som

---

skulle til for å gå fra opprissing til brudd. Hovedårsaken til det er at dekkene har forspent armering. Forspenningen vil gjøre at dekkene blir svært stive og dermed tillate lite deformasjon før brudd. Uten spennarmering ville deformasjonene blitt større før dekkene gikk til brudd.

Resultatene fra heftforsøket på dekket viser at strekkfastheten til Biocrete er lavere enn heften mellom de to betongene. Med en gjennomsnittlig verdi i aksial strekkfasthet på  $f_{ctm} = 2,05$  MPa er det 6,6 % av trykkfastheten til biocreten. Det er litt mindre enn samme tall for vanlig konstruksjonsbetong der forholdet mellom strekkfasthet og trykkfasthet typisk ligger på 8-10 %. Det er likevel større enn høyfast betong, der forholdet er 4-6 %. Strekkfastheten bør i utgangspunktet ikke by på problemer siden man i prosjektering av betongkonstruksjoner vanligvis antar at alle strekkraftene må tas av armeringen. I enkelte tilfeller er det likevel klart at strekkfasthet har en betydning. Ved strekkbelastning vil strekkkapasiteten bestemme hvordan oppsprekningen av betongen blir og dermed også påvirke utseende og bestandigheten til betongen [27]. I følge Eurokode er  $f_{ctk,0,05} = 1,8$  MPa for en vanlig B25 betong. Sammenlignet med Biocrete er denne verdien 25 % større. Siden forskjellen er relativt stor, vil det være hensiktsmessig med videre testing innefor dette feltet.

### 7.5.2 Vegger

I beregningene av M-N diagram er trykkfasthet den eneste forskjellen mellom skallveggen med normalbetong og med Biocrete. Det har, som nevnt, blitt tatt utgangspunkt i minimumskravet til betongkvalitet på B30 for normalbetongen. Biocreteblandingen som ble brukt til fullskalaforsøk på Orkanger i fjor tilsvarer en B30 betong i vangene med trykkfasthet på 37,65 MPa. Forskjellen mellom veggene ligger i senterbetongen, der biocreteveggen har en trykkfasthet på 22,5 MPa, mens den normale betongveggen også her har B30 kvalitet med trykkfasthet på 38 MPa. Biocrete med 60 kg/m<sup>3</sup> biokull vil altså akkurat ligge innenfor kravet til Con-Form med B30 kvalitet, mens biocreten som er brukt i senter med 90 kg/m<sup>3</sup> biokull ikke oppfyller dette kravet. Grunnen til at biocreteveggen tåler mindre aksialkraft er fordi trykkfastheten i senterbetongen er lavere. Denne trykkfastheten vil også være hovedfaktoren til at veggen tåler mindre moment, men her er ikke forskjellen mellom de to veggtypene like stor. En sannsynlig forklaring på dette er at momentarmen i senterbetongen er såpass lav at den ikke vil påvirke momentkapasiteten betydelig. Majoriteten av momentkapasiteten ligger i vangene og der trykkfastheten er veldig lik i begge veggene. Con-Forms minimumskrav på B30 i senterbetongen er veldig konservativt og kanskje ikke nødvendig i innvendig boligvegger eller tilsvarende. Dermed vil en svakere Biocrete med opptill 90 kg/m<sup>3</sup> biokull være et alternativ for å få den ønskede miljøgevinsten. Spørsmålet blir da hvor mye man kan redusere kapasiteten for å få større miljøgevinst.

Fra diagrammet kan det observeres en moment-aksial kombinasjon der biocreteveggen vil ha nok kapasitet, men ikke veggen i normalbetong. Dette er på grunn av unøyaktigheten som kommer ved at vi bare har brukt 4 kontrollpunkter i beregningen av diagrammet. Ved å bruke flere punkter ville linjene buet mer og normalbetongbuen ville vært på utsiden av buen for Biocrete hele veien.

---

Det viser seg likevel at veggen i Biocrete har grei kapasitet. I alle fall når det kommer til bruk i boliger der lasten på hver vegg ikke er altfor stor.



---

## 8 Konklusjon

### 8.1 LCA og EPD

Den foreløpige konklusjonen fra EPD Norge er at de ikke vil etterkomme aktørenes ønske om å få en EPD for Biocrete. Grunnen til dette er at prinsippet for å lage en EPD for betong tar utgangspunkt i summen av alle delkomponenter og bidrag fra produksjon. Dersom man skulle ha regnet inn biokullet på denne måten måtte man ha hatt en EPD for biokullet med negativ GWP-verdi, noe som ikke lar seg gjøre med dagens regneregler og standarder. Disse skal revideres i 2024, og med CCS som en av de mest lovende teknologiene for å nå fastsatte klimamål, er det forventet at det vil gjøres endringer som tillater at karbon som lagres regnes med negativ verdi. Den midlertidige løsningen som fremstår mest aktuell med tanke på å få utnyttet det negative bidraget fra biokull, er en kombinasjon av to dokumenter. En EPD for betongen og en LCA-analyse av biokullet som gjør det mulig å tilegne dette en negativ GWP-verdi. Slik får entreprenørene to dokumenter til det totale klimagassregnskapet og får utnyttet den negative verdien karbonlagring gir. Det er enighet blant ekspertene på fagfeltet om at tilfredsstillende dokumentasjon og hensiktsmessig bruk av råstoff er kritiske faktorer i forbindelse med å realisere Biocrete som produkt. De påpeker viktigheten av transparent dialog. Alle steiner må snus, og det endelige produktet må være et resultat av konsensus i bransjen. Prosjektgruppa må kunne overbevise andre aktører om at bruk av biokull i betong gir fler fordeler enn ulemper, og at bruken av biokull i betong ikke går på bekostning av eventuelt bedre alternativer.

### 8.2 Fukt og struktur

Resultatene fra vannabsorpsjonsforsøket gir tydelige indikasjoner på at total vannabsorpsjon er i området rundt 150 %, det samme som tidligere estimert. Det kan dog viktig å påpeke at det kan være variabel vannabsorpsjon på biokullet fra ulike produksjoner og at man bør finne direkte metoder for å få nøyaktige data på biokullet. Et annet viktig resultat er at initiell fuktighet i biokullet ikke ser ut til å påvirke støpeligheten. Det ser derimot ut som at det kan lønne seg å ha noe fuktighet i biokullet. Dette ser ut til å gi lavere luftinnhold og høyere trykkfasthet, og kan også redusere eksplosjonsfare under produksjon. I den teoretiske analysen av sammenhengen mellom luftinnhold, densitet og vannabsorpsjon konkluderes det med at den faktiske partikkeldensiteten til biokullet brukt i årets forsøk er høyere enn tidligere antatt. Resultatene fra vårens forsøk tyder på at partikkeldensiteten ligger på rundt  $475 \text{ kg/m}^3$ . Til tross for at kvaliteten på biokullet kan variere, er det nærliggende å tro at denne partikkeldensiteten stemmer bedre. Dette som følge av veldig gode resultater fra forsøket. Videre konkluderes det med at biokullet ser ut til å ha svært fin porøsitet, antageligvis i samme størrelsesorden som de fine kapillærporene i betongen, og bidrar til å gi en svært tett betong. Uttørkingsforsøket viste at prøvestykkene etter lang tids uttørring fremdeles innholdt en betydelig mengde vann. Vanninnholdet ga forventninger om at RF i betongen

---

kunne være så høy som 95-99 %. RF-målingene som ble utført på de samme prøvestykkene etter uttørkingsforsøket viste derimot en gjennomsnittlig RF på ca. 75 %. Som følge av at vannet befinner seg i betongen, men ikke gir forventede utslag på målingene, er det rimelig å anta at porestrukturen i betongen er så fin at uttørkingen går svært sakte.

Teorien om at biokull bidrar til en tett betong styrkes av resultatene fra kapillærabsorpsjonsforsøket. Gjennomsnittlig motstandstall for en Biocrete med 60 kg biokull per  $m^3$  på  $1,05E+08$   $m/s^2$  viser at denne betongen ligger i samme område som en ordinær konstruksjonsbetong med masseforhold 0,4. Med andre ord virker det ikke som om at biokullet påvirker transporthastigheten. Sementforbruket til en B30 med biokull er i samme størrelsesorden som en vanlig B30, men likvel litt lavere som følge av at biokullet er en god meget god filler. I tillegg til dette bidrar biokullet til å få masseforholdet ned til 0,4, sammenlignet med en vanlig B30-betong som typisk har et  $v/c$ -tall på 0,54. Det vil si helt tilpasset kravet til masseforhold for M60 for CEM II B/M-sement (Standard FA). Biocrete antas dermed å være en lettere, vesentlig tettere og mer bestandig betong enn normalbetong i tilsvarende fasthetsklasser. Dette betyr igjen at biokullet tilfører betongen gode tekniske egenskaper utover den allerede dokumenterte karbonlagringen. Med nevnte bestandighetsegenskaper er ikke lenger Biocrete forbehold innendørs bruk og bruksområdet blir følgelig mye større. Det er ingen grunn til å tro at betong med biokull ikke skal kunne anvendes i eksponerte miljøer.

### 8.3 Konstruksjonsanalyse

Nedbøyings- og momentkapasitetsforsøket som ble gjennomført på Orkanger ga gode resultater på kapasiteten til Biocrete. Det var ingen overraskelser og kapasiteten til biocretedekket var ikke lavere enn forventet. Dekket med Biocrete hadde som forventet større nedbøyning underveis og gikk til brudd ved lavere punktlast enn normalbetongen. Det konkluderes med at forskjellen er et resultat av at Biocrete har lavere E-modul og trykkfasthet. Resultatene ble verifisert av SINTEF som testet blandingen brukt i forsøket. Dette er Biocrete med 60kg biokull per  $m^3$ , så ved å redusere mengden biokull noe, kan forskjellen bli enda mindre. Momentkapasiteten til biocretedekket som ble beregnet etter Eurokode 2 viste seg å være på sikker side sammenlignet med momentet som førte til brudd. Det virker dermed ikke umulig at eksisterende standarder kan benyttes til kapasitetsberegninger for Biocrete. Muligens er en korreksjonsfaktor alt som skal til, men det trengs mer data for å identifisere denne. Heftforsøket som ble gjort på de samme dekkene resulterte derimot i lav strekkfasthet for Biocrete. En strekkfasthet som er 25 % lavere enn tilsvarende verdi for en standard B25 betong.

Konstruksjonsanalysen for veggelementer viser at en vegg med Biocrete vil tåle mindre, spesielt i aksialtrykk. Biocrete med  $60 \text{ kg}/m^3$  biokull vil akkurat tilfredstille kravet til Con-Form på minimum fasthet B30 i senter og vangene, mens Biocrete med  $90 \text{ kg}/m^3$  biokull vil bli for svak. Kravet til Con-Form er dog veldig konservativt, så det å redusere fasthet for større miljøgevinst ser absolutt mulig ut.

---

## 9 Videre arbeid

Til tross for nye funn og gode resultater fra arbeidet gjort i denne rapporten er det fremdeles egenskaper og prosesser ved Biocrete som må kartlegges. Det vil være behov for videre undersøkelser av de fuktmechaniske egenskapene til både biokull og Biocrete. Frem til nå har mye av testingen blitt utført med indirekte metoder. Mer nøyaktige, direkte metoder, må tas i bruk for å få bekreftet, eller eventuelt avkreftet funn og antakelser gjort i denne, og tidligere rapporter. I tillegg stemmer ikke alle resultatene fra SINTEF og absorpsjonsforsøk overens med tidligere antakelser og resultater. Dette er avvik som må utredes og bekreftes.

Videre er det ikke gjort skjærkapasitetstester. Et forsøk der skjærkapasiteten blir dimensjonerende er derfor en naturlig vei å gå i fremtidige forsøk på dekker med Biocrete. Det er heller ikke blitt gjort noen form for fullskala kapasitetstesting av veggelementer. Her vil det være spennende å teste forskjellen mellom et Con-Form veggelement med normalbetong og et med Biocrete, og sammenligne resultatene med den teoretiske kapasiteten. Strekkfastheten ble testet, men resultatene ble dårlig og utvalget lite. Det vil være nødvendig med mer testing for å få pålitelige resultater.

Betongens brannegenskaper er fortsatt ikke testet. Branntesting skal gjennomføres, men per nå har er det usikkert når. Det er fremdeles dialog mellom prosjektgruppa og RISE AS. Resultatene fra disse forsøkene vil gi nyttig informasjon som må vurderes. Frostbestandighet har heller ikke blitt undersøkt og det er behov for å finne ut hvordan tine- og fryseprosesser påvirker Biocrete. Til tross for at plattendekkerne som ble brukt i nedbøyingsforsøket på Orkanger viste gode tendenser er det ikke gjort standardiserte tester som kan bekrefte dette. Både luftinnhold og fuktighet er parametre som kan være med på å påvirke frostbestandighet.

Karbonatiseringsforsøkene som skal gjennomføres av SINTEF er lagt til tidlig i juli 2022. Resultatene vil langt på vei kunne bekrefte eller sette spørsmålstejn ved antagelsene knyttet til den nye betongens bestandighet. Det er forventet lite karbonatisering for betongen med biokull. Dersom svarene fra testingen viser lav karbonatisering vil det forsterke antagelsen om at Biocrete er en svært tett betong. Dersom resultatene viser høy karbonatisering må dette undersøkes og forstås.

Til slutt vil det være viktig å gjennomføre en grundig økonomisk analyse som gir utbyggere en oversiktlig fremstilling av ekstra kostnader, og eventuelle gevinster, ved bruk av Biocrete.

---

## Referanser

- [1] Kvellheim, A.K. og Bramselv, K. *Betong er en del av klimaløsningen*. 2020. URL: <https://www.tu.no/artikler/betong-er-en-del-av-klimalosningen/489468> (sjekket 22.04.2022).
- [2] SINTEF. *Betong er en del av klimaløsningen*. URL: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/-betong-er-en-del-av-klimalosningen/> (sjekket 26.05.2022).
- [3] *Miljømål 5.2*. 2021. URL: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/klima/miljomal-5.2/> (sjekket 09.02.2022).
- [4] Norsk Biokullnettverk. *Hva er biokull?* URL: <https://www.biokull.info/hva-er-biokull> (sjekket 14.02.2022).
- [5] M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijikata, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, Hoegh-Guldberg O., D. Jacob og G. Zhou. «Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems». I: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Red. av Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, og T. Waterfield. 2018. Kap. 3, s. 175–311.
- [6] Byggforskserien. *Uttørking og forebygging av byggfukt*. URL: [https://www.byggforsk.no/dokument/227/uttorking\\_og\\_forebygging\\_av\\_byggfukt](https://www.byggforsk.no/dokument/227/uttorking_og_forebygging_av_byggfukt) (sjekket 11.05.2022).
- [7] Lenes, O.A og Strypet, V. *Biocrete - Karbonfangst ved bruk av biokull i betong*. Prosjektoppgave. Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, 2021.
- [8] Gjengår, P. W., Nesse, H. F. og Solheim, V. H. «Biocrete - Biokull i betong». Masteroppg. Norway: Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, 2021.
- [9] Klima. *CO2 vs. CO2e: What's the difference?* URL: <https://klima.com/blog/CO2-vs-CO2e-what-is-the-difference/> (sjekket 25.05.2022).
- [10] Norsk Biokullnettverk. *Hva er biokull?* URL: <https://www.biokull.info/produsere-biokull> (sjekket 15.02.2022).
- [11] Smeplass, S og Rasmussen, B.O. *Biocrete - karbonnøytral betong*. Power-Point presentation.
- [12] Tveiten, O. og Simpson, D.N. *Jarnvinneanlegg, kolgroper og kokegrop. Buhaugane hyttefelt på Filefjell, Lærdal kommune, Sogn Fjordane*. Tekn. rapp. 4. Bergen museum, 2008.
- [13] Toldnæs, J.P. *globale oppvarmingspotensialer*. URL: [https://snl.no/globale\\_oppvarmingspotensialer](https://snl.no/globale_oppvarmingspotensialer) (sjekket 26.05.2022).
- [14] Bjørn Ole Rasmussen, Sverre Smeplass. «Biocrete - karbonnøytral betong». Norsk betongdag. 2021.

- 
- [15] *Kan vi bruke betong med god klimasamvittighet?* 2016. URL: <https://forskning.no/bygningsmaterialer-klima/kan-vi-bruke-betong-med-god-klimasamvittighet/379248> (sjekket 07.02.2022).
- [16] EPD Norge. *epd-norge*. 2021. URL: [https://www.epd-norge.no/?lang=no\\_NO](https://www.epd-norge.no/?lang=no_NO) (sjekket 25.02.2022).
- [17] SINTEF. *Livsløpsanalyser av bygninger (LCA)*. URL: <https://www.sintef.no/ekspertise/community/livsløpsanalyser-av-bygninger/> (sjekket 25.02.2022).
- [18] Standard Norge. *NS-EN 15084:2012+A2:2019 Bærekraftige byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer*. Standard. (2012). URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1105165> (sjekket 17.03.2022).
- [19] Norcem. *Norcem og karbonfangst*. URL: <https://www.norcem.no/no/CCS> (sjekket 28.02.2022).
- [20] Regjeringen.no. *Spørsmål og svar om Langskip-prosjektet*. 2021. URL: <https://www.regjeringen.no/no/no/tema/energi/landingsider/ny-side/ccs/id2863902/?expand=factbox2864133> (sjekket 28.02.2022).
- [21] Accend. *Life Cycle Assessment calculation of CO<sub>2</sub> removal for biochar production at Oplandske Bio facility at Rudshøgda, Norway*. Teknisk rapport. 2021.
- [22] Rosvold, K.A. *GROT*. URL: <https://snl.no/GROT-.hogstavfall> (sjekket 22.03.2022).
- [23] Oplandske Bioenergi. *Biokull*. URL: <https://oplandske.no/files/biokull-fra-oplandske-bioenergi-2464.pdf> (sjekket 23.03.2022).
- [24] Torstensen, S.B. *Klimaregnskap for fjernvarme 2020*. Tekn. rapp. 34223-00005-3.0. Norsk Fjernvarme, 2020.
- [25] Geminor. *Kraftig økning i behandling og materialgjenvinning av trevirke*. URL: <https://geminor.no/2021/06/kraftig-okning-i-behandling-og-materialgjenvinning-av-trevirke/> (sjekket 23.03.2022).
- [26] SINTEF. *Unngå byggskader*. URL: <https://www.sintef.no/community/fagblogg/poster/unnga-byggskader/> (sjekket 24.05.2022).
- [27] Smeplass, S. «Betongens sammensetning, struktur og egenskaper». I: *Betong. Regelverk teknologi og utførelse*. Red. av Maage, M. Byggnæringens forlag, 2015, s. 56–78.
- [28] S.Jacobsen, M.Maage, S.Smeplass, K.O.Kjellsen, E.J.Sellevold, J.Lingård, R.Cepuritis, R.Myrdal, Ø.Bjøntegaard, M.Geiker. *Concrete Technology*. 4th. Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [29] Lindmark, S. «Nya krav avseende fukt i undergolv». I: (2020). URL: <https://static.byggjtanst.se/amadocsmed/Nya%20krav%20avseende%20fukt%20i%20undergolv.pdf> (sjekket 02.02.2022).
- [30] Byggforskserien. *Legging av myke og halvharde golvbelegg*. URL: [https://www.byggforsk.no/dokument/460/legging\\_av\\_myke\\_og\\_halfvarde\\_golvbelegg](https://www.byggforsk.no/dokument/460/legging_av_myke_og_halfvarde_golvbelegg) (sjekket 11.05.2022).
-

- 
- [31] Byggforskserien. *Legging av parkett*. URL: <https://www.byggforsk.no/dokument/466/legging-av-parkett> (sjekket 11.05.2022).
- [32] *Undergulv i et system*. 2010. URL: [http://www.dexor.se/norsk/undergulv\\_system.htm](http://www.dexor.se/norsk/undergulv_system.htm) (sjekket 04.02.2022).
- [33] Sjöberg, A. *Direktlimmat trågolvl på betongunderlag*. Tekn. rapp. TVBM-3112. Lunds Tekniske Högskola, 2003. URL: <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4715360/641847.pdf> (sjekket 09.02.2022).
- [34] Geving, S. *Fukt i betong - Målemetoder og uttørking*. Tekn. rapp. Prosjektrapport 4. SINTEF Byggforsk, 2007.
- [35] Salvesen, E.N. «Betongens rolle i brannsikre tunneler». Masteroppg. Norway: Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, 2016.
- [36] Persson, B. *Fire resistance of self-compacting concrete, SCC*. Tekn. rapp. 2004. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02483286> (sjekket 30.03.2022).
- [37] Norcem. *God betong er bestandig*. URL: <https://www.norbetong.no/no/bestandighet> (sjekket 24.05.2022).
- [38] Smeplass, S. *Kapillærabsorpsjon som kvalitetskriterium*. Tekn. rapp. STF65 A88028. SINTEF Byggforsk, 1988.
- [39] *EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. EN. Brussels: CEN, 2005.
- [40] S.I. Sørensen. *Betongkonstruksjoner-Beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. 2th. Fagbokforlaget, 2013.

# Appendix

## A Blandeskjema

### A.1 Blandeskjema Biocrete60

| Blandeskjema                  |                             |            |            |             |                 | SKANSKA |
|-------------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------------|-----------------|---------|
| Prosjekt                      | Regnearkutvikling           |            |            |             |                 |         |
| Reseptnummer                  | Resept A                    |            |            |             |                 |         |
| Tilsiktet kvalitet            |                             |            |            |             |                 |         |
| Blande volum                  | 40 liter                    |            |            |             |                 |         |
| Dato:                         |                             |            |            |             |                 |         |
| Tidspunkt for vanntilsetning: |                             |            |            |             |                 |         |
| Ansvarlig:                    |                             |            |            |             |                 |         |
| Utført av:                    |                             |            |            |             |                 |         |
| Materialer                    | Resept<br>kg/m <sup>3</sup> | Sats<br>kg | Fukt*<br>% | Korr.<br>kg | Oppveid**<br>kg |         |
| Norcem Standard FA            | 279,6                       | 11,185     |            |             | 11,185          |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      |            |             | 0,000           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      |            |             | 0,000           |         |
| Elkem Microsilica             | 14,7                        | 0,589      | 0,0        | 0,000       | 0,589           |         |
| Elkem Microsilica             | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |         |
| Normineral flyveaske          | 73,6                        | 2,944      | 0,0        | 0,000       | 2,944           |         |
| Normineral flyveaske          | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |         |
| Slagg                         | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |         |
| Fritt vann                    | 144,2                       | 5,769      |            | -1,487      | 4,282           |         |
| Absorbert vann                | 96,2                        | 3,850      |            |             | 3,850           | 8,132   |
| Årdal 0/8 mm nat. vask.       | 960,1                       | 38,403     | 3,4        | 1,306       | 39,709          |         |
| Årdal 0/2 mm nat. vask        | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |         |
| Årdal 8/16mm                  | 480,0                       | 19,202     | 0,5        | 0,096       | 19,298          |         |
| Årdal 16/22 mm                | 0,0                         | 0,000      | 0,5        | 0,000       | 0,000           |         |
| Biokull                       | 60,0                        | 2,400      | 0,0        | 0,000       | 2,400           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |         |
| Mapei Dynamon SX-N            | 2,6                         | 0,103      | 83         | 0,086       | 0,103           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      | 0          | 0,000       | 0,000           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      | 0          | 0,000       | 0,000           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      | 0          | 0,000       | 0,000           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      |            |             | 0,000           |         |
|                               | 0,0                         | 0,000      |            |             | 0,000           |         |

Source: Sverre Smeplass

## A.2 Blandeskjema Biocrete90

| Blandeskjema <span style="float: right;">SKANSKA</span> |                             |            |            |             |                 |
|---|-----------------------------|------------|------------|-------------|-----------------|
| Prosjekt  | Regnearkutvikling           |            |            |             |                 |
| Reseptnummer  | Resept A                    |            |            |             |                 |
| Tilsiktet kvalitet                                      |                             |            |            |             |                 |
| Blandevolum   | 40 liter                    |            |            |             |                 |
| Dato:   |                             |            |            |             |                 |
| Tidspunkt for vanntilsetning:                           |                             |            |            |             |                 |
| Ansvarlig:  |                             |            |            |             |                 |
| Utført av:  |                             |            |            |             |                 |
| Materialer  | Resept<br>kg/m <sup>3</sup> | Sats<br>kg | Fukt*<br>% | Korr.<br>kg | Oppveid**<br>kg |
| Norcem Standard FA                                      | 279,3                       | 11,171     |            |             | 11,171          |
|   | 0,0                         | 0,000      |            |             | 0,000           |
|   | 0,0                         | 0,000      |            |             | 0,000           |
| Elkem Microsilica                                       | 14,7                        | 0,588      | 0,0        | 0,000       | 0,588           |
| Elkem Microsilica                                       | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
| Normineral flyveaske                                    | 73,5                        | 2,940      | 0,0        | 0,000       | 2,940           |
| Normineral flyveaske                                    | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
| Slagg   | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
| Fritt vann  | 144,0                       | 5,762      |            | -1,317      | 4,445           |
| Absorbert vann  | 140,0                       | 5,599      |            |             | 5,599           |
| Årdal 0/8 mm nat. vask.                                 | 821,1                       | 32,842     | 3,5        | 1,149       | 33,992          |
| Årdal 0/2 mm nat. vask                                  | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
| Årdal 8/16mm  | 409,2                       | 16,368     | 0,5        | 0,082       | 16,450          |
| Årdal 16/22 mm  | 0,0                         | 0,000      | 0,5        | 0,000       | 0,000           |
| Biokull   | 89,8                        | 3,590      | 0,0        | 0,000       | 3,590           |
|   | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
|   | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
|   | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
|   | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
|   | 0,0                         | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
| Mapei Dynamon SX-N                                      | 2,6                         | 0,103      | 83         | 0,085       | 0,103           |
|   | 0,0                         | 0,000      | 0          | 0,000       | 0,000           |
|   | 0,0                         | 0,000      | 0          | 0,000       | 0,000           |
|   | 0,0                         | 0,000      | 0          | 0,000       | 0,000           |
|   | 0,0                         | 0,000      |            |             | 0,000           |
|   | 0,0                         | 0,000      |            |             | 0,000           |

10,044

Source: Sverre Smeplass



## B Reseptkorleksjon

### B.1 Resptkorleksjon 0 % initiell fukt

| Materialer                             | Resept            |      |       | Korrigert abs og dens |      |       | Korrigert resept  |       |
|--|-------------------|------|-------|-----------------------|------|-------|-------------------|-------|
|  | kg/m <sup>3</sup> | Dens | Volum | kg/m <sup>3</sup>     | Dens | Volum | kg/m <sup>3</sup> | Volum |
| Norcem Standard FA                     | 339               | 3000 | 113   | 339                   | 3000 | 113   | 356               | 119   |
| Elkem Microsilica                      | 18                | 2200 | 8     | 18                    | 2200 | 8     | 19                | 9     |
| Fritt vann                             | 175               | 1000 | 175   | 175                   | 1000 | 175   | 184               | 184   |
| Absorbert vann                         | 122               | 0    |       | 122                   | 0    | 0     | 128               | 0     |
| Ramlo 0/8 mm nat. vask.                | 1 159             | 2650 | 437   | 1 159                 | 2680 | 432   | 1 218             | 454   |
| Gjølme 8/16mm                          | -                 | 2670 | -     | -                     | 2800 | -     | -                 | -     |
| Gjølme 16/22 mm                        | -                 | 2800 | -     | -                     | 2800 | -     | -                 | -     |
| Biokull                                | 75                | 375  | 200   | 75                    | 475  | 158   | 79                | 166   |
| Mapei Dynamon SX-23                    | 4,5               | 1261 | 1     | 4                     | 1261 | 1     | 4,7               | 1     |
| Normineral flyveaske                   | 89,1              | 2200 | 41    | 89                    | 1000 | 20    | 93,6              | 1     |
| Luft                                   | 0                 | 0    | 20    | 0                     | 0    | 44    | -                 | 21    |
| Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> ) | 1 977             |      | 994   |                       |      | 952   | 1 985             | 954   |

|                          |       |       |
|--------------------------|-------|-------|
| Målt dens                | 1985  | 1 985 |
| Masseforhold             | 0,49  | 0,49  |
| Teoretisk vannabsorpsjon | 155 % | 155 % |
| Est. biokull < 0,125 mm  | 41 %  | 75 %  |
| Matriksvolum             | 462   | 482   |
| Vol. andel biokull       | 20 %  | 17 %  |

Source: Sverre Smeplass

### B.2 Reseptkorleksjon 50 % initiell fukt

| Materialer                             | Resept            |       |       | Korrigert abs og dens |       |       | Korrigert resept  |       |
|--|-------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------------------|-------|
|  | kg/m <sup>3</sup> | Dens  | Volum | kg/m <sup>3</sup>     | Dens  | Volum | kg/m <sup>3</sup> | Volum |
| Norcem Standard FA                     | 339               | 3000  | 113   | 339                   | 3000  | 113   | 365               | 122   |
| Elkem Microsilica                      | 18                | 2200  | 8     | 18                    | 2200  | 8     | 19                | 9     |
| Fritt vann                             | 175               | 1000  | 175   | 175                   | 1000  | 175   | 189               | 189   |
| Absorbert vann                         | 85                | 0     |       | 84                    | 0     | 0     | 91                | 0     |
| Ramlo 0/8 mm nat. vask.                | 1 159             | 2650  | 437   | 1 159                 | 2680  | 432   | 1 251             | 467   |
| Gjølme 8/16mm                          | -                 | 2670  | -     | -                     | 2800  | -     | -                 | -     |
| Gjølme 16/22 mm                        | -                 | 2800  | -     | -                     | 2800  | -     | -                 | -     |
| Biokull                                | 113               | 562,5 | 201   | 113                   | 712,5 | 159   | 122               | 171   |
| Mapei Dynamon SX-23                    | 4,5               | 1261  | 1     | 4                     | 1261  | 1     | 4,8               | 1     |
| Normineral flyveaske                   | 89,1              | 2200  | 41    | 89                    | 1000  | 20    | 96,2              | 1     |
| Luft                                   | 0                 | 0     | 20    | 0                     | 0     | 18    | -                 | 22    |
| Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> ) | 1 978             |       | 995   |                       |       | 927   | 2 040             | 981   |

|                          |      |       |
|--------------------------|------|-------|
| Målt dens                | 2039 | 2 040 |
| Masseforhold             | 0,49 | 0,49  |
| Teoretisk vannabsorpsjon | 70 % | 69 %  |
| Est. biokull < 0,125 mm  | 41 % | 75 %  |
| Matriksvolum             | 462  | 496   |
| Vol. andel biokull       | 20 % | 17 %  |

Source: Sverre Smeplass

### B.3 Reseptkorleksjon 100 % initiell fukt

| Materialer                | Resept |      |       | Korrigert abs og dens |      |       | Korrigert resept |       |
|---------------------------|--------|------|-------|-----------------------|------|-------|------------------|-------|
|                           | kg/m3  | Dens | Volum | kg/m3                 | Dens | Volum | kg/m3            | Volum |
| Norcem Standard FA        | 339    | 3000 | 113   | 339                   | 3000 | 113   | 367              | 122   |
| Elkem Microsilica         | 18     | 2200 | 8     | 18                    | 2200 | 8     | 19               | 9     |
| Fritt vann                | 175    | 1000 | 175   | 175                   | 1000 | 175   | 190              | 190   |
| Absorbert vann            | 47     | 0    |       | 47                    | 0    | 0     | 50               | 0     |
| Ramlo 0/8 mm nat. vask.   | 1 159  | 2650 | 437   | 1 159                 | 2680 | 432   | 1 255            | 468   |
| Gjølme 8/16mm             | -      | 2670 | -     | -                     | 2800 | -     | -                | -     |
| Gjølme 16/22 mm           | -      | 2800 | -     | -                     | 2800 | -     | -                | -     |
| Biokull                   | 151    | 750  | 201   | 151                   | 950  | 159   | 163              | 172   |
| Mapei Dynamon SX-23       | 4,5    | 1261 | 1     | 4                     | 1261 | 1     | 4,8              | 1     |
| Normineral flyveaske      | 89,1   | 2200 | 41    | 89                    | 1000 | 20    | 96,5             | 1     |
| Luft                      | 0      | 0    | 20    | 0                     | 0    | 15    | -                | 22    |
| Prop. betongdens. (kg/m3) | 1 978  |      | 995   |                       |      | 923   | 2 047            | 984   |

|                          |      |       |
|--------------------------|------|-------|
| Målt dens                | 2047 | 2 047 |
| Masseforhold             | 0,49 | 0,49  |
| Teoretisk vannabsorpsjon | 27 % | 27 %  |
| Est. biokull < 0,125 mm  | 41 % | 75 %  |
| Matriksvolum             | 462  | 497   |
| Vol. andel biokull       | 20 % | 17 %  |

Source: Sverre Smeplass

## C Prøving Sintef

### C.1 Blandeskjema biocrete 60

| Blandeskjema                     |                                      | SKANSKA    |            |             |                 |
|----------------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-------------|-----------------|
| Prosjekt                         | BioCrete - SINTEF-forsøk januar 2022 |            |            |             |                 |
| Reseptnummer                     | Biocrete 60                          |            |            |             |                 |
| Tilsiktet kvalitet               | B25                                  |            |            |             |                 |
| Blandevolum                      | 1000 liter                           |            |            |             |                 |
| Dato:                            |                                      |            |            |             |                 |
| Tidspunkt for vanntilsetning:    |                                      |            |            |             |                 |
| Ansvarlig:                       |                                      |            |            |             |                 |
| Utført av:                       |                                      |            |            |             |                 |
| Materialer                       | Resept<br>kg/m <sup>3</sup>          | Sats<br>kg | Fukt*<br>% | Korr.<br>kg | Oppveid**<br>kg |
| Norcem Standard FA               | 271,2                                | 271,236    |            |             | 271,236         |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      |            |             | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      |            |             | 0,000           |
| Elkem Microsilica                | 14,3                                 | 14,276     | 0,0        | 0,000       | 14,276          |
| Elkem Microsilica                | 0,0                                  | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
| Normineral flyveaske             | 71,4                                 | 71,378     | 0,0        | 0,000       | 71,378          |
| Normineral flyveaske             | 0,0                                  | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
| Slagg                            | 0,0                                  | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
| Fritt vann                       | 139,9                                | 139,901    |            | -35,553     | 104,347         |
| Absorbent vann                   | 100,2                                | 100,224    |            |             | 100,224         |
| NorStone Årdal 0/8 mm nat. vask. | 928,7                                | 928,708    | 3,5        | 32,505      | 961,213         |
| NorStone Årdal 8/16 mm A-5383    | 532,4                                | 532,429    | 0,0        | 0,000       | 532,429         |
| Biokull                          | 60,1                                 | 60,088     | 0,5        | 0,300       | 60,389          |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0,5        | 0,000       | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0,0        | 0,000       | 0,000           |
| Mapei Dynamon SX-23              | 3,6                                  | 3,569      | 77         | 2,748       | 3,569           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0          | 0,000       | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0          | 0,000       | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      | 0          | 0,000       | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      |            |             | 0,000           |
|                                  | 0,0                                  | 0,000      |            |             | 0,000           |

Source: SINTEF (2022)

## C.2 Trykkfasthet Orkanger



### 1 Prøving

SINTEF mottok 2021-07-13 åtte borkjerner med diameter 92 mm og varierende lengde fra 270 til 440 mm. Prøvene var merket "1" til "8". Det er to betongtyper med fire kjerner av samme type. Prøvene er uttatt uten SINTEFs medvirkning.

Kjernene ble lagret i vann ved 20 °C fram til prøving. Det ble tildannet ett prøvestykke med høyde lik to ganger diameter fra midtre del av hver sylinder for bestemmelse av trykkfasthet samt densitet ved veiling i luft og vann i henhold til NS-EN 12390-3/7 og for bestemmelse av E-modul i henhold til NS-EN 12390-13, Metode A.

To sylindre av hver betongtype ble trykkprøvd og for resterende sylindere ble det bestemt E-modul. Etter bestemmelse av E-modul ble disse prøvene belastet til brudd. Prøving ble utført 2021-08-10 etter 28 døgns forutgående vannlagring. Resultatene er gjengitt i Tabell 1.

Tabell 1: Prøvsresultater

| Prøve nr. | Høyde, mm | Diameter, mm | Densitet, kg/m <sup>3</sup> | E-modul, GPa   |                | Trykkfasthet, MPa |
|-----------|-----------|--------------|-----------------------------|----------------|----------------|-------------------|
|           |           |              |                             | E <sub>0</sub> | E <sub>c</sub> |                   |
| 1         | 188,1     | 94,4         | 2400                        | -              | -              | 37,4              |
| 6         | 188,7     | 94,4         | 2400                        | -              | -              | 37,4              |
| 7         | 188,1     | 94,4         | 2400                        | 28,3           | 32,4           | 36,0              |
| 8         | 188,2     | 94,4         | 2380                        | 26,4           | 30,2           | 36,9              |
| Middel    | 188,3     | 94,4         | 2395                        | 27,4           | 31,3           | 36,9              |
| 2         | 188,4     | 94,4         | 2170                        | -              | -              | 30,2              |
| 3         | 188,7     | 94,4         | 2190                        | -              | -              | 31,1              |
| 4         | 188,7     | 94,4         | 2200                        | 20,6           | 22,5           | 30,5              |
| 5         | 187,7     | 94,4         | 2180                        | 23,7           | 25,5           | 31,8              |
| Middel    | 188,4     | 94,4         | 2185                        | 22,1           | 24,0           | 30,9              |

Source: SINTEF (2022)

## C.3 Kapillærabsorpsjon skive A

### Kapillærabsorpsjon - beregning av motstandstall

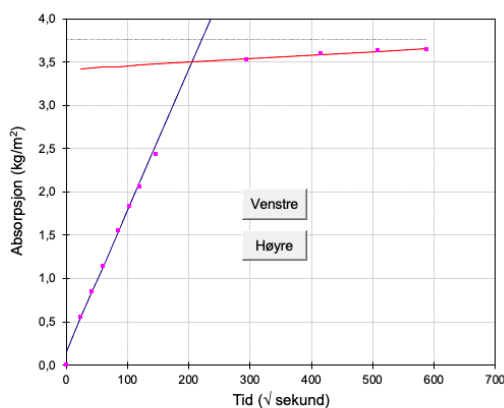
KS 14-05-04-507

Prosjekt Biocrete masteroppgave 2

SS 2012-04-26

Skive A

| Tidspunkt     | Vekt   | Absorpsjon                  | Kurvedel |
|---------------|--------|-----------------------------|----------|
| Etter saging  | 324,00 |                             |          |
| Tørket 100 °C | 324,00 |                             |          |
| 0 min         | 324,15 | 0,00                        |          |
| 10 min        | 328,31 | 0,55                        | v        |
| 30 min        | 330,63 | 0,84                        | v        |
| 1 time        | 332,99 | 1,14                        | v        |
| 2 timer       | 336,16 | 1,55                        | v        |
| 3 timer       | 338,45 | 1,84                        | v        |
| 4 timer       | 340,20 | 2,06                        |          |
| 6 timer       | 343,11 | 2,43                        |          |
| 1 døgn        | 351,69 | 3,53                        | h        |
| 2 døgn        | 352,21 | 3,59                        | h        |
| 3 døgn        | 352,55 | 3,64                        | h        |
| 4 døgn        | 352,60 | 3,64                        | h        |
| Vannmettet    | 353,54 |                             |          |
| Vekt i vann   | 194,90 |                             |          |
| Trykkmettet   | 361,06 |                             |          |
| H =           | 0,0200 | $\rho_{\text{venstre}}^2 =$ | 0,9997   |
| D =           | 0,1000 | $\rho_{\text{høyre}}^2 =$   | 0,9451   |



### Resultater

|                   |          |                        |
|-------------------|----------|------------------------|
| Motstandstall     | 1,05E+08 | [s/m <sup>2</sup> ]    |
| Kapillaritetstall | 1,71E-02 | [kg/m <sup>2</sup> √s] |
| Sugporisitet      | 18,0     | [% vol.]               |
| Åpen makropor.    | 0,6      | [% vol.]               |
| Lukket makropor.  | 4,7      | [% vol.]               |
| Faststoffdensitet | 2665     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |
| Tørredensitet     | 2042     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |

Source: SINTEF (2022)

## C.4 Kapillærabsorpsjon skive B

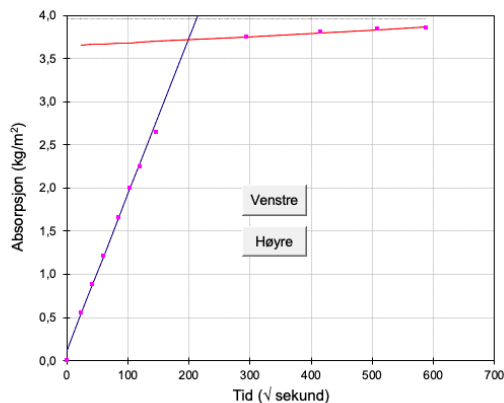
### Kapillærabsorpsjon - beregning av motstandstall

KS 14-05-04-507

SS 2012-04-26

Prosjekt Biocrete masteroppgave 2  
Skive B

| Tidspunkt     | Vekt   | Absorpsjon               | Kurvedel |
|---------------|--------|--------------------------|----------|
| Etter saging  | 316,90 |                          |          |
| Tørket 100 °C | 316,90 |                          |          |
| 0 min         | 317,06 | 0,00                     |          |
| 10 min        | 321,26 | 0,56                     | v        |
| 30 min        | 323,83 | 0,88                     | v        |
| 1 time        | 326,43 | 1,21                     | v        |
| 2 timer       | 329,91 | 1,66                     | v        |
| 3 timer       | 332,56 | 1,99                     | v        |
| 4 timer       | 334,57 | 2,25                     |          |
| 6 timer       | 337,72 | 2,65                     |          |
| 1 døgn        | 346,31 | 3,74                     | h        |
| 2 døgn        | 346,83 | 3,81                     | h        |
| 3 døgn        | 347,08 | 3,84                     | h        |
| 4 døgn        | 347,14 | 3,85                     | h        |
| Vannmettet    | 348,04 |                          |          |
| Vekt i vann   | 190,00 |                          |          |
| Trykkmettet   | 356,08 |                          |          |
| H =           | 0,0200 | $r^2_{\text{venstre}} =$ | 0,9999   |
| D =           | 0,1000 | $r^2_{\text{høyre}} =$   | 0,9333   |



#### Resultater

|                   |          |                        |
|-------------------|----------|------------------------|
| Motstandstall     | 9,88E+07 | [s/m <sup>2</sup> ]    |
| Kapillaritetstall | 1,87E-02 | [kg/m <sup>2</sup> √s] |
| Sugporøsitet      | 19,1     | [% vol.]               |
| Åpen makropor.    | 0,6      | [% vol.]               |
| Lukket makropor.  | 5,1      | [% vol.]               |
| Faststoffdensitet | 2666     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |
| Tettdensitet      | 2005     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |

Source: SINTEF (2022)

## C.5 Kapillærabsorpsjon skive C

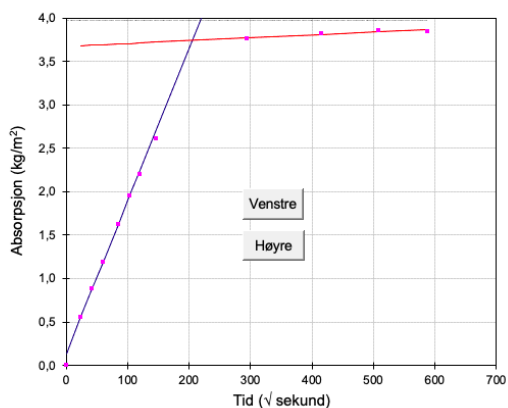
### Kapillærabsorpsjon - beregning av motstandstall

KS 14-05-04-507

SS 2012-04-26

Prosjekt Biocrete masteroppgave 2  
Skive C

| Tidspunkt     | Vekt   | Absorpsjon               | Kurvedel |
|---------------|--------|--------------------------|----------|
| Etter saging  | 319,50 |                          |          |
| Tørket 100 °C | 319,50 |                          |          |
| 0 min         | 319,64 | 0,00                     |          |
| 10 min        | 323,89 | 0,56                     | v        |
| 30 min        | 326,40 | 0,88                     | v        |
| 1 time        | 328,87 | 1,19                     | v        |
| 2 timer       | 332,28 | 1,63                     | v        |
| 3 timer       | 334,84 | 1,95                     | v        |
| 4 timer       | 336,80 | 2,20                     |          |
| 6 timer       | 340,00 | 2,61                     |          |
| 1 døgn        | 349,00 | 3,76                     | h        |
| 2 døgn        | 349,53 | 3,82                     | h        |
| 3 døgn        | 349,79 | 3,86                     | h        |
| 4 døgn        | 349,72 | 3,85                     | h        |
| Vannmettet    | 350,73 |                          |          |
| Vekt i vann   | 192,40 |                          |          |
| Trykkmettet   | 358,13 |                          |          |
| H =           | 0,0200 | $r^2_{\text{venstre}} =$ | 0,9999   |
| D =           | 0,1000 | $r^2_{\text{høyre}} =$   | 0,8415   |



#### Resultater

|                   |          |                        |
|-------------------|----------|------------------------|
| Motstandstall     | 1,05E+08 | [s/m <sup>2</sup> ]    |
| Kapillaritetstall | 1,82E-02 | [kg/m <sup>2</sup> √s] |
| Sugporøsitet      | 19,1     | [% vol.]               |
| Åpen makropor.    | 0,6      | [% vol.]               |
| Lukket makropor.  | 4,7      | [% vol.]               |
| Faststoffdensitet | 2669     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |
| Tettdensitet      | 2018     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |

Source: SINTEF (2022)

## C.6 Kapillærabsorpsjon skive D

### Kapillærabsorpsjon - beregning av motstandstall

KS 14-05-04-507

SS 2012-04-26

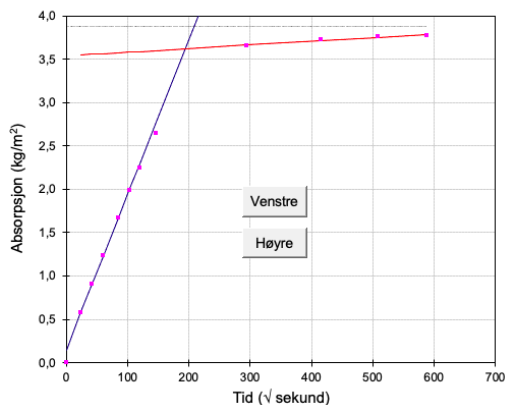
Prosjekt Biocrete masteroppgave 2

Skive D

| Tidspunkt     | Vekt   | Absorpsjon               | Kurvedel |
|---------------|--------|--------------------------|----------|
| Etter saging  | 324,30 |                          |          |
| Tørket 100 °C | 324,30 |                          |          |
| 0 min         | 324,47 | 0,00                     |          |
| 10 min        | 328,79 | 0,57                     | v        |
| 30 min        | 331,45 | 0,91                     | v        |
| 1 time        | 333,99 | 1,23                     | v        |
| 2 timer       | 337,45 | 1,67                     | v        |
| 3 timer       | 339,95 | 1,99                     | v        |
| 4 timer       | 341,98 | 2,25                     |          |
| 6 timer       | 345,10 | 2,65                     |          |
| 1 døgn        | 352,98 | 3,65                     | h        |
| 2 døgn        | 353,60 | 3,73                     | h        |
| 3 døgn        | 353,86 | 3,76                     | h        |
| 4 døgn        | 353,95 | 3,78                     | h        |
| Vannmettet    | 354,80 |                          |          |
| Vekt i vann   | 195,70 |                          |          |
| Trykkmettet   | 361,87 |                          |          |
| H =           | 0,0200 | $r^2_{\text{venstre}} =$ | 0,9995   |
| D =           | 0,1000 | $r^2_{\text{høyre}} =$   | 0,9325   |

### Resultater

|                   |          |                        |
|-------------------|----------|------------------------|
| Motstandstall     | 9,42E+07 | [s/m <sup>2</sup> ]    |
| Kapillaritetstall | 1,87E-02 | [kg/m <sup>2</sup> √s] |
| Supporisitet      | 18,6     | [% vol.]               |
| Åpen makropor.    | 0,5      | [% vol.]               |
| Lukket makropor.  | 4,4      | [% vol.]               |
| Faststoffdensitet | 2668     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |
| Tørredensitet     | 2038     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |



Source: SINTEF (2022)

## C.7 Kapillærabsorpsjon skive E

### Kapillærabsorpsjon - beregning av motstandstall

KS 14-05-04-507

SS 2012-04-26

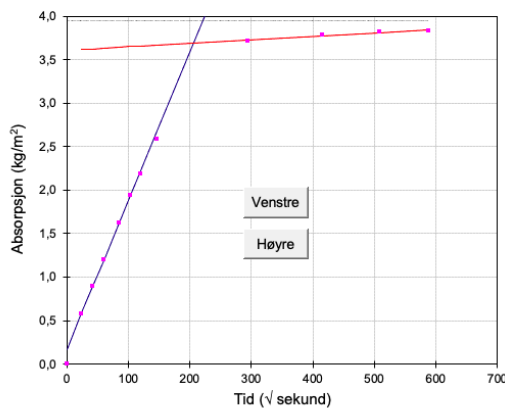
Prosjekt Biocrete masteroppgave 2

Skive E

| Tidspunkt     | Vekt   | Absorpsjon               | Kurvedel |
|---------------|--------|--------------------------|----------|
| Etter saging  | 321,10 |                          |          |
| Tørket 100 °C | 321,10 |                          |          |
| 0 min         | 321,25 | 0,00                     |          |
| 10 min        | 325,65 | 0,58                     | v        |
| 30 min        | 328,08 | 0,89                     | v        |
| 1 time        | 330,53 | 1,20                     | v        |
| 2 timer       | 333,87 | 1,63                     | v        |
| 3 timer       | 336,30 | 1,94                     | v        |
| 4 timer       | 339,24 | 2,18                     |          |
| 6 timer       | 341,40 | 2,58                     |          |
| 1 døgn        | 350,31 | 3,72                     | h        |
| 2 døgn        | 350,84 | 3,79                     | h        |
| 3 døgn        | 351,10 | 3,82                     | h        |
| 4 døgn        | 351,24 | 3,84                     | h        |
| Vannmettet    | 352,09 |                          |          |
| Vekt i vann   | 194,10 |                          |          |
| Trykkmettet   | 359,22 |                          |          |
| H =           | 0,0200 | $r^2_{\text{venstre}} =$ | 0,9998   |
| D =           | 0,1000 | $r^2_{\text{høyre}} =$   | 0,9668   |

### Resultater

|                   |          |                        |
|-------------------|----------|------------------------|
| Motstandstall     | 1,06E+08 | [s/m <sup>2</sup> ]    |
| Kapillaritetstall | 1,79E-02 | [kg/m <sup>2</sup> √s] |
| Supporisitet      | 19,1     | [% vol.]               |
| Åpen makropor.    | 0,5      | [% vol.]               |
| Lukket makropor.  | 4,5      | [% vol.]               |
| Faststoffdensitet | 2679     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |
| Tørredensitet     | 2032     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |



Source: SINTEF (2022)

## C.8 Kapillærabsorpsjon skive F

### Kapillærabsorpsjon - beregning av motstandstall

KS 14-05-04-507

SS 2012-04-26

Prosjekt Biocrete masteroppgave 2

Skive F

| Tidspunkt | Vekt | Absorpsjon | Kurvedel |
|-----------|------|------------|----------|
|-----------|------|------------|----------|

|               |        |
|---------------|--------|
| Etter saging  | 329,00 |
| Tørket 100 °C | 329,00 |

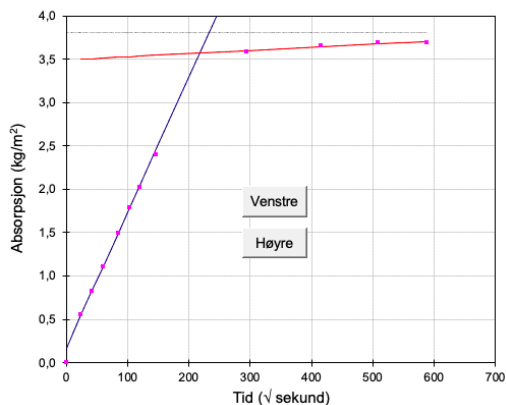
| Tid     | Vekt   | Absorpsjon | Kurvedel |
|---------|--------|------------|----------|
| 0 min   | 329,18 | 0,00       |          |
| 10 min  | 333,34 | 0,55       | v        |
| 30 min  | 335,47 | 0,82       | v        |
| 1 time  | 337,70 | 1,11       | v        |
| 2 timer | 340,75 | 1,50       | v        |
| 3 timer | 343,05 | 1,79       | v        |
| 4 timer | 344,86 | 2,02       |          |
| 6 timer | 347,82 | 2,40       |          |
| 1 døgn  | 357,19 | 3,59       | h        |
| 2 døgn  | 357,72 | 3,66       | h        |
| 3 døgn  | 357,98 | 3,69       | h        |
| 4 døgn  | 358,02 | 3,69       | h        |

|             |        |
|-------------|--------|
| Vannmettet  | 358,91 |
| Vekt i vann | 199,50 |
| Trykkmettet | 365,97 |

|     |        |                          |        |
|-----|--------|--------------------------|--------|
| H = | 0,0200 | $r^2_{\text{venstre}} =$ | 0,9999 |
| D = | 0,1000 | $r^2_{\text{høyre}} =$   | 0,9232 |

#### Resultater

|                   |          |                        |
|-------------------|----------|------------------------|
| Motstandstall     | 1,19E+08 | [s/m <sup>2</sup> ]    |
| Kapillaritetstall | 1,64E-02 | [kg/m <sup>2</sup> √s] |
| Supporøsitet      | 18,2     | [% vol.]               |
| Åpen makropor.    | 0,6      | [% vol.]               |
| Lukket makropor.  | 4,4      | [% vol.]               |
| Faststoffdensitet | 2687     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |
| Tørredensitet     | 2064     | [kg/m <sup>3</sup> ]   |



Source: SINTEF (2022)

## C.9 Kapillærabsorpsjon skive A-F

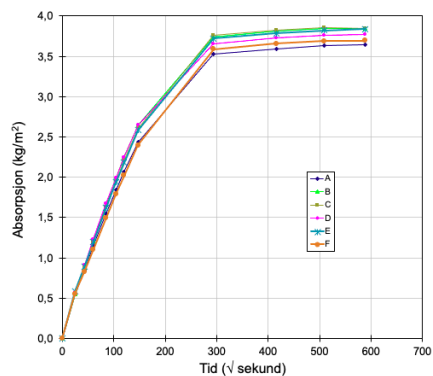
### Kapillærabsorpsjon

KS 14-05-04-507

SS 2012-04-26

|          |                             |  |
|----------|-----------------------------|--|
| Prosjekt | Biocrete masteroppgave 2022 |  |
|----------|-----------------------------|--|

| Størrelse             | Middelverdier                     | Var. koeff. / std.av.       |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Motstandstall         | 1,05E+08 [s/m <sup>2</sup> ]      | 7,9 %                       |
| Kapillaritetstall     | 1,78E-02 [kg / m <sup>2</sup> √s] | 5,2 %                       |
| Supporøsitet          | 18,7 [% vol.]                     | 2,6 %                       |
| Åpen makroporøsitet   | 0,6 [% vol.]                      | 6,8 %                       |
| Lukket makroporøsitet | 4,6 [% vol.]                      | 5,4 %                       |
| PF-verdi (samlet)     | 0,19                              | -                           |
| Faststoffdensitet     | 2672,4 [kg / m <sup>3</sup> ]     | 8,7 [kg / m <sup>3</sup> ]  |
| Tørredensitet         | 2033,3 [kg / m <sup>3</sup> ]     | 20,3 [kg / m <sup>3</sup> ] |



Source: SINTEF (2022)





---

## E LCA-rapport biokull



Life Cycle Assessment and calculation of CO<sub>2</sub> removal for biochar production at Oplandske Bio facility at Rudshøgda, Norway

Version 1.0

Date 19.10.21

accend



## Important information

This report has been prepared on behalf of Oplandske Bio by the author, Accend AS. The rights to the information herein are held by the owner, Oplandske Bio. Copying and distribution of the contents are not permitted without the owner's permission. Accend has prepared the report to ascertain the net CO<sub>2</sub> sequestration of biochar produced by Oplandske Bio. The report contains a carbon footprint calculation for the biochar product using the life cycle assessment approach in accordance with ISO 14067, where applicable.

Disclaimer: The author has taken every reasonable care to ensure that the contents are an accurate and fair representation of the product's carbon footprint, based upon the received production data and using industry best practice. However, the author disclaims all responsibility for the consequences of actions taken by any third party, directly or indirectly, based on the information in this report. The report has not been 3rd party verified.

## Contents

|   |    |
|---|----|
| Important information .....   | 3  |
| List of Figures .....   | 5  |
| Abbreviations .....   | 6  |
| Glossary of terms .....   | 7  |
| 1. Introduction .....   | 8  |
| 2. Compliance with Puro methodology.....                                | 9  |
| 3. System .....   | 10 |
| 4. Feedstock Analysis .....   | 10 |
| a. Goal and scope.....  | 12 |
| b. System Boundary .....  | 12 |
| c. Carbon content calculation.....                                      | 14 |
| d. Quantity of biochar .....  | 14 |
| e. Carbon content .....   | 14 |
| f. Emissions from raw materials. (EPD Module A1) .....                  | 15 |
| g. Pile emissions (EPD Module A1) .....                                 | 15 |
| h. Transport emissions (EPD Module A2).....                             | 15 |
| i. Emissions from the manufacturing of the biochar (EPD Module A3)..... | 16 |
| j. List of emissions factors .....                                      | 17 |
| k. Allocation and cut-offs .....  | 17 |
| l. Results .....  | 18 |
| 7. References.....  | 20 |

## List of Figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 Oplandske Bio production site .....  | 8  |
| Figure 2 System diagram. Source: Biomacon.....  | 10 |
| Figure 3 Woodchips used as feedstock.....   | 11 |
| Figure 4 System boundary.....   | 13 |
| Figure 5 CO <sub>2</sub> removal formula.....   | 14 |
| Figure 6 Process emissions in metric tons CO <sub>2</sub> e from materials, transport and manufacturing A1-A3. Metric tons CO <sub>2</sub> e..... | 18 |
| Figure 7 Process emissions by type and share of total. ....   | 18 |
| Figure 8 Pathway from gross to net embodied CO <sub>2</sub> . Metric tons CO <sub>2</sub> e .....   | 19 |

## Abbreviations

|                    |  |
|--------------------|--|
| EPDs               | Environmental Product Declarations   |
| GHG                | Greenhouse gases   |
| GWP                | Global Warming Potential   |
| GWP <sub>Bio</sub> | Carbon dioxide only released from the combustion of biogenic materials (eg wood) |
| ISO                | International Organization for Standardization                                   |
| Kg                 | kilogram   |
| KWh                | Kilowatt hour  |
| LCA                | Life Cycle Assessment  |
| LCI                | Life Cycle Inventory   |
| LCIA               | Life Cycle Impact Assessment   |
| m                  | meters   |
| m <sup>3</sup>     | cubic meters   |
| MC                 | moisture content   |
| MJ                 | megajoule  |
| tonkm              | metric ton – kilometers  |
| PEFC               | Programme for the Endorsement of Forest Certification                            |

## Glossary of terms

**Allocation** – A way of dividing emissions and resource use among the different products of a process. The partitioning can be made on weight basis, energy content, or economic value.

**Cradle-to-gate** – LCA model which includes upstream part of the product life cycle, i.e. all steps from raw material extraction to product at factory gate.

**Declared Unit** - Quantity of a wood building product for use as a reference unit, e.g. mass, volume, for the expression of environmental information needed in information modules.

**Functional unit** – expresses the function of studied product in quantitative terms and serves as basis for calculations. It is the reference flow to which other flows in the LCA are related. It also serves as a unit of comparison in comparative studies.

**Life cycle assessment (LCA)** – Method for the environmental assessment of products covering their lifecycle from raw material extraction to waste treatment

**Life cycle impact assessment (LCIA)** – Phase of an LCA study during which the environmental impacts of the product are assessed and evaluated.

**System boundary** – A set of criteria that specifies which processes are part of a product.

**Global warming potential (GWP)** - GWP is a method to compare the global climate change effects of different GHGs to that of CO<sub>2</sub>.



## 1. Introduction

Oplandske Bio is a Norwegian bioenergy company from the Opland region. They operate district heat, local heat and process heat operations based on renewable biomass from the region. In 2021 Oplandske Bio commenced operation of the first industrial-scale pyrolysis plant in Norway at Rudshøgda in the municipality of Ringsaker.

The biochar manufacturing facility sells hot water as a bi-product to a large meat processing facility located adjacently. The facility was purpose-built and is very modern and highly automated.

The woodchips that are used as feedstock are sourced from a nearby forestry company and are PEFC certified. The transport distance to the facility is less than 2km. The wood chips are loaded directly into the automatic buffer, the feedstock is dried using heat from pyrolysis before entry into the biochar reactor.

The production facility attained the EBC sustainable biochar certification this year. They produce biochar for sale as animal feed and as soil improvement for agricultural and urban environments.



*Figure 1 Oplandske Bio production site*

The period of this LCA study is 1<sup>st</sup> January 2021- 31<sup>st</sup> August 2021. During this period, the company produced 130 dry metrics ton of biochar. The company has plans to scale up operations at the site given that they are able sell the biochar, heat and carbon removals.

This report is concerned only with the biochar's CO<sub>2</sub> sequestration potential and with the lifecycle greenhouse gas emissions attributable to the production of the biochar. Any emissions reductions due to the use of biochar

are not quantified as part of this study. Data sources are the Ecoinvent 3.6 database for upstream emissions factors, 3<sup>rd</sup> party LCA studies of the feedstock, Bionova's LCA tool, LCA data from comparable operations, sales and feedstock data from the company and chemical analyses of the biochar and exhaust gases by independent third-party laboratories.

## 2. Compliance with Puro methodology

The production of biochar by Oplandske Bio is performed in accordance with the eligibility requirements for the Puro biochar methodology and the EBC. Paragraph references to the requirements detailed in Puro CO<sub>2</sub> removal marketplace general rules, version 2.0, annex 1 are included in parentheses.

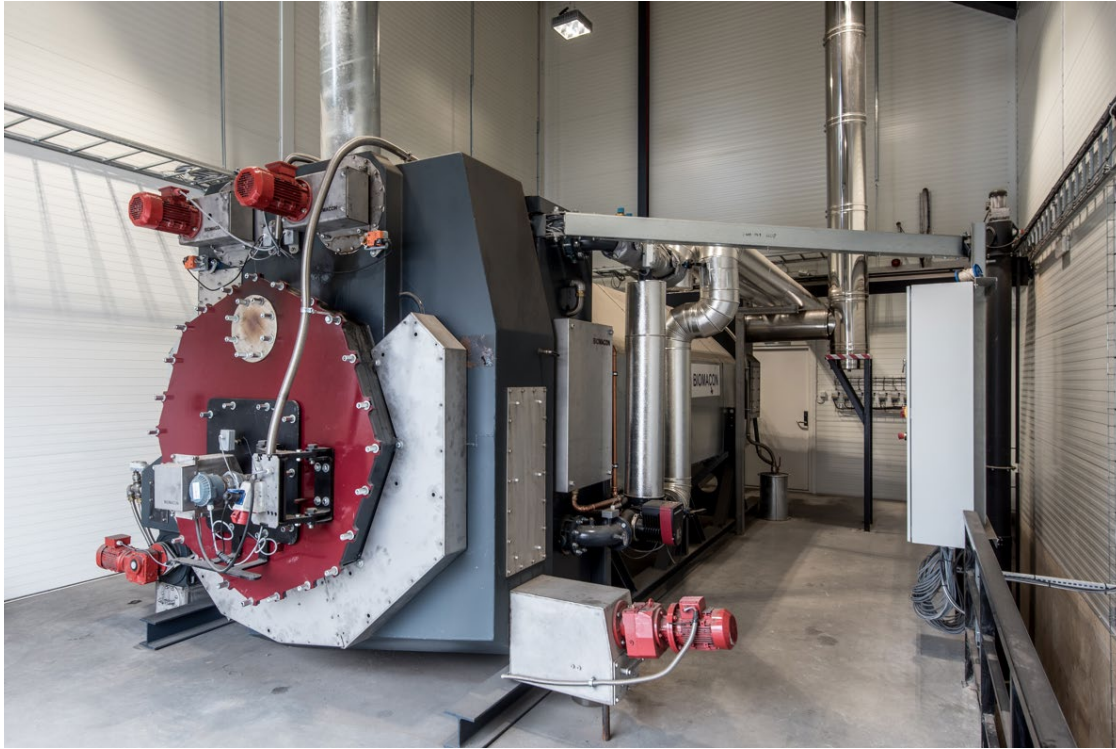
- The produced biochar is not used for energy purposes. Biochar produced during the period has been marketed and sold for agriculture and for soil improvement. (§1.1.1)
- The feedstock consists exclusively of wood chips. Feedstock supply for the wood chips is well documented and PEFC sustainably certified. (§1.1.2-4)
- The facility is EBC certified. Using the Cradle-to-gate approach, the following emissions have been accounted for: Harvesting of the wood, chipping, transport of woodchips to the production site, and the manufacturing of the biochar on site. (§1.1.5)
- Pyrolysis gases are captured and combusted within the reactor to maintain the carbonization process. (§1.1.6-8). Remaining gases are combusted and exhausted. The exhaust emissions have been analyzed and quantified.
- The produced biochar has a high, stable carbon content. The lab analysis demonstrated a carbon content of 92% in the dry state, which corresponds to the gross capture of 3,359 Kg/Kg (§1.1.9)
- The produced biochar has a H/Corg molar ratio of 0,12, well below the 0,7 threshold (§1.1.10)
- The O/Corg molar ratio is calculated to be 0,03, well below the 0,4 threshold. (§1.1.11) and below 0,2, meaning that the 2,5% buffer is used in the CORC Calculation.
- Oplandske Bio has implemented appropriate measures to ensure the safe storage and transport of the biochar. They can provide a material safety data sheet for transport and storage. (§1.1.12)
- The potential for methane emissions from stockpiling of wet feedstock onsite and at the supplier has been considered in accordance with the criteria of the EBC.<sup>1</sup> There are no emissions from feedstock storage.
- The potential for fugitive release of syngas from pyrolysis is considered negligible.

---

<sup>1</sup> [https://www.european-biochar.org/media/doc/2/c\\_en\\_sink-value\\_2-1.pdf](https://www.european-biochar.org/media/doc/2/c_en_sink-value_2-1.pdf)

### 3. System

Figure 2 shows the reactor Oplandske Bio uses to convert the feedstock to outputs. The Biomacon industrial converter has a wood chip loading capacity of 238 kg/h with a yield of 20% on dry mass and can produce up to 64 kg/h of biochar.



*Figure 2 Biochar reactor, Biomacon C400.*

Oplandske Bio are in 24/7 operation. Heat is used for drying the incoming feedstock from approximately 30% moisture down to around 15%. Excess heat is sold in the form of hot water to the neighbouring factory.

### 4. Feedstock Analysis

Oplandske Bio used 1012 tons of wet feedstock during the period. They source wood chips from PEFC certified spruce forests as feedstock. The main supplier is Glommen Mjøsen Skog SA, located at Rudshøgda, Norway. They are delivered by closed truck, the transport distance is less than 2km.



*Figure 3 Woodchips used as feedstock*

The supplier has given written confirmation that the woodchips are produced continuously according to the customer's need and that the normal turnover rate of the woodchips is 1-2 weeks. On site the chips are held for maximum 3 days before drying and consumption.

## 5. Life Cycle Assessment

Lifecycle assessment (LCA) is an internationally accepted method to analyze complex impacts and outputs of a product or process and the corresponding effects they might have on the environment. LCA is an objective process to evaluate a product's life cycle by identifying and quantifying energy and materials used and wastes released to the environment; to assess the impact of those energy and materials uses and releases on the environment, and to evaluate and implement opportunities to effect environmental improvements. LCA studies can evaluate full product life cycles, often referred to as "cradle to grave", or incorporate only a portion of the products life cycle, referred to as "cradle-to-gate", or "gate-to-gate". This study can be categorized as a cradle-to-gate LCA as it considers the impacts from forestry to shipping of the biochar.

The LCIA process characterizes and assesses the effects of environmental releases identified in the LCI into impact categories such as global warming, acidification, carcinogenics, respiratory effects, eutrophication, ozone depletion, ecotoxicity, and smog.

### a. Goal and scope

The Global warming impact category is the only one considered in this report. A calculation of the carbon footprint of the biochar has been carried out in accordance with ISO 14044 and 14067, where applicable. The declared unit is 1 metric ton (1000 Kg) of biochar. The primary goal is to generate a cradle-to-gate product global warming footprint, documenting the carbon capture of the biochar produced at Oplandske Bio. The primary audience for the results of this report is Oplandske Bio, Puro.Earth marketplace, and third-party auditors and potential carbon certificate buyers. The report does not include product use and end of life phases, which are required for comparative assertions relative to substitute products.

### b. System Boundary

The system boundary is defined using the "cradle to gate" approach A1-A3, figure 4. The process of wood harvesting, chipping, transport, drying, the energy and the exhaust emissions have been included in the system boundary. After production, emissions related to the transport of biochar to the destination are excluded from the system boundary. Capital equipment, transportation of employees, construction, maintenance, use of the biochar have been excluded from the boundary. The system boundary of this study accords to the Puro earth requirements.

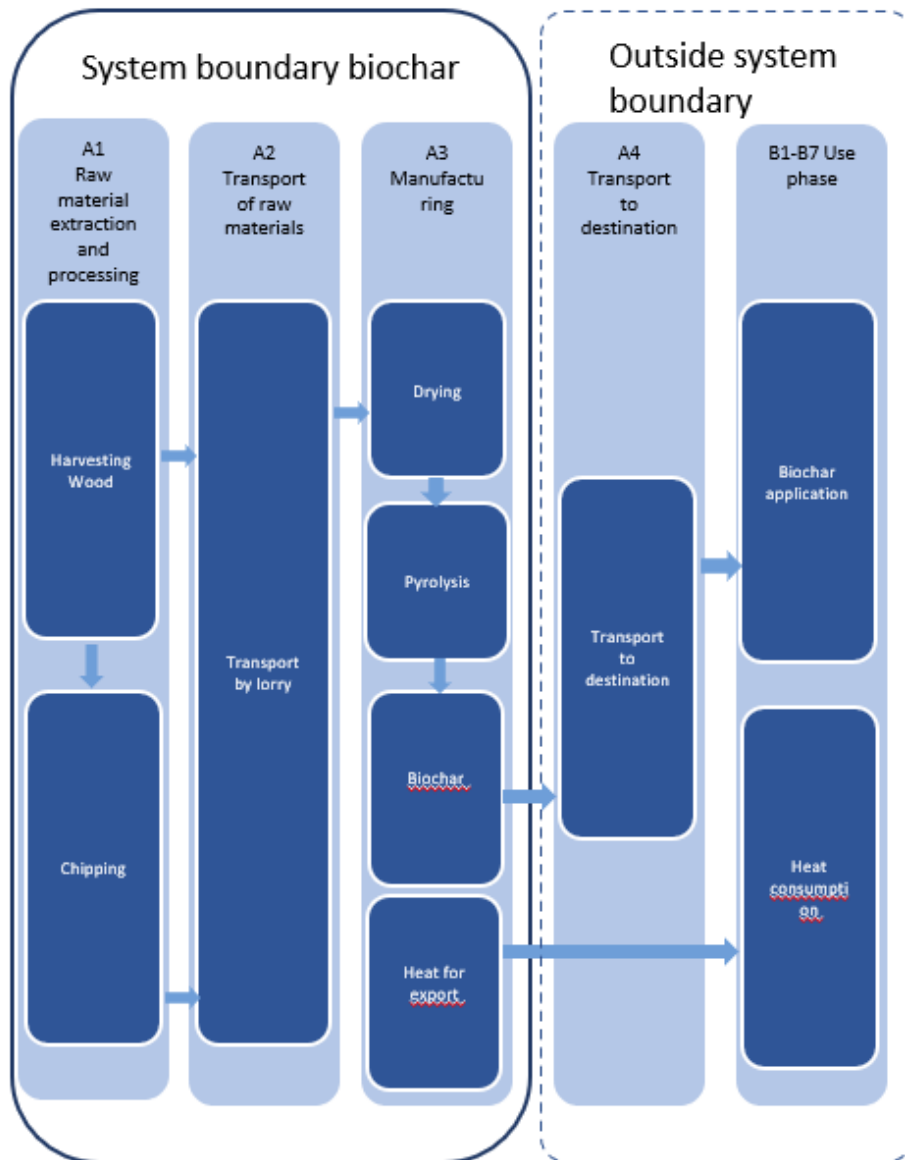


Figure 4 System boundary

### c. Carbon content calculation

The CO<sub>2</sub> removal potential of the biochar is derived using the formula:

The quantity of biochar produced and sold to non-energy users is multiplied with the carbon content of the biochar, taking into account the buffer for uncertainty, from which we subtract the emissions from the biochar production.

Afterwards, from the production process variables, the emissions from harvesting the raw material, including the possible loss of sinks, and the emissions from the transport of the raw material(s) to the production facility are deducted. Finally, the result is the amount of available CORCs.

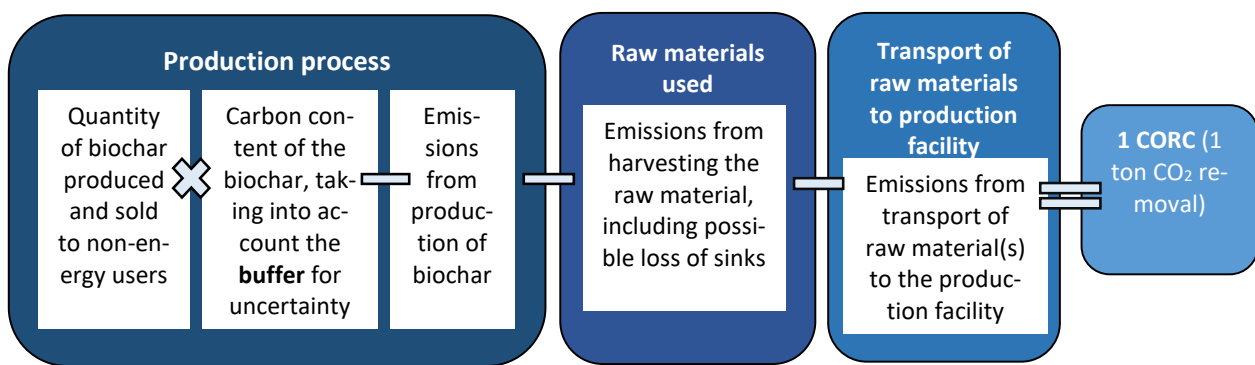


Figure 5 CO<sub>2</sub> removal formula<sup>2</sup>

### d. Quantity of biochar

141 metric tons of biochar were produced in the period 1<sup>st</sup> January 2021 – 31<sup>st</sup> August 2021. The bags are weighed immediately after production. This ensures that the atmospheric moisture does not impact the measurement. To ascertain the dry weight of the biochar, the moisture content has been deducted. Analysis shows that the moisture content of the biochar is 8%<sup>3</sup>. The quantity of dry biochar produced during the period is 130 metric tons.

### e. Carbon content

The carbon content of the biochar was measured at 92%, in the dry state<sup>4</sup>. The stability of the carbon content can be ascertained using the molar O/C<sub>org</sub> ratio. The maximum oxygen content was calculated by excluding other elements, and the maximum molar O/C ratio of 0.03 determined. The lower safety buffer of 2.5% from the Puro methodology is therefore applied. The stable CO<sub>2</sub> content, taking into account the safety buffer, is 3,275 metric kg/kg (1 declared unit) of output.

<sup>2</sup> Puro CO<sub>2</sub> removal marketplace general rules, annex 1

<sup>3</sup> Eurofins analysis done for Oplandske Bio, AR-21-MM-043096-01, 23.04.2021

<sup>4</sup> Eurofins analysis done for Oplandske Bio, AR-21-MM-043096-01, 23.04.2021

#### f. Emissions from raw materials. (EPD Module A1)

Analysis shows that 5.1 tons of dry wood chips were required to produce 1 dry ton of biochar during the study period. The calculation of the emissions from the forestry and harvesting of the wood chip includes loss of sinks. The data source is "Valente, C., Spinelli, R., Hillring, B. G., & Solberg, B. (2014). Mountain forest wood fuel supply chains: Comparative studies between Norway and Italy. *Biomass and Bioenergy*, 71, 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.09.018>". This LCA study was performed on data from the same supplier. The additional process steps of chipping has been added using an industry-standard factor for diesel-powered chipping.

The analysis shows that 33,90 tons of CO<sub>2</sub>e emissions are caused by the woodchips used to produce the biochar during the period. This amounts to 211 kg CO<sub>2</sub>e/unit.

In addition, the emissions related to the production of the packaging have been accounted for. Oplandske Bio uses big bags made from polypropylene for the storage and transportation of the output. The emissions related to the production of these bags are calculated using a global emission set from Ecoinvent 3.6 for polypropylene.

The packing emissions amount to 12.6 kg CO<sub>2</sub>e/unit..

Overall emissions from raw materials are **223 kg CO<sub>2</sub>e/unit.**

#### g. Pile emissions (EPD Module A1)

Wood chips are stored in moist form for less than one month at the supplier or at the production facility combined. Therefore, no pile emissions have been calculated in accordance with guidelines from Puro.earth and the EBC.

#### h. Transport emissions (EPD Module A2)

The wood chips are transported by freight trucks. The distance from the supplier, Glommen Mjøsen Skog SA to the facility location in Rudshøgda is very short, only 2km. Greenhouse gases emissions from feedstock transport represent **1,1 kg** per declared unit of output. The emissions factor 0.0901 kg CO<sub>2</sub>e/tonkm from Ecoinvent 3.6 has been used.

In addition, the emissions related to the production of the packaging have been accounted for. Oplandske Bio uses big bags made from polypropylene for the storage and transportation of the output. The emissions related to the production of these bags are calculated using a global emission set from Ecoinvent 3.6 for polypropylene. The transport distance is 234 kilometres. Emissions related to the transport amount **0,0019** m tonnes CO<sub>2</sub>e/unit, whilst the emissions related to the production of the bags is **0,0098** m tonnes of CO<sub>2</sub>e/unit.

Total transport emissions (EPD Module A2) amount to **0,002 tons CO<sub>2</sub>e** per unit of biochar.



i. Emissions from the manufacturing of the biochar (EPD Module A3)

The pyrolysis reactor re-uses the syngas to maintain heat but uses a small amount of electric power for its mechanical operation. 458 kWh of electricity are used for each ton of dry biochar. Emissions related to electricity consumption have been calculated using the national grid mix for Norway, which is primarily hydropower. Emissions from the consumption of electricity amount to only 8.6 kg CO<sub>2</sub>e per dry metric ton of biochar.

Oplandske Bio commissioned an exhaust gas analysis in May 2021<sup>5</sup>. CO<sub>2</sub> emissions are considered to be carbon neutral, the report also measures methane, which is included in the LCI. The report shows a rate of 0,02Kg CH<sub>4</sub>/hour. Using GWp100<sup>6</sup> the methane emissions amount to under 4 grams CO<sub>2</sub>e/unit of biochar.

In addition, Oplandske Bio used a diesel-powered loader for 5 months of the study period using 939 liters of diesel.

The total emissions related to the manufacturing of the biochar (EPD Module A3) are **34.5 kg CO<sub>2</sub>e/unit** of biochar.

---

<sup>5</sup> Teknisk Rapport, Oplandske Bioenergi, Konesjonsmåling 2021

<sup>6</sup> IPCC, 2015, Global warming potential values.

j. List of emissions factors

| Module | Inputs                  | LCI Data source | Geography      | Year | Data Quality Assessment |
|--------|-------------------------|-----------------|----------------|------|-------------------------|
| A1     | Wood chips              | Ecoinvent 3.6   | Norway/global  | 2014 | Good                    |
| A1     | Polypropylene for bags  | Ecoinvent 3.6   | Global         | 2019 | Average                 |
| A2     | Transport of wood chips | Ecoinvent 3.6   | EU             | 2019 | Average                 |
| A2     | Transport of bags.      | Ecoinvent 3.6   | EU             | 2019 | Average                 |
| A3     | Electricity.            | Ecoinvent 3.6   | Norway         | 2019 | Good                    |
| A3     | Methane emissions       | Measurement     | Plant specific | 2021 | Excellent               |
| A3     | Diesel                  | Ecoinvent 3.6   | Global         | 2019 | Average                 |

k. Allocation and cut-offs

Emissions have been allocated to the biochar and the heat sold to the neighbouring factory based on energy. The heat energy is metered out from the reactor, and the energy supplied to the chip drier is metered, the remaining heat is assumed to be exported to the nearby factory, outside the system boundary. The energy content of the biochar has been estimated using industry standard values for wood-based biochar. The resulting emissions allocation key is 81% to the biochar and 19% to the heat.

If the mass/energy of a flow is less than 1% of the model flow's cumulative mass/energy, it may be excluded, provided its environmental relevance is minor. All energy and mass flows from the primary data have been allocated to the LCA for biochar. Material and energy inputs related to the construction of the facility have been excluded from the system boundary.

## I. Results

The emissions from the production process of one unit (one metric ton) of biochar are **0.26** metric tons. Figures 8 and 9 show the breakdown into the process stages.

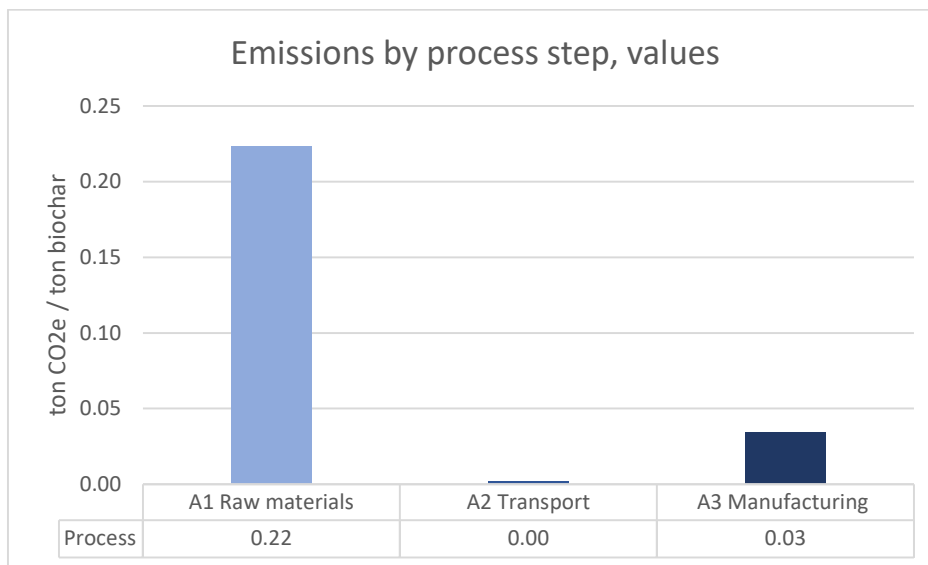


Figure 6 Process emissions in metric tons CO<sub>2</sub>e from materials, transport and manufacturing A1-A3. Metric tons CO<sub>2</sub>e

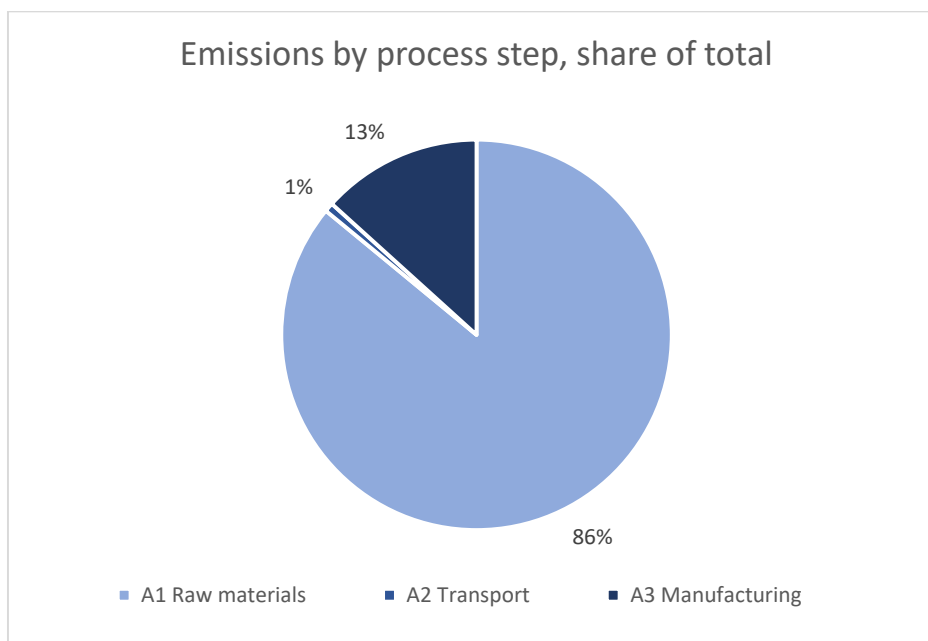


Figure 7 Process emissions by type and share of total.

From the laboratory analysis of the biochar’s physical qualities, the gross sequestration of CO<sub>2</sub> is 3.275 metric tons/unit. Using the formula in figure 6, after the 0.26 tons of emissions per unit has been deducted, the net CO<sub>2</sub> sequestration per metric ton of dry biochar, and the factor used to calculate Puro CO<sub>2</sub> removal certificates (CORCs) is **3.01**.

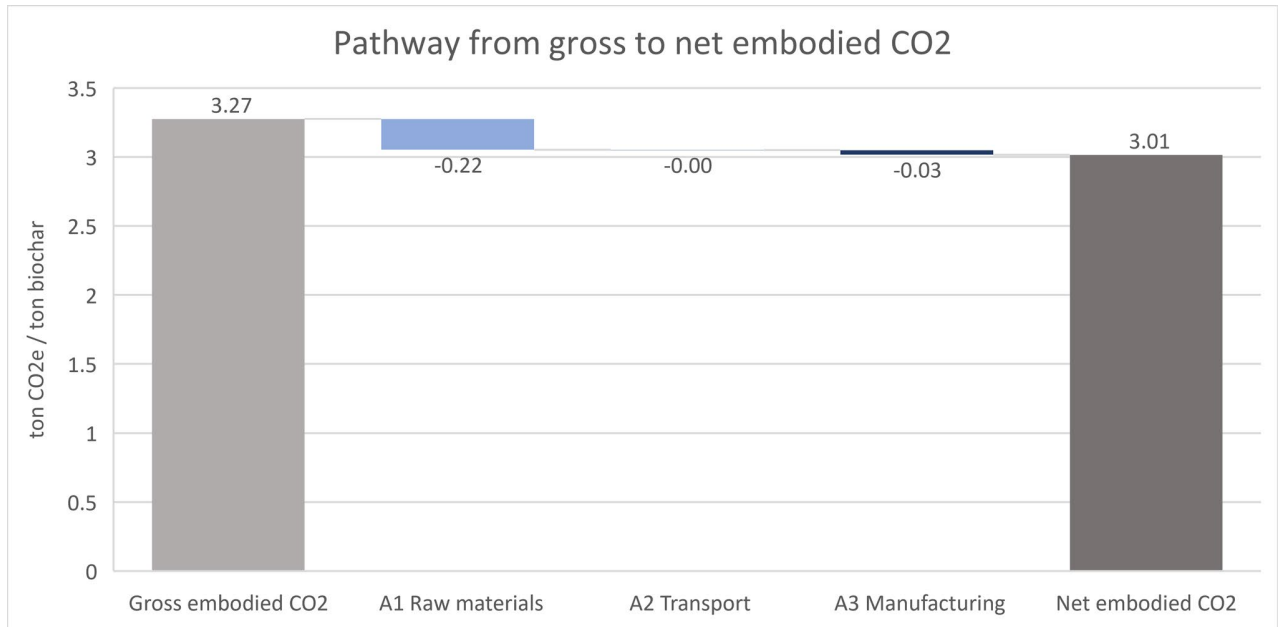


Figure 8 Pathway from gross to net embodied CO<sub>2</sub>. Metric tons CO<sub>2</sub>e

## 7. References

*2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories — IPCC.*

(n.d.). <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>

EBC. (n.d.). The European Biochar Certificate (EBC). [https://www.european-biochar.org/media/doc/2/c\\_en\\_sink-value\\_2-1.pdf](https://www.european-biochar.org/media/doc/2/c_en_sink-value_2-1.pdf)

EBC. (n.d.). The European Biochar Certificate (EBC). [https://www.european-biochar.org/media/doc/2/positivliste\\_en\\_2021.pdf](https://www.european-biochar.org/media/doc/2/positivliste_en_2021.pdf)

Environmental Resources Trust, Michael Gillenwater, World Resources Insti, & World Business Council for Sustainable development. (2005, July). *CALCULATION TOOL FOR DIRECT EMISSIONS FROM STATIONARY COMBUSTION*. Greenhouse Gas Protocol | . [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/Stationary\\_Combustion\\_Guidance\\_final\\_1.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/Stationary_Combustion_Guidance_final_1.pdf)

(n.d.). forests.org. [https://forests.org/wp-content/uploads/2015\\_2019StandardsandRulesSection2Oct2015.pdf](https://forests.org/wp-content/uploads/2015_2019StandardsandRulesSection2Oct2015.pdf)

IPCC. (2015). *Global Warming Potential Values*. Greenhouse Gas Protocol | . [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29\\_1.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf)

- ISO 14064. (2019). Greenhouse gases. Quantification and reporting of greenhouse gas emissions for organizations. Guidance for the application of ISO 14064-1. <https://doi.org/10.3403/30206679u>
- ISO 14067. (2018). Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification and communication. <https://doi.org/10.3403/30244913>
- Spinelli, R., & Magagnotti, N. (2014). Determining long-term chipper usage, productivity and fuel consumption. *Biomass and Bioenergy*, 66, 442-449. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.04.016>
- Trefokuks, Treteknisk. (2011). *Fokus på Tre - Gran*. Hjem | Treteknisk. <https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-28.pdf>
- Typical calorific values of fuels*. (n.d.). Forest Research. <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/fthr/biomass-energy-resources/reference-biomass/facts-figures/typical-calorific-values-of-fuels>
- Valente, C., Spinelli, R., Hillring, B. G., & Solberg, B. (2014). Mountain forest wood fuel supply chains: Comparative studies between Norway and Italy. *Biomass and Bioenergy*, 71, 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.09.018>

Puro.Earth. (2020). [https://static.puro.earth/live/uploads/tinymce/Puro\\_Documents/Puro-Rules-CO2-removal-marketplace\\_v2.0\\_final.pdf](https://static.puro.earth/live/uploads/tinymce/Puro_Documents/Puro-Rules-CO2-removal-marketplace_v2.0_final.pdf)

*Typical calorific values of fuels.* (n.d.). Forest Research. <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/fthr/biomass-energy-resources/reference-biomass/facts-figures/typical-calorific-values-of-fuels>

(n.d.). Welcome to GOV.UK. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/47732/7309-cca-draft-technical-guidance-app-b.xls](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/47732/7309-cca-draft-technical-guidance-app-b.xls)

World Resources Institute, & World Business Council for Sustainable Development. (n.d.). *A Corporate Accounting and Reporting Standard. Greenhouse Gas Protocol* | <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>

Teknisk Rapport, Oplandske Bioenergi, Konesjonsmåling 2021

Biomaccon C400-I Information sheet

Eurofins analysis done for Oplandske Bio, AR-21-MM-043096-01, 23.04.2021

---

**F EPD Biocrete**



# ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

in accordance with ISO 14025, ISO 21930 and EN 15804

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Eier av deklarasjonen:            | Betong Øst AS                                  |
| Programoperatør:                  | Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner |
| Utgiver:                          | Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner |
| Deklarasjonsnummer:               | NEPD-1471-490-NO                               |
| Publiseringsnummer:               | Ikke tildelt                                   |
| ECO Platform registreringsnummer: | Ikke tildelt                                   |
| Godkjent dato:                    |  |
| Gyldig til:                       | 22.04.2027                                     |

## Orkanger\_ Biocrete D16 Std-FA

Betong Øst AS

**BETONG ØST**

[www.epd-norge.no](http://www.epd-norge.no)



## Generell informasjon

**Produkt:**

Orkanger\_ Biocrete D16 Std-FA

**Programoperatør:**

Næringslivets stiftelse for Miljødeklarasjoner  
Pb. 5250 Majorstuen, 0303 Oslo  
Phone: +47 23 08 80 00  
e-post: [post@epd-norge.no](mailto:post@epd-norge.no)

**Deklarasjonsnummer:**

NEPD-1471-490-NO

**ECO Platform registreringsnummer:****Deklarasjonen er basert på PCR:**

EN 15804:2012+A1:2013 tjener som kjerne-PCR  
NPCR 020:2018 Part B for Concrete and concrete elements

**Erklæring om ansvar:**

Eieren av deklarasjonen skal være ansvarlig for den underliggende informasjon og bevis. EPD Norge skal ikke være ansvarlig med hensyn til produsent informasjon, livsløpsvurdering data og bevis.

**Deklarert enhet:**

1 m3 Orkanger\_ Biocrete D16 Std-FA

**Deklarert enhet med opsjon:**

A1,A2,A3,A4,C1,C2,C3,C4,D

**Funksjonell enhet:****Generelt om verifikasjon av EPD fra verktøy:**

Uavhengig verifikasjon av data, annen miljøinformasjon og EPD er foretatt etter ISO 14025:2010, kapittel 8.1.3 og 8.1.4. Individuell tredjepartsverifisering av hver EPD er ikke nødvendig når verktøyet er i) integrert i bedriftens miljøstyringssystem, ii) prosedyrer for bruk av verktøyet er godkjent av EPD-Norge og iii) prosessen granskes årlig. Se vedlegg G i EPD-Norges retningslinjer for ytterligere informasjon om EPD-verktøy.

**Verifikasjon av EPD-verktøy:**

Uavhengig tredjepartsverifikasjon av verktøy, bakgrunnsdata og test-EPD er gjort i henhold til EPD-Norge sine prosedyrer og retningslinjer for verifisering og godkjenning av EPD-verktøy.

Anne Rønning, Norsus AS

(krever ikke signatur)

**Eier av deklarasjonen:**

Betong Øst AS  
Kontaktperson: Stefan Skjæret  
Telefon: 62 88 81 11  
e-post: [post@betongost.no](mailto:post@betongost.no)

**Produsent:**

Betong Øst AS  
Postboks 1223 2206 Kongsvinger  
Norway

**Produksjonssted:**

Betong Øst AS - Orkanger  
Norway

**Kvalitet/Miljøsystem:**

NS-EN ISO 14001: 2004 S-022

**Org. no.:**

976 076 850

**Godkjent dato:****Gyldig til:**

22.04.2027

**Årstall for studien:**

2020

**Sammenlignbarhet:**

EPD av byggevarer er nødvendigvis ikke sammenlignbare hvis de ikke samsvarer med NS-EN 15804 og ses i en bygningskontekst.

**Miljødeklarasjonen er utarbeidet av:**

Deklarasjonen er utarbeidet og verifisert ved bruk av EPDverktøy lca.tools ver EPD2020.11, utviklet av LCA.no AS. EPDverktøyet er integrert i bedriftens miljøstyringssystem, og godkjent av EPD-Norge

EPD er utarbeidet av:

Svein Erling Nisja

Bedriftsspesifikke data og EPD er kontrollert av:

Stefan Skjæret

**Godkjent:**

Sign

Håkon Hauan, Daglig leder EPD-Norge

## Produkt

### Produktbeskrivelse:

### Tekniske data:

### Produktspesifikasjon:

### Markedsområde:

### Levetid, produkt:

### Levetid, bygg:

| Materialer | kg      | %     |
|------------|---------|-------|
| Cement     | 279,90  | 13,90 |
| Aggregate  | 1440,00 | 71,51 |
| Water      | 203,00  | 10,08 |
| Chemicals  | 2,60    | 0,13  |
| SCM        | 88,30   | 4,38  |
| Totalt     | 2013,80 |       |

## LCA: Beregningsregler

### Deklarert enhet:

1 m3 Orkanger\_ Biocrete D16 Std-FA

### Cut-off kriterier:

Alle viktige råmaterialer og all viktig energibruk er inkludert. Produksjonsprosessen for råmaterialene og energistrømmer som inngår med veldig små mengder (mindre enn 1%) er ikke inkludert. Disse cut-off kriteriene gjelder ikke for farlige materialer og stoffer.

### Allokering:

Allokering er gjort iht. bestemmelser i EN 15804. Inngående energi og vann, samt produksjon av avfall i egen produksjon er allokert likt mellom alle produktene gjennom masseallokering. Miljøpåvirkning og ressursforbruk for primærproduksjonen av resirkulerte materialer er allokert til det opprinnelige produktsystemet. Bearbeidingsprosessen og transport av materialet til produksjonssted er allokert til analysen i denne EPDen.

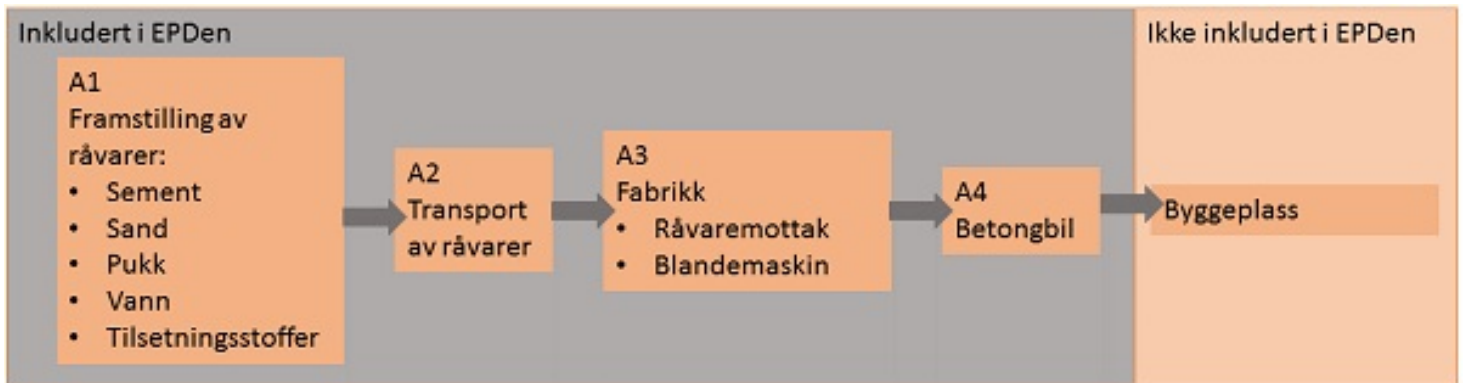
### Datakvalitet:

Spesifikke data for produktsammensetningen er fremskaffet av produsenten. De representerer produksjonen av det deklarete produktet og ble samlet inn for EPD-utvikling i det oppgitte året for studien. Bakgrunnsdata er basert på registrerte EPDer i henhold til EN 15804, Østfoldforskning sine databaser, ecoinvent og andre LCAdatabaser. Datakvaliteten for råmaterialene i A1 er presentert i tabellen nedenfor.

| Materials | Source                        | Data quality | Year |
|-----------|-------------------------------|--------------|------|
| Aggregate | Modified EcoInvent            | Database     | 2012 |
| SCM       | TI, Denmark                   | EPD          | 2013 |
| Aggregate | Østfoldforskning              | Database     | 2016 |
| Cement    | NEPD 211, 15                  | EPD          | 2016 |
| Water     | ecoinvent 3.4                 | Database     | 2017 |
| SCM       | ecoinvent 3.6                 | Database     | 2019 |
| Chemicals | NEPD-2690-1394-EN / S-P-02803 | EPD          | 2021 |

## Systemgrenser:

Flytskjemaet nedenfor illustrerer systemgrensene for analysen:



## Teknisk tilleggsinformasjon

**LCA: Scenarier og annen teknisk informasjon**

Følgende informasjonen beskriver scenariene for modulene i EPDen.

**Transport fra produksjonssted til bruker (A4)**

| Type     | Kapasitetsutnyttelse inkl retur % | Kjøretøytype           | Distanse km | Brennstoff/Energi forbruk | Enhet | Verdi (l/t) |
|----------|-----------------------------------|------------------------|-------------|---------------------------|-------|-------------|
| Bil      | 53,0 %                            | Concrete truck, EURO 6 | 1           | 0,020216                  | l/tkm | 0,01        |
| Jernbane |                                   |                        |             |                           | l/tkm |             |
| Båt      |                                   |                        |             |                           | l/tkm |             |
| Annet    |                                   |                        |             |                           | l/tkm |             |

..

## LCA: Resultater

LCA resultatene er presentert under for den deklarerde enheten som er definert på side 2 av EPD dokumentet.

### Systemgrenser (X=inkludert, MND=modul ikke deklareret, MNR=modul ikke relevant)

| Product stage |           |             |           | Construction installation stage  | User stage |             |            |              |            |                         |                       |             | End of life stage |                   |                            |   | Beyond the system boundaries |
|---------------|-----------|-------------|-----------|----------------------------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------------------|-----------------------|-------------|-------------------|-------------------|----------------------------|---|------------------------------|
| Råmaterialer  | Transport | Tilvirkning | Transport | Konstruksjons/ installasjonsfase | Bruk       | Vedlikehold | Reparasjon | Utskiftinger | Renovering | Operasjonell energibruk | Operasjonell vannbruk | Demontering | Transport         | Avfallsbehandling | Avfall til sluttbehandling | Gjenbruk/gjenvinning/resirkulering-potensiale |                              |
| A1            | A2        | A3          | A4        | A5                               | B1         | B2          | B3         | B4           | B5         | B6                      | B7                    | C1          | C2                | C3                | C4                         | D   |                              |
| X             | X         | X           | X         | MND                              | MND        | MND         | MND        | MND          | MND        | MND                     | MND                   | X           | X                 | X                 | X                          | X   |                              |

### Miljøpåvirkning (Environmental impact)

| Parameter | Unit                                 | A1       | A2       | A3       | A4       | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
|-----------|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----|----|----|----|---|
| GWP       | kg CO <sub>2</sub> -eq               | 1,80E+02 | 1,11E+01 | 4,62E+00 | 8,52E-02 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| ODP       | kg CFC11 -eq                         | 3,29E-06 | 2,21E-06 | 8,32E-07 | 1,61E-08 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| POCP      | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq | 2,77E-02 | 2,21E-03 | 9,34E-04 | 1,51E-05 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| AP        | kg SO <sub>2</sub> -eq               | 5,08E-01 | 5,44E-02 | 3,32E-02 | 3,00E-04 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| EP        | kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq | 5,69E-02 | 8,84E-03 | 7,16E-03 | 6,24E-05 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| ADPM      | kg Sb -eq                            | 9,43E-05 | 1,87E-05 | 6,08E-06 | 1,88E-07 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| ADPE      | MJ                                   | 1,01E+03 | 1,75E+02 | 6,74E+01 | 1,30E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |

GWP Global warming potential; ODP Depletion potential of the stratospheric ozone layer; POCP Formation potential of tropospheric photochemical oxidants; AP Acidification potential of land and water; EP Eutrophication potential; ADPM Abiotic depletion potential for non fossil resources; ADPE Abiotic depletion potential for fossil resources

"Leseeksempel 9,0 E-03 = 9,0\*10<sup>-3</sup> = 0,009"

\*INA Indicator Not Assessed

## Ressursbruk (Resource use)

| Parameter | Unit           | A1       | A2       | A3       | A4       | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------|----|----|----|----|---|
| RPEE      | MJ             | 1,88E+02 | 2,62E+00 | 3,11E+01 | 2,00E-02 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| RPEM      | MJ             | 1,62E+01 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,12E-03 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| TPE       | MJ             | 2,04E+02 | 2,62E+00 | 3,11E+01 | 2,61E-02 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| NRPE      | MJ             | 1,01E+03 | 1,79E+02 | 6,98E+01 | 1,33E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| NRPM      | MJ             | 1,11E-01 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| TRPE      | MJ             | 1,01E+03 | 1,79E+02 | 6,98E+01 | 1,33E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| SM        | kg             | 1,26E+02 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| RSF       | MJ             | 2,23E+01 | 0,00E+00 | 5,32E-03 | 0,00E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| NRSF      | MJ             | 1,91E+02 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| W         | m <sup>3</sup> | 2,41E+00 | 3,47E-02 | 5,30E-02 | 1,18E-03 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |

RPEE Renewable primary energy resources used as energy carrier; RPEM Renewable primary energy resources used as raw materials; TPE Total use of renewable primary energy resources; NRPE Non renewable primary energy resources used as energy carrier; NRPM Non renewable primary energy resources used as materials; TRPE Total use of non renewable primary energy resources; SM Use of secondary materials; RSF Use of renewable secondary fuels; NRSF Use of non renewable secondary fuels; W Use of net fresh water

"Leseeksempel 9,0 E-03 = 9,0\*10<sup>-3</sup> = 0,009"

\*INA Indicator Not Assessed

## Livsløpets slutt - Avfall (End of life - Waste)

| Parameter | Unit | A1       | A2       | A3       | A4       | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
|-----------|------|----------|----------|----------|----------|----|----|----|----|---|
| HW        | kg   | 7,67E-04 | 9,06E-05 | 3,89E-05 | 1,01E-06 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| NHW       | kg   | 3,64E+01 | 1,17E+01 | 2,19E+01 | 1,32E-01 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| RW        | kg   | INA*     | INA*     | INA*     | INA*     | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |

HW Hazardous waste disposed; NHW Non hazardous waste disposed; RW Radioactive waste disposed

"Leseeksempel 9,0 E-03 = 9,0\*10<sup>-3</sup> = 0,009"

\*INA Indicator Not Assessed

## Livsløpets slutt - Utgangsfaktorer (End of life - Output flow)

| Parameter | Unit | A1       | A2       | A3       | A4       | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
|-----------|------|----------|----------|----------|----------|----|----|----|----|---|
| CR        | kg   | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| MR        | kg   | 3,31E-01 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| MER       | kg   | 7,49E-02 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| EEE       | MJ   | INA*     | INA*     | INA*     | INA*     | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |
| ETE       | MJ   | INA*     | INA*     | INA*     | INA*     | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 |

CR Components for reuse; MR Materials for recycling; MER Materials for energy recovery; EEE Exported electric energy; ETE Exported thermal energy

"Leseeksempel 9,0 E-03 = 9,0\*10<sup>-3</sup> = 0,009"

\*INA Indicator Not Assessed

## Norske tilleggskrav

### Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

Nasjonal produksjonsmix fra import, lavspenning (inkludert produksjon av overføringslinjer, i tillegg til direkte utslipp og tap i nett) er brukt for anvendt elektrisitet i produksjonsprosessen (A3). Bakgrunnsdata er presentert i tabellen under. Karakteriseringsfaktorer fra EN15804:2012+A1:2013 er benyttet.

| Elektrisitetsmix     | Datakilde     | Mengde | Enhet         |
|----------------------|---------------|--------|---------------|
| El-mix, Norway (kWh) | ecoinvent 3.4 | 31,04  | g CO2-ekv/kWh |

### Farlige stoffer

Produktet er ikke tilført stoffer fra REACH Kandidatliste eller den norske prioritetslisten.

### Inneklima

## Bibliografi

NS-EN ISO 14025:2010 Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III  
 NS-EN ISO 14044:2006 Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Krav og retningslinjer  
 NS-EN 15804:2012+A1:2013 Bærekraftig byggverk - Miljødeklarasjoner  
 ISO 21930:2017 Sustainability in buildings and civil engineering works  
 ecoinvent v3, Allocation, cut-off by classification, Swiss Centre of Life Cycle Inventories .  
 Iversen et al., (2018) eEPD v3 .0 - Background information for EPD gen. system. LCA.no OR 04.18  
 Vold et al. (2014) EPD-generator for betongindustrien, bakgrunnsinformasjon for verifisering, OR 04.14, Østfoldforskning,  
 NPCR Part A: Construction products and services. Ver. 1.0. April 2017, EPD-Norge.

|   |   |  |
|---|---|--|
|   | <b>Programoperatør og utgiver</b><br>Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner<br>PostBoks 5250 Majorstuen, 0303 Oslo, Norge | Telefon: +47 23 08 80 00<br>e-post: post@epd-norge.no<br>web: www.epd-norge.no               |
|   | <b>Eier av deklarasjon</b><br>Betong Øst AS<br>Postboks 1223 2206 Kongsvinger   | Telefon: 62 88 81 11<br>e-post: post@betongost.no<br>web: www.betongost.no                   |
|  | <b>Forfatter av livsløpsrapporten</b><br>Østfoldforskning AS<br>Stadion 4 1671 Kråkerøy   | Telefon: +47 69 35 11 00<br>e-post: post@ostfoldforskning.no<br>web: www.ostfoldforskning.no |
|  | <b>Utvikler av EPD-generator</b><br>LCA.no AS<br>Dokka 1C 1671 Kråkerøy   | Telefon: +47 916 50 916<br>e-post: post@lca.no<br>web: www.lca.no                            |



