

Betong med høy flyveaskedosering

Frederic Aarnæs Hermansen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: januar 2018

Hovedveileder: Sverre Smeplass, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk



MASTEROPPGAVE 2017

FAGOMRÅDE:
Betongteknologi

DATO:
17.01.2018

ANTALL SIDER:
109 + vedlegg

TITTEL:

Betong med høy flyveaskedosering
Concrete with high dosages of fly-ash

UTFØRT AV:

Frederic Aarnæs Hermansen



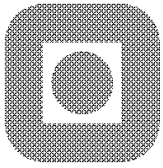
SAMMENDRAG:

Opggaven har gjennom ulike laboratorieforsøk gjort målinger av betong- og mørtel sammensetninger med en høy flyveaskedosering, i området 50-80% av total bindemiddelmengde. Tilfredsstillende fasthetsutvikling og støpelighet har vært førende ved utformingen av reseptene. Det er også foretatt tester ved bruk av alkalisk aktivering, og oppgaven berører derfor temaer omkring alkaliske aktiverte materialer, hybrid betong og ulike bindemiddelsystemer. Dette studiet har vist at det fortsatt foreligger store begrensinger ved bruk av aktivatorer under vanlige herdeforhold, både av støpelighets- og herdetekniske hensyn. Fravær av kjemiske tilsetninger gir også svært trege betonger i tidlig fase, men kan få stor hjelp av en reduksjon i masseforhold. Høy flyveaskedosering, og et lavt masseforhold har derfor vist relativt gode langtids styrkeeffekter, og gunstige porøsitetmålinger. Bestandighetsbetraktninger og proporsjoneringskrav gitt gjennom standarden, gir likevel store begrensinger ved bruken av slike sammensetninger. Miljøgevinsten av disse er derimot åpenbar, noe miljødeklarasjonene av de enkelte betongreseptene viser.

FAGLÆRER: Prof. II Sverre Smeplass

VEILEDER(E): Prof. II Sverre Smeplass

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk



INSTITUTT FOR KONSTRUKSJONSTEKNIKK
Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi
NTNU – Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet

MASTEROPPGAVE 2017

for stud. techn.
Frederic Aarnæs Hermansen

Betong med høy flyveaskedosering
Concrete with high dosages of fly ash

Innledning

Betong-bindemidler med høye doseringer flyveaske gir gunstige GWP-verdier. Dagens betongstandard forutsetter at flyveaske kan betraktes som et pozzolant materiale, dvs. at silikainnholdet i flyveasken reagerer med kalkoverskuddet som oppstår når portland-sementen hydratiserer. Dette er utgangspunktet for de doseringsbegrensningene som ligger i standarden.

Flyveasken har imidlertid en kjemisk sammensetning som gjør at den kan betraktes som et eget hydraulisk bindemiddel som kan aktiveres ved tilførsel av alkalier. Reaksjons-kinetikken er i hovedsak kjent, og betraktes gjerne som en form for polymerisering. Dersom vi øker flyveaskeinnholdet i betong utover det som er gitt som maksimumsbegrensning i standarden ser vi at vi får et betydelig styrkebidrag, som må skyldes slik polymerisering. Reaksjonskinetikken har gitt navnet til rent flyveaskebaserte betonger, som kalles geopolymere. Geopolymere er ikke regulert gjennom standardverket, dette gir i praksis en tung begrensning ved bruken av slike materialer.

Oppgave

Oppgaven går ut på å studere de parameterne som kan brukes for å styre sluttfastheten og fasthetsutviklingen i betonger med høy flyveaskedosering, dvs. vann/bindemiddelforhold, sement og flyveaskedosering, evt. tilskudd av alkalier og evt. andre virkemidler. Som utgangspunkt for dette laboratoriearbeidet skal det gjennomføres et enkelt litteratursøk for å finne kilder som beskriver reaksjonskinetikken for geopolymere og betonger med høy flyveaskedosering.

Betongstandardens begrensning av flyveaskedosering er delvis relatert til usikkerhet om betongens bestandighetsegenskaper. Det hører derfor med til oppgaven å studere bestandighetsrelaterte egenskaper hos flyveaskebaserte betonger, spesielt oppnådd porevolum og porestørrelsesfordeling.

Byggeprosjektet Powerhouse Brattøra skal bruke betonger med høy flyveaskedosering i bunnplate og dekker. Dekkene skal støpes i løpet av høst/vinter 2017/2018. Disse konstruksjonsdelene skal forspennes, og det er viktig at betongen har en relativ rask fasthetsutvikling, slik at oppspenning av dekkene ikke begrenser framdriften i prosjektet. Det hører med til oppgaven å verifisere resepttekniske og byggetekniske tiltak for å sikre tilstrekkelig fasthetsutvikling, og begrense negative effekter av betongens temperaturfølsomhet.

Gjennomføring

Oppgaven utføres ved Institutt for konstruksjonsteknikk i samarbeid med Skanska Norge AS. Gjennomføringen av oppgaven skal tilpasses de ressursene som stilles til disposisjon.

Oppgaven er utlevert 24. august 2017. Besvarelsen skal innleveres innen 17. januar 2018.

Trondheim 22. august 2017.

Sverre Smeplass
Prof. II

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet høsten 2017 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Oppgaven dekker 30 studiepoeng og er registrert under faget TKT4925 Betongteknologi, ved Institutt for konstruksjonsteknikk. Besvarelsen er utarbeidet i samarbeid med Skanska Norge AS. Prosjektoppgaven fra våren 2017 omhandlende lavkarbonbetong i etteroppspente dekker har mye av den samme tematikken, og tar for seg mange av de problemstillingene som denne oppgaven ønsker å besvare.

Masteroppgaven har til hensikt å gi svar på hvilke egenskaper i betong som er å finne i sammensetninger med høy flyveaskedosering, og hvordan dette endrer en del forutsetninger for bruken av disse. Det er i første rekke miljøgevinsten ved slike betonger som er motivasjonen for et slikt arbeid. Derfor har Powerhouse Brattørkaia og Gullhaug Torg vært viktige referanseprosjekter, og lagt rammene for oppgavens innhold. Ulike prosjekterings- og byggetekniske krav har vært førende for mange av de betongparameterne som studeres i oppgaven, og som de praktiske arbeidene ved laboratoriet ønsker å besvare. Resultater fra forsøkene har også satt betingelsene for hvilken retning oppgaven har tatt.

Opgavens nærhet til betongnæringen gjennom Skanska sine byggeprosjekter har gitt et verdifullt innblikk i de praktiske sidene ved betongarbeid. Dette har gitt en spennende tverrfaglig tilnærming til arbeidet, i kombinasjon med det tunge fagmiljøet jeg har hatt mulighet til å lene meg på ved instituttet og SINTEF.

Jeg vil begynne med å rette en særlig takk til Sverre Smeplass, professor II og sjefsrådgiver ved betongteknologiavdelingen i Skanska Teknikk. Han har fungert som min veileder, både under prosjektoppgaven og masteroppgaven, og har vært en avgjørende tilrettelegger og bidragsyter for gjennomføringen av oppgaven i sin helhet. Hans smittende engasjement og inkluderingen jeg har fått i pågående byggeprosjekter, har vært en viktig motivasjon for arbeidet.

Jeg vil fortsette med å få takke Steinar Seehuus og Ove Loraas, ingeniør og avdelingsingeniør ved Institutt for konstruksjonsteknikk, som har hjulpet meg med gjennomføringen av de mange forsøkene. Enten det skulle være luftmålinger av fersk betong, eller trykksetting av prøver gjennom PF-metoden. De praktiske arbeidene hadde ikke vært mulig uten gode råd, og en hjelpende hånd fra disse to.

En stor takk til førsteamanuensis Klaartje De Weerd og professor Harald Justnes som har gitt meg innsikt i sementkjemi, geopolymer og effekter av kjemiske tilsetninger i sement og betong. Begge har holdt døren oppe for mine mange henvendelser, og gitt meg oppriktige svar på selv de mest opplagte spørsmål. En videre takk til Agnar Løbakk fra Unicon, og Tom Fredvik fra Norcem, som jeg i tide og utide har henvendt meg til over mail. Utarbeidelsen av miljødeklarasjoner og informasjon omkring flyveaske har vært til god hjelp for oppgaven.

En avsluttende takk til det uforholdsmessige varme støpelaboratoriet som har holdt svetten gående, og kroppsforbrenningen på et hensiktsmessig nivå under de mange timene jeg har tilbrakt der. Uten varmen og de mange støpeseansene ville ikke de ukentlige inntakene av vafler, kaker og kaffe på kontoret vært helsemessig forsvarlig.



Frederic Aarnæs Hermansen

Trondheim, januar 2018

Sammendrag

Fleksibel og miljøvennlig utforming av byggekonstruksjoner setter høye krav til prosjektering og utførelse av nye bolig- og næringsbygg. Dette engasjerer hele byggets livsløp, og ikke kun brukerfasen som tradisjonelt sett har stått i fokus. Dette kan avdekke betydelig ressursbruk knyttet til materialer og produksjonen av disse. Bæresystem av betong er et godt eksempel i så måte, og vil kunne dominere både bygningsvolumet, og tilhørende miljøbelastning knyttet til energiforbruk og klimagassutslipp.

Powerhouse Brattørkaia og Futurebuilt Gullhaug Torg er en av flere representanter for miljøvennlig, og bærekraftig prosjektering i Norge. Bæresystemet skal i begge prosjektene utføres med etterspente flatdekker, der slankhet og fleksibilitet spiller en viktig rolle. For å optimalisere dekkene ytterligere med hensyn på reduksjon i energi- og klimagassavtrykk er det ønskelig med en lavkarbonbetong. Her må også herdetekniske og støpelighetsmessige egenskaper tilfredsstilles, i kraft av det som kreves av en etterspent plassenbetong. Det er valgt en betongsammensetning med høy flyveaskedosering for dette formålet. Oppgaven tar derfor for seg betong- og mørtelsammensetninger med 50, 60, 70 og 80% flyveaskeinnhold. Sammen med målinger av fasthetsutvikling og konsistensegenskaper har bestandighet, proporsjoneringskrav gjennom standarden, og en mer inngående kunnskap om alkalisk aktiverte materialer vært nødvendig å studere nærmere. Ved flyveaskedoserings opp mot 70-80% av total bindemiddelandel har alternative aktiveringsmetoder vært aktuelt. Oppgaven har derfor gjennomført støp med kjemiske aktivatorer tilsatt, inneholdende natriumhydroksid og natriumsilikat.

Gjennom porøsitetmålinger er det avdekket en del fysiske karakteristikk som gir et bedre grunnlag for å vurdere de bestandighetsrelaterte egenskapene i betong. Her viste flyveaskedoserings på 50 og 60% høye verdier av motstandstallet. Det vil si en betong med lav permeabilitet, og en mer lukket porestruktur. Dette gir en antydning om gode forutsetninger for å håndtere ulike nedbrytende mekanismer i betong, uten at dette lar seg påvise direkte i oppgaven. På tross av dette fremstår karbonatisering fortsatt som den mest problematiske, og er en effekt som er særlig utfordrende i flyveaskebetonger. Gjennom en analyse av de enkelte betongreseptene har denne oppgaven vist at ingen vil tilfredsstille kravene for en M90 betong, i henhold til det nasjonale tillegget for NS-EN 206. Dette setter i praksis en tung begrensning ved bruken av slike betongtyper, på tross av at det tilsynelatende foreligger få argumenter som kan forsvare et slikt regelverk, under den aktuelle eksponeringsklassen X0.

Betong med høy flyveaskedosering påvirker reaksjonskinetikken i betongen, og gir et tregt herdeforløp med liten varmeutvikling. Et redusert bidrag fra den eksoterme hydratiseringen av OPC gjør at tilfredsstillende fasthetsutvikling i tidlig fase er krevende. Dette er en svakhet i flyveaskebaserte betonger, og kommer særlig til syne ved 1, 2 og 3 døgns fasthetstesting. Av produksjons- og fremdriftsmessige årsaker er det ønskelig at betongen tidlig opparbeider seg god nok styrke før oppspenning. Den nødvendige trykkfastheten på 25 MPa etter 3 døgn, viser at dette ikke er mulig for noen av reseptene i denne oppgaven. En viss forbedring er observert ved redusert masseforhold, og spesielt ved bruk av aktivatorer som ga økte fasthetsverdier etter de første 24 timene. Disse effektene har likevel vært begrenset, og ingen resepter nådde høyere enn halvparten av den nødvendige styrken etter 3 døgn. På den annen side viser fasthetsutviklingen positive resultater i langtids styrkeoppbygging for de ulike betongsammensetningene. Spesielt ga en gradvis reduksjon i masseforhold god effekt under det høye flyveaskenivået. En effekt som kjemisk aktivering, i det store og hele, ikke karte å vise til over tid. Det er grunn til å tro at mangelen på ekstern varmetilførsel i de alkaliske aktiverte reseptene forklarer den manglende effekten disse gir i styrkebidrag etter 24 timer. De mange mulighetene som foreligger ved proporsjonering av alkalisk aktiverte materialer må også tas i betraktning, ettersom dette studiet kun har gjort forsøk i et begrenset området innenfor alkalisk aktivering og doseringsprinsipper.

Arbeidet med oppgaven har i stor grad vært styrt av de resultatene som har fremkommet underveis i forsøkene. Førrige avsnitts redegjørelse for fasthetsutvikling har vært tett fulgt av de enkelte reseptenes konsistensegenskaper. Synkmål og visuell observasjon av bearbeidbarhet har derfor fått en viktig rolle i det som har vært en optimaliseringsprosess for å finne den mest egnede reseptutformingene. I de alkalisk aktiverte sammensetningene viste de ferske mørtel- og betongblandningene svært dårlige egenskaper, selv ved ulike doseringsregimer av aktivatorene. Et naftalen basert SP stoff isteden for den ordinære copolymeren viste heller ingen forbedring i bearbeidbarhet. Til gjengjeld viste sammensetningene uten kjemisk aktivering, med sterkt redusert masseforhold, få problemer med å opprettholde støpeligheten. v/b forhold ned mot 0,28 har gitt velfungerende konsistensegenskaper ved bruk av copolymer, under normale doseringsnivåer. Dette gjelder for flyveaskedoserings på 70% av totalt bindemiddel, som har vært det gjennomgående flyveaskenivået for de fleste resepter i oppgaven. Av tilgjengelige parameterjusteringer har kjemisk aktivering, masseforhold og matriksmengde, sammen med ulik bruk av vannreducerende tilsetningsstoffer, vært styrende for de ulike reseptutformingene.

Et utvalg av betongsammensetningene har vært gjenstand for en miljøanalyse gjennom EPD generatoren hos Unicon. Samtlige resepter viser et forventet lavt klimagassavtrykk, helt ned mot 90 kg CO₂ eqv/m³ betong. Dette vil være godt innenfor de minstekravene som er satt for betongtypen som skal nyttes i de etterspente dekkene ved Gullhaug Torg.

Abstract

Today's planning and construction of new industrial- and residential buildings have shown a strong push towards flexible and environmental building design. As a result, a greater focus on the buildings total life cycle has shown to be vital. Such a holistic view reveals a considerable contribution to energy use, and greenhouse gas emissions from the production of the different building materials. Taking into consideration the support system in a building, there is a great deal of potential optimization methods available for reducing a buildings environmental impact.

Powerhouse Brattørkaia and Futurebuilt Gullhaug Torg are examples of building projects, based on an environmental and sustainable way of thinking. The support system in these buildings will be based on post tensioned concrete slabs, maintaining slenderness and flexibility characteristics. For further optimization, it is viewed as essential to use a so called low-carbon concrete. A mixture composing of high dosages of fly-ash will be used for this purpose. More precisely mixes containing 50, 60, 70 and 80% fly ash of total binder content. A concrete of such characteristics will also need to satisfy traditional curing and workability capabilities. Sustainability considerations, proportioning according to standards, and an in-depth study of alkaline activators are further assessed. The latter is essential as these fly-ash based compositions are somewhat dependent on other means of activation methods. For that reason, a selection of the mixes contains activators based on sodium hydroxide and sodium silicate.

Based on the results from the porosity measurements, a better view of the sustainability characteristics of a fly ash based specimen can be given. It can be shown that dosages of 50 and 60% fly ash resulted in high values of the so called "resistance number". It represents a concrete with low degree of permeability. This high quality physical characteristics, may suggest a specimen capable of enduring the effects from deteriorating mechanisms, although not directly proved in this study. Nevertheless, carbonation still represents the biggest concern when dealing with such compositions, both with and without alkali activated materials. When analyzing the different concrete mixtures, it has been shown that none of these can fulfill the proportioning requirements, according to the national annex of NS-EN 206. This pose a big restriction of the utility of such concrete compositions, despite the fact that there seems to be few arguments which supports such restrictions, when considering exposure class X0.

High levels of fly-ash affect the reaction kinetics in concrete, resulting in a slow curing rate, and reduced amount of heat development. Minor contribution from the exothermic hydration of OPC, suggests that a satisfying strength development will be challenging in the early stages of curing. This is easily exhibited in the strength measurements of 1, 2 and 3 days of nearly every mixture composed in this study.

A compressive strength development of 25 MPa within 3 days proved impossible. A figure which happen to be the desired mechanical strength needed for tensioning of the steel cables in the slabs. An improvement of early compressive strength during 1 and 2 days was possible when the mixes had a reduced mass ratio. This was also exhibited when adding the before mentioned activators in the mixes, though mostly showed during the first 24 hours. These effects were in total minor, as none of the mixtures reached past half of the desired strength development after 3 days. On the other hand, long term strength development has proved to be far better than expected, during measurements of 28 and 56 days strength development. Reducing the mass ratio proved to be the most effective adjustment in comparison to alkaline activators, concerning both early and long-term strength development together. This study suggests that the lack of external heat contribution to alkali activated mixtures, reduce the potential effects of strength contribution these type of binder holds. The vast number of possible alkaline proportioning alternatives needs to be addressed, as this thesis has undergone only a limited area of alkaline activators, and dosages techniques.

The latter paragraph concerning mechanical properties of the different mixtures, has also undergone measurements of the workability in fresh state. Slump measurements and visual determination of consistency, has been a key parameter when optimizing the different mixtures. The alkaline mortar- and concrete mixtures were all suffering from poorly workability characteristics, even during different dosages regimes. A naphthalene based SP, instead of the usual copolymer did not show any improvements. For the non-alkaline mixtures on the other hand, there were no problems with the consistency, even with mass ratio levels as low as 0,28. Normal dosages of copolymer proved to be effective in such mixtures. The latter are studies valid for fly ash dosages of 70%, which has also been the most studied fly-ash dosage regime during the experiments. The different parameter adjustments have been; alkaline activators, mass ratio adjustments, matrix composition, as well as different use of water reducing admixtures.

A set of different concrete mixtures in the study has undergone an environmental analysis through the EPD generator, facilitated by Unicon. All mixtures showed an expected low contribution in greenhouse gas emissions, as low as 90 kg CO₂ eqv/m³ concrete. This is well within the minimum expectations for the concrete specifications at Gullhaug Torg.

Innholdsfortegnelse

FORORD	V
SAMMENDRAG	VII
ABSTRACT	IX
FIGURLISTE	XIV
TABELLISTE	XV
FORKORTELSER	XVI
1 INNLEDNING	1
1.1 BAKGRUNN	1
1.1.1 <i>Klimaets rolle</i>	1
1.1.2 <i>Powerhouse Brattørkaia og Gullhaug Torg</i>	3
1.2 MÅL OG FORSKNINGSSPØRSMÅL	5
1.3 INNHOLD OG GENERELLE AVKLARINGER	8
1.4 AVGRENSNINGER I OPPGAVEN	9
2 TEORI	11
2.1 ETTERSPELTE DEKKER.....	11
2.2 LAVKARBONBETONG	13
2.3 MILJØANALYSE.....	16
2.4 LOVVERK OG STANDARDER	17
2.4.1 <i>Betongteknologi</i>	17
2.4.2 <i>Miljødeklarasjoner</i>	18
2.5 BEGRENSNINGER I STANDARDEN	19
2.6 ALTERNATIVE BINDEMIDLER I BETONG	19
2.6.1 <i>Silikastøv</i>	19
2.6.2 <i>Flyveaske</i>	20
2.7 AKTIVITETSAKTIVITETEN.....	22
2.8 AKTIVERING AV SEMENT	23
2.8.1 <i>Mekanisk aktivering</i>	23
2.8.2 <i>Synergieffekter ved tilsetning av kalksteinsmel</i>	23
2.8.3 <i>Mild kjemisk aktivering</i>	24
2.8.4 <i>Sterk kjemisk aktivering</i>	25
2.9 AKTIVATORENS ROLLE I ET MILJØPERSPEKTIV	25
2.10 ULIKE BINDEMIDDELSYSTEMER.....	26
2.10.1 <i>Geopolymer</i>	26
2.10.2 <i>Alkali aktiverte materialer</i>	28
2.10.3 <i>Hybrid betong av OPC og alkali aktivert flyveaske</i>	29
2.10.4 <i>Uorganisk polymer</i>	30
2.10.5 <i>Kalsiumsulfataluminat</i>	30
2.11 BESTANDIGHET	31
2.11.1 <i>Bestandighetsbetraktninger i standarden</i>	31
2.11.2 <i>Kloridinntrengning</i>	32
2.11.3 <i>Karbonatisering</i>	32
2.11.4 <i>Sulfatangrep</i>	34
2.11.5 <i>ASR problematikk</i>	35
2.11.6 <i>Målinger av porevolum og porestørrelsesfordeling</i>	36
2.12 BEARBEIDBARHET	37

2.13	AKTIVATORENS PÅVIRKNING AV STØPELIGHET	39
3	METODE	41
3.1	UTGANGSPUNKT FOR LABORATORIEARBEIDET	41
3.2	MATERIALER.....	43
3.3	DEL 1 INNLEDENDE FORSØK	44
3.3.1	<i>Fremgangsmåte</i>	44
3.3.2	<i>Proporsjonering og blanding</i>	45
3.3.3	<i>Måling av kapillær sugeevne og porøsitet</i>	46
3.4	DEL 2 MØRTELBLANDINGER	47
3.4.1	<i>Fremgangsmåte</i>	47
3.4.2	<i>Proporsjonering og blanding</i>	49
3.5	DEL 3 BETONGBLANDINGER	51
3.5.1	<i>Fremgangsmåte</i>	51
3.5.2	<i>Proporsjonering og blanding</i>	52
3.6	KRAV TIL BETONGSAMMENSETNING	53
3.7	KARTLEGGING AV BETONGRESEPTENES TILHØRIGHET	54
3.8	UTARBEIDE MILJØDEKLARASJONER.....	55
4	RESULTATER	57
4.1	BEARBEIDBARHET	57
4.1.1	<i>Betongblandinger</i>	57
4.1.2	<i>Mørtelblandinger</i>	58
4.2	FASTHETSUTVIKLING	61
4.2.1	<i>Del 1 Innledende forsøk</i>	61
4.2.2	<i>Del 2 Mørtelblandinger</i>	62
4.2.3	<i>Del 3 Betongblandinger</i>	63
4.3	MÅLING AV KAPILLÆRABSORPSJON	65
4.4	KRAV TIL BETONGSAMMENSETNING	65
4.5	MILJØDEKLARASJONER	68
5	DISKUSJON	71
5.1	BEARBEIDBARHET	71
5.1.1	<i>Aktivatorens påvirkning av støpelighet</i>	71
5.1.2	<i>Konsekvenser av de praktiske resultatene</i>	72
5.1.3	<i>Fravær av aktivatordosering</i>	73
5.2	FASTHETSUTVIKLING	73
5.2.1	<i>Del 1 Innledende forsøk</i>	73
5.2.2	<i>Del 2 Mørtelblandinger</i>	75
5.2.3	<i>Del 3 Betongblandinger</i>	77
5.3	BESTANDIGHET	79
5.4	BEGRENSNINGER I STANDARDEN	82
5.5	MILJØDEKLARASJONER	83
5.6	FLYVEASKENS PÅVIRKNING	84
6	KONKLUSJON.....	85
7	VIDERE ARBEID	87
7.1	UTEN AKTIVATOR	87
7.2	MED AKTIVATOR	87
	REFERANSER	89

Figurliste

<i>Figur 1 Powerhouse Brattørkaia</i> [2]	3
<i>Figur 2 Futurebuilt Gullhaug Torg</i> [4]	4
<i>Figur 3 De ulike livsfasene til et bygg som inngår i ZEBs definisjonsområde</i> [8]	5
<i>Figur 4 Motvirkende vertikale krefter ved bruk av spennarmering i dekket</i> [6]	11
<i>Figur 5 Dekkestøp ved Powerhouse Brattørkaia [Foto: Frederic Hermansen]</i>	12
<i>Figur 6 System av Norsk Standard som grunnlag for prosjektering, utførelse og kontroll av betongkonstruksjoner</i> [7]	18
<i>Figur 7 Oversikt over ulike bindemiddelsystemer</i> [3]	29
<i>Figur 8 Prinsipielt absorpsjonsforløp</i> [5]	37
<i>Figur 9 Pågående støp ved Powerhouse Brattørkaia [Foto: Frederic Hermansen]</i>	39
<i>Figur 10 Diskprøver lagt i vannspeil (t.v), før plassering i trykktank (t.h)</i>	47
<i>Figur 11 Plassering av resept C6* i forma</i>	58
<i>Figur 12 Avforming av resept C6*</i>	58
<i>Figur 13 Avsluttet blanding av resept C3</i>	59
<i>Figur 14 Plassering av resept C2 i forma</i>	59
<i>Figur 15 Avsluttet blanding av resept C6</i>	60
<i>Figur 16 Plassering av resept C6 i forma</i>	60
<i>Figur 17 Avforming av resept C2</i>	60
<i>Figur 18 Fasthetsutvikling for reseptene i del 1</i>	62
<i>Figur 19 Fasthetsutvikling for reseptene i del 2</i>	63
<i>Figur 20 Fasthetsutvikling for reseptene i del 3</i>	64
<i>Figur 21 Oversikt over de enkelte reseptenes GWP bidrag</i>	69
<i>Figur 22 Oversikt over de enkelte reseptenes innebygget energi</i>	69
<i>Figur 23 Sammenligning i fasthetsutvikling mellom resept C og mørtelblandingene C2, C5 og C6</i>	76
<i>Figur 24 Sammenligning i fasthetsutvikling mellom resept C og mørtelblandingene C3 og C4</i>	76
<i>Figur 25 Sammenligning i fasthetsutvikling mellom resept CX, C1*og C</i>	78

Tabelliste

<i>Tabell 1 Lavkarbonklasser med grenseverdier for klimagassutslipp[1]</i>	14
<i>Tabell 2 Oversikt over alle materialene som er brukt i forsøkene</i>	43
<i>Tabell 3 Reseptteknisk oversikt over de ulike sammensetningene i del 1</i>	45
<i>Tabell 4 Låste parametere ved proporsjonering under del 1</i>	45
<i>Tabell 5 Oversikt over arbeidsprosessen i del 1</i>	46
<i>Tabell 6 Aktivator spesifikasjoner</i>	49
<i>Tabell 7 Reseptteknisk oversikt over de ulike sammensetningene i del 2</i>	50
<i>Tabell 8 Låste parametere ved proporsjonering under del 2</i>	50
<i>Tabell 9 Oversikt over arbeidsprosessen i del 2</i>	51
<i>Tabell 10 Reseptteknisk oversikt over de ulike sammensetningene i del 3</i>	52
<i>Tabell 11 Låste parametere ved proporsjonering under del 3</i>	52
<i>Tabell 12 Oversikt over arbeidsprosessen i del 3</i>	53
<i>Tabell 13 Aktuelle optimaliseringsalternativer ved økende grad av flyveaskedosering</i>	55
<i>Tabell 14 Reseptteknisk oversikt over de ulike sammensetningene i del 1 og 3</i>	57
<i>Tabell 15 Oversikt over synkmål og luftinnhold for samtlige betongblandinger</i>	58
<i>Tabell 16 Støpelighetsegenskaper i del 2 basert på visuell observasjon</i>	59
<i>Tabell 17 Målte bruddspenningsverdier ved ulike tidspunkt i del 1</i>	61
<i>Tabell 18 Målte bruddspenningsverdier ved ulike tidspunkt i del 2</i>	62
<i>Tabell 19 Målte bruddspenningsverdier ved ulike tidspunkt i del 3</i>	64
<i>Tabell 20 Resultater fra kapillær sugsevne og porøsitet i resept A</i>	65
<i>Tabell 21 Resultater fra kapillær sugsevne og porøsitet i resept B</i>	65
<i>Tabell 22 Kontroll av resept A i henhold til gjeldene akseptkriterier</i>	66
<i>Tabell 23 Kontroll av resept B i henhold til gjeldende akseptkriterier</i>	66
<i>Tabell 24 Kontroll av resept C i henhold til gjeldende akseptkriterier</i>	66
<i>Tabell 25 Kontroll av resept D i henhold til gjeldende akseptkriterier</i>	67
<i>Tabell 26 Kontroll av resept C1* i henhold til gjeldende akseptkriterier</i>	67
<i>Tabell 27 Kontroll av resept C6* i henhold til gjeldende akseptkriterier</i>	67
<i>Tabell 28 Kontroll av resept CX i henhold til gjeldende akseptkriterier</i>	68
<i>Tabell 29 Kvantitativ fremstilling av miljøprestasjonen til utvalgte resepter fra EPD generatoren</i>	69
<i>Tabell 30 Reseptteknisk utforming av et utvalg av de kjemisk aktiverte mørtelblandinger</i> ..	75
<i>Tabell 31 Sammenligning i porøsitetsegenskaper mellom referansetall og resept A og B</i>	80

Forkortelser

OPC	Ordinær portland sement
AAM	Alkali aktiverte materialer
ASR	Alkali silika reaksjon
SKB	Selvkomprimerende betong
GWP	Global warming potential
EPD	Environmental product declaration
RCPT	Rapid chloride permeability test
XRF	X-ray fluorescence
XRD	X-ray diffraction
SEM	Scanning electron microscopy
EDS/EDX	Energy dispersive X-ray spectroscopy
SF	Silica fume, silikastøv
FA	Fly ash, flyveaske
SP	Superplastiserende tilsetningsstoff
P	Plastiserende tilsetningsstoff
wt%	Vektprosent
v/b	Vann/bindemiddel forhold, eller masseforhold

C	CaO
H	H ₂ O
A	Al ₂ O ₃
S	SiO ₂
<u>S</u>	SO ₃
F	Fe ₂ O ₃
<u>C</u>	CO ₂
CH	Ca(OH) ₂

1 Innledning

Dette kapitlet introduserer forskningsspørsmålene som ønskes besvart i oppgaven, med bakgrunn i to aktuelle byggeprosjekter. Bakteppet for oppgaven, og arbeidene som gjøres i forbindelse med denne, er motivert av miljøhensyn. Oppgavens tilknytning til klima- og miljø spørsmål blir derfor redegjort for her. Innhold og generelle avklaringer i oppgaven som helhet vil også bli nevnt.

1.1 Bakgrunn

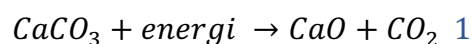
1.1.1 Klimaets rolle

Arbeidet for et bærekraftig samfunn har vært en del av det offentlige ordskiftet i lang tid, både nasjonalt og internasjonalt. Menneskeskapte klima- og miljøødeleggelser har de siste tiårene blitt et globalt anliggende, og tiltak som for å snu denne trenden er blitt viktigere enn noen gang før. På den internasjonale arenaen er uavhengige internasjonale organisasjoner som WWF, Greenpeace og IUCN, og mellomstatlige organisasjoner underlagt FN sambandet, viktige institusjoner. Norge har gjennom forpliktelser i Parisavtalen, og gjennom det nasjonale klimaforliket, satt egne mål for reduksjon i energibruk og klimagassutslipp[9, 10]. En av de overordnede målene er at Norge skal være karbonnøytralt i 2050, med et forpliktende mål om karbonnøytralitet senest i 2030. Dette innebærer å sørge for utslippsreduksjoner tilsvarende norske utslipp i 2030[11]. Veien dit er helt avhengig av at privat næringsvirksomhet bidrar, og her er byggenæringen en vesentlig aktør. Ca. 40% av energiforbruket, og 36% av EUs CO₂-utslipp kommer fra Europas bygningsmasse[12]. Globalt anslås det at ca. 40% av verdens CO₂-utslipp kan tilskrives bygninger i sin helhet[13]. Dette understreker det enorme forbedringspotensialet som ligger i dagens og fremtidens bygningsmasse. Lovpålagte miljø- og energikrav, samt en økende forståelse av fordelene med langsiktig bærekraftig tenkning ved prosjektering av bygg, har ført til en gradvis dreining mot det vi i dag gjerne forbinder med det ”grønne skiftet”. Implementeringen av LCA-analyser, bærekraftighetsvurderinger, og større helhetlig tenkning ved utforming av bygg kjennetegner denne trenden. Slike tiltak har vært viktig for at et nokså konservativt, og en ofte lite endringsvillig næring skal kunne være med i kampen for et mer klima- og miljøvennlig samfunn. Zero Emission Buildings, Powerhouse alliansen og Futurebuilt er alle representanter og pådrivere for en slik tankegang. Derfor er det de siste årene gjennomført flere prosjekter innenfor dette området. Her kan nevnes Powerhouse Kjørbo, Powerhouse Brattøra, Multikomfort Larvik, Bellonahuset, Skarpnes prosjektet og Campus Evenstad. Og flere er på vei. Powerhouse Brattørkaia er under bygging, og Futurebuilt Gullhaug Torg 2A går i gang med bygging i 2018, og skal bli Norges første naturlige ventilerte nullenergibygg[14].

Som et resultat av et stadig mindre energibehov under driftstiden i bygg vil det samlede energiforbruket og klimagassutslippene fra bygningsmaterialene, utgjøre en større andel av byggets totale energi og CO₂-regnskap. Av den grunn kreves det tiltak for å minimere dette bidraget. Ettersom en betydelig volumandel av bygningsmaterialene kan tilskrives betong, er dette ikke overraskende en viktig faktor å ta hensyn til. Dette betyr at ved å minke CO₂-bidraget fra sementproduksjonen vil en kunne gjøre store kutt i byggets klimaregnskap.

Ettersom betong regnes som det dominerende bygningmaterialet verden over, vil eventuelle reduksjoner i klimagassutslipp fra betong, og da i første omgang fra sementproduksjon, ha stor effekt også i et globalt perspektiv. For å støtte oppunder de allerede fremlagte tall vedrørende energiforbruk og klimagassutslipp, er sementproduksjon den virkelig store synderen. Ca. 7-8% av verden menneskeskapte CO₂-utslipp kan tilskrives sementproduksjon[15], og forbruket øker. I 2014 viste en måling at det globale forbruket lå på ca. 34000 megatonn portlandsement, med en årlig økning på 6%[16]. Dette er bakgrunnen for de mange tiltak og forskningsprosjektene verden over som jobber for en ”renere” produksjonsprosess. Norcem, Norges eneste sementprodusent, benytter blant annet avfallsbasert brensel(RDF) som delvis erstatning for fossilt brensel ved sin fabrikk i Brevik. Samtidig arbeides det med et statsstøttet karbonfangstprosjekt ved samme sted[17]. Her skal det testes ut ulike teknologier som best kan fange opp CO₂-utslipp fra fabrikk.

Et annet vesentlig bidrag for å redusere karbonavtrykket i betong, er reduksjon i klinkermengden. Dette betyr en reduksjon i CO₂-utslipp, både fra kalsinering og fyring. Med fyring vises det her til den energikrevende oppvarmingen til 1400°C som legger grunnlaget for kalsineringsprosessen. Selve kalsineringen er den kjemiske reaksjonen nødvendig for produksjon av den reaktive klinkeren kalsiumoksid(CaO), en dominerende del av portlandsementen. Ligningen under viser bakgrunnen for CO₂-produksjon når råmel bestående av kalkstein, og andre korreksjonsmaterialer, varmes opp i en roterende ovn. Merk at korreksjonsmaterialer som kis, bauxitt, kvarts etc. ikke er tatt med i ligning 1:



Å erstatte brensel med andre alternative energikilder vil derfor delvis løse problemet, da utslipp tilknyttet kalsinering fortsatt er tilstede. En reduksjon i andelen portlandsement i betong vil på sin side også kutte i CO₂-utslipp fra kalsinering. Dette er altså kjernen i, og utgangspunktet for oppgaven.

1.1.2 Powerhouse Brattørkaia og Gullhaug Torg

To pågående byggeprosjekter som denne oppgaven tar utgangspunkt i er Powerhouse Brattørkaia i Trondheim, og Gullhaug Torg i Oslo. Begge har satt seg høye mål hva gjelder miljø- og bærekraftighetsambisjoner. Begge kjennetegnes av kreative arkitektoniske løsninger, som i sin tur påvirker valg av materialer og bæresystem. Dette introduserer mange nye utfordringer, men også muligheter når målet om reduserte energi- og klimagassavtrykk skal innfris.



Figur 1 Powerhouse Brattørkaia[2]

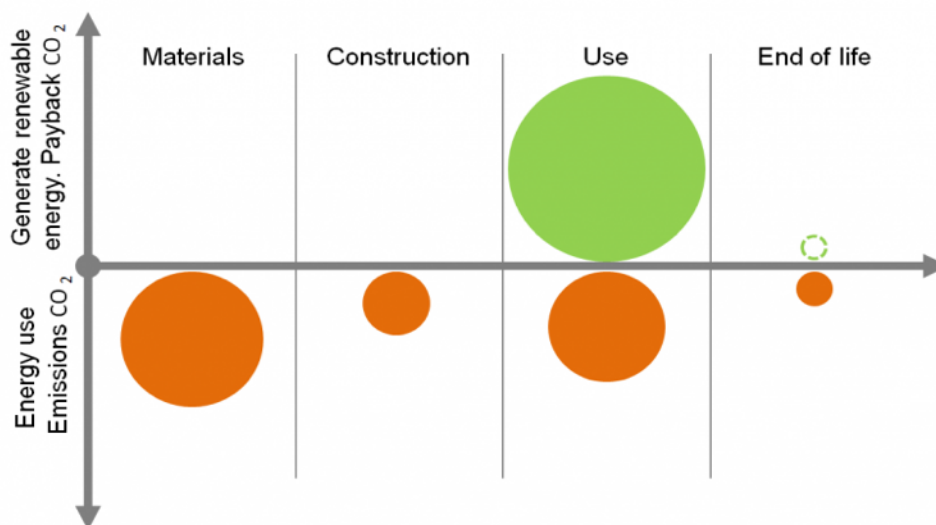
Powerhouse Brattørkaia er allerede under utbygging, og skal etter planen være Norges første nybygde, energipositive kontorbygg, ved sin planlagte ferdigstillelse 1. Februar 2019[18]. Det betyr i korte trekk at byggets energiproduksjon skal overgå prosjektets totale energiforbruk fra vugge til grav, over en periode på 60 år. Skanska er totalentreprenør for prosjektet med Entra som byggherre, og Snøhetta som arkitekt. Prosjektet er en del av Powerhouse alliansen, et samarbeidprosjekt mellom flere ulike aktører; Skanska, Zero, Asplan Viak, Snøhetta og Entra[19]. Gullhaug Torg er drevet frem av FutureBuilt, et tilsvarende samarbeidsprogram som utvikler klimanøytrale bygg og byområder. Hovedsakelig lokalisert i Oslo-regionen. Prosjektet er fortsatt i detaljprosjekteringen, og har en foreløpig planlagt byggestart i april 2018. En av de viktigste klimatiltakene i bygget slik det fremkommer av FutureBuilt sine egne beskrivelser er: Naturlig og hybrid ventilasjon, bygningsintegreerte solceller i tak/takhage, varme og kjølekonsept basert på geovarme/kjøling og lavtemperatur varme/kjøling i vegger og gulv[20].



Figur 2 Futurebuilt Gullhaug Torg[4]

For prosjektet på Brattørkaia er det kravene gjennom powerhouse definisjonen som har vært førende for mange av byggets løsninger. Bygget må tilfredsstillere energimål som kreves for et plusshus, samtidig som arkitektoniske hensyn skal ivaretas. Dette er gitt under forutsetningen om kommersiell tilgjengelighet og gjennomførbarhet. Slike og andre målsettinger er definert gjennom 20 spesifiserte kriterier gitt av Powerhouse definisjonen[21]. Ved å tilfredsstillere disse målparameterne, har prosjektet også lyktes i å tilfredsstillere den strengeste miljøsertifisering til BREEAM, den såkalte BREEAM Outstanding[18]. Konsekvensen av disse Powerhouse kravene er et bygg med mange spennende arkitektoniske og tekniske løsninger. Hele det sørvendte taket har en helning på 26° , og skal dekket av solcellepaneler. Dette vil være den største bidragsyteren av fornybar energiproduksjon, og skal etter planen produsere mer strøm enn bygget har behov for under drift. Det er derfor tenkt at overflødig strøm skal leveres ut på det ordinære strømmettet. Å redusere behovet for elektrisk belysning ved å utnytte dagslyset i størst mulig grad, er også et viktig energitiltak. Det ovale atriet i midten av bygget er en måte å løse dette på. Videre skal en sjøledning legges ut i fjorden som ved hjelp av varmeutveksling med sjøvannet, øker varmepumpens effekt og dermed reduserer energibehovet for oppvarming. Slike tiltak vil bidra til en reduksjon i energiforbruk under driftsfasen. På den måten vil det totale energiforbruket under hele byggets livsløp i større grad domineres av materialenes innebygget energi. Termen innebygget energi henviser til energi tilknyttet; råvareuttak, prosessering og bearbeidelse av materialene, produksjonsprosess, montasje og transport[22]. En slik dreining fra energi tilknyttet drift, til energi tilknyttet bygningsmaterialer betyr at fokuset på energieffektivisering må rettes mot produksjonsfasen.

Betrakter vi modellen til ZEB i figur 3 vedrørende livsløpsfasene til et bygg, ser man tydelig at energi tilknyttet materialer sammen med CO₂-bidraget, dominerer i slike ”grønne” bygg. Å minimere miljøbelastningen fra denne fasen setter derfor søkelyset på materialer som betong. På Brattørkaia står betong for en betydelig del av byggets totale volum, og en reduksjon i energibruken og klimagassutslippene herfra, er en forutsetning for videre optimalisering. Mange av disse betraktningene er fullt ut overførbare til prosjektet ved Gullhaug Torg, som også har samme bæresystem av betong. En hensiktsmessig vurdering av materialenes miljøbelastning er nødvendig også her.



Figur 3 De ulike livsfasene til et bygg som inngår i ZEBs definisjonsområde[8]

1.2 Mål og forskningsspørsmål

Høy flyveaskedosering påvirker i stor grad herdeforløpet i betong. Generelt er dette synonymt med en saktegående herdeprosess, og lav varmeutvikling. I mange situasjoner er dette ønskelig i forbindelse med støp av store betongkonstruksjoner, mens i andre sammenhenger representerer dette et produksjonsproblem som kan forringe fremdriften. I etterspente dekker der tidlig fasthetsutvikling er nødvendig for å avverge dette, vil betong med høy flyveaskedosering være en utfordring. I undertegnede prosjektoppgave ble det gjennomført en laboratoriestudie med sikte på å nå 25 MPa trykkfasthet etter 3 døgn, for en betong med 50% flyveaske. En lavkarbonbetong klasse A, med lavt innebygget energi, var førende for alle reseptene som ble testet under dette studiet. I denne masteroppgaven skal nevnte betongsammensetning videreføres, i et forsøk på å redusere energibruk og klimagassutslipp ytterligere.

Hovedfokuset vil være å studere i hvor stor grad en økende flyveaskedosering vil påvirke fasthetsutvikling, bearbeidbarhet og bestandighetsrelaterte egenskaper. Powerhouse Brattørkaia og Gullhaug Torg utføres begge med etterspente dekker, og er to byggeprosjekter som denne masteroppgaven vil jobbe parallelt med. For sistnevnte prosjekt er det foreslått en betongtype med ytterligere flyveaskedosering utover de allerede 50 prosentene. Her foreligger det et mål om et klimagassavtrykk helt ned mot 170 kg CO₂-ekv pr m³ betong. Det hører derfor med i oppgaven å finne en betongsammensetning som også tilfredsstillende slike utslippskrav. Innebygget energi vil ikke være en målparameter i dette studiet. Kravet om 25 MPa trykkfasthet etter 3 døgn vil i denne omgang kun være en målsetning, og et nyttig holdepunkt når de ulike reseptene skal sammenlignes. Dette skyldes at økte flyveaskedoserings utover 50% vil ha problemer med å nå et slikt krav. Her vil det være interessant å se i hvor stor grad en kan tillatte ytterligere flyveaskedosering før betongens ønskede egenskaper forringes i for stor grad, og om en da må vurdere andre aktiveringsmetoder. Eventuelle byggtekniske tiltak som er nødvendig for å sikre tilstrekkelig fasthetsutvikling vil ikke bli vurdert nærmere, selv om dette fremkommer i oppgaveteksten. I samråd med veileder er dette satt til side. Samtidig har tallfesting av miljøegenskaper i betong, og betongens støpelighetsegenskaper fått større spillerom enn hva oppgaven i utgangspunktet la opp til. Futurebuilt Gullhaug Torg har således fått større oppmerksomhet.

Masteroppgaven skal også drøfte betongens bestandighetsrelaterte egenskaper, da en slik betong er tilknyttet større usikkerhet med tanke på kjemisk og fysisk struktur, enn hva tilfellet er for den mer kjente portlandbaserte betongen. Resultater herifra vil også være aktuelt for Powerhouse Brattørkaia, hvis betongtype har begrenset informasjon omkring egne bestandighetsegenskaper. En mindre studie innenfor måling av porevolum og porestørrelsesfordeling er aktuelle parametere som bør undersøkes i en slik sammenheng. Samtidig skal oppgaven klargjøre de begrensinger som ligger i NS-EN 206. Positive resultater fra forsøkene bør kunne åpne for en diskusjon om standarden eventuelt er moden for revidering.

En viktig del av arbeidet er å redegjøre for den litteraturen og forskningen som omhandler bruken av alkali aktiverte materialer. Ettersom en her befinner seg i sjiktet mellom den konvensjonelle portlandsbetongen og den mindre utbredte geopolymere, er det også stor usikkerhet i forhold til hva som vil være de dominerende reaksjonsproduktene. Det hører derfor med å utforske dette området, både med tanke på praktiske, mekaniske og bestandighetsrelaterte egenskaper. Slik kan se på teorien i sammenheng med de resultater som fremkommer under laboratoriearbeidet.

Tilfredsstillende bearbeidbarhet, og praktisk håndtering av betong er viktige parametere i dette studiet. Utgangspunktet for laboratorieforsøkene vil derfor å hele tiden ha en pragmatisk tilnærming til valg av betongsammensetning. Den skal kunne blandes, transporteres og bearbeides i forskaling på lik linje med dagens plasstøpte betonger.

De nokså brede rammene for oppgaven slike de fremkommer over, er forsøkt konkretisert gjennom følgende punkter:

- Oppnå tidlig fasthetsutvikling med ønske om 25 MPa trykkfasthet etter 3 døgn.
- Oppnå tilfredsstillende støpelighetsegenskaper for en plasstøpt betong.
- Etablere en bedre oppfatning av bestandighetsrelaterte egenskaper i betong med høy flyveaskedosering og i hybride sammensetninger, både gjennom litteraturstudie og praktiske forsøk.
- Avklare begrensinger som ligger i slike sammensetninger styrt av standarden.
- Dokumentere miljøgevinsten som ligger i betong med høy flyveaskedosering, og hybride sammensetninger.

1.3 Innhold og generelle avklaringer

Denne oppgaven er en studie som i hovedsak tar for seg herdetekniske, og praktiske egenskaper i mørtler og betong med høyt flyveaskeinnhold. Sideblikk inn i nasjonale regelverk, i relasjon til bestandighetsrelaterte egenskaper, vil også bli redegjort for. Oppgaven er bygget rundt de praktiske arbeidene ved betonglaboratoriet, og de funn som er gjort i den sammenheng. Studiet favner flere fagfelt innenfor betongteknologi, og tar samtidig et steg inn i det mer ukjente landskapet av alkali aktiverte betong- og mørtel sammensetninger. Studie er slikt sett nybrottsarbeid, og har dermed vært avhengig av en mindre litteraturstudie for å avdekke tidligere erfaring, og forskning omkring dette temaet. Oppgaven vil under teoridelen gi en innføring i hvilke temaer og fagområder som berøres, før det redegjøres for metodikken og de påfølgende resultatene fra de praktiske arbeidene. Med hensyn på gitte krav til måloppnåelse gitt under punkt 1.2, vil det gis en anbefaling av de sammensetningene som har vist størst potensiale, og som tilfredstiller ett eller flere mål.

Oppgaven forutsetter at leser har tilstrekkelig kunnskap om betong som byggemateriale. Grunnleggende innsikt i sementkjemi, og kunnskap om betongens egenskaper i fersk og herdet fase er nødvendig.

Teksten vil inneholde flere fremmedord med forenklinger og forkortelser underveis. Disse er etter beste evne listet under forkortelser i forkant av dette kapitlet. Noen presiseringer er likevel nødvendig:

- Når oppgaven refererer til standarden uten ytterligere forklaring siktes det alltid til NS-EN 206:2013+A1:2016+NA:2017. Dette gjelder også når teksten henviser til det nasjonale tillegget.
- Ved referering kun til geopolymere kan en ta utgangspunkt i en ren flyveaske betong, om ikke annet er spesifisert.
- Hybrid betong vil i denne sammenhengen vise til en betong inneholdende OPC og alkali aktivert flyveaske. Andre typer hybrid betonger som nevnes i oppgaven vil i tilfellet bli spesifisert ytterligere.
- Betong med høy flyveaskedosering vil i denne teksten referere til en betong med OPC og flyveaske, uten kjemisk aktivering.

1.4 Avgrensninger i oppgaven

Opgaven vil i stor grad fokusere på de funn som gjøres under laboratorieforsøk, og vurdere de ulike betongreseptenes egenskaper i sammenheng med støpelighet og herdeutvikling. Av de mange bestandighetsrelaterte målingene som er tilgjengelig, vil kun et utvalg av reseptene bli testet for dette, og kun gjennom porositetsmålinger. Dette kan derfor forstås mer som et supplement til de målingene som gjøres av styrkeutvikling og bearbeidbarhet.

De økonomiske aspektene som måtte påvirke valg av de eksperimentelle betongreseptene vil ikke bli redegjort for i denne oppgaven.

Det i hovedsak betong i etasjeskillere som har størst relevans, da disse dominerer det totale betongvolumet. Det skal poengteres at søyler og vegger også utgjør en del av dette volumet, som sammen med bunnplata også har betydning for de miljømessige aspektene. En konkretisering synes nødvendig: Dette studiet ser på en flyveaskebetong definert etter en M90 B35 betong. Det betyr at eksempelvis søyler og bunnplate ikke faller inn under denne kategorien. Selv om dette er konstruksjonsdeler som ikke berøres i dette studiet, forandrer ikke det faktum at de vil prege prosjektets totale energi- og klimagass budsjett. For bunnplata sin del skyldes dette at en har å gjøre med en konstruksjonsdel som vanskelig kan akseptere store justeringer i materialsammensetning. Her er det snakk om golv på grunn, og dermed eksponert for et ytre potensielt aggressivt miljø, med strengere krav til tilfredsstillende bestandighetsegenskaper. Dette påvirker kravet til materialsammensetning og den tilhørende miljølasten. Et annet viktig poeng er at etasjeskillere har en større utfordring i forhold til fremdrift, og tidlig fasthetsutvikling. En treg betong vil kunne korrumpere fremdriften ved at dekkene ikke rask nok kan spennes opp, avformes og brukes som arbeidsplattform for andre fag og for neste dekketøp. Forhold som ikke i like stor grad gjelder for de andre konstruksjonsdelene.

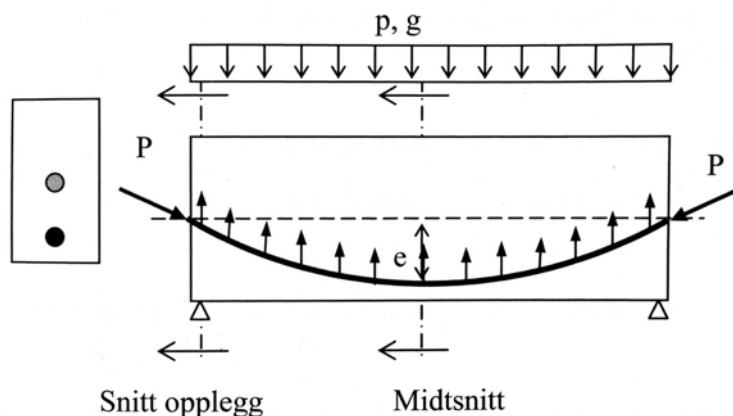
Som et ledd i å minimere betongens påvirkning på miljøet, foreligger det gjerne to alternativer for optimalisering. Enten ved å minimere mengden betong i konstruksjonen som helhet, eller å redusere betongens CO₂- og energiavtrykk. Førstnevnte tiltak omfatter eksempelvis bruk av oppspente dekker. Et tiltak som tillater reduksjon i betongvolum sammenlignet med ordinære slakkarmerte dekker. Dette er et fagfelt som tilhører dimensjonering av bygg, og vil ikke bli vurdert videre i oppgaven. Det er likevel viktig å være klar over denne delen ved optimalisering av betongkonstruksjoner, fordi det synliggjør et bredere spekter av muligheter for å redusere betongens påvirkning av et byggs klimaregnskap. For mer informasjon om optimalisering av bæresystemer og deres tilknyttede klimagassregnskap, bes leser henvende seg til Ollendorff[22] og Sælen[14] sin masteroppgave, som omhandler henholdsvis Powerhouse Brattørkaia og Futurebuilt Gullhaug Torg.

2 Teori

Dette kapitelet introduserer relevant teoretisk bakgrunn som grunnlag for gjennomføring av oppgaven, og de praktiske arbeidene som introduseres i kapittel 3. Samtidig inneholder kapitelet en mindre litteratur studie omkring alkalisk aktiverte materialer.

2.1 Etterspente dekker

Etterspente flatdekker er plasstøpte dekker som benytter spennarmering, og som helt eller delvis erstatter bruken av slakkarmering. Metoden går ut på at kabler av høyfast jomfruelig stål legges i forskalingen før utstøping. Når betongen har opparbeidet seg tilstrekkelig styrke, vil kablens aktive ende spennes opp med forankring i den passive enden, for på den måten å initiere en trykkspenning i betongen, se figur 4. Ved å legge kablene med en eksentrisitet e , fra tyngdepunktsaksen der strekksonen for betongen er lokalisert, kan en motvirke de vertikale kreftene som virker på dekket under nedbøyning. De oppspente stålwirene vil gi et flatdekke med lange spennmuligheter, og dermed å øke fleksibiliteten til bygget. Det vil igjen tilrettelegge for endrede bruksmønstre over tid, og dermed øke levetiden betraktelig. En slik dekkeløsning vil gi større friheter for utforming av himlingsystemer, der EI og VVS vanligvis begrenses av langsgående bjelkene i taket. Denne effekten forsterkes av muligheten for å øke spennlengden betraktelig, utover det som er anbefalt som maksimalt spenn for slakkarmerte flatdekker på 7,2m[22]. Dette frigjør plass som ellers ville gått til plassering av søylepunkter



Figur 4 Motvirkende vertikale krefter ved bruk av spennarmering i dekket[6]

Et viktig aspekt vedrørende dimensjonering av bæresystemet til Powerhouse Brattørkaia, har vært utfordringen rundt byggets form og arkitektur. Alternativet med hulldekke ville gi en ensidig aksial lastvirkning, hvor systemet ville vært begrenset av søyler og bjelkeopplegg. Med en arkitektur som Powerhouse Brattørkaia representerer, vil de krumme fasadene kreve et sekundært bæresystem av stål, i kombinasjon med hulldekkene.

Dette skulle vise seg å gi et betydelig bidrag til innebygget energi. Alternativet med hulldekker falt bort, selv om hulldekker alene viste et lavere CO₂-avtrykk[23]. Av de estimatene som har blitt gjort av Skanska i denne sammenhengen, viser tallgrunnlaget at innebygget energi ble redusert med ca. 3%, sammenlignet med hulldekkeløsningen[24].

Økte stålmengder og behovet for avrettingsmasse er særlig skyld i dette. I utgangspunktet er en lavkarbonbetong av hulldekke gunstig, men på grunn av behovet for stål ved en slik konstruksjonsløsning ga dette alene en økning på ca. 20% i innebygget energi. Etterspente dekker har også noen økonomiske fordeler og gir heller ikke noe redusert fremdriftsevne sammenlignet med hulldekke, som gjerne har større begrensinger på leveransekapasitet enn hva gjelder plastøpt betong.[24]

For Powerhouse Brattørkaia vil netto dekketykkelse for de etterspente dekkene være på om lag 240 mm. Det vil under støping legges på en ekstra tykkelse på 5 mm for å ha noe å slipe på. Dette er et gunstig klimatiltak ettersom alternativet ved valg av hulldekke er påstøp på 10 mm, med en avrettingsmasse som er forbundet med et høyt sementinnhold. Behovet for ekstra påstøp henger sammen med hulldekkenes krumme overflate[24]. Det er prosjektert at spennkablene i dekket skal kombineres med slakkarmering i området rundt søylepunkter der skjærkrefter dominerer. Figur 5 gir et bilde av den første dekkestøpen på Brattørkaia, og viser blant annet stålkablene med sine respektive passive ankre i enden. Bildet illustrerer også den reduserte armeringsmengden slike dekker gir, og flere steder er dekket kun armert med et mindre armeringsnett.



Figur 5 Dekkestøp ved Powerhouse Brattørkaia [Foto: Frederic Hermansen]

Bæresystemet på Gullhaug Torg vil også ha samme dekkesystem som ved Powerhouse Brattørkaia. Den spesielle arkitektoniske formen på bygget har også i dette prosjektet favorisert etterspente flatdekker. Sælen[14] har i sin masteroppgave fra 2016 bekreftet slike dekker som beste løsning, spesielt når den irregulær geometrien i bygget må tas hensyn til. De miljømessige vurderingene i kombinasjon med den åpenbare arkitektoniske friheten disse gir, har vært den viktigste begrunnelsen for dette valget. Dekketykkelsen vil være på omlag 240 mm, med en ekstra påstøp av hensyn til lydkrav. Både fiberarmering og ordinær slakkarmering er oppe til vurdering. Det synes likevel nærliggende å tro at slakkarmering vil vinne frem, da det slår ut positivt på miljøregnskapet[24].

2.2 Lavkarbonbetong

Lavkarbonbetong er et begrep som ved de fleste praktiske formål kan sammenlignes med den mer kjente termen lavvarmebetong, som oftere nyttes ute i næringen. Begge kjennetegnes tradisjonelt ved lav varmeutvikling og lengre herdetid, men som også innehar et miljømessig fortrinn. Det er viktig å ikke la seg forvirre av de mange begrepene som florerer rundt de såkalte miljøvennlige betongene. En miljøbetong er litt feilaktig brukt som morgendagens materiale, men faktum er at det heller er en videreføring av allerede eksisterende teknologi. Samtidig har nok begrepet fått mer luft i vingene etter de senere års miljøfokus. Noe forenklet kan en si at lavkarbonbetong er betongsammensetninger som med utstrakt bruk av alternative bindemidler erstatter deler av den tradisjonelle portlandsementen. Disse er i dag hovedsakelig representert ved flyveaske, silikastøv og slagg. I praksis er det kun en delvis erstatning som er aktuelt i dag, da en gradvis dreining vekk fra portlandsementen introduserer utfordringer og nye egenskaper i betongen som det er mindre erfaring rundt. I visse sammenhenger kan dette gi en mindre allsidig betong og dermed redusere betongens brukspotensial.

Det er flere måter å redusere betongens klimagassavtrykk på, men den viktigste når lavkarbonbetongbegrepet nyttes er en reduksjon av andelen portlandsement. De nevnte alternative bindemidlene anses som energi- og karbonnøytrale, da all utslipp og energiforbruk tillegges selve primærproduksjonen i de respektive industrinæringene. Dette betyr at en betong med utstrakt bruk av alternative bindemidler, har en betydelig evne til å kutte i betongens totale CO₂-utslipp. Reelt sett er det fortsatt snakk om utslipp av klimagasser, men bidraget er allokert til hovedaktørene selv. En total analyse fra vugge til grav av GWP-bidraget fra disse alternative bindemidlene, er nødvendig om et fullstendig klimagassbudsjett skal utarbeides. At det her er snakk om null utslipp under produksjon gir derimot ingen informasjon om utslipp knyttet til transport av disse råmaterialene. Under punkt 2.3 gis en nærmere forklaring på dette. For å lettere definere betongens miljøegenskaper har en arbeidsgruppe gjennom Norsk Betongforening definert en bransjenorm for lavkarbonbetong i Norge[1]. Dette klassifiseringssystemet, gitt i tabell 1 gir en oversikt over lavkarbonbetongklasser med ulike kombinasjoner av fasthets- og bestandighetsklasser definert med grenseverdier for GWP.

Tabell 1 Lavkarbonklasser med grenseverdier for klimagassutslipp[1]

	B20	B25	B30	B35	B35	B45	B55
	M90	M90	M60	M45/MF45	M40/MF40	M40/MF40	M40/MF40
Maksimalt tillatt klimagassutslipp [kg CO ₂ -ekv. pr m ³ betong]							
Lavkarbon A	170	180	200	210	230	240	250
Lavkarbon B	200	220	240	270	300	310	320
Lavkarbon C	240	260	280	320	350	360	370
Bransjereferanse	280	300	320	370	410	420	430

For prosjektet på Brattørkaia har Skanska som en del av Powerhouse-alliansen i hovedsak jobbet med energibudsjettering, og tilfredstillelse av et fastsatt energiforbud per arealenhet. I dag er det budsjettert med et forbruk på 14,8 kWh/år. Selv om det i BREEAM-NOR systemet ikke angis maksimalkrav til klimagassutslipp[25], har prosjektet likevel satt seg egne mål om en betong i lavkarbonklasse A. Når energikalkulering av betong og andre materialer estimeres gjennom EPD generatorer angis det også et GWP-bidrag. Det er derfor naturlig å benytte seg av begge talldataene når dette uansett regnes ut gjennom generatoren. Betongen vil i praksis falle inn under eksponeringsklasse X0, da bæresystemet ikke er eksponert for et ytre, potensielt aggressivt miljø. Etasjeskillere er derfor prosjektert og utført som en B35 M90 betong. For en slik betong, som tilfredsstiller lavkarbonklasse A, betyr dette et maksimalt tillatt klimagassutslipp på ca. 210 kg CO₂-ekv pr m³ betong. I henhold til Unicon sin EPD for våren 2017, viser denne et GWP-bidrag estimert til ca. 158,1 kg CO₂-ekv pr m³ betong. Denne er gyldig fra fase A1 til A4 for en lavkarbonbetong levert fra Havna i Trondheim, til Powerhouse Brattørkaia. Denne er angitt i vedlegget som ”referanse EPD”. Betongens innebygget energi ble målt til 1321,7 MJ/m³. Denne betongsammensetningen er per dags dato endret, og derfor er det reelle energi- og GWP bidraget noe høyere. Dett skyldes at prosjektet har fått mer spillerom i energiregnskapet, og dermed tillatt en reduksjon i flyveaskedosering til 35% av total bindemiddelmengde[24]. En slik løsning gir vinterdriftsfordeler med tanke på varmeutvikling og temperatursensitivitet. Dekket over kjeller ble imidlertid støpt med 50% flyveaskedosering slik EPD’en tar utgangspunkt i, men med et redusert masseforhold på 0,38.

Gullhaug Torg har gjennom FutureBuilt ikke spesifisert et formelt krav til betongens GWP-verdi, eller innebygget energi. Det er derimot satt et krav om 50% reduksjon i klimagassutslipp i forhold til et referansebygg, slik det fremkommer i FutureBuilt sine ”krav til byggeprosjekter”[26]. Utbygger skal dokumentere dette gjennom tilfredstillelse av utvalgte minstekrav fra BREEAM NOR, eller gjennom klimagassberegninger. En ytterligere spesifisering av GWP-bidraget er i praksis nødvendig for at et klimagassregnskap skal kunne gjennomføres. Gjennom rådgivergruppen bestående blant annet av Skanska Teknikk, er det derfor utredet et konsept som legger opp til en betongsammensetning som skal gå forbi lavkarbonklasse A[24], og på den måten få tallfestet betongens totale påvirkning.

For de etterspente dekkene skal det derfor utvikles en sammensetning med inntil 50% flyveaske. Det betyr at det ligger en forventning om ytterligere reduksjon i betongs klimagassutslipp sammenlignet med Powerhouse Brattørkaia. En målsetting som denne oppgaven, gjennom gradvis økende flyveaskedosering, ønsker å oppnå utover de allerede planlagte 50 prosentene. Rådgivergruppen foreslo et mål om et karbonavtrykk helt ned mot 140-145 kg CO₂-ekv pr m³ betong, men dette ble oppjustert til 170 kg CO₂-ekv pr m³ betong. Det skyldtes behovet for å redusere betongens temperatursensitivitet. Allikevel vil dette være en formidabel reduksjon i karbonavtrykk for en B35 betong. Bestandighetsklassen er som på Powerhouse prosjektet satt til M90, og tilfredsstiller da eksponeringsklasse X0.

Norcem har per i dag ingen kommersielt tilgjengelig lavkarbonsement som kan tilfredsstille alle lavkarbonklassene. For å få levert en lavkarbonklasse A betong, må proporsjonering gjøres hos blandeverkene selv. Dette betyr at lokasjonen til blandeverket, og tilgjengelighet på ulike råmaterialer, vil ha innvirkning på betongens totale klima- og energibelastning. Dette vil reflekteres i bidraget fra fase A4, som beskriver transportbidraget til byggeplass/anlegg. Det samme vil gjelde for fase A2, som tallfester transportbidragene for de ulike råmaterialene. Eksempelvis kan dette være importering av flyveaske fra fastlands Europa. Bidraget fra disse fasene kan utgjøre forskjellen på å få levert en godkjent lavkarbon A, eller B betong. Dette vil kunne observeres om en sammenligner Osloregionen med Trøndelag. En lavkarbonbetong klasse C regnes som standard leveranse i Trondheim. I Oslo derimot, vil en klasse B betong være normal bestillingsvare, i motsetning til hva tilfellet er i Trøndelag. Denne forskjellen beror på den lokale tilgjengeligheten av betongens bestanddeler. Norsk betongforenings publikasjon nr. 37, "Lavkarbonbetong", lister opp følgende parametere som påvirker betongens klimagassutslipp med geografisk plassering[1]:

- Tilgjengelig bindemiddeltype
- Kvalitet på tilslag
- Transport av råvarer til betongfabrikk

Leveranser av lavkarbonbetong klasse A i Trøndelags område er utfordrende nettopp fordi tilgangen på et godt tilslag er redusert, og avstanden til de to sementfabrikkene i Norge, Kjøpsvik og Brevik, begge er lokalisert langt unna Trøndelag. Slikt sett faller Trondheim og Trøndelagsområde mellom to stoler. Lokaliteten til betongens bestanddeler er derfor avgjørende for de EPD'ene som utarbeides for de enkelte betongsammensetningene, og som i sint tur vil påvirke prosjektets totale klimagassregnskap. Isolert sett vil det derfor kunne være forskjell fra en EPD til en annen, med samme betongsammensetning, men med ulik geografisk plassering. Dette vil for eksempel kunne gjenspeiles i en betongtype tilhørende prosjektet ved Gullhaug Torg, kontra den samme betongtypen tilhørende Powerhouse Brattørkaia. Da med fase A1 til A4 i tankene.

2.3 Miljøanalyse

Å utarbeide livsløpsanalyser for et bygg gir verdifull informasjon om byggets samlede miljøpåvirkning, under hele sitt livsløp. Å stadfeste hvilke områder som akkumulerer mest energi under sin livssyklus, og/eller som kjennetegnes ved store klimagassutslipp gir prosjekterende muligheten til å gjøre endringer i forkant, og på den måten kunne arbeide mer proaktivt. Dette kan for eksempel være tiltak innenfor organiseringen av byggeprosjektet, og systemet som helhet. Det kan gjelde de fysiske arbeidende som utføres i forkant og under bygging, eller det kan gjelde de enkelte materialenes påvirkning. Sistnevnte vil blant annet avdekke betongens bidrag. Som byggemateriale vil den, avhengig av sine; bestanddeler, mengde og dimensjoneringsmetode, gi et bidrag til hele byggets energi- og klimagassregnskap. LCA er derfor viktig verktøy i byggeprosjekter, spesielt når det foreligger krav, eller et ønske om at bygget skal være et lavenergibygg eller nullutslippsbygg. Alt ettersom hva utbygget ønsker å fronte bygget sitt som. Typisk ser man at kunde, byggherre eller andre aktører, ønsker et lav energi/utslipps-bygg som skal tilfredsstillere spesifikke krav. I dag er det vanlig å benytte seg av miljøsertifiseringen BREEAM, som er ledende innenfor bærekraftighetsvurderinger av infrastruktur og bygninger. For å innfri slike sertifiseringer er LCA et nyttig verktøy, særlig når det i økende grad blir fokusert på innebygget energi, og GWP-verdier i forkant av brukerfasen. Det vil si i produksjons- og konstruksjonsfasen. Se vedlegget som illustrerer dette i de ulike EPD'ene. Det er i produksjonsfasen betongen har sitt største bidrag hva gjelder energiforbruk og GWP-utslipp, og som derfor sier mest om betongens totale miljøavtrykk.

For å lettere synliggjøre ulike materialenes miljøbelastning, utarbeides det miljødeklarasjoner, eller såkalte EPD'er. "Environmental product declaration" tallfester en komponents miljøbidrag innenfor ulike systemgrenser, eller faser. Under produksjonsfasen tar analysen for seg:

- A1 Fremstilling av råvarer
- A2 Transport av råvarer
- A3 Produksjon av betongen

En EPD gir derfor et viktig datagrunnlag for den bakenforliggende livsløpsanalysen av byggeprosjekter. I dette tilfellet vil betongens miljøprofil lettere kunne identifiseres, og eventuelle tiltak for å forbedre klima- og energibelastningen være enklere. Betong er særs lite klima- og energivennlig ved produksjon og fremstilling, og dette understreker relevansen til en EPD som et viktig miljødokument. Gjennom "EPD Norge" ligger det offentlig tilgjengelig miljødeklarasjoner for ulike materialer og komponenter. Disse EPD'ene er gjenstand for streng kontroll, og er bundet av lovverk som blant annet; NS-EN ISO 14025, Prinsipper og prosedyrer for miljømerker og miljødeklarasjoner.

Det må bemerkes at den geografiske gyldigheten av EPD'ene er begrenset til det aktuelle produktet og produksjonsstedet, siden stedsspesifikke data er benyttet i den utstrekning de har vært tilgjengelige[1]. EPD'er tar ikke hensyn til om det er snakk om en vinterbetong eller sommerbetong. Eventuelle tiltak som må gjennomføres ved vinterstøp, som for eksempel fying, vil derfor ikke bli tatt hensyn til i EPD'en til den aktuelle deklarererte betongtypen. De utslipp som skjer ved produksjon av betong hos betongleverandøren, i EPD'er betegnet som fase 3, tar gjennomsnittet av et års produksjon på det aktuelle blandeverket og angir en GWP-verdi ut i fra dette.

2.4 Lovverk og standarder

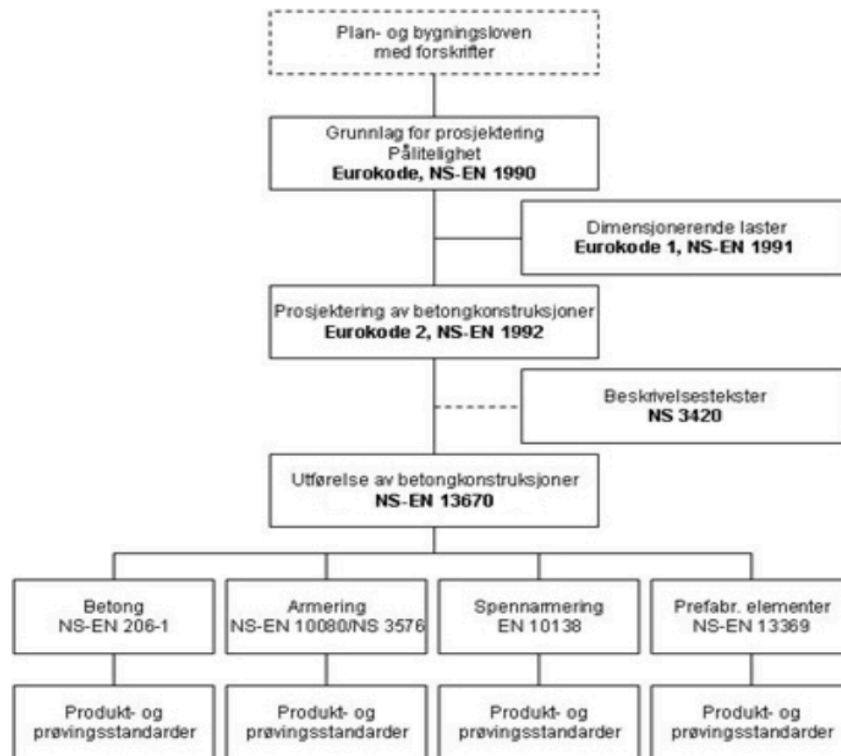
2.4.1 Betongteknologi

Gjeldende europeiske krav til betong som byggemateriale er gitt etter NS-EN 206. Denne er en del av systemet av Norsk Standard for prosjektering, utførelse og kontroll av betongkonstruksjoner. Standard Norge er forvalter og utgiver av slike standarder, og har enerett på fastsetting og utgivelser av slike regelverk. Standard Norge er det norske medlemmet i CEN og ISO[27, 28]. Figur 6 gir en oversikt over det hierarkiske loververket som betongkonstruksjoner omfattes av. Utførelse av testing for trykkfasthet, luftprøve av fersk betong, slumpmålinger etc. faller inn under "produkt og prøvingsstandarder" illustrert i figuren. NS-EN 206:2013+A1:2016+NA:2017 som er det fulle navnet på standarden angir krav til:

- Delmaterialer for betong
- Egenskaper for fersk og herdet betong og påvisning av disse
- Begrensninger i betongsammensetning
- Betongspesifikasjon
- Levering av fersk betong
- Rutiner for produksjonskontroll
- Samsvarskriterier og evaluering av samsvar

Ved bruk av alternative bindemidler i betong i Norge er det gitt spesifikke krav til henholdsvis flyveaske, silikastøv og slagg, angitt i nasjonalt tillegg. I tillegg er det en egen standard for flyveaske i betong der det gis definisjoner, spesifikasjoner og generelle kvalitetskrav til flyveasken. Dette fremkommer i NS-EN 450-1:2012.

I NS-EN 197-1:2011 gis samme oversikt over krav og prosedyrer men her generalisert ytterligere ved å favne bruken av alle ulike sementtyper og alternative bindemidler.



Figur 6 System av Norsk Standard som grunnlag for prosjektering, utførelse og kontroll av betongkonstruksjoner[7]

2.4.2 Miljødeklarasjoner

EPD Norge er øverste myndighet og påser at bruken av EPD generatorer og godkjenning av innsendte EPD'er, eller miljødeklarasjoner, skjer i henhold til gjeldende regelverk. En verifikator som eksempelvis Østfoldforskning, verifiserer og utarbeider EPD'er og fungerer som faginstans for analyse av miljøprestasjonen til ulike produkter og tjenester. Østfoldforskning tilbyr også talldata for ulike miljøbelastninger til næringslivet, noe som muliggjør bruk av godkjente EPD generatorer ute blant bedriftene[1]. FABEKO, Den norske fabrikkbetongforeningen og BEF, Betongelementforeningen har eksempelvis egne EPD generatorer rettet mot sin næring. Dette gir de ulike betongleverandørene i Norge muligheten til å få utarbeidet EPD'er på egne betongresepter.

Utarbeiding av EPD'er er bundet av lovverk som[29]:

- ISO 14025:2006, Prinsipper og prosedyrer for miljømerker og miljødeklarasjoner
- ISO 21930: 2007, Sustainability in building and construction – Environmental declaration of building products.
- NS-EN 15804:2012, Bærekraftige byggverk, Miljødeklarasjoner, Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer
- ISO/TS 14067:2013, Klimagasser - Produkters klimaspør - Krav og retningslinjer for kvantifisering og kommunikasjon

2.5 Begrensninger i standarden

Det er den europeiske standarden NS-EN 206, som sammen med det nasjonale tillegget styrer valg av betongsammensetning i Norge. To parametere som særlig setter begrensninger på flyveaskedosering i betong, er minste effektive bindmiddelmengede og betongens masseforhold, gitt i nasjonalt tillegg. Beregning av disse to parameterne forutsetter en portlandsklinkerandel på minst på 65% av b[7]. Bakgrunnen for disse reglene er i hovedsak styrt av betongens bestandighetsegenskaper. Se punkt om 2.11 om bestandighet for en utfyllende forklaring på dette. For ekstreme lavkarbonbetonger vil dette kravet vanskelig innfris om ikke deler av flyveasken anses som inert materiale. Dette fordrer også at eksponeringsklassen tillater det, og at krav til minste effektive bindemiddelmengde tilfredsstilles.

Den utbredte forskningen som gjøres på lavkarbonbetong sammen med de mer ekstreme lavkarbonbetongene som denne oppgaven befatter seg med, vil etter hvert kreve at standarden følger med i utviklingen. Økt erfaring med, og ytterligere dokumentasjon på de mer langtrekkende bestandighetsegenskapene, vil kunne danne et grunnlag for slike betongers plass i lovverket. Foreløpig må det gjøres en del avgrensinger i forhold til eksisterende regelverk, før godkjenninger kan gjøres gjennom øverste myndighet. Det betyr at eventuelle endringer som skal gjøres i standarden også må prosesseres gjennom hele lovverket, også plan- og bygningsloven, slik figur 6 illustrerer.

2.6 Alternative bindemidler i betong

I dette delkapitlet vil kun silikastøv og flyveaske bli aktualisert da det er disse som vil inngå i den videre studien. Flyveasken som det her refereres til er industrielt produsert, men generelt er flyveaske også å finne som naturlige pozzolaniske materialer nyttbar i betongproduksjon. Eksempelvis vulkansk aske og kalsinert leire. Hydrauliske bindemidler som slagg vil heller ikke bli redegjort for.

2.6.1 Silikastøv

Silikastøv består av små finkornede, sfæriske partikler, inneholdende minst 85 wt% av amorf silisiumdioksid[30]. Silikastøv er et biprodukt fra smelteprosessen ved produksjon av silisium og ferrosilisium legeringer. Produktet er på lik linje med flyveaske, et pozzolan som reagerer med kalsiumhydroksider, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fra hydratiseringsprosessen. Dette er med på å øke andelen C-S-H gel, det dominerende bindemiddelet i en OPC betong. Silikastøv er et effektivt tilsetningsmateriale som har gunstige egenskaper både i fersk og herdet betong. På bakgrunn av sin størrelse har silikastøv gode filler egenskaper, og vil i fersk fase bidra til å gi betongen stabiliserende egenskaper, kombinert med å bidra positivt til bearbeidbarheten. Økt stabilitet minimerer faren for blødning og separasjon, men kan også øke faren for uttørking ved overflaten. Dette kan gi oppsprekking som er særlig problematisk ved store overflater sommerstid.

Silikastøvets høye reaktivitet bidrar til å gi betongen økt styrke, særlig i tidlig fase. Det er silikainnholdet og den spesifikke overflaten som er bakgrunnen for nettopp dette. Av den grunn er det også silikastøvet som engasjeres og forbrukes først i pozzolanreaksjonen, før eventuelle andre pozzolaner og hydrauliske bindemidler tar tak. Typiske karakteristikker for silikastøv er gitt under[31]:

- SiO_2 innhold = 85-98%
- Sfæriske partikler med gjennomsnittlig diameter = 0,1 μm
- Spesifikk overflate = 20.000 m^2/kg

Silikastøv leveres som et separat produkt til blandeverket, eller kan leveres ferdig innblandet i portlandssement. Eksempelvis en CEM II/A-D sement som inneholder 6-10% silkastøv. Leveranser av Mikrosilika, som produktnavnet kalles, kommer fra silisiumproduksjonen i Norge, hos Elkem ASA[32]. Endelig doseringsmengde av silkastøv i betong justeres av blandeverket, eller etter prosjektspesifikke behov. Men mengden er hele tiden bundet av de begrensninger som ligger i standarden. Tabell NA.10 og NA.12 i nasjonalt tillegg angir hvilke regler som gjelder for dosering av silkastøv. Disse er gitt i vedlegget.

2.6.2 Flyveaske

Flyveaske er et gråaktig pulver av sfæriske, glassaktige partikler som dannes under fyring av kull i sammenheng med strømproduksjon ved kullkraftverk. Dette biproduktet hentes ut gjennom mekanisk eller elektrostatisk utfelling fra støv- og gasspartikler som avgis under kullfyringen[33]. Flyveaske består i hovedsak av silisiumoksider, SiO_2 og aluminiumoksider, Al_2O_3 , men innholdet kan variere sterkt avhengig av type kull som forbrennes. Den kjemiske sammensetning til kullet, samt de eventuelle forurensede stoffene som deltar i forbrenningen legger grunnlaget for flyveaskens faktiske sammensetning[24, 34].

Flyveaske er et pozzolanisk materiale på lik linje med silkastøv, og innehar mye av de samme egenskapene. De opptrer derfor nokså likt i både fersk og herdet betong. Tilstedeværelsen av silisiumoksider fra flyveasken vil i den basiske porevannsløsningen produsere kalsiumsilikahydrater i reaksjon med kalsiumhydroksider, slik en ser med silkastøv. Den vesentlige forskjellen er at flyveaske ikke har en like høy virkningsfaktor. Dette betyr at under hydratisering er det partikler av silkastøv som engasjeres først i en pozzolanreaksjon. Denne forskjellen i reaktivitet forklares ut ifra den fysiske og kjemiske oppbygningen av de to, konkretisert i den punktvisen listen gitt i neste side[31]. Bruk av flyveaske gir med andre ord en tregere betong og redusert varmeutvikling. Dette er en egenskap som i visse sammenhenger er ønskelig og til og med nødvendig. Ved støp av store betongkonstruksjoner vil flyveaske tilsetning være fordelaktig, da det begrenser varmeutviklingen som gjerne kan bli uforholdsmessig høy i sentrum av konstruksjonen.

De mindre varme overflatene som raskere avkjøles vil bety store temperaturforskjeller i konstruksjonen, som så kan føre til fastholdingsproblemer. De temperaturbevegelsene som oppstår ved oppvarming og avkjøling kan med andre ord gi oppgav til store riss og sprekkdannelser, om ikke konstruksjonen har opparbeidet nok styrke under herdeforløpet. På den annen side kan flyveaskedosering ha en negativ effekt i slankere konstruksjoner, og i situasjoner der rask fasthetsutvikling er nødvendig for fremdriften på byggeplassen.

- SiO_2 innhold = 45-55%
- Sfæriske partikler, ofte hule, med gjennomsnittlig diameter = 10-20 μm
- Spesifikk overflate = 300-500 m^2/kg

Flyveaske leveres enten som ferdig innblandet i portlandssement, under betegnelsen Standard FA eller Anlegg FA, eller som et separat tilsetningsmateriale. Norcem er leverandør av flyveaske i Norge som importerer dette fra Europa. Flyveasken kommer i dag fra Steag i Hamburg[35]. Som allerede nevnt kan sammensetningen i flyveaske variere sterkt. Dette skyldes kullelets naturlige inhomogenitet ved gruveuttaket, og at fyringsprosessen ved kullkraftverket påvirker sammensetningen. I NS-EN 197-1:2011[30] skilles det mellom flyveaske av typen V og W. Flyveaske type V skal ha et reaktivt CaO innhold < 10 wt% og et reaktivt SiO_2 innhold > 25 wt%. Flyveaske av typen W skal ha et reaktivt CaO innhold > 10 wt%. Flyveasken som leveres i Norge er av typen V. I vedlegget fremkommer Norcem's XRF analyse av flyveasken brukt under dette studiet[35]. Denne analysen er altså unik for den aktuelle batchen, og vil ikke være representativ for all flyveaske som importeres til Norge. Andelen SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 og CaO som er de dominerende komponentene i flyveasken kan altså variere seg imellom. Fra et herdeteknikk standpunkt er det ønskelig at ha en relativt høy andel SiO_2 , da dette er en hovedkomponent i pozzolanreaksjon for C-S-H gel produksjon. I andre bindemiddelsystemer, slik som i en ren geopolymer vil også aluminiumoksid være en viktig bestanddel. Punkt 2.10.1 gir en ytterligere utgreiing av geopolymer.

I tillegg til å avdekke det kjemiske innholdet i flyveasken, vil også det mineralske innholdet være interessant å analysere. Dette gjøres ved hjelp av XRD-Rietveld analyse. Da kan andelen av den amorfe glassfasen avdekkes, sammen med de krystalline mineralene kvarts og mulitt, som dominerer de ikke-amorfe fasene[36]. Et godt mål på å vurdere reaktiviteten til flyveasken er å se på hvor mye som finnes av den amorfe glassfasen. Dette er en uordnet struktur som lettere kan løsrive seg og delta i nye reaksjoner, i motsetning til den mer stabile ordnede strukturen som kjennetegner de krystalline mineralene. Disse kan derfor antas som inert materiale. Typisk vil en kunne se en fordeling med 70% amorf, og 30% krystallin struktur i flyveaske.[37, 38].

Mengden tillatt flyveaske i betong er styrt av standarden. I det nasjonale tillegget angir tabell NA.9 og NA.12 hvilke begrensinger som er gjeldende. Disse er gitt i vedlegget.

2.7 Aktivitetsfaktoren

Aktivitetsfaktoren brukes i kombinasjon med masseforholdet for å kunne uttrykke betongens utviklede egenskaper mer korrekt når også pozzolaner inngår i bindemiddelet. Når alternative bindemidler tas i bruk enten for å erstatte OPC eller i kombinasjon med OPC, er det ønskelig å vurdere hva slags innvirkning dette har på betongens egenskaper, som regel i form av styrkeutvikling. En kan i prinsippet også bruke aktivitetsfaktoren som indikator for andre egenskaper. Det er viktig å merke seg at aktivitetsfaktoren avhenger av tid, masseforhold, mengde pozzolan, prosentandel av bindemiddel og temperatur. Det betyr at det ofte kreves omfattende testing for å kunne gi brukbare verdier for aktivitetsfaktoren. I en typisk betongsammensetning med bruk av silikastøv som tilsats, vil k -verdien ligge rundt 2,0 innenfor 28 døgns trykkfasthet. Ettersom pozzolaniske reaksjoner er avhengige av kalsiumhydroksider fra hydratisering, vil styrkeutvikling til en betong med silikastøv ligge noe bak en ordinær betong av kun portlandsement, i tidlig fase. Derimot vil styrkeutviklingen øke markant når de pozzolaniske reaksjonene først setter i gang. På grunn av silikastøvet høye spesifikke overflate og SiO_2 -innhold, vil en slik betongsammensetning oppleve en raskere styrkeoppbygning, men ha en lavere utvikling i styrke på langt sikt. K -verdien vil derfor minke med tiden. Flyveaske har et lavere SiO_2 innhold, og en partikkelstørrelse på linje med portlandsement. Den forholder seg derfor noe tregere enn silikastøv. For flyveaske ligger som regel aktivitetsfaktoren rundt 0,7 ved 28 døgns trykkfasthet. Derimot kan k -verdien ligge rundt 1,0 på langt sikt[31]. Nasjonalt tillegg gir føringer for hvilke k -verdier som kan brukes for henholdsvis silikastøv og flyveaske, avhengig av sementtype og bestandighetsklasse. Her er det en direkte sammenheng mellom tabell NA.12 og gitte k -verdier. Bakgrunnen for dette er nærmere beskrevet i bestandighetskapittelet under punkt 2.11.2 og 2.11.3.

Betongsammensetninger bestående av andre materialer enn silikastøv, flyveaske og slagg, og som direkte påvirker bindemiddelegenskapene i betonger, er i dag ikke regulert gjennom standarden. Her siktes det til de kjemiske tilsetningene som inngår i alkaliaktiverede materialer. Se punkt 2.10.2 som tar for seg AAM. Disse spiller en aktiv rolle i hydratiserings- og eventuelle polymeriseringsprosesser som foregår under herding. Deres konsentrasjon og mengde i blandingen, vil påvirke de kjemiske prosessene. Av den grunn har det blitt argumentert for at slike alkalier har en naturlig plass i v/b beregningen. Da AAM også introduserer nye erfaringer i forhold til avbindingstid, herdeforløp, varmetvikling, vannbinding etc. viser litteraturen også at masseforholdet mister sin betydning som en viktig betongparameter. Prosessene som foregår er i mindre grad er styrt direkte av vann-bindemiddelforholdet, og mange forsøk har derfor heller spesifisert betongens egenskaper ut ifra andre parametere som eksempelvis alkali/silikatforhold, og kalsiuminnhold fra OPC. I dette studiet derimot er alle praktiske forsøk gjort med utgangspunkt i masseforhold, og eventuelle aktivator doseringer er blitt betraktet som et tradisjonelt tilsetningsstoff. De inngår dermed ikke i v/b forholdet, annet en bidraget de gir fra vanninnholdet i selve aktivatorløsningen.

2.8 Aktivering av sement

Utstrakt bruk flyveaske har en tendens til å redusere betongens tidlige fasthetsutvikling. Dette er ved mange praktiske formål lite ønskelig, og tiltak gjennom økt aktivering av sement er et mulig alternativ for å motvirke dette. Med sement menes her alle typer materialer med bindemiddelegenskaper. Den tradisjonelle herdningsakseleratoren er gjerne det mest åpenbare alternativet for å fremme tidlig fasthetsutvikling. Dette øker hydratiseringsraten av C_3S , et klinkermineral som i stor grad er ansvarlig for betongens tidlige styrkeutvikling. $NaSCN$, natriumsulfocyanat er et eksempel på denne type akselerator som er mye brukt i Skandinavia[39]. Utfordringen derimot, er at disse gjerne er skreddersydd for betong der hydratisering av OPC dominerer. Ustrakt bruk av alternative bindemidler kan bety at effekten av slike tilsetningsstoffer reduseres. Da produsentene av disse tilsetningsstoffene er ytterst forsiktige med å røpe produktinnholdet, vil det under punkt 2.8.3 og 2.8.4 nevnes mulig kjemiske doseringssammensetninger, fremfor å foreslå et kommersielt produkt som kan nyttes for en betong med høy flyveaskedosering. Ulike aktiveringsmetoder av OPC, og andre alternative bindemidler som tar utgangspunkt i betong med vesentlig høy flyveaskedosering introduseres under.

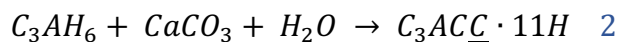
2.8.1 Mekanisk aktivering

Mekanisk aktivering henviser til en metode der sementpartikler gjennomgår en høy intensiv knusing/aktivering av OPC, sammen med ulike typer filler eller alternative bindemidler som flyveaske[40]. Denne videre oppmalingen i de vibrerende møllene evner å øke reaktiviteten i bindemiddelet, noe som har vist økt tidlig fasthetsutvikling sammenlignet med de uten en slik mekanisk prosessering[40]. En slik type fysisk optimalisering er allerede kommersialisert gjennom eksempelvis "EMC Cement"[41]. Denne metoden vil altså kunne gi en ren portlandklinker en høyere reaktivitet, eller den kan tillatte en større andel alternative bindemidler som erstatning for portlandsement, uten å forringe fasthetsutviklingen[42]. Det skal legges til at EMC konseptet ikke har blitt brukt i Norge[43].

2.8.2 Synergieffekter ved tilsetting av kalksteinsmel

Tilsetting av kalksteinsmel i sement er en metode som har vist å gi gunstige synergieffekter sammen med OPC og flyveaske. Noen av disse effektene er blant annet knyttet til filler egenskapene til kalksteinen. Ordet "filler" betegner et materiale som anses som inert, altså et kjemisk ikke-aktivt materiale. Likevel kan den påvirke hydratasjonsraten til klinkeren og distribusjonen av reaksjonsproduktene i betongen[44]. Et filler materiale, det vil si partikler mindre enn 125 mikrometer slik den er definert gjennom partikkel-matriks modellen, kan tjene som nukleasjonssted for hydratasjon av sementpartikler. Dette er egenskaper som kan øke reaksjonskinetikken i betongen.

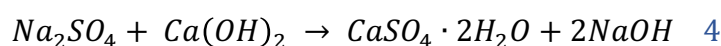
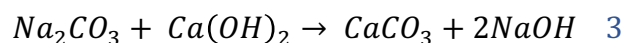
Av andre påviste effekter av kalksteinstilsetning er stabilisering av AFt-fasen, ettringitt, $C_3A \cdot 3\overline{CS} \cdot 32H$. Denne prosessen skjer ved at monosulfat er ustabil ved tilstedeværelsen av $CaCO_3$, og vil danne monokarbonat. Dette gir overflødig sulfation som på ny kan reagere med monosulfat og danne ettringitt. Økt tilstedeværelse av ettringitt gir økt evne til å binde vann. Større vannopptak bidrar til færre porer i betongen, og en mindre porøs betong vil i sin tur bidra til en sterkere betong. Videre vil kalkstein kunne fungere som reaktant i produksjonen av monokarbonat, kalsium monokarboaluminat hydrat, $C_4A\overline{C} \cdot 11H$ eller C-A- \overline{C} -H gel. Et krystallint bindemiddel som bidrar til ytterligere fasthetsutvikling, se ligning 2. Denne prosessen skjer på bakgrunn av en reaksjon mellom nettopp kalkstein, $CaCO_3$ og kalsiumaluminathydrat, C_3AH_6 . Et hydrat produsert gjennom C_3A , kalsiumaluminat hydratasjon[43].



I dag leverer Norcem sementtypene: Standard FA og Anlegg FA med 4 wt% kalksteinsmel, $CaCO_3$ [24], med øye for nettopp disse effektene. At dette tiltaket legges frem som et alternativ for aktivering av sement, skyldes likheten mellom C_3A klinker og flyveaske. Nemlig aluminium innholdet. Det er derfor aktuelt å kunne betrakte kalkstein som en bidragsyter for å fremme tidlig fasthetsutvikling også for betong med høy flyveaskedosering. Dette betyr en ekstra økning i kalksteininnhold i forhold til 4 wt% som er normal dosering i dag. De Weerd et al[37] har tidligere gjort forsøk ved bruk av trefoldige blandinger med OPC, FA og kalksteinsmel. For en OPC-betong med 30 wt% FA av b, og 5 wt% kalksteinsmel ga en 3-døgns fasthet på 23,8 MPa. For en OPC betong med 35% FA uten kalksteinsmel derimot, ga en 3-døgns fasthet på 21,5 MPa. Dette viser en forbedret, men begrenset effekt ved kalksteinstilsetning. En videre økning i tilsetning vil etter en dosering på cirka 10 wt% forringe styrkeutviklingen, om en sammenligner med en ren OPC betong[36].

2.8.3 Mild kjemisk aktivering

Kjemisk aktivering henspiller på de tiltak der en gjennom tilsetning av mindre doser kjemiske stoffer kan forbedre herdeprosessen. Betydningen ”mild” viser til stoffer som er mindre aggressive og kan håndteres uten større behov for verneutstyr og andre sikkerhetsforanstaltninger. Kjemisk aktivering nytter prinsippet om at økt pH i porevannet bidrar til økt løselighet av flyveaske. Økt løselighet betyr at en større del av partikkeloverflaten til flyveaske eksponeres i porevannet. Se punkt 2.10.3 som beskriver disse mekanismene mer detaljert. Alkalikarbonater som Na_2CO_3 og KCO_3 vil være to aktuelle aktivatorer i denne sammenhengen, og kan være et nyttig hjelpemiddel ved høy flyveaskedosering. Her åpnes det for økt gelproduksjon ved reaksjon med kalsiumhydroksid, $Ca(OH)_2$. Om vi betrakter den kjemiske reaksjonsligningen ved tilsetning av natriumkarbonat og natriumsulfat får en som vist i ligning 3 og 4[42, 45]:



Produksjon av NaOH bidrar til den økte pH-verdien i porevannet. Flyveasken vil få en høyere løselighet og reagere raskere med kalsiumhydroksid. In-situ produksjon av NaOH betyr også at en ikke behøver å tilsette sterke basiske løsninger direkte under blanding. På den måten vil tilsetning av slike uorganiske salter minimere utfordringer knyttet til HMS.

Ved tilsetning av natriumkarbonat felles det også ut kalsiumkarbonat. Økt mengde CaCO_3 åpner for en raskere reaksjon med kalsiumaluminathydrat, C_3AH_6 fra OPC, enn hva tilfellet er for CaO-holdige portlandsklinkerne. Dette kan bidra positivt for en betong med en lav tidlig fasthetsutvikling[43]. Av de mindre gunstige effektene bruken av slike aktivatorer kan gi, er den påståtte reduserte bearbeidbarheten. CaCO_3 gir en hardere konsistens i den ferske betongen når dette felles ut etter reaksjon med kalsiumhydroksid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fra OPC hydratasjonen[42].

2.8.4 Sterk kjemisk aktivering

Sterk kjemisk aktivering beskriver aktivatorløsninger som er sterkt basiske. Den vanligste er gjerne NaOH, også kjent som kaustisk soda eller lut. Denne aktivatoren nyttes normalt i kombinasjon med Na_2SiO_3 , vannglass. NaOH bidrar som nevnt til å øke pH nivået i porevannet slik at silikatene i flyveasken kan aktiveres. Ved å også tilsette vannglass i blandingen vil dette fremskynde produksjonen av reaksjonsprodukter, ettersom vannglasset allerede inneholder monomere av silikater, som raskere kan innlemmes i en polymeriseringsstruktur[36]. Slike sterke basiske løsninger øker løseligheten til flyveasken, og er særlig aktuelt der flyveaskedosering nærmer seg 100% av total bindemiddel. Et høyere pH-nivå i porevannet vil derfor legge til rette for et bindemiddelsystem som vil skille seg fra en blanding der mild kjemisk aktivering tas i bruk. Se punkt 2.10.3 for en utdypende forklaring. De åpenbare motargumentene ved denne typen aktivatorer er de praktiske helse- og sikkerhetsutfordringene. Klargjøring og lagring av slike løsninger krever derfor ekstra tilsyn og strengere krav til HMS. I sammenheng med bruk sterk kjemisk aktivering i betong, har det også vært rapportert om utfordringer knyttet til en redusert effekt fra vannreducerende tilsetningsstoffer.

2.9 Aktivatorens rolle i et miljøperspektiv

Etter hvert som forskning og erfaring med alkali aktiverte systemer vil bidra til å øke brukspotensiale, introduseres også andre akseptkriterier som må tilfredsstilles. Eksempelvis gjelder dette de rent økonomiske aspektene, som hos betongnæringen åpenbart vil veie tungt. Det gjelder regelverk som må innlemme disse nye materialene. Det gjelder logistikk og praktisk håndtering. Dette er forhold som enda ligger frem i tid, men for å komme dit bør en kunne dokumentere at det foreligger et forbedret miljøpotensiale. Er miljøbelastningen, som jo er hovedmotivasjonen for denne type materialer, faktisk så gunstig som den later til å være? Her hersker det fortsatt en del usikkerhet. Flere studier viser at produksjon av de mest dominerende alkaliske aktivatorene; vannglass og natriumhydroksid, utgjør brorparten av CO_2 -utslippet for en geopolymer[46, 47].

Selv om det er en generell konsensus om at alkali aktiverte materialer har et betraktelig bedre CO₂ avtrykk, er dette slik Provis et al[48] beskriver det, basert på en holistisk fremgangsmåte som i mindre grad tar hensyn til lokale forhold og begrensninger. Denne usikkerheten skyldes gjerne at logistiske faktorer som transport, produksjon og forsyningskjeder, i mindre grad er avklart for alkali aktiverte materialer. Dette skiller seg fra den ordinære portlandsbetongen som lettere kan få hele sin verdikjede avdekket, nærmest uavhengig av geografisk plassering. En slik vurdering får støtte fra McLellan et al[49] sine talldata fra Australia, vedrørende den store spredningen i de potensielle miljøgevinstene omkring AAM, herunder geopolymere. Her ble det konkludert med at en geopolymere betong potensielt kunne redusere sitt klimagassutslipp med 97%, men også ha en økning på 14%, sammenlignet med en OPC betong. Råvaretilgang og transport influerte i stor grad denne sammenligningen. Turner et al[46] har målt CO₂-utslippet for en geopolymere betong, og kommer frem til en reduksjon på bare 9%, sammenlignet med en betong bestående av 100% portlandsement. Noen av grunnene til dette lave resultatet ble forklart ut ifra: Nødvendig energi tilknyttet produksjon av de alkaliske aktivatorene, behovet for økt omgivende temperatur ved herding, og behandling og transport av råmaterialer for produksjon av alkaliske aktivatorer.

Det er med andre ord mulig å finne svært ulike talldata for miljøgevinsten vedrørende geopolymere, i likhet med en hybrid betong som også er gjenstand for alkaliske tilsetninger. En kommersialisering av hybrid og geopolymere betong skulle derfor tilsi at tilgjengelighet, og miljøvennlig produksjon av ulike kjemiske alkalier, må på plass før potensiale til disse fullt ut kan utnyttes.

2.10 Ulike bindemiddelsystemer

2.10.1 Geopolymere

Geopolymere, i ordets rette forstand, antyder en polymerkjede bestående av stoffer med geologisk opprinnelse. Det vil si uorganiske metalloksider en kan finne i jordskorpen, eksempelvis silisium og aluminium. Dette er også de mest dominerende grunnstoffene sammen med oksygen i jordskorpen[50]. Betegnelsen geopolymere ble første gang introdusert av franskmannen Joseph Davidovits allerede i 1972[51]. Geopolymere beskrives som et amorft til semi-krystallint materiale, med egenskaper som kan ligne zeolitt, et naturlig forekommende mineral. Den kjemiske strukturen er dog ikke lik, ettersom zeolitt er et hydrat. Kjemisk fremstilt zeolitt er forøvrig kjent som et sekundærprodukt for alkali aktiverte materialer[52], på samme måte som en finner tilstedeværelsen av C-A-C-H gel, ved C-S-H gel produksjon under portlandhydratasjon. Denne geosyntetiseringen i geopolymere kan forklares ved at det foregår produksjon av ”kunstig stein” som gir tilhørende egenskaper som hardhet, bestandighet, og varme- og brannisolerende evner[53]. Sistnevnte egenskap var også utgangspunktet for Davidovits forskning på bakgrunn av flere katastrofale branner i Frankrike tidlig på 70-tallet[51].

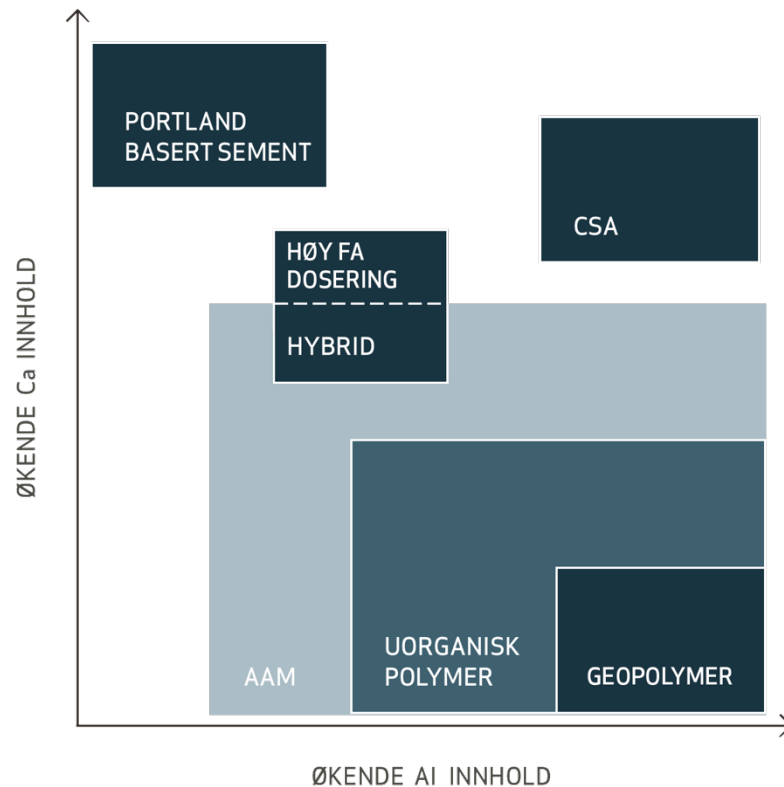
Denne polymeriseringsprosessen danner et bindemiddel som skiller seg fra den mer kjente hydratiseringen av portlandsement, og produksjonen av C-S-H gel. I en geopolymer skjer det en kondensasjonsreaksjon mellom de oppløste silikatene og aluminatene, i en sterkt basisk porevannsløsning. Det er viktig å merke seg at den overordnede beskrivelsen av en geopolymer kjennetegnes som metalloksider som bindes i en repeterende tredimensjonal struktur, der polymeriseringen aktiveres av et basisk, eller syreholdig medium. I betongsammenheng derimot, er geopolymer avhengig av en alkalisk aktivator som er utgangspunktet og første steg i en polymeriseringsprosess[54]. Den økte pH-verdien skyldes tilførselen av aktivatorer, som regel et alkalihydroksid og et alkalisilikat. De aluminiumsrike silikatmaterialer finnes typisk i flyveaske, og naturlige pozzolaner som vulkansk aske og metakaolin. Også kalt kalsinert leire. Felles for disse er deres tilfredsstillende mengder av aluminiumoksid, Al_2O_3 [34]. Kondensasjonsreaksjonen skjer umiddelbart etter blanding, og avbindingstiden kan derfor være vanskeligere å justere med tilsetningsstoffer, slik en er vant til i en OPC betong. Resultatet er et uorganisk tredimensjonalt nettverk av monomere bestående av aluminium og silikat-tetraeder, AlO_4^- og SiO_4^- [34], der nettverket fremkommer som Si-O-Al bindinger. Aktivatorenes rolle i polymeriseringsreaksjonen kjennetegnes gjerne ut ifra to ting[53]. De bidrar til å øke pH-verdien, og dermed løseligheten til aluminiumsilikatene. Samtidig opprettholder alkaliene den elektriske nøytraliteten i matrisen. Uten tilførsel av disse oppstår det en ubalanse av negativt ladede partikler forårsaket av tetraeder strukturen til geopolymer. Dette nettverket av aluminium, silisium og oksygen dannes uten H_2O som reaktant. H_2O fungerer her som en katalysator for den kjemiske reaksjonen, og inngår ikke selve polymeriseringsprosessen. Dette er også en åpenbar forskjell fra den mer kjente hydratiseringen av OPC, der vann bindes kjemisk. Som regel 0,23g vann/g OPC ved full hydratisering[55].

Geopolymer fremstår i dag som det grønne alternativet til portlandsement. Den økte bekymringen for verdens CO_2 -utslipp har de siste årene gitt luft i vingene for videre optimalisering av geopolymer. Selv om teknologien har eksistert i årtier, og er et godt etablert fagfelt innenfor betongteknologien, er den ikke like fullt akseptert ute i betongnæringen. Dette skyldes særlig en del praktiske begrensinger som gjør den mindre konkurransedyktig mot den mer etablerte OPC betongen. Nødvendigheten for å øke pH-verdien i tilstrekkelig grad gjør at sterke basiske løsninger som NaOH gjerne må tilsettes på stedet. Dette er av praktiske årsaker lite ønskelig, samtidig som det utgjør en HMS-risiko ved håndtering av slike stoffer. Minimal tidlig fasthetsutvikling ved romtemperatur gjør at herding under forhøyet temperatur ofte er mest aktuelt ved bruk av geopolymer[43]. Som regel betyr dette temperaturer på 50-60°C, eller mer[38, 45]. Dette innebærer i praksis at bruken i dag er begrenset til prefabrikkerte betongelementer. Samtidig er det knyttet en del utfordringer i forbindelse med avformingsprosessen. Støpen har lett for å sette seg fast i forskalingen, og vanskeliggjør fine overflater. Den tradisjonelle formoljen reagerer med geopolymer og mister den smørende effekten den er tiltenkt for å lette avformingen[56]. Fra et produksjonsmessig ståsted er geopolymer fortsatt et nisjemateriale. Det omfattende logistikkapparatet som må ligge til grunn for å kunne levere på tilgjengelighet og volum, er ikke til stede, slik tilfellet er for den velintegreerte portlandsementen i betongindustrien[3].

Motivasjonen for en videre utvikling av geopolymere skyldes med andre ord de gunstige klimagassavtrykkene, om en utelater usikkerheten rundt aktivatorenes bidrag. Da geopolymere sement ikke er basert på kalsiumkarbonat, CaCO_3 som råmateriale, forsvinner også CO_2 -utslippene forbundet med kalsinering og brensel til oppvarming. Nærmere beskrivelse av de nøyaktige GWP-verdiene forbundet med slike betongtyper, og energibruken tilknyttet dette, vil ikke utdypes i stor grad. Essensen her er at alkali aktiverte materialer anses som gunstige alternativer da de i stor grad tar i bruk eksisterende materialer fra annen industri. I tillegg er det den åpenbare fordel at avfallsprodukter fra annen industri som brukes i betongen også minimerer mengden deponering av slikt avfall. Gode bestandighetsrelaterte egenskaper trekkes også frem som et viktig argument for videre forskning og bruk av geopolymere.

2.10.2 Alkali aktiverte materialer

AAM er en betegnelse som favner bindemiddelsystemer i betong, der tilførsel av alkalialter i løs eller fast form er en forutsetning for herdeprosessen. Samt en bidragsyter for videre herding. Alkalisaltene kan være et alkali hydroksid eller forbindelser av silikater, karbonater, sulfater, aluminater eller oksider[3]. En geopolymere regnes som en undergruppe av AMM, da tilførsel av alkalier er avgjørende for en polymeriseringsprosess. Alkalisaltene er som nevnt i en slik sammenheng gjerne representert ved de to aktivatorene; NaOH og Na_2SiO_3 . Om vi betrakter en annen herdeprosess, nemlig hydratisering av OPC, finnes det også en rekke tiltak her som kan øke herderaten ved tilførsel av alkalier. Eksempelvis forbindelser av kalsium, kalium og natrium. Tilførsel av NaCO_3 eller NaSO_4 har vist seg å gi slike effekter i en OPC betong med høy andel alternative bindemidler[43]. Det er viktig å merke seg at her fungerer alkaliene som et hjelpemiddel for å optimalisere herdeprosessen under hydratisering, men er ikke en forutsetning slik tilfellet er for en polymeriseringsprosess. Av denne grunn brukes ikke betegnelsen AAM om kjemiske prosesser hvor OPC, eller rettere sagt; der kalsium fortsatt har en dominerende rolle i bindemiddelproduksjonen. Figur 7 gir en egen oversikt over hvor en kan plassere de ulike bindemiddelsystemene, med utgangspunkt i litteraturen[3]. Her er altså den avgjørende forskjellen mellom en ren OPC betong og en geopolymere deres ulike Ca/Al forhold. Hydratisering ved OPC krever tilstrekkelig mengder med kalsiumsilikater ved produksjon av kalsiumsilikahydrater, C-S-H gel. En ren geopolymere derimot er avhengig av aluminiumsilikater. Legg merke til at det også finnes områder mellom OPC og AAM i figuren der OPC og en vanlig hydratisering foregår, selv med store mengder flyveaske, og/eller med drahjelp fra kjemisk aktivering. I blandingssystemer der en befinner seg i området mellom en OPC betong, og betong basert på et AAM system, er det utfordrende å vite eksakt hvordan de kjemiske prosessene vil foregå. Dette fører oss til det området som denne oppgaven blant annet befatter seg med: En hybrid betong med OPC og alkali aktivert flyveaske sement. Veiskillet mellom en ren OPC betong og en AAM system, slik figuren illustrerer. På den andre siden kan sammensetninger med høy flyveaskedosering observeres, uten kjemisk aktivering. Og slik figuren antyder, vil denne oppgaven derfor befatte seg med betonger og mørtler som opererer i skillet mellom alkali aktiverte materialer, og ikke alkali aktiverte materialer.



Figur 7 Oversikt over ulike bindemiddelsystemer[3]

2.10.3 Hybrid betong av OPC og alkali aktivert flyveaske

I en hybrid betong bestående av OPC og alkali aktivert flyveaske vil en kunne observere dannelsen av ulike typer bindemiddelsystemer. Type alkalitilsetning og de ulike effektene dette gir blir ikke diskutert under dette punktet. Tilførselen av kalsium i porevannsløsningen fra OPC gir grunnlaget for andre bindemiddelsystemer enn hva som er tilfellet for en ren flyveaske aktivert sement, beskrevet gjennom geopolymerprosessen. Avhengig av flyveaske-klinkerforhold, samt alkaliteten til aktivatoren som tilsettes, vil enten en dominerende klinkerhydratasjon, eller økt flyveaske aktivering finne sted[45]. Dette begrunnes ut ifra at C-S-H gel blir ustabil i et sterkt alkalisk miljø med $>7,5\text{M}(\text{mol/l})$ NaOH[45]. I et slikt hybrid system vil de dominerende gel formasjonene typisk kjennetegnes av C-A-S-H og (N,C)-A-S-H[57]. Her det snakk om gelformasjoner med kjemisk bundet vann, men med aluminium som en betydelig del av gelproduktet. Garcia-Lodeiro et al[58] gjorde analyser av en hybrid sement bestående av 30% OPC, og 70% flyveaske, med bruk av to typer aktivatorer: Na_2CO_3 og en mix av NaOH og Na_2SiO_3 . Resultatene viste at et høyt innhold av alkalier ga en retardasjon i OPC hydratasjonen, og tilstedeværelsen av alkalier en høyere løselighet av flyveaske. Gradvis økning av pH i porevannsløsningen favoriserer derfor C-A-S-H og N-A-S-H, til fordel for C-S-H gel.

I korte trekk er tilstedeværelsen av aluminium fra flyveaske, og natrium fra blant annet aktivatortilsetning, grunnlaget for den omgjøring en ser fra C-S-H gel til C-A-S-H gel i matriksen. Samtidig vil tilstedeværelsen av kalsium fra OPC også kunne danne endrede gelstrukturer vist gjennom produksjon av (N,C)-A-S-H[45].

Det er fremlagt flere modeller for hvordan den fysiske endringen i flyveasken fører til økt reaktivitet når tilgangen på mengden alkalier øker. Fernandez-Jimnez et al[59] foreslår en prosess der de kjemiske aktivatorene angriper overflaten til de hule og sfæriske flyveaskepartiklene. Resultatet er dannelsen av små hulrom tilgjengelig for det høyalkaliske porevannet, og en videre oppløsning av flyveaskepartiklene vil kunne skje. Her vil de mindre cenosfærene og plerosfærene i flyveasken bidra til en intensivert reaksjonsprosess, og dannelsen av de overnevnte reaksjonsproduktene. Den reduserte avbindingstiden, og økt tidlig fasthetsutvikling som kjennetegner kjemisk aktivert flyveaske, blir derfor akkreditert disse mindre sfæriske partiklene en finner i de hule flyveaskepartiklene.

2.10.4 Uorganisk polymer

En uorganisk polymer er på lik linje med geopolymer definert som en undergruppe av AAM, men har større likheter med nevnte hybrid betong, da den også inneholder mindre mengder kalsium. Dog er ikke dette en betong der OPC inngår som bindemiddel. Alkali aktivert slagg, eller en flyveaske/slagg blandingssement derimot vil kunne karakterisere som en uorganisk polymer. Samtidig regnes den ikke som en ren geopolymer, ettersom slagg inneholder kalsium[34]. For en uorganisk polymer ser en gradvis større overvekt av silikataluminater enn kalsiumsilikater i nettverksstrukturen. I sementkjemien er dette definert som en større andel $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$, enn hva en kan observere i OPC[3]. Den endimensjonale kjemiske strukturen til kalsiumsilikahydrater, vil hos en uorganisk geopolymer ha et mer kryssbundet silikatnettverk, i retning av en tredimensjonal struktur slik en kan observere for en geopolymer[3].

2.10.5 Kalsiumsulfataluminat

Kalsiumsulfataluminat, CSA er et annet bindemiddel som det i denne sammenheng ikke tillegges mye oppmerksomhet. CSA er en gipsbasert sementtype der bindemiddel produksjonen domineres av ettringitt, og hydrater fra C_3S klinker.

CSA finnes brukt i avrettingsmasser der behovet for rask herding er stor. Det er dog ikke et utbredt byggemateriale for stor skala byggeproduksjon[43].

2.11 Bestandighet

Betongens bestandighetsegenskaper påvirkes av en rekke faktorer, deriblant permeabilitet og porestruktur. Dette er en viktig fysisk parameter som i stor grad styrer hvordan aggressive stoffer som klorider, sulfater og karbondioksid evner å trenge inn i betongen. Konsekvensene er mange; klorid induisert korrosjon, eller korrosjon gjennom karbonatisering kan gi tap av betongtverrsnitt gjennom avskaling, og/eller strukturelle lastproblemer gjennom tap av armeringstverrsnitt. Sulfatangrep, ASR eller frostangrep kan på samme måte gi volumforandringer inne i betongen, med oppsprekking, avskaling eller krakelering som resultat. Dette kan gi visuelle og strukturelle skader, samt åpne opp for videre økning av karbonatisering og kloridinntrengning.

2.11.1 Bestandighetsbetraktninger i standarden

Å sammensette en betong som er motstandsdyktig mot overnevnte nedbrytende mekanismer blir definert etter forventet eksponering i det aktuelle miljøet. Denne eksponeringsklassen vil i sin tur vise til nødvendig bestandighetsklasse for betongen. I Tabell NA.12 i nasjonalt tillegg gis det grenseverdier for hvilke sementtyper som kan nyttes innenfor de enkelte bestandighetsklassene. Eksponeringsklasse X0 setter med andre ord få begrensinger på sammensetningen i betongen, og en M90 vil være tilstrekkelig i et slikt tilfelle. Dette er også situasjonen for de to referanseprosjektene ved Brattørkaia og Gullhaug Torg. Alle bestandighetsklassene definerer krav til effektiv bindemiddelmengde, sementtype og mengde dosering av alternative bindemidler. Inkludert grenseverdier for luftinnhold. For en M90 betong som er minst konservativ i så måte, muliggjør derfor store friheter ved valg av ønsket betongsammensetning. For en ordinær betong er dette akseptabelt da en rent erfaringsmessig kjenner til de begrensningene som gjelder vedrørende bestandighet. For en betong med høy flyveaskedosering derimot, som også er karakterisert som en M90 betong, finnes det ikke nok erfaring eller tilstrekkelig dokumentasjon på den faktiske oppførselen den har i ulike miljøer. Dette skaper en viss usikkerhet om langtidsegenskapene, og er viktig å ta i betraktning.

Rent lovmessig kan en slik betong, som nevnt tidligere, tilfredsstillende nødvendige krav i henhold til standarden. Da med antagelsen om at overflødig flyveaske regnes som filler materiale. Dette er vist i undertegnede prosjektoppgave om lavkarbonbetong ved Powerhouse Brattørkaia[60]. Om betongen evner å tilfredsstillende andre eksponeringsklasser enn X0 vil derfor være interessant å kjenne til, og som ikke lar seg avgjøre uten videre testing. Det er her nødvendigheten for testing av porestruktur og permeabilitet kommer inn, da det gir en god indikasjon på betongens overordnede motstand mot nedbrytende mekanismer. I litteraturen finnes det studier av ulike bindemiddelsystemer og hvordan disse påvirker betongens bestandighetsrelaterte egenskaper. Da siktes det til hvordan de ulike aktiveringsmetodene, særlig gjennom kjemisk aktivering, påvirker betongens bestandighet ved produksjon av ulike reaksjonsprodukter. En slik studie og redegjørelse for disse mekanismene vil ikke bli foretatt her. Det er likevel nyttig å være klar over at alkaliske aktivatorene introduserer nye spørsmål vedrørende bestandighetsegenskaper, og ikke kun gjennom den direkte påvirkningen en får fra økt flyveaskedosering.

2.11.2 Kloridinntrengning

Klorider i betong er problematisk da den kan gjøre store lokale skaders uten behov for reduksjon i pH-nivået for at korrosjonsprosessen skal starte. Kloriders transportmekanismer må skje som oppløst i vann. Enten ved ionediffusjon i porevannet, kapillærsug eller ren vanngjennomtrengning som er typisk ved marine miljøer. Økt pozzolaninnhold bidrar generelt til en tettere og mindre permeabel betong, og minimerer derfor muligheten for gjennomtrengning av salter. En annen effekt ved tilførsel av flyveaske og C_3A , er at de binder opp saltene til såkalte Friedel's salt, og dermed akkumulerer klorider i porevannet. Dette er en særlig gunstig effekt ved flyveasketilsetning i betong. Dette bidraget er synliggjort i tabell NA.12 som ikke setter strengere krav for en sementtype av CEM I, eller en sementtype av CEM II A-V i en M45 betong. I bransjen vil en betong under bestandighetsklasse M45 typisk være myntet på konstruksjoner lokalisert i miljøer eksponert for klorider. Ser vi derfor under kravene for en M45 i tabell NA.12, eller M40 for den saks skyld, gir ikke sementtyper inneholdende flyveaske andre krav til masseforhold. En tilsvarende effekt ser vi for tabell NA.9, som ikke nedjusterer k-verdi kravet for nevnte bestandighetsklasse. Med andre ord viser dette at tilførsel av pozzolaner som flyveske, bidrar positivt i forhold til kloridmotstand, og standarden har derfor ikke diskreditert et slikt bidrag.

Det er grunn til å tro at en videre økning i flyveaske ikke vil forringe de nevnte egenskapene, tvert imot bevare dem. Da med tanke på hybrid betonger og geopolymer av flyveaske. Dette skyldes i første omgang de overnevnte mekanismene, men også på bakgrunn av tilgjengelig litteratur[38]. Ettersom klorid inntrengning er sterk relatert til betongens porøsitetsegenskaper, tilsier i utgangspunktet en tettere betong også en mer kloridbestandig betong. Det skal legges til at mange av de målingene som gjøres på klorider i AAM systemer er basert på premisset om en betong av portlandsement. Med andre ord har AAM med sitt endrede alkaliske miljø vist at slike metoder har en begrenset gyldighet. Noe Provis et al[48] understreker når metoder som RCPT, som estimerer diffusjonskoeffisienter, skal nyttes.

2.11.3 Karbonatisering

Betrakter vi en M60 betong tilfredsstillende ikke den lenger krav til kloridmotstand, ei heller andre kjemiske angrep[61]. Til gjengjeld tilfredsstillende den krav til motstand mot karbonatisering. En betong under M60 er derfor gjerne styrt av hvordan betongens ulike sementtyper evner å motstå karbonatisering. Korrosjon ved karbonatisering forløper seg ved at karbonoksid løst i vann, eller vanddamp binder opp alkaliene i porevannet og senker pH-nivået. Dette vil gjøre passivfilmen rundt armeringen ustabil, og en korrosjonsprosess vil kunne initieres. For en betong inneholdende flyveaske ser en derfor i samme tabell, NA.12, et strengere krav til masseforhold, når flyveaske er en del av sementinnholdet. Her ligger største tillate masseforhold mellom 0,50 – 0,55 for en M60 betong. Dette beror på effekten en ser ved gradvis økende pozzolanbruk i betong. Større andel pozzolaner muliggjør økt produksjon av C-S-H gel gjennom reaksjon med kalsiumhydroksid, $Ca(OH)_2$ som jo er hovedmotivasjon for å ta i bruk pozzolaner i portlandsbaserte betonger.

Den negative effekten er at dette også minker andelen alkalier i betongen, gjennom reduksjon av kalsium fra $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Dette reduserer evnen til å opprettholde et tilstrekkelig høyt pH-nivå nødvendig for at passivfilmen på armeringen skal eksistere. Som Langedal[62] viser i sine studier, er det en klar økning i karbonatiseringsraten ved mørtler inneholdende flyveaske, kontra rene portlandsbaserte mørtler. Målingene kan vise til en betydelige høyere resistivitet i flyveaskemørtelen, noe som indikerer reduserte mengder av de mest dominerende alkaliene; Na^+ og K^+ .

En annen effekt ved økt flyveaskedosering er at inntrenging av karbondioksid oppløst i vann eller i vanddamp, i mindre grad kan reagere med kalsiumioner fra kalsiumhydroksid og danne CaCO_3 , ett fast stoff som bidrar til å øke tettheten i betongen. Dette vil over tid kunne gi en mindre permeabel betong og dermed større motstand mot inntrenging av aggressive stoffer. Fraværet av kalsium fra kalsiumhydroksid hindrer altså denne effekten. Et lavere masseforhold skal forsøke å korrigere for denne effekten slik det fremkommer i tabell NA.12. Tabell NA.9 som angir ulike k-verdier for flyveaske, viser at for en M60 betong er k-verdi tallet satt som en direkte konsekvens av overnevnte grunner. Her ligger den kun på 0,4, i motsetning til resterende bestandighetsklasser på 0,7. En verdi som i praksis betyr at bindemiddelmengden må økes for å kompensere for en slik reduksjon. En betong med svært høy flyveaskedosering, som har minimalt med kalsium i systemet, vil med andre ord være problematisk i forbindelse med karbonatisering. En slik sammenheng mellom tillatt k-verdi og krav til bestandighetsklasse ser vi også for silikastøv, gitt i tabell NA.10. Her viser en M60 betong en tillatt k-verdi på 1,0. For de lavere bestandighetsklassene der hensynet på kloridmotstand spiller inn, er tilførsel av silikastøv tillagt en åpenbar positiv effekt, vist ved en k-verdi på 2,0.

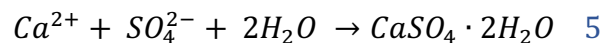
På dette området, som ved de fleste andre diskusjoner vedrørende nedbrytende mekanismer, er det knyttet stor usikkerhet til slike betongers bestandighetsegenskaper i alkali aktivert system. Provis et al[48] argumenterer blant annet for at den høye alkaliteten i betonger av AAM sørger for at pH-nivået vil kunne holdes tilstrekkelig høy nok til at armeringsjernet ikke depassiviseres. Samtidig nevnes effekten av at karbonatisering i tidlig alder kan forringe betongens mekaniske egenskaper i et alkali aktivert system. Dette forklares ved at tilgangen på frie alkalier minker med økende CO_2 konsentrasjoner. Når dette skjer vil reaksjonskinetikken i et alkaliaktivert materiale, som er helt avhengig av et høyalkalisk miljø, gradvis reduseres. Bernal et al[63] har studert karbonatisering i AAM systemer basert på slagg og flyveaske. Her vises resultater av alkali aktiverte flyveaskebaserte bindemidler, at karbonatisering i hovedsak skjer ved utfelling av alkalibikarbonat-salter fra porevannsløsningen. Og nesten ingen forandring i gelformasjonen. For natriumsilikat aktiverte flyveaske/slagg blandinger vises det til de dominerende gelformasjonene av C-A-S-H og N-A-S-H systemene. Som forøvrig tilsvarer de antatte dominerende reaksjonsproduktene aktuelt i dette studiets blandinger av OPC, med alkaliaktivert flyveaske. Se punkt 3.7 for nærmere beskrivelse. Her gir derimot karbonatiseringen en tilsvarende CaCO_3 produksjon, ikke gjennom Portlanditt reaksjon, men i direkte reaksjon med C-A-S-H. Dette etterlater en aluminiumholdig restgel i kombinasjon med CaCO_3 , sammen med en uendret N-A-S-H gel.

Litteraturen later ikke til å konkludere om risikoen for armeringskorrosjon ved karbonatisering i AAM er større enn for den tradisjonelle portlandsbetongen. Det gis allikevel en antydning om at en ikke uten videre kan avskrive slike AAM betonger som uegnet, da mekanismene bak karbonatisering ikke kan forklares kun på bakgrunn av manglende kalsium fra $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

At disse målingene er gjort under et sterkt aggressivt testregime, som i realiteten ikke samsvarer med den egentlige saktegående karbonatiseringsprosessene, trekkes frem som et viktig motargument, og som forstyrrer de faktiske forholdene i et alkali aktivert materiale[48]. Med andre ord hersker det usikkerhet vedrørende effekten av CO_2 inntrengning i alkali aktiverte materialer.

2.11.4 Sulfatangrep

Sammen med nevnte karbonatisering- og klorid problematikk er sulfatangrep også styrt av betongens porestruktur. Da kan inntrenging av sulfater skje som oppløst i ioner og trenge inn i betongens poresystem. Utfordringen med sulfater er i første rekke knyttet til den ødeleggende ekspansjonen som oppstår ved forsinket ettringitt produksjon. En annen uheldig effekt er produksjon av gips. Sulfationer vil kunne reagere med kalsiumioner fra kalsiumhydroksid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fra den hydrerte sementpastaen, og danne gips. Se ligning 5:



Produksjon av gips reduserer betongens evne til å produsere C-S-H gel fra kalsiumioner og gir derfor en svakere betong. Samtidig skjer det en volumforandring i overgangen mellom kalsiumhydroksid og gipsproduksjon, som kan bidra til oppsprekking[64]. Sulfatangrep er i Norge sammenlignet med mange andre land, et mindre problem[24]. Dette skyldes særlig strenge krav ifra standarden. Samtidig er slike reaksjoner svært temperaturavhengig, og på den måten vil et kaldere klima bidra til å dempe denne problematikken. Merk at disse kjennetegnes ved en ordinær betongsammensetning, men for en ren geopolymer med fravær av kalsium vil ikke ettringittproduksjon kunne skje[43]. Dette er direkte relatert til de lave konsentrasjonene av AFm-fasen, som kjennetegner systemer basert på flyveaske og/eller slagg[36, 48].

For en hybridbetong eller en betong med høy flyveaskedosering som dette studie befatter seg med, vil det nødvendigvis måtte være tilstrekkelig mengder med kalsium for at sulfatangrep skal utgjøre en risiko. Hvor i doseringsforløpet av flyveaske, og den påfølgende reduksjonen av kalsiumforbindelser, dette eliminerer trusselen for sulfatangrep, har det ikke lyktes å avdekke.

I nasjonalt tillegg, tabell NA.13 gis det krav til bindemiddel i sulfatholdige miljøer gjengitt i vedlegget. For eksponeringsklasser over XA1 er det gitt minstekrav til silikastøv- og flyveasketilsetning, ettersom dette bidrar positivt til å hindre sulfatangrep. Pozzolanbruk bidrar som nevnt til en tettere og mindre permeabel betong. Samtidig er det satt krav til maksimalt innhold av C_3A og kalkfiller.

2.11.5 ASR problematikk

ASR, alkali silika reaksjon, er også et bestandighetsproblem i fast betong. Denne nedbrytende mekanismen er i mindre grad styrt av betongens porestruktur og permeabilitet slik som overnevnte mekanismer, men heller av andre faktorer. Henholdsvis grad av fuktighet, alkaliinnhold og alkalireaktivt tilslag, hvorav alkalireaktivt tilslag avhenger av mengden kvartsinnhold. Store mineralkorn på tilslag er sett på som lite ønskelig da dette gir gode ”vekstvilkår” for ASR[64].

ASR kan først beskrives som tilfeller der en får uønsket gel produksjon i tilslaget. Denne gel'en ekspanderer og utøver press på betongen, og gir opphav til lokale strekkspenninger. Dette resulterer i sprekkdannelse og såkalt krakelering som kan observeres ved betongoverflaten. Selv om ikke gelproduksjonen i seg selv nødvendigvis er ødeleggende vil dannelsen av sprekker legge til rette for at aggressive stoffer raskt kan redusere kvaliteten, og levetiden på betongkonstruksjonen. Korrosjon og frostsprengningen er aktuelle mekanismer i denne sammenheng. På tilsvarende måte, dog i en fersk betong som kan ta hånd om volumforandringer, skjer det et likedan reaksjonsmønster i en pozzolanreaksjon. Pozzolanet får løst sitt innhold av silikat ioner ved tilstedeværelsen av det basiske hydroksidionet i porevannet. Med tilstrekkelig tilgang på kalsium dannes så C-S-H gel. I forkant av denne reaksjonen skjer det en reaksjon med de lettere tilgjengelige alkaliene, som kalium og natrium. En alkali silika gel dannes. Denne er ustabil ved tilstedeværelsen av kalsium, og kalsiumsilikahydrat, C-S-H gel dannes som resultat av dette[65].

Når silikater fra tilslaget over tid gir næring til produksjon av disse forbindelsene, vil de i en herdet betong kunne ha ødeleggende effekter. For en geopolymere betong, uten tilgang på kalsium i systemet, argumenteres det for at ASR ikke vil være et praktisk problem. Det første angrepet er forbundet med en relativt lav viskositet og liten ”sprengkraft”. Det er først når en del av alkaliene byttes ut med kalsium at viskositeten øker, sammen med den tilhørende vannbindingen, og dermed økt ”sprengkraft”. For en vanlig betong kan dette beskrives som når alkali silika forbindelser presses ut fra tilslaget og inn i pastaen der kalsium befinner seg. Det er i forbindelse med denne reaksjonen det hevdes at den ødeleggende ekspansjonen foregår[43]. OPC betonger med tilførsel av flyveaske vil redusere faren for ASR da den reduserer alkaliteten, og senker andelen kalsium i systemet

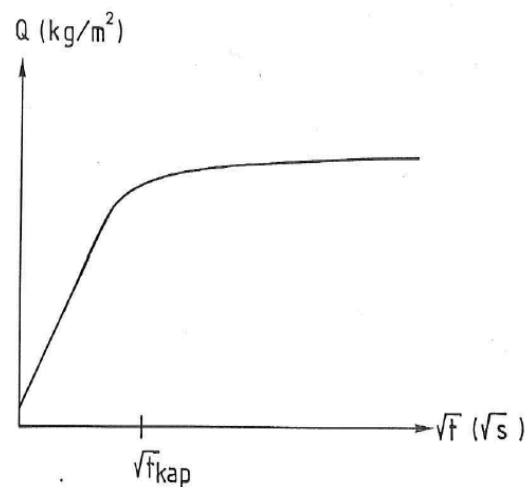
Garcia-Lodeiro et al.[52] gjennomførte en studie av ulike typer mørtelblandinger der det ble foretatt en SEM/EDX analyse. Resultatet viste at rene portlandsementer inneholdt ASR-gel, mens den aktiverte flyveaskemørtelen på sin side, ikke viste signifikante tegn til volumforandringer[52], og dermed ingen ASR problematikk. Dette på tross av at prøvene inneholdt reaktivt tilslag, i kombinasjon med en høy temperatur og et fuktig alkalisk miljø. Prøvene var plassert i 1M NaOH løsning i en forseglet beholder på 85 grader celsius.

Fraværet av skadelig ASR begrunnes ut ifra det manglende kalsiuminnholdet i den rene flyveaskemørtelen. Studien beskriver at selv med tilførsel av den sterke økningen i alkalier fra aktivator doseringen, bidrar ikke dette negativt. Reaksjonen som skjer mellom det silikatholdige tilslaget og alkaliene i porevannet, har vist seg å heller produsere zeolitiske krystalline forbindelser, som felles ut i allerede tilgjengelige porer, og som da ikke vil utgjøre noen fare[52]. For et blandingssystem der både OPC, FA og alkaliske aktivatorer inngår, vil risikoen for ASR igjen kunne være aktuelt så fremt det er tilstrekkelig kalsium tilgjengelig, slik litteraturen beskriver. Risikoen for ASR i en hybrid betong kan derfor ikke utelukkende begrunnes ut ifra det økte alkalieinnholdet, men må sees i sammenheng med andelen kalsium tilgjengelig i systemet.

2.11.6 Målinger av porevolum og porestørrelsesfordeling

Av de mange metodene som er tilgjengelig for karakterisering av betongens permeabilitetsegenskaper, er kapillær sugeevne og porøsitet en av de mest brukte metodene i Norge. Tradisjonelt er masseforholdet den første indikatoren for vurdering av betongens bestandighetsegenskaper. At bestandighetsklassene i standarden defineres etter v/b-forholdet, og dermed hvilken eksponeringsklasse den tilfredsstillende, understreker betydningen av denne parameteren. Økt bruk av pozzolaner, tilsetningsstoffer og andre aktiveringsmekanismer gjør gjerne at masseforholdet bør sees i sammenheng med andre målinger[66]. Å studere betongens kapillære sugeevne og porøsitet vil være et godt supplement til dette. På tross av at betongen er et kompositt materiale, med en inhomogen porestruktur, viser målinger at betongens vannoppsug følger nokså bestemte utviklingstrekk. Det gjør denne type målinger ideell for sammenligning mellom ulike prøver. I forkant av slike tester klargjøres det ferdigherdede betongprøver av 20 mm tykke disk, saget fra sylinderprøver. Disse vil etter en bestemt herdeperiode tørkes i varmeskap før selve forsøket tar til. Prøvene vil så være eksponert for et ensidig fritt vannspeil, der den påfølgende vektøkningen fra vannoppsuget måles etter bestemte tidspunkt. Figur 8 illustrerer et prinsipielt absorpsjonsforløp for en slik betongprøve. Figuren uttrykker absorbert vannmengde per areal, Q av eksponeringsflaten, og et vannoppsug som en funksjon av kvadratroten av tiden, \sqrt{t} . Første del av kurven illustrerer vannoppsuget i de mindre gel- og kapillære porene, der kapillarkreftene dominerer. Etter hvert som vannfronten nærmer seg toppen av prøven, observeres et knekkpunkt i kurven. Avhengig av hvor dette skjæringspunktet ligger langs x-aksen, defineres så et motstandstall for betongen. Denne angir i praksis hastigheten på vanntransporten gjennom prøven. Det betyr i sin tur at motstandstallet er relatert til betongens permeabilitet, og sier noe om åpenheten og kontinuiteten i porene. Denne egenskapen er derfor særlig interessant i vurdering av betongens bestandighetsegenskaper. En betong med lavt masseforhold vil typisk kjennetegnes av et høyt motstandstall, med et knekkpunkt lokalisert lengre ut på x-aksen. Den påfølgende slake kuven uttrykker den mer saktegående oppfyllingen av makroporer i betongen. På dette tidspunktet antas betongen å ha en kapillær metning, slik at resterende vannopptak tilfaller betongens makroporer, mer nøyaktig det åpne poresystemet.

Forhøyet andel kontinuerlige makroporer har betydning for betongens permeabilitet, og skyldes gjerne dårlig kompaktering[67]. Lukkede makroporer derimot er et direkte mål på den herde betongens luftporeinnhold, og kan være praktisk å sammenligne med tidligere målinger av luftinnholdet i den ferske betongen. Samsvarende tall forsterker påliteligheten til prøveresultatene. En annen viktig bestandighetsrelatert egenskap, er sugporøsiteten. Sugporøsiteten tar for seg porevolumet til gel- og kapillærsystemet, og faller med økende betongkvalitet[24]. Verdien er derfor relatert til masseforhold og bindmiddelmengde, som igjen dikterer hydratasjonsgraden og mengden reaksjonsprodukter som kan oppta de tomme kapillærporene. Lavere porøsitet er derfor å foretrekke, både av bestandighetshensyn, og at fastheten styrkes med redusert porøsitet.



Figur 8 Prinsipielt absorpsjonsforløp[5]

2.12 Bearbeidbarhet

Bearbeidbarhet er et begrep som omhandler støplighetsegenskaper av fersk betong. Det er vanlig å skille mellom tre ulike egenskaper; stabilitet, mobilitet og evne til kompaktgjøring[68]. Stabilitet beskriver betongens evne til å bevare sin homogenitet ved ro, og under bevegelse. Økt bruk av flyveaske og silkastøv er positivt for bevaring av stabiliteten i betong. Da øker mengden finpartikler, som igjen øker kontaktområde mellom partiklene og den flytende fasen. Dette bidrar til å øke effekten av de interne kohesjonskreftene, og stabiliteten øker. En stor andel pozzolaner kan dog gi en noe mer seig masse som ikke nødvendigvis er en ønskelig effekt. Faktorer som reduserer stabiliteten i betong, er segregering og separasjon. Segregering eller ”blødning” som det også kalles, kjennetegnes ved at vannet i den ferske betongen skiller seg og legger seg på overflaten, eller ved betongens utflytningsfront. Figur 9 viser tendenser til dette, selv om det langt ifra er et alvorlig tilfelle. En mindre, delvis separasjon av vann kan nemlig være hensiktsmessig for å eliminere faren for blant annet uttørkingsvinn, og oppsprekking under herding. En annen mulighet er ansamlinger av vann i større lommer innad i betongen.

Dette kan gi lokalt høye v/b forhold som bidrar negativt til fasthetsutvikling og bestandighet[68]. Den andre dominerende mekanismen er segregering, som også er separasjon i ordets rette forstand. Men denne gangen myntet på tilslaget i betongen. Ved slike tilfeller er det vanlig at tilslaget synker, for så å gi fravær av tilslag eller ansamlinger av lite differensierte tilslagsgraderinger. Også her kan noe segregering i form av mørtel separasjon (matriks og sand) være hensiktsmessig, da økt andel mørtel ved overflaten bidrar til penere overflater og forenkler eventuell slip av betong. En typisk feil når segregering av tilslag finner sted, er for høy fallhøyde ved støp i veggforskaling. Da kan ansamlinger av grove tilslag havne i nedre del av vegg med synlige steinreir som resultat.

Mobilitet er en annen egenskap som berører utflytningsevnen til den ferske betongen. Det vil si evnen til bevegelse på grunn av kreftene som virker på den[68]. Denne egenskapen tar i større grad for seg betongens reologiske egenskaper som plastisk viskositet og flyteskjærspenning. I dag kan mobiliteten i visse betonger enkelt justeres ved bruk av superplastiserende tilsetningsstoffer som reduserer friksjonen, og kohesjonskreftene mellom partiklene. Luftinnførendemidler og økt vanninnhold er andre metoder for å økte mobiliteten, selv om sistnevnte sjelden er et fornuftig tiltak. Det vil alltid være en viss avveining som må gjøre mellom ønsket stabilitet og mobiliteten da en vanskelig kan oppfylle begge fullt ut. Dette er typisk for en SKB som med sine høye mobilitet også er utsatt for stabilitetsproblemer. Undertegnede tidligere prosjektoppgave gir en introduksjon til dette temaet ved bruk av reometermålinger[60]. En nokså gunstig effekt vedrørende betong med høy flyveaskedosering er de gode stabilitetsegenskapene dette gir, uten å påvirke mobiliteten nevneverdig. Høy flyveaskedosering åpner også for en betong som med et sterkt redusert masseforhold likevel kan få gode støpelighetsegenskaper.

Even til kompaktgjøring beskriver betongens evne til å fylle ut forskalingen og gi muligheten til å vibrere ut innkapslede luftporer[68]. I praksis er effekten av kompaktgjøring en viktig forutsetning for at styrken til betongen opprettholdes ved at eventuelle luftporer ledes ut av betongen. Som en vet vil et lavere vanninnhold i betong gi en sterkere betong, så fremt hydratiseringen opprettholdes. Et mindre vanninnhold vil også gi en tykkere konsistens i betongen, og den flytere tyngre. Ved å tilføre flyveaske gir dette økt evne til kompaktgjøring selv med et lavt v/b forhold. I kombinasjon med SP og høy flyveaske dosering har det vist seg at betongens kompaktgjøring, så vel som mobilitet og stabilitet, opprettholdes selv med masseforhold ned mot 0,38. Figur 9 fra Powerhouse Brattørkaia viser en slik betongsammensetning med 50% flyveaske og $v/b = 0,38$. Denne betongen fungerte fint under pumping, utstøping og vibrering. Noe som ikke ville vært tilfellet ved normal dosering av OPC og tilsvarende masseforhold. Da hadde betongen vært tung og krevende å jobbe med. Denne betongen derimot hadde egenskaper som til forveksling kunne ligne en SKB, med god utflytningsevne.



Figur 9 Pågående støp ved Powerhouse Brattørkaia [Foto: Frederic Hermansen]

2.13 Aktivatorens påvirkning av støpelighet

Bruk av flyveaske legger altså gode forutsetninger for en betongs bearbeidbarhet. I AAM synes det derimot å påvirke negativt i mange sammenhenger. Det er grunn til å tro at effektene fra disse høyalkaliske forbindelsene forringer betongens konsistens straks de tilsettes blandingen. Særlig er dette synlig ved bruk av superplastiserende tilsetningsstoffer, der selv betydelige doseringer viser seg å gi redusert effekt. Det kan synes at denne problematikken er gjeldende for de fleste typer sammensetninger der aktivator inngår. Problematikken er med andre ikke begrenset kun til hybrid betonger av flyveaske, OPC og aktivator. Denne antagelsen forsterkes av stud.techn. Jevne[69] sine lignende utfordringer ved bruk av flyveaske- og slaggaktiverte mørtler. Det foreligger flere ulike resultater og erfaringer ved bruk av aktivatorer i slagg- og flyveaskebaserte betong- og mørtelsammensetninger. Det er ønskelig å fremme et utvalg av disse fra litteraturen, for å gi en mer dekkende beskrivelse av de store forskjellene en ser i støpelighetsegenskaper hos alkali aktiverte materialer:

Arbi et al.[70] viser til resultater der tilfredsstillende konsistens var fullt oppnåelig. Av flere ulike blandinger ble det utført slumpstest av en betongsammensetning med 100% FA, og en annen med henholdsvis 70% FA og 30% slagg innhold. Begge disse viste et synkmål i området 200-250 mm. Prøven inneholdende slagg responderte best på en naftalen basert SP, mens det ble rapportert om at den rene flyveaskebaserte geopolymere fungerte bedre med SP av copolymer.

Alle betongene hadde $v/b = 0,52$, 0-4 sand, 4-16 stein og $b/\text{tilslag} = 1/4,3$. Alle blandinger inneholdt en natriumsilikat- og natriumhydroksid løsning, uten at doseringsmengde og konsentrasjon av disse ble ytterligere spesifisert. Gunasekara et al.[38] viser også til svært gode resultater med geopolymer av flyveaske, inneholdende natriumsilikat og natriumhydroksid løsninger. Her nevnes ingen bruk av vannreducerende tilsetningsstoffer.

Collins et al.[71] har analysert rene slagaktiverte betonger. Det ble blant annet utført to identiske blandinger, men med ulik fremgangsmåte for aktivator dosering. I første blanding navngitt AAS1, ble slumpverdien målt for en sammensetning der pulver av natriumsilikat ble forblandet med slagg i tørr fase. I neste blanding navngitt AAS2, var aktivatoren en forblandet vannløsning inneholdende natriumsilikat i kombinasjon med NaOH for å opprettholde lik kjemisk sammensetning som den tørre aktivator løsningen. Slumpmål etter blanding viste stor forskjell mellom de to. AAS2 med våt aktivator dosering ga et synkmål på 50 mm, mens tørraktivator dosering ga en verdi på i underkant av 120 mm. En tydelig forbedring i konsistens. Studien begrunner dette ut ifra den mer saktegående oppløsningen av alkalier i porevannet fra tørrblandingen, som leder til en redusert reaksjonshastighet, sammenlignet med de allerede oppløste alkaliene fra AAS2. Sistnevnte blanding ga også et gradvis redusert synkmål over tid, noe som ikke var tilfellet for AAS1. Begge blandinger inneholdt 100% slagg (2 % fra gips), sand og grovt tilslag med maks kornstørrelse lik 14 mm. Masseforhold lik 0,50, og ingen bruk av vannreducerende tilsetningsstoff, verken SP eller P slik det fremkommer i teksten. Doseringsmengde og konsentrasjon av aktivatorer ble ikke spesifisert nærmere.

Av andre studier omkring bearbeidbarheten til alkali aktiverte materialer er det også rapportert om forbedret støpelighet ved bruk av det plastiserende tilsetningsstoffet lignosulfonat. Bakharev et al.[72] viste til en lengre periode med god konsistens ved bruk av lignosulfonat, sammenlignet med SP. Dette var både med natriumsilikat alene og en kombinasjon med natriumhydroksid og natriumkarbonatløsning. I begge tilfeller ga disse også retarderende effekter. Ved bruk av SP inneholdende naftalen fikk blandingen kun økt støpelighet i startfasen, men med en påfølgende rask størkning allerede etter de første minuttene. Støpeligheten til disse falt derfor drastisk etter noenlunde like slumpverdier etter blanding.

3 Metode

Dette kapitlet redegjør for de ulike praktiske forsøkene som er gjennomført i oppgaven. Disse er beskrevet under del 1 til 3, og skiller mellom ulike resepter og faser av laboratoriarbeidet. I etterkant gis en nærmere beskrivelse av antatte bindemiddelsystemer disse reseptene faller inn under, metoden for utarbeidelse av miljødeklarasjoner og hvordan de ulike reseptene svarer til akseptkriteriene i standarden.

3.1 Utgangspunkt for laboratoriarbeidet

Dette studiet tar på mange måter over stafettpinnen fra undertegnede prosjektoppgave om bruk av lavkarbonbetong i oppspente dekker. Her var målet å tilfredsstillende en lavkarbonklasse A med lavt innebygget energi, samtidig som styrkeutviklingen ble ivaretatt i tidlig fase. Dette betydde et mål om 25 MPa oppnådd trykkfasthet, ved 3 dagers herding. Den gangen var arbeidet knyttet opp mot Powerhouse Brattørkaia, som utføres med en slik dekkeløsning. Betongtypen som blir brukt i de dekkene har en flyveaske dosering på cirka 50% av totalt bindemiddel, og et masseforhold på 0,38-0,40. Foruten de nødvendige tiltakene som må gjøre i forhold til fyring og tildekking etter støp, tilfredsstiller denne betongen både nødvendig fasthet og støpelighet. En flyveaskebasert betong vant altså frem på bekostning av slagg, og en kombinasjon av disse to. Dette skyldes flere ting. Blant annet ga slaggbetongen utfordringer i forhold til pumpbarhet og ugunstige energitall[73]. Samtidig viste flyveaske gode resultater innenfor de fleste målparameterne; støpbarhet, styrkeutvikling og innebygget energi.

En flyveaske basert betong videreføres derfor i denne oppgaven, og tar samtidig utgangspunkt i Gullhaug Torg, som gjennom FutureBuilt også setter krav til en miljøvennlig betong. Til forskjell fra den tidligere prosjektoppgaven vil arbeidet i denne sammenheng bære preg av å være mer eksperimentell, da det er ønskelig å se hvor langt det er mulig å strekke seg hva gjelder flyveaskedosering. Tilfredsstillende støpbarhet og styrkeutvikling er fortsatt viktige målparametere, og vil være styrende for de veivalg som tas under de praktiske forsøkene. Miljøanalyse av resepter, og en kartlegging av bestandighetsegenskaper og gjeldende begrensinger i standarden, er andre nødvendige fokusområder. Dette vil redegjøres for i etterkant av støpearbeidene. De resultater som fremkommer vil forhåpentligvis gi et bedre evalueringsgrunnlag for valg av betongtype ved Gullhaug Torg.

På bakgrunn av gjeldende eksponeringsklasse ved Powerhouse Brattørkaia, har det i første omgang ikke vært nødvendig å avdekke langtidsegenskaper som bestandighet i betongen. Dette er derimot ikke ensbetydende med at kjennskapen til disse egenskapene er gode nok. For der er erfaringsgrunnlaget for slike betongtyper nokså lav. Når dette studiet nå skal øke flyveaskeinnholdet ytterligere, utover 50%, vil det derfor være hensiktsmessig å få en bedre oppfatning av de bestandighetsrelaterte egenskapene.

Samtidig er det ønskelig å se dette i sammenheng med de utfordringer som er forbundet med å tilfredsstille gjeldende krav i standarden. Eventuelle senere målsettinger om å få slike betongtyper godkjent for en M90 og andre eksponeringsklasser, krever at det gjøres grundig undersøkelser av slike betongers oppførsel over tid. Positive resultater vil kunne slå beina under de krav som blant annet gjelder for maks flyveaskedosering og effektiv bindemiddelmengde. Og som en funksjon av dette vil det være naturlig å vurdere om en revidering av standarden er aktuelt i årene som kommer.

En studie av betongens porevolum og porestruktur vil være et skritt i denne retningen. Det vil derfor gjøres en test av dette i de innledende prøvene. Målet med de praktiske arbeidene ved laboratoriet har vært å begrense antall varierende parametere så godt det lar seg gjøre, og samtidig se effekter ved endret proporsjonering. Dette har vært nødvendig for å lettere vurdere hvilke variabler som har påvirket de ulike resultatene. Med et økende antall sammensetninger forsterkes viktigheten av nettopp dette. Silikastøvet har eksempelvis en låst dosering på 10% gjennom alle forsøkene. Dette skyldes ikke at effekten fra silikastøvet ikke anerkjennes. Tilstedeværelsen av silikastøv er der for å sikre en fornuftig tidlig styrkeutvikling, en helt nødvendig egenskap i disse tregt herdende reseptene. En videre økning av silikastøv er derimot verken særlig effektivt rent herdeteknikk, eller økonomisk fornuftig, ettersom silikastøv er ca. dobbelt så dyrt som flyveaske[35].

I hovedsak har det vært masseforhold og matriksmengde som har styrt sammensetningene, i kombinasjon med aktivatordoseringene der dette har vært aktuelt. Alle sammensetningene tar utgangspunkt i at de skal tilfredsstille kravene til en plasstøpt betong. Med andre ord vil det å studere effektene ved herding under økt omgivende temperatur ikke være aktuelt for denne oppgaven. Dette er et alternativ som i praksis kun er aktuelt for prefabrikkerte betongelementer. Alle prøvene, både i de innledende og senere rundene, er derfor herdet i romtemperatur ved 20°C.

Herding i romtemperatur ved bruk av aktivatorer, vist under del 2 og 3, gir et herderegime som skiller seg fra andre alkali aktiverte materialer som beskrives i litteraturen. De fleste forsøk kjennetegnes ved at betong av AAM, både med og uten OPC i bindemiddelet, i en periode har herdet under forhøyet temperatur, mellom 50 til 80°C[38, 74, 75]. Det betyr at muligheten for å tilføre varme i betongen er begrenset til den eksoterme reaksjonen fra OPC hydratasjonen, som gradvis minker med økende flyveaskedosering. Dette vil gi en ekstra begrensende effekt for hybrid betongen som her studeres.

3.2 Materialer

Norcem Standard FA er valgt som fast sementtype under alle betong- og mørtelblandingene. Denne sementtypen vil gi en sammensetning hvor det totale flyveaskeinnholdet kjennetegnes av en høyere finmalingsgrad. Mindre partikler legger til rette for en økt reaksjonskinetikk. Dette skyldes at flyveasken i Std FA, og Anlegg FA om du vil, blir tilsatt klinkeren sammen med gips og kalksteinsmel før den males i sementmølla. Den videre oppmalingen av flyveaske gir partikler som er finere enn klinkeren selv, da flyveasken har en lavere mekanisk styrke og knuses lettere[24]. Siden denne oppgaven tilstreber raskere herding i tidlig fase er det logisk å anta at en industrisement i kombinasjon med flyveaske burde vært mer aktuelt. Da med tanke på effekten den gir med redusert avbindingstid. Denne sementtypen ble brukt i undertegnede tidligere prosjektoppgave, men ga lite tilfredsstillende resultater med hensyn på nettopp tidlig fasthetsutvikling.

Erfaringene ved bruk av industrisement og høy flyveaskedosering har også ved tidligere prosjekter gitt varierende resultater[24]. En Std FA sement, og ytterligere flyveaskedosering, sto derfor frem som den mest prominente kombinasjonen. Synergieffektene som er påvist ved kalksteinstilsetning og flyveaske, slik det fremkommer i teorikapittelet, blir også ivarettatt i denne sementtypen. En oversikt over hvilke tilsetningsstoffer, pozzolaner, tilslag og sementtyper som er brukt under laboratoriearbeidet er gitt i tabell 2.

Tabell 2 Oversikt over alle materialene som er brukt i forsøkene

Materialoversikt			
Navn	Materiale	Type	Produsent
Std FA	Standard sement FA	CEM II/A-M	Norcem
FA	Flyveaske	Klasse V	Steag
SF	Silikastøv	Mikrosilika 940D	Elkem
Tilslag	0/8 sand	-	NorStone Årdal
	8/16 stein	-	NorStone Årdal
SP	Superplastiserende av copolymer	Dynamon SX-N	Mapei
SP	Superplastiserende av naftalen	Mighty 150	Sika
Aktivator	Vannglass, natriumsilikat	TamShot 10SS	Normet
Aktivator	Kaustisk soda, natriumhydroksid	Pellets, 99% renhet	VWR

3.3 Del 1 Innledende forsøk

3.3.1 Fremgangsmåte

For å se hvor langt det er mulig å strekke seg med gradvis høyere flyveaskedoser, er det i de innledende forsøkene gjennomført støp med 60, 70 og 80% flyveaskedosering. Samtlige uten bruk av aktivatorer og akseleratorer. For ordens skyld refereres det her til prosent av totalt bindemiddel når disse andelene oppgis. En referansestøp på 50% flyveaske ble også gjennomført, tilsvarende resepten som vant frem i undertegnedes tidligere prosjektoppgave. Tilsvarende sammensetning er blitt benyttet i det første dekket på Powerhouse Brattørkaia.

På bakgrunn av de resultatene som fremkom i de innledende forsøkene, ble den videre veien lagt for hvilke tiltak som var nødvendig å foreta for å fremme tidlig fasthetsutvikling. Fortsatt med sikte på 25 MPa, etter 3 dagers herding ved 20°C. Doseringer opp mot 70-80% flyveaske derimot, uten bruk av aktivator eller herding ved økt omgivende temperatur, ga ingen forventning om tidlig styrkeutvikling. Ei heller den nødvendige 3-dagers fastheten. Tanken var heller å observere hvordan en slik betong ville oppføre seg når flyveasken får en så dominerende plass i bindemiddelmengden. Resultatene vil så gi en pekepinn på hvor i løypa produksjonen av kalsiumhydroksid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ blir for liten til at tilstrekkelig mengder flyveaske kan engasjeres i en pozzolanreaksjon. Om dette kun ville vise seg å ha innvirkning på tidlig styrkeutvikling, eller om hele herdeforløpet ville avvike sterkt fra referansestøpen på 50% flyveaske, var aktuelle problemstillinger for denne fasen.

Etter hvert som kalsiumbidraget fra portlandsementen gradvis forsvinner, reduseres også flyveaskens reaktivitet. Etter hvert vil situasjonen nå et punkt der store deler av flyveasken kun fungerer om filler. Ekstra tilførsel av alkalier er da nødvendig. Hvor i doseringssituasjonen dette skjer, vil til en viss grad speiles av betongens herdeforløp. Her vil det være interessant å se videre på hvilke optimaliseringsalternativer som kan motvirke disse effektene.

I kombinasjon med målinger av styrkeutvikling og bearbeidbarhet, skal bestandighetsrelaterte egenskaper testes ved måling av porestruktur og porevolum. Slike målinger vil gi en nyttig indikasjon på betongens motstand mot nedbrytende mekanismer. Det er ikke gjort inngående tester av eksempelvis kloridinntrengning, karbonatiseringsfront, frostmotstand etc. da hovedmotivasjonen har vært å etablere en generell forståelse av betongens egnethet i aggressive miljøer. Dette er tidkrevende arbeid, og også utenfor omfanget av denne oppgaven. Det er derfor kun porevolumet og porestrukturen som skal undersøkes nærmere. Det vil si målinger utført gjennom PF-metoden. Dette er kun gjort for resept A og B, med henholdsvis 50% og 60% flyveaskedosering, og dermed målinger avgrenset til de innledende forsøkene. Det betyr at oppgaven ikke vil avdekke egenskaper knyttet til en den såkalte hybridbetongen inneholdende aktivatorer, som kjennetegner mange av de senere reseptene i del 2. Dette skyldes både tilgjengelig tid, samt at dette kun er et supplement til de andre målingene. Ettersom det er lite erfaring spesielt i Norge, på langtidsegenskapene til betong med så høy flyveaskedosering, vil denne metoden gi et godt innblikk i hva en kan forvente av slike betonger når bestandighetsegenskaper skal undersøkes.

Og som tidligere nevnt, vil det i årene som kommer være fornuftig å bli kjent med resepter med høy andel flyveaske om disse skal kunne tre inn i standarden som en akseptert betongsammensetning. Foreløpig er det i praksis kun mulig å definere disse innenfor rammene av en M90 betong. Se punkt 3.6 vedrørende krav til betongsammensetning. På tross av at de reelle kvalitetene til betongen kan vise seg å tilfredsstille flere eksponeringsklasser enn bare X0.

3.3.2 Proporsjonering og blanding

Tabell 3 gir en oversikt over sammensetningen til de fire ulike reseptene. Eneste forskjell mellom disse, er den prosentvise økningen i totalt flyveaskeinnhold, fra resept A til resept D. For superplastiserende tilsetningsstoff er det kun brukt copolymer med utgangspunkt i 1,5 wt% av bindemiddel. Tall i parentes angir faktisk dosering ved blanding, ettersom justeringen av konsistens har vært nødvendig for å oppnå noenlunde lik slumpverdi. Justering av masseforhold ved endret tilsetning av SP er derimot ikke gjort. Fra tilslaget kommer 60 volum% fra 0/8 sand og 40 volum% fra 8/16 stein.

Tabell 3 Reseptteknisk oversikt over de ulike sammensetningene i del 1

Sammensetning								
	v/b	Matriks [l/m ³]	Effektiv b [kg/m ³]	OPC [% av b]	Tilsatt FA [% av b]	Tot FA [% av b]	Tilsatt SF [% av b]	SP [% av b]
Resept A	0,40	300	363	40,0	41,2	50,0	10,0	1,5 (1,12)
Resept B	0,40	300	357	30,0	53,4	60,0	10,0	1,5 (1,49)
Resept C	0,40	300	350	20,0	65,6	70,0	10,0	1,5 (1,28)
Resept D	0,40	300	344	10,0	77,8	80,0	10,0	1,5 (1,04)

Tabell 4 gir en oversikt over låste parameterne ved de innledende prøvene. Det viser med andre ord hvilke parametere som har forholdt seg uforandret. Det er kun mengden flyveaske og OPC som har variert mellom de fire reseptene. Tabell 5 gir en samlet oversikt for gjennomføringen av støpearbeidet.

Tabell 4 Låste parametere ved proporsjonering under del 1

Navn	Mengde
Std FA	
Flyveaske	
Silikastøv	✓
0/8 sand	✓
8/16 stein	✓
Matriksmengde	✓
SP	✓
luftinnhold	✓
v/b	✓

Tabell 5 Oversikt over arbeidsprosessen i del 1

Faser		Merknad
Oppveiing	Alle delmaterialene er proporsjonert og veid opp for en blanding på 40 liter.	Utregningsskjema for proporsjonering av de ulike reseptene er utarbeidet av Sverre Smeplass i Skanska
Blanding	1 min tørrblanding 2 min våtblanding 2 min henstilling 1 min våtblanding	De tørre ingrediensene (Std FA, flyveaske, silikastøv og tilslag) ble tilsatt og blandet først i 1min. Tilsetting av SP under våtblanding ble gjort gradvis for justering av ønsket konsistens.
Utstøping	Det ble støpt 18 terninger på 100x100mm for fasthetstesting, og to sylinder prøver på 100x200mm for testing av kapillær sugesevne og porøsitet.	Utstøping av betong i terningformer ble gjort med murskje og håndspade, og avsluttet med vibrobord i 1-2 sek. Utstøping i sylindrerforma ble gjort med håndspade og kompaktgjøring med stålstag som under slumpmåling, i tre etapper. Avsluttet med vibrobord i 1-2 sek. Alle formene ble i forkant sprayet med formolje.
Målinger	<ol style="list-style-type: none"> 1. Test av slump etter NS-EN 12350-2:2009 Prøving av fersk betong Del 2: Synkmål 2. Test av trykkfasthet etter NS-EN 12390-3:2009 Prøving av herdet betong Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet. 3. Test av luftinnhold etter NS-EN 12350-7:2009 Prøving av fersk betong del 7: Luftinnhold Trykkmetoder. 4. Test av kapillærsugeevne og porøsitet etter SINTEF metode fra 1996. Basert på Powers-modell[67] 	Fasthetstesting ble gjort etter 1, 2, 3, 7, 28, 56 døgn á 3 terninger på 100x100mm. Test av kapillær sugesevne og porøsitet er gjort med 20mm disk fra sylindrerprøver.. Kun resept A og B har blitt testet for kapillær sugesevne og porøsitet. Dette er gjort etter 56 dagers herding. Alle prøvene har herdet i 1 døgn ved romtemperatur før avforming og plassering i vannbad (også ved romtemperatur) frem til aktuelt prøvetidspunkt.

3.3.3 Måling av kapillær sugesevne og porøsitet

Målinger av betongens absorpsjonsevne er gjennomført for resept A og B, etter 56 dagers herding. Hver resept hadde en prøveserie bestående av 4 disk med tykkelse 20 mm, og tilfredsstilte slikt sett prøvemethodens krav til samlet eksponeringsareal. Hver prøveserie er tatt ut fra midten av én sylindrerprøve. Sylindrerprøvene har herdet i vannbad ved romtemperatur på 20°C frem til prøvetidspunktet.

Gjennomføringen av testen følger stegene gitt av den interne prosedyren utført ved SINTEF[67]. Fremgangsmåten er basert på disse retningslinjene:

- Tørring av prøver i ventilert varmeskap ved 105°C, i 4 dager.
- Vannabsorpsjon av prøver i beholder med lokk. Rist er benyttet for å eksponere hele underflaten av disken. Vannstand 1-2 mm opp på skivene. Registering av vektøkning etter gitte tidspunkt. Total varighet: 4 døgn.
- Vannmetning av prøver fullt neddykket i vann. Registering av vektøkning etter 3 døgn.
- Vannmetning av prøver fullt neddykket i vann, i trykktank ved 50 atm. Registering av vekt etter 1 døgn.

Trykktanken er vist t.h. i figur 10 der de avsluttende målingene av vannopptak i luft/makroporer gjøres. Måling av fuktopptak i gel- og kapillærporesystemet er vist t.v. i figur 10 der vannspeilet dekker 1-2 mm av sideflatene.



Figur 10 Diskprøver lagt i vannspeil (t.v.), før plassering i trykktank (t.h)

3.4 Del 2 Mørtelblandinger

3.4.1 Fremgangsmåte

Bakgrunnen for skifte til mindre mørtelblandinger på 5 liter var å redusere arbeidsmengden, og dermed gi rom for flere gjennomføringer. Hovedmotivasjonen var å få en oppfatning av hvilke resepter som responderte best på tidlig styrkeutvikling. Fasthetstesting ble kun gjort etter 1 og 2 døgn. Det ga en god indikasjon på betongens tidlige herdegenskaper, samtidig som det minimerte mengden arbeid i forbindelse med rengjøring og avforming. Fokuset var rettet mot herdegenskaper fremfor bearbeidbarhet. Med utgangspunkt i resultatene fra de innledende prøvene, ble det bestemt at det skulle jobbes videre med 70% flyveaske dosering. Resept A, med 50% flyveaske, hadde vist gode herdegenskaper både fra undertegnede tidligere arbeid, og erfaringer fra Powerhouse prosjektet som har en tilsvarende sammensetning i dekkene. Det var det derfor ønskelig å strekke seg enda litt lenger. 60% flyveaske dosering hadde vist en svakere, men et noe tilsvarende herdeforløp som ved 50% FA. Det syntes derfor åpenbart at det interessante ville være å se hvordan en dosering på 70% flyveaske vil oppføre seg ved bruk av varierende aktivator doseringer, matriksmengder og masseforhold.

Fra de innledende prøvene hadde denne resepten vist tendenser på manglende styrkeutvikling. En klar antydning om manglende produksjon av C-S-H gel i matriksen. Det syntes derfor interessant å se på hvilke justeringer i resepten som kunne endre et slikt forløp. Vurderinger omkring mørtelens støpelighet ble begrenset til en visuell kontroll under blanding. Ingen slumpmålinger ble gjennomført.

Justeringer underveis i denne fasen, med hensyn på økt tidlig fasthetsutvikling, har vært aktivator dosering og masseforhold. Masseforholdet ble derfor redusert fra 0,40 til 0,32 for de fleste sammensetningene, ettersom et lavere v/b-forhold er en effektiv måte å redusere avbindingstiden til betongen på. Effektene fra blant annet silikastøv, kalksteinstilsetning, finhetsgrad av råmaterialene, omgivende temperatur, mineralfordeling i klinkeren etc. er selvfølgelig andre faktorer som kan bidra til økt tidlig styrkeutvikling i en betong. Disse parameterne er enten låst på bakgrunn av valgt sementtype, eller låst av hensyn til ønske om å ha så få variabler som mulig.

For å kompensere for nedjustert masseforhold, har andelen matriks blitt økt for å gi blandingen en noenlunde bearbeidbar konsistens. For de fleste reseptene er matriksvolumet derfor justert opp. Dette har gitt et matriksinnhold på opptil 400 l/m^3 , noen som i teorien tilsvarer en selvkompimerende betong[76]. I kombinasjon med naftalen dosering var dette ansett som den mest gunstige måten for å opprettholde konsistensen i mørtelen. Dette var særlig med tanke på de utfordringene som tidligere har blitt nevnt i litteraturen ved bruk av aktivator og påfølgende støpelighetsvansker. SP av copolymer ble sett bort ifra i kombinasjon med aktivator i denne oppgaven.

Det er kun vannglass og kaustisk soda som er blitt testet i de ulike mørtelblandingene og betongblandingene. Dette beror i hovedsak på at det foreligger mer erfaring og litteratur på dette området enn ved bruk av andre aktivatorer. Tilsvarende forsøk, men med rene slagg- og flyveaskebetonger ved samme laboratorium i regi av stud.techn. Jevne, gjorde det hensiktsmessig å gå den veien. Her har erfaringsutveksling vært til god hjelp for gjennomføringen av laboriearbeidet. Andre typer alkalitilsetninger som natriumkarbonat og natriumsulfat, herunder mild kjemisk aktivering, er ikke tatt med i dette studiet selv om disse også kunne vært interessante å sett nærmere på.

Aktivator av natriumhydroksid besto av en vannløsning, som tidligere var klargjort ved laboriet ved å oppløse rene NaOH pellets i vann. Vannglass kom som en ferdig levert løsning fra produsent. Se tabell 6 for detaljert informasjon om de to. Den største utfordringen under dette arbeidet var å bestemme en hensiktsmessig dosering. Tidligere forsøk fra litteraturen ga en pekepinn på aktuell mengde, men gjorde det vanskelig å sammenligne direkte med tidligere forsøk. Dette skyldtes blant annet ulik tallfesting av konsentrasjonen til de ulike aktivatorløsningene. Noen oppga molare verdier, andre oppga et konsentrasjonsforhold mellom natriumsilikat og natriumhydroksid.

Det har heller ikke alltid vært spesifisert om oppløste pellets i vann har vært natriumhydrokoksid(Na_2O), eller natriumhydroksid(NaOH), noe som kan forvirre ytterligere. Det ble i denne studien valgt å dosere aktivatorene ut ifra prosent av bindemiddel. Det gjorde også proporsjoneringsarbeidet lettere.

Tabell 6 Aktivator spesifikasjoner

	Vannglass	Kaustisk soda
Kjemisk navn	Natriumsilikat	Natriumhydroksid
Kjemisk formel	Na_2SiO_3	NaOH
Tørrstoff i vannløsning [wt%]	35	45
Densitet løsning [kg/m ³]	1350	1478
Molar konsentrasjon [mol/l]	-	11,25
Mol ratioforhold	$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,31$	-

3.4.2 Proporsjonering og blanding

De ulike mørtelblandingen har underveis i denne fasen blitt forsøkt optimalisert på bakgrunn forgående støp, og resultatene disse har vist. Ved proporsjonering av en ny mørtelsammensetning har aktivatordosering vært den viktigste parameteren for å påvirke styrkeutviklingen. Riktignok er også masseforholdet en viktig faktor, men den ble i de fleste tilfeller låst på 0,32. Justering av mengden matriks og SP ble på sin side viktig for å påvirke bearbeidbarheten, noe som skulle vise seg å bli en krevende oppgave. Dette var de overordnede tiltakene, men det ble også gjort ulike operasjonstekniske endringer under, og før blanding for å påvirke støpeligheten ytterligere. Halvparten av SP'en ble tilført vann- og aktivatorløsningen før blanding, og tiden under våtblanding ble økt for å gi SP'en bedre forutsetninger for å virke. Dette skyldes at naftalen, sammenlignet med copolymer, kan ha behov for lengre blandetid før effektene blir merkbare[24]. Mighty 150 har ingen retarderende effekter, og lengre blandetid ble derfor ikke ansett som noe problem.

Etter flere svake resultater ved bruk av både vannglass og kaustisk soda, i hovedsak på grunn av manglende støpelighet, ble det foretatt enkelte blandinger med enten redusert eller ingen vannglassmengde. En reduksjon i vannglass ble sett på som en mulighet for å håndtere dette, da SP dosering og matriksjustering ikke ga ønsket effekt.

Med utgangspunkt i informasjonen fra tabell 6 ble det fastsatt en prosentandel aktivatorløsning av b, som skulle brukes i proporsjoneringen av de ulike reseptene. For natriumhydroksid løsningen ble dette i første omgang satt til 2,5% av b, og for vannglass; 2,4% av b. Stud.techn. Jevne[77] jobbet i sin prosjektoppgave med aktivatordoseringer av vannglass og natriumhydroksid med hhv 9% og 5,4% av b. Dette var riktignok for en geopolymere, og det ble derfor valgt å justere ned mengden for å få en antatt best tilpasning til en hybrid betong.

En større reduksjonen i vannglass forklares ut ifra risikoen for at for store mengder, i kombinasjon med portlandsement, kan gi ”flash-set”. En effekt som tidligere ble utnyttet i sammenheng med sprøytebetong[24]. For alle blandingene inneholdende aktivator ble formene i forkant tørket rene for formolje, og deretter sprayet med et olje- og fettfritt smøremiddel. Formolje har vist seg å ikke fungere i kontakt med aktivatorer, og dermed gitt vanskeligheter med avforming og påfølgende rensing. Smøremiddelet ble derfor brukt som erstatning.

Tabell 7 viser gir en oversikt over sammensetningen til de ulike mørtelblandingene. Tall i parentes angir faktisk dosering ved blanding. Justering av masseforhold ved endret tilsetning av SP er ikke gjort. For resept C3 ble det tilsatt ytterligere vann for å gi blandingen en mulighet for å la seg støpe i formene. Dette ble gjort etter at ytterligere SP var tilsatt. Tall i parentes under v/b forhold angir derfor det reelle masseforholdet. Fra tilslaget kommer 100 volum% fra 0/8 sand.

Tabell 7 Reseptteknisk oversikt over de ulike sammensetningene i del 2

Sammensetning										
	v/b	Matriks [l/m ³]	Effektiv b [kg/m ³]	OPC [% av b]	Tilsatt FA [% av b]	Tot FA [% av b]	Tilsatt SF [% av b]	SP [% av b]	Vannglass [% av b]	NaOH [% av b]
Resept C1	0,32	370	475	20,0	65,6	70,0	10,0	1,5 (1,64)	0	0
Resept C2	0,32	400	507	20,0	65,6	70,0	10,0	4,0 (6,4)	2,4	2,5
Resept C3	0,32 (0,42)	370	469	20,0	65,6	70,0	10,0	2,0 (2,9)	2,4	2,5
Resept C4	0,40	350	398	20,0	65,6	70,0	10,0	3,0 (6,9)	2,4	2,5
Resept C5	0,32	400	507	20,0	65,6	70,0	10,0	4,0 (4,9)	1,2	2,5
Resept C6	0,32	400	508	20,0	65,6	70,0	10,0	4,0 (6,6)	0	2,5
Resept D1	0,32	400	498	10,0	77,8	80,0	10,0	4,0 (7,0)	0	2,5

Tabell 8 gir en oversikt over låste parametere under mørtelblandingene, og viser hvilke parametere som har forholdt seg uforandret. Med andre ord er det kun andelen silikastøv og tilslag, samt beregnet luftinnhold, som ikke har variert mellom de ulike reseptene. Tabell 9 gir en samlet oversikt for gjennomføringen av støpearbeidet under del 2.

Tabell 8 Låste parametere ved proporsjonering under del 2

Navn	Mengde
Std FA	
Flyveaske	
Silikastøv	✓
0/8 sand	✓
Matriksmengde	
SP	
Aktivator	
luftinnhold	✓

Tabell 9 Oversikt over arbeidsprosessen i del 2

Fase		Merknad
Oppveing	Alle delmaterialene er proporsjonert og veid opp for en blanding på 5 liter.	Utregningsskjema for proporsjonering av de ulike reseptene er utarbeidet av Sverre Smeplass, Skanska.
Blanding	1 min tørrblanding 15 min våtblanding 2 min henstilling 1 min våtblanding	De tørre ingrediensene (Std FA, flyveaske, silikastøv og tilslag) ble tilsatt og blandet først i 1min. Løsning av NaOH og vannglass, ble tilsatt i det oppveide vannet før blanding. På bakgrunn av erfaringen fra første mørtelstøp, resept C3, ble tiden under våtblanding økt til 15min og halvparten av SP tilført vannløsning før blanding. All mørtelstøp, unntatt C3 er derfor utført slik. C3 hadde samme blandeprosedyre som i innledende prøver.
Utstøping	Det ble støpt 4 terninger på 100x100mm for fasthetstesting	Kompaktgjøring utført med murskje og vibrobord i 2-3 sek, i to etapper. Det ble ikke brukt formolje på de prøvene som inneholdt aktivatorer, da dette bryter ned oljen og den smørende effekten forsvinner. Ved disse prøvene ble det sprayet på et olje- og fettfritt smøremiddel i formene.
Målinger	1. Visuell kontroll av konsistens og støpelighet 2. Test av trykkfasthet etter NS-EN 12390-3:2009 Prøving av herdet betong Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet	Fasthetstesting ble gjort etter 1 og 2 døgn á 2 terninger på 100x100mm. Sluppmålinger ble ikke gjennomført under mørtelstøp da konsistensen ikke tillot dette. Dette var heller ikke intensjonen da kun visuelle betraktninger av konsistens var nødvendig for å vurdere aktuelle sammensetninger å jobbe videre med. Alle prøvene har herdet i 1 døgn ved romtemperatur før plassering i vannbad (også ved romtemperatur) frem til aktuelt testtidspunkt.

3.5 Del 3 Betongblandinger

3.5.1 Fremgangsmåte

For de avsluttende testene i del 3 var det ønskelig å bruke erfaringen fra mørtelstøpene til å sammensette de mest lovende betongtypene. To retninger var nødvendig å utforske videre. En ytterligere test ved bruk av aktivator, og en ny blanding med enda lavere masseforhold. Av rene styrkebetraktninger ga mørteltestene varierende resultater ved bruk av aktivator. Og det samme gjaldt støpelighetsegenskapene. En avsluttende full skala test syntes nødvendig for og lettere se aktivatorens påvirkning av konsistens, og styrkeutvikling for en ordinær betong. Kun dosering med NaOH ble videreført fra del 2, på bakgrunn av den minimale påvirkningen vannglass ga i tidlig styrkeutvikling, sammenlignet med de uten. Henholdsvis resept C6 og D1. En ny reduksjon av masseforholdet ned mot 0,28 ble også gjennomført. Som de tidligere resultatene fra laboratoriarbeidet, og tidligere erfaringer nevnt i teorikapitlet har bekreftet, kan støpeligheten opprettholdes selv med et lavt vanninnhold for de uten kjemisk aktivering.

3.5.2 Proporsjonering og blanding

En flyveaskedosering på 70% for samtlige tre resepter ble opprettholdt og matriksinnholdet ble justert ned til 300 l/m³. Dette ga en mer reell betongsammensetning og samtidig en nødvendig korrigerende får å få et bedre sammenligningsgrunnlag med de innledende prøvene. Tre blandinger ble gjennomført; resept C1* og C6* som en videreføring fra mørtelstøpene C1 og C6. Og til slutt resept CX som en ny variant, med ytterligere reduksjon i masseforhold. Tabell 10 gir en oversikt over nevnte sammensetninger. Som tidligere er naftalenbasert SP brukt for resept C6* med aktivator, og SP av copolymer brukt i resept C1* og CX. Tall i parentes angir faktisk dosering ved blanding, uten at reelt masseforhold er justert etter dette. Fra tilslaget kommer 60 volum% fra 0/8 sand og 40 volum% fra 8/16 stein. Tabell 11 gir på sin side en oversikt over de låste parameterne, og tabell 12 en samlet oversikt for gjennomføringen av støpearbeidet.

Tabell 10 Reseptteknisk oversikt over de ulike sammensetningene i del 3

Sammensetning										
	v/b	Matriks [l/m ³]	Effektiv b [kg/m ³]	OPC [% av b]	Tilsatt FA [% av b]	Tot FA [% av b]	Tilsatt SF [% av b]	SP [% av b]	Vannglass [% av b]	NaOH [% av b]
Resept C1*	0,32	300	388	20,0	65,6	70,0	10,0	1,5 (1,6)	0	0
Resept C6*	0,32	300	380	20,0	65,6	70,0	10,0	6,0 (7,11)	0	2,5
Resept CX	0,28	320	439	20,0	65,6	70,0	10,0	1,5 (1,6)	0	0

Tabell 11 Låste parametere ved proporsjonering under del 3

Navn	Mengde
Std FA	
Flyveaske	
Silikastøv	✓
0/8 sand	✓
8/16 stein	✓
Matriksmengde	✓
SP	
Aktivator	
luftinnhold	✓
v/b	✓

Tabell 12 Oversikt over arbeidsprosessen i del 3

Fase		Merknad
Oppveing	Alle komponentene i betongblandingene på 40 liter er veid opp i henhold til ønsket resept	Utregningsskjema for proporsjonering av de ulike reseptene er utarbeidet av Sverre Smeplass, Skanska
Blanding	1 min tørrblanding 2 min våtblanding 2 min henstilling 1 min våtblanding	De tørre ingrediensene (Std FA, flyveaske, silkastøv og tilslag) ble tilsatt og blandet først i 1min. For resept C1* skjedde tilsetting av Dynamon SX-N gradvis under våtblanding, og justert etter ønsket konsistens. For resept C6* ble blandetiden under våtblanding økt til 4 min etter 1 min henstilling. SP av naftalen tilsatt gradvis, med dosering over beregnet mengde.
Utstøping	Det ble støpt 18 terninger på 100x100mm for fasthetstesting.	Utstøping av betong i terningformer ble gjort med murskje og håndspade, og avsluttet med vibrobord i 1-2 sek. Avsluttet med vibrobord i 1-2 sek. Alle formene ble i forkant sprayet med formolje, unntatt resept C6* der spray av olje- og fettfritt smøremiddel ble brukt.
Målinger	1. Test av slump etter NS-EN 12350-2:2009 Prøving av fersk betong Del 2: Synkmål 2. Test av trykkfasthet etter NS-EN 12390-3:2009 Prøving av herdnet betong Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet. 3. Test av luftinnhold etter NS-EN 12350-7:2009 Prøving av fersk betong del 7: Luftinnhold Trykkmetoder.	Fasthetstesting ble gjort etter 1, 2, 3, 7, 28, 56 døgn á 3 terninger på 100x100mm. Alle prøvene har herdet i 1 døgn ved romtemperatur før avforming og plassering i vannbad (også ved romtemperatur) frem til aktuelt tidspunkt for trykktest. Resept C6* gjennomgikk ikke slumpetest da konsistensen ikke tillot dette.

3.6 Krav til betongsammensetning

Betongdekkene på Powerhouse Brattørkaia og Gullhaug Tog er i henhold til standarden kun pålagt en M90 betong, på bakgrunn av eksponeringsklassen den er definert under. Et slikt masseforhold legger i utgangspunkt få begrensninger ved utarbeidelsen av nye betongresepter. Utfordringen derimot, vil være å tilfredsstillere krav til maksimum bruk av alternative bindemidler, og samtidig tilfredsstillere krav til minste effektive bindemiddelmengde. For en lavkarbonbetong som domineres sterkt av disse bindemidlene, vil dette være krevende. Kravet om minst 65 wt% portlandsklinker i bindemiddelet, vil være en begrensende faktor for høye flyveaske doseringer. Se tabell NA.9 i vedlegg. Og selv om en betrakter resterende silkastøv og flyveaske som filler, må også kravet til minste effektive bindemiddelmengde kunne tilfredsstillers. Det som må betraktes som filler vil påvirke matriksandelen i betongen, og ikke bindemiddelmengden som sådan. Dette er en akseptabel forenkling ettersom silkastøv og flyveaske i hovedsak bidrar positivt til styrkeutvikling og bestandighet. Eksponeringsklasse X0 betyr at karboniseringsproblematikken rundt bruken av pozzolaner i dette tilfellet ikke vil være en aktuell problemstilling. Tabell NA. 12 i vedlegget viser sammenhengen mellom bestandighetsklasse, og tilhørende krav til minste effektive bindemiddelmengde.

Det er grunn til å tro at de valgte betongsammensetningene vil falle utenfor standarden. Det er derfor utført en kontroll av alle betongreseptene for å lettere synliggjøre denne problematikken. Ved å beregne de totale flyveaskemengdene fra CEMII og ekstern tilsetning, kan tillatt mengde flyveaske beregnes. Bidraget fra portlandsementen (klinker og gips) vil være 68 wt% av CEM II. Det vil si; 18 wt% fra FA, og 4 wt% fra kalkstein. Ut ifra tillatte mengder pozzolaner kan effektiv bindemiddelmengde beregnes, og ut av dette, de oppnådde bindemiddelandelene. Beregninger gjøres forøvrig på bakgrunn av en M90 betong. Som ellers i dette studiet er eventuelle påvirkninger fra aktivator dosering ikke tatt hensyn til under beregningene. På samme vis som under proporsjonering og beregning av masseforhold er disse ansett kun som et tilsetningsstoff. Da standarden heller ikke har noe regelverk som kan regulere denne type sammensetning, er resept C6* som det her er snakk om, beregnet under samme forutsetninger som de resterende betongtypene.

3.7 Kartlegging av betongreseptenes tilhørighet

Å navigere seg i et landskap der betongen ikke lenger kjennetegnes av den tradisjonelle hydratasjonen av portlandsement, er en krevende oppgave. Mye forskning er gjort på strukturen og oppbygningen av alkali aktiverte materialer, noe teorikapitlet delvis har redegjort for. Dette gjelder spesielt geopolymer, men også hybrid betongene som denne oppgaven beskjeftiger seg med. I et forsøk på å sammenfatte noe av denne teorien er det laget en tabell, med det formålet å sette det i sammenheng med de praktiske arbeidene. Tabell 13 presenterer derfor de ulike reseptene, plassert etter antatt kjemisk tilhørighet, sammen med aktuelle optimaliseringsalternativer presentert i teorikapitlet. Tabellen er riktignok tuftet på en del forutsetninger som det er behov for å utdype nærmere. Under kolonne ”sterk kjemisk aktivering” vil det i mindre grad finnes stabile faser av C-A-S-H, om tilstedeværelsen av kalsium er for lav. Produksjon av C-S-H gel vil heller ikke kunne holdes stabilt under dette høye alkaliske nivået. På denne måten vil enten et N-A-S-H og/eller (N,C)-A-S-H system være mest prominent. Geopolymer er plassert som nummer én for å understreke at denne kjennetegnes av de rene aluminiumsilikat forbindelsene som flyveaske, GBA(ground bottom ash), metakaolin, etc. Samtidig som den understreker at det foregår polymeriseringsprosesser. Resterende punkter 2 til 4 vil være reaksjonsprodukter som vil kunne observeres i en hybrid betong med OPC og alkali aktivert flyveaske. Noe som er tilfellet for mange av sammensetningene i dette studiet. Som kolonnene: mild- og sterk kjemisk aktivering antyder, er dannelsen av C-A-S-H gel mer fremtredende for løsninger med moderate alkalinitet, fremfor i høy alkaliske løsninger som isteden gjerne favoriserer (N,C)-A-S-H gel[48]. Tabellen tar ikke for seg andre sekundære reaksjonsprodukter som karbonater, AFt, AFm etc. som også kan inngå i de ulike reaksjonsproduktene. Tabellen er ment for å gi en mer triviell oversikt over de ulike bindemiddelsystemene, og tar forbehold om eventuelle mangler. Pilen som angir gradvis økende flyveaskemengde understreker i hvilke faser av doseringsnivået de ulike aktiveringsmetodene er mest aktuelle.

Samtidig viser den et minkende kalsiumdominert system, jo lenger en går mot høyre. Ytterligere dokumentasjon på faktisk bindemiddelstruktur må gjøres med mer avanserte måleinstrumenter, som PDF(pair distribution function), og bruk av røntgenmålinger[48]. Dette vil gi en bedre innsikt i dannelsen og strukturen til de ulike reaksjonsproduktene som dominerer de alkaliaktiverede materialene.

Tabell 13 Aktuelle optimaliseringsalternativer ved økende grad av flyveaskedosering

	Ingen tiltak	Mekanisk aktivering	Synergi effekter ved kalkstein	Mild kjemisk aktivering	Sterk kjemisk aktivering	Merknad
Bindemiddel systemer	1.C-S-H	2.C-S-H	1.C-S-H 2.C-A-C-H	1.C-A-S-H 2.(N,C)-A-S-H 3.C-S-H 4.C-A-C-H	1.Geopolymer 2.N-A-S-H 3.(N,C)-A-S-H 4.C-A-S-H	CaCO3 bidrar også til stabilisering av Aft-fasen. Geopolymer forutsetter 0% Ca. Uthevet skrift angir antatt dominerende gel.
Virkemiddel	-	Høyere oppmalingsgrad av OPC og FA	Kalkstein tilsetning utover normal dosering	Na2CO3 K2CO3 Na2SO4 K2SO4	NaOH Na2SiO3	Bruk av tilsetningsstoffer som de tradisjonelle herdnings- og størkningsakseleratorene blir ikke karakterisert som et virkemiddel i denne sammenheng
Kjemisk prosess	Hydratasjon	Hydratasjon	Hydratasjon	Hydratasjon	Polymerisering og hydratasjon	-
Reseptenes tilhørighet	Resept A Resept B Resept C Resept D Resept C1 Resept C1* Resept CX	-	-	-	Resept C2 Resept C3 Resept C4 Resept C5 Resept C6 Resept D1 Resept C6*	-

FA-DOSERING



3.8 Utarbeide miljødeklarasjoner

Mange av de utfordringene som er knyttet til betongens støpelighet og styrkeutvikling kommer som en funksjon av ønske om en lav utslipps- og lavenergi betong. Det ligger med andre ord en klar forventning om gode GWP- og energitall hos de ulike reseptene. For å kunne dokumentere dette til det fulle, har det vært ønskelig å utarbeide EPD'er for de enkelte betongsammensetningene. Mørtlene derimot, som ble testet under del 2, har kun hatt en rolle i oppgaven for å avklare støpelighetspotensial og tidligfasthet. De er med andre ord ikke aktuelle i forbindelse med full skala produksjon, og dermed ikke aktuelle i sammenheng med miljødeklarasjoner.

Seks EPD'er; henholdsvis resept A, B, C1*, C6*, CX og D1*, er analysert gjennom Unicon sin EPD generator. Dette har gitt tallverdier for innebygget energi og GWP. Som tidligere nevnt er det GWP-verdiene som er interessante i denne oppgaven, da dette er mest aktuelt for prosjektet ved Gullhaug Torg. Ettersom EPD generatoren uansett beregner energiforbruket synes det likevel fornuftig å presentere dette som en del av betongens samlede miljøbelastning. Alle reseptene, med unntak av D1*, er støpt som fullverdige betonger. D1* er en tenkt blanding og basert på mørtelresepten D1. EPD'en til D1* har derfor en tilsvarende sammensetning, men hvor matriksandelen er redusert til 300 l/m³, og tilslag lik resterende betongblandinger. Resept D1* fremkommer derfor som en ordinær betong i EPD'en. En liten kommentar til EPD'ene som er vedlagt, er at disse mangler tegnet *. De må med andre ikke blandes med mørtelblandinger som egentlig har denne navngivningen.

I EPD generatoren foreligger det enkelte avvik. Dette skyldes manglende tilgjengelig data for noen av komponentene i betongen. Der derfor foretatt enkelte tilpasninger i analysen som må tas med i betraktning når verdiene skal presenteres. Aktivator av natriumhydroksid er erstattet med en størkningsakselerator. Og de ulike superplastiserende tilsetningsstoffene er håndtert som én generell SP, der de generiske verdiene er basert på et utvalg av flere SP stoff[78]. EPD'ene tar også utgangspunkt i et lokalt tilslag som Unicon benytter på Havna i Trondheim. Dette kommer fra Forset Grus AS, og ikke fra Årdal som er benyttet i forsøkene.

At det ikke foreligger egne energi- og utslippstall for natriumhydroksid vil for C6* og D1* bety at det foreligger en ytterligere usikkerhet i denne miljøanalysen. Særlig om vi tar i betraktning de studiene som er gjort omkring miljøbelastningen fra disse. Se punkt 2.9. Uavhengig av aktivatordosering må EPD'ene i sin helhet alltid vurderes ut ifra at dette er grove estimeringer, som ikke alltid vil representere realiteten. De er dog utarbeidet på like premisser, slik at sammenligning mellom de ulike EPD'ene bør gi et godt bilde av de ulike reseptenes miljøprestasjon.

4 Resultater

Dette kapitelet presenterer resultatene fra metodekapittelet. Med unntak av kommentarer til selve resultatene, er drøftingen omkring disse redegjort for i kapittel 5.

4.1 Bearbeidbarhet

4.1.1 Betongblandinger

Tabell 15 viser ulike synkmål for betongblandingene i del 1 og 3. Som tabellen indikerer, er det ikke målt noen synk for resept C6*. Den særdeles dårlige konsistensen gjorde det umulig å gjennomføre en slik test. Reseptens støpelighet er forsøkt visualisert i figur 11. En videre dosering av SP, selv over anbefalt mengde, ga ingen tegn til forbedring. Om det i det hele tatt førte til noen endring, var det i så fall i negativ retning. Den manglende evnen til kompaktgjøring som betongen led av, er synliggjort under avformingene i figur 12. Selv om dette bildet av prøven var en av de minst egnede, viste de fleste terningene flere områder med steinreir. Sammenlignet med mørtelresepten C6 fra del 2, viste C6* også ytterligere forverring i konsistens.

De resterende reseptene hadde derimot god støpelighet, og responderte godt på SP. Det var ingen merkbar forskjell i konsistens mellom de ulike reseptene, hva gjelder flyveaskedosering eller masseforhold. Det må understrekes at alle reseptene, unntatt C6* brukte superplastiserende av copolymer, mens resept C6* brukte superplastiserende av naftalen.

Tabell 15 viser også luftinnholdet til den ferske betongen, målt i henhold til NS-EN 12350-7:2009. Legg merke til den økte verdien for resept A og C6*. Det er grunn til å tro at disse i realiteten skal ligge nærmere de andre verdiene. Mangelfull tetting mellom overdelstykket og beholderen kan ha gitt feil verdier under trykkpåføring. Gjentakende testing måtte gjøres før en avlesning var mulig. Dette kan ha endret forutsetningene for den ferske betongen og det settes derfor spørsmålsteget ved disse resultatene.

Tabell 14 Reseptteknisk oversikt over de ulike sammensetningene i del 1 og 3

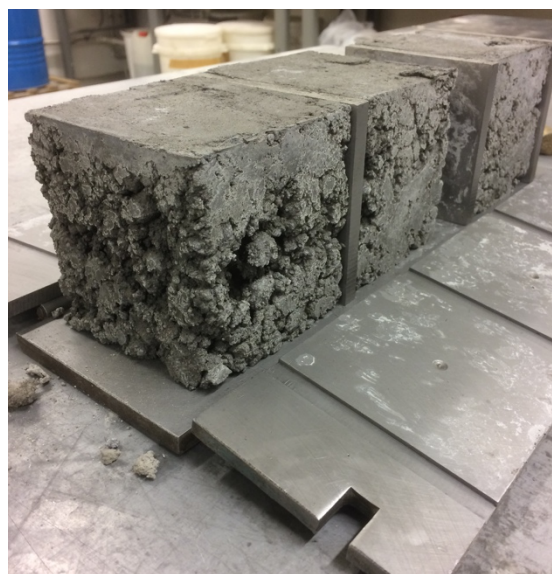
Sammensetning Del 1 og 3										
	v/b	Matriks [l/m ³]	Effektiv b [kg/m ³]	OPC [% av b]	Tilsatt FA [% av b]	Tot FA [% av b]	Tilsatt SF [% av b]	SP [% av b]	Vannglass [% av b]	NaOH [% av b]
Resept A	0,40	300	363	40,0	41,2	50,0	10,0	1,5 (1,12)	0	0
Resept B	0,40	300	357	30,0	53,4	60,0	10,0	1,5 (1,49)	0	0
Resept C	0,40	300	350	20,0	65,6	70,0	10,0	1,5 (1,28)	0	0
Resept D	0,40	300	344	10,0	77,8	80,0	10,0	1,5 (1,04)	0	0
Resept C1*	0,32	300	388	20,0	65,6	70,0	10,0	1,5 (1,6)	0	0
Resept C6*	0,32	300	380	20,0	65,6	70,0	10,0	6,0 (7,11)	0	2,5
Resept CX	0,28	320	439	20,0	65,6	70,0	10,0	1,5 (1,6)	0	0

Tabell 15 Oversikt over synkmål og luftinnhold for samtlige betongblandinger

Synkmål for samtlige betongblandinger [mm]		Luftinnhold [% volum]
Resept A	190	2,4
Resept B	220	1,5
Resept C	210	1,6
Resept D	190	1,5
Resept C1*	210	1,7
Resept C6*	-	2,5
Resept CX	225	1,7



Figur 11 Plassering av resept C6 i forma*



*Figur 12 Avforming av resept C6**

4.1.2 Mørtelblandinger

I del 2 er mørtelblandingen støpelighet vurdert ut ifra en visuell observasjon. Samtlige blandinger med aktivator viste en konsistens med reduserte, til ingen støpelighetsegenskaper. Med ingen støpelighet menes en blanding der selv ikke manuell omrøring lot seg gjøre. Alle blandinger med aktivator var tunge og krevende å spa i. Dette gjaldt særlig resept C2, C3, C4 og C5. Resept C6 og D1 viste noe tegn til forbedring i konsistens. Blandingen lot seg falle mer til ro, og samlet seg mer etter omrøring fra tvangsblenderen. En viss mobilitet kunne derfor observeres. Dette var ikke tilfellet for de andre reseptene. Tabell 16 gir en kvalitativ vurdering av støpelighetsegenskapene til de ulike reseptene. Tabellen over tilsvarer tabell 7 og er gjentatt her for en lettere sammenligning mellom reseptutforming og resultater. Av mørtelblandingen som inneholdt aktivator, viste resept C6 og til dels D1 tegn til forbedring. Men ikke tilstrekkelig til å ha noen praktisk verdi for dette studiets øyemed. Konsistensen til disse kunne til en viss grad sammenlignes med murmørtel. Figur 13-16 illustrerer noen av disse forskjellene. Det understrekes at resept C1, som ikke hadde aktivator tilsetning viste gode støpelighetsegenskaper.

Sammensetning Del 2										
	v/b	Matriks [l/m ³]	Effektiv b [kg/m ³]	OPC [% av b]	Tilsatt FA [% av b]	Tot FA [% av b]	Tilsatt SF [% av b]	SP [% av b]	Vannglass [% av b]	NaOH [% av b]
Resept C1	0,32	370	475	20,0	65,6	70,0	10,0	1,5 (1,64)	0	0
Resept C2	0,32	400	507	20,0	65,6	70,0	10,0	4,0 (6,4)	2,4	2,5
Resept C3	0,32 (0,42)	370	469	20,0	65,6	70,0	10,0	2,0 (2,9)	2,4	2,5
Resept C4	0,40	350	398	20,0	65,6	70,0	10,0	3,0 (6,9)	2,4	2,5
Resept C5	0,32	400	507	20,0	65,6	70,0	10,0	4,0 (4,9)	1,2	2,5
Resept C6	0,32	400	508	20,0	65,6	70,0	10,0	4,0 (6,6)	0	2,5
Resept D1	0,32	400	498	10,0	77,8	80,0	10,0	4,0 (7,0)	0	2,5

Tabell 16 Støpelighetsegenskaper i del 2 basert på visuell observasjon

Del 2 Visuell observasjon		
	Støpelighet	Merknad
Resept C1	✓	Bearbeidbar
Resept C2	X	Ikke bearbeidbar
Resept C3	X	Ikke bearbeidbar
Resept C4	X	Ikke bearbeidbar
Resept C5	X	Ikke bearbeidbar
Resept C6	X	Murmørtelkonsistens
Resept D1	X	Delvis murmørtelkonsistens



Figur 13 Avsluttet blanding av resept C3



Figur 14 Plassering av resept C2 i forma

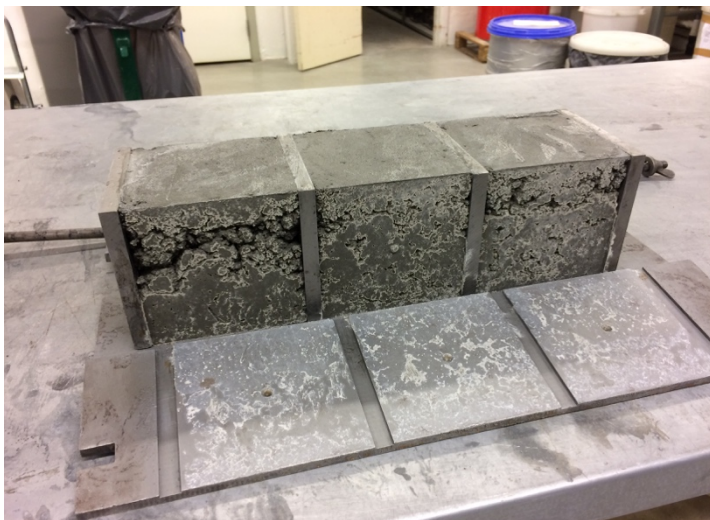


Figur 15 Avsluttet blanding av resept C6



Figur 16 Plassering av resept C6 i forma

Problematikken rundt konsistensen til disse mørtelblandingen gir også utfordringer med kompaktgjøingen og støping i terningformen. Figur 17 illustrerer den mest ødeleggende effekten ved dette. Samme utfordring ble også erfart med betongresepten C6*, som nevnt i punkt 4.1.1.



Figur 17 Avforming av resept C2

4.2 Fasthetsutvikling

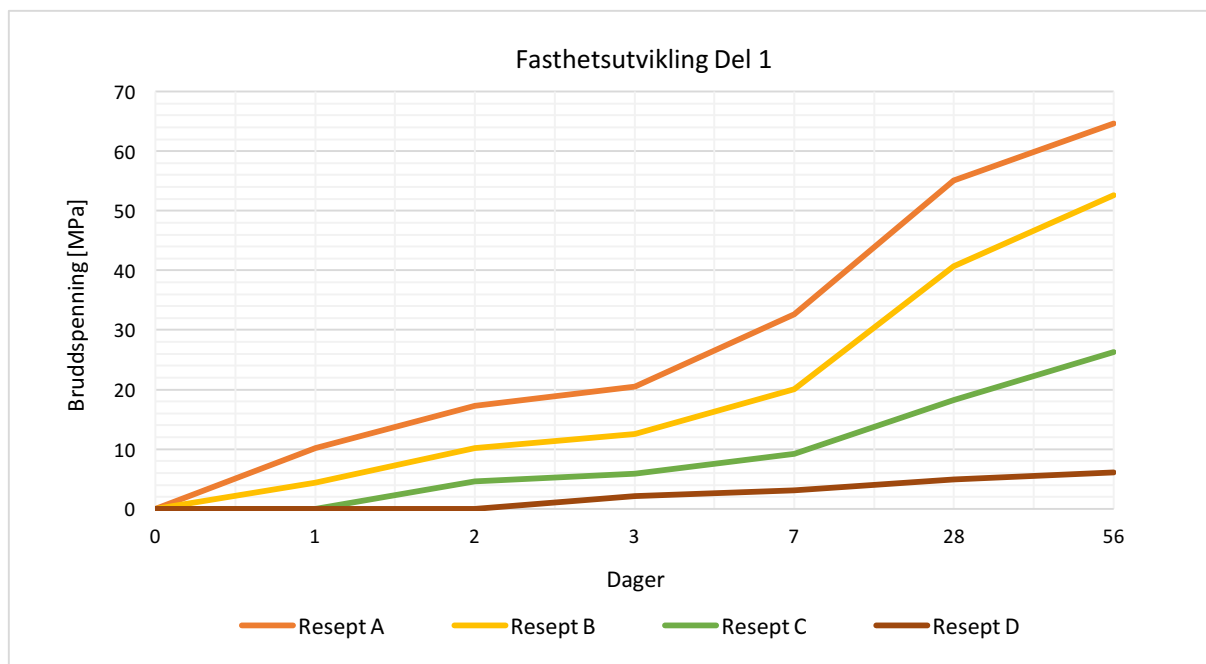
4.2.1 Del 1 Innledende forsøk

Tabell 17 sammen med figur 18 viser fasthetsutviklingen til de ulike betongreseptene, over en periode på 56 dager. Målinger ved hvert tidspunkt angir gjennomsnittlig bruddspenning, for en prøveserie på 3 betongterninger. Nullverdier betegner prøveserier der fastheten er for lav til at trykkpressa kan registrere en verdi. Logging av lastpåføring skjer ført ved 17-18 kN, slik at trykkfastheten til disse terningene nødvendigvis må være under 1,7-1,8 MPa. Denne sammenhengen gjelder forøvrig også for del 2 og 3. Den svake herdeaktiviteten hos resept C og D krevde at avformingen av prøvene måtte gjøres etter 2 døgn, med unntak av første prøveserie som måtte testes etter 1 døgn. På dette tidspunktet var alle i utgangspunktet for svake til at en hensiktsmessig avforming ville vært mulig, uten å påføre skader.

Ingen av reseptene kan vise til den ønskede 3-dagers fasthet på 25 MPa. Til gjengjeld viser resept A og B gode fasthetsegenskaper ved 28 og 56 dager. De to resterende, med 70 og 80% flyveaske, har liten til ingen styrkeutvikling den første uka. For resept D gjelder dette i praksis hele testperioden. Det var tydelig å observere denne saktegående herdeprosessen da prøveterningene over lengre tid hadde en gjennomgående fuktig og myk tekstur, selv mange dager etter avforming.

Tabell 17 Målte bruddspenningsverdier ved ulike tidspunkt i del 1

Herdetid ved 20°C [dager]	Bruddspenning [MPa]			
	Resept A	Resept B	Resept C	Resept D
1	10,2	4,4	0,0	0,0
2	17,3	10,2	4,6	0,0
3	20,5	12,5	5,9	2,1
7	32,6	20,1	9,2	3,1
28	55,0	40,7	18,2	4,9
56	64,7	52,6	26,3	6,1



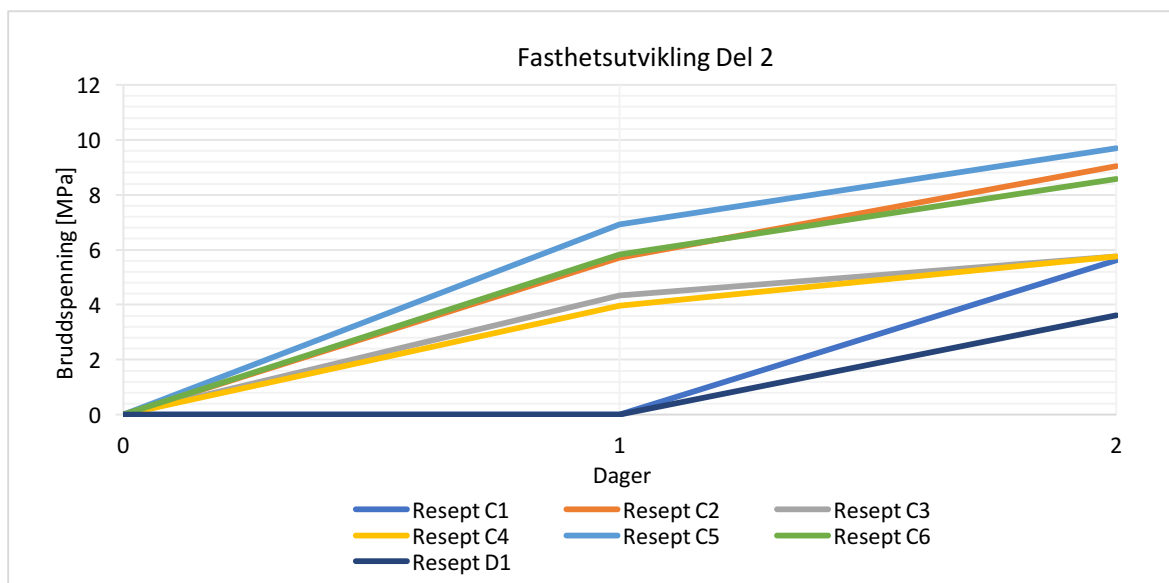
Figur 18 Fasthetsutvikling for reseptene i del 1

4.2.2 Del 2 Mørtelblandinger

Tabell 18 sammen med figur 19 viser fasthetsutviklingen til de ulike mørtelreseptene etter 1 og 2 døgn. For hvert testtidspunkt er det utført trykktesting av 2 terninger. Alle mørtelblandingene med aktivator ga målbare fastheter i trykkpressa etter 1 døgn, i motsetning til de uten aktivator med tilsvarende 70% flyveaskeinnhold. Fasthetsutviklingen til de ulike reseptene kan med fordel studeres sammen med tabell 7. En liten merknad til figur 19 er at resept C3 på bakgrunn av redusert støpelighet, fikk tilsatt ekstra vann i etterkant av proporsjonering. Denne har dermed hatt et reelt masseforhold på ca. 0,42, og kan derfor ligne resept C4.

Tabell 18 Målte brudspenningsverdier ved ulike tidspunkt i del 2

Herdetid ved 20°C [dager]	Brudspenning [MPa]						
	Resept C1	Resept C2	Resept C3	Resept C4	Resept C5	Resept C6	Resept D1
1	0,0	5,7	4,3	4,0	6,9	5,8	0,0
2	5,6	9,0	5,8	5,8	9,7	8,6	3,6



Figur 19 Fasthetsutvikling for reseptene i del 2

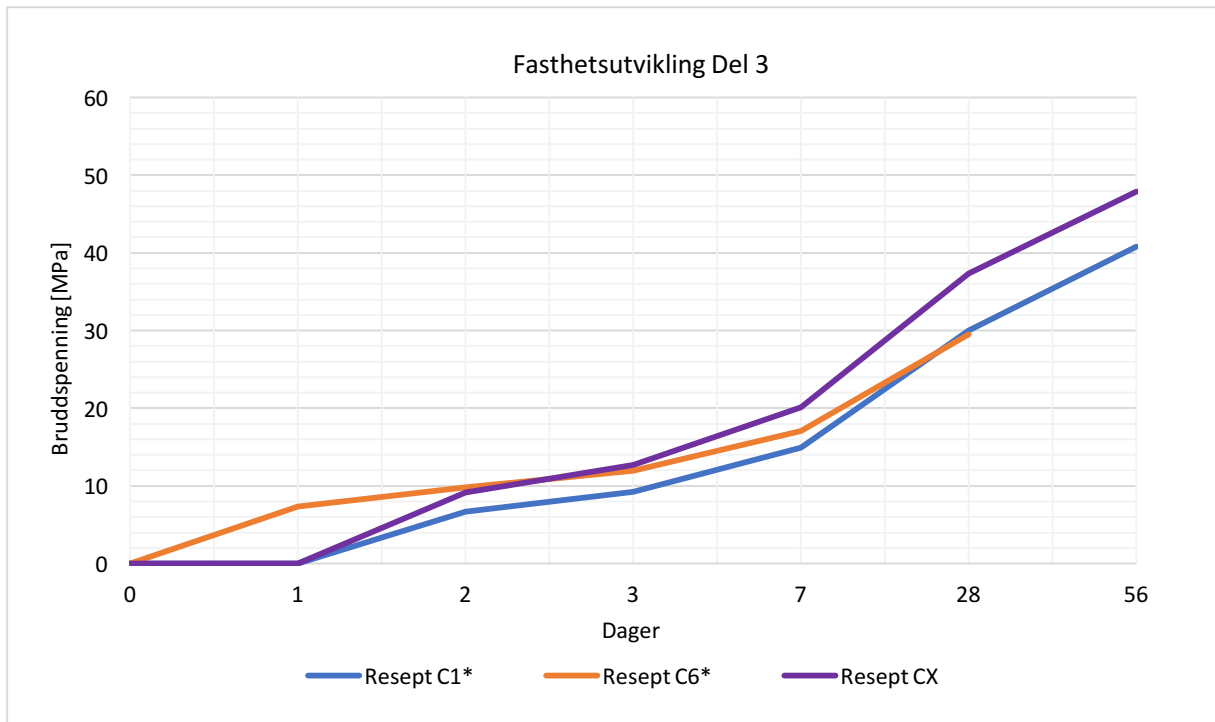
4.2.3 Del 3 Betongblandinger

Tabell 19 og figur 20 viser fasthetsutviklingen til de ulike betongreseptene over en periode på 56 dager. Målinger ved hvert tidspunkt angir gjennomsnittlig bruddspenning for én prøveserie. Som nevnt i punkt 4.1.1, ga resept C6* krevende muligheter for tilfredsstillende utstøping og kompaktgjøring. Dette har også påvirket målingene fra trykktestingen. Det vil si at de første målingene, henholdsvis etter 1 og 2 døgn, ble gjort med de best kompakterte terningprøvene. Største differanse mellom de laveste og høyeste målingene innad i prøveserien var her på 0,27 MPa. For døgn 3 og 7 var denne differansen på henholdsvis 1,44 og 2,09 MPa. For 28 døgns testing måtte 2 av prøvene i serien forkastes da disse inneholdt store steinreir, og hadde bruddspenninger ned mot 8 MPa. 28 døgns fastheten er derfor basert på kun én terningprøve. 56 døgns fastheten måtte i sin helhet forkastes, da disse representerte det samme problemet som under 28 døgns testing. Med andre ord, ikke representarive målinger for denne resepten. Resterende resepter, C1* og CX hadde naturlig nok ikke dette problemet.

Ingen resepter kan vise til den ønskede 3-dagers fastheten. Dog er de alle nærmere 25 MPa, sammenlignet med resept C med samme flyveaskedosering. I det store kan del 3 vise til en betraktelig forbedring i fasthetsutvikling, sammenlignet med de innledende prøvene. Resept CX har eksempelvis en dobbelt så høy trykkfasthet enn tilfellet er for resept C etter 28 dager.

Tabell 19 Målte bruddspenningsverdier ved ulike tidspunkt i del 3

Herdetid ved 20°C [dager]	Bruddspenning [MPa]		
	Resept C1*	Resept C6*	Resept CX
1	0,0	7,4	0,0
2	6,7	9,8	9,1
3	9,2	11,9	12,7
7	14,9	17,0	20,1
28	30,0	29,5	37,4
56	40,8	-	47,9



Figur 20 Fasthetsutvikling for reseptene i del 3

4.3 Måling av kapillærabsorpsjon

Tabell 20 og 21 gir de ulike kapillær- og porøsitetsmålingene for resept A og B. Dette er middelværdier fra hver enkelt prøveserie, å 4 disker for resepter herdet i 56 dager. Både resept A og B kan vise til høye verdier for motstandstall, og relativt normale verdier for sugporøsitet. Den lukkede makroporøsiteten viser en god korrelasjon til luftmålingene gjort av den ferske betongen vist i tabell 15, med forutsetning om at luftmålingen fra resept A i realiteten er noe lavere.

Tabell 20 Resultater fra kapillær sugsevne og porøsitet i resept A

Resept A			
Størrelse		Middelværdi	Var. koeff./std.av.
Motstandstall	[s/m ²]	1,56E+08	5,2 %
Sugporøsitet	[% vol.]	13,1	1,9 %
Åpen makroporøsitet	[% vol.]	0,1	4,5 %
Lukket makroporøsitet	[% vol.]	1,4	1,7 %

Tabell 21 Resultater fra kapillær sugsevne og porøsitet i resept B

Resept B			
Størrelse		Middelværdi	Var. koeff./std.av.
Motstandstall	[s/m ²]	1,62E+08	1,6 %
Sugporøsitet	[% vol.]	12,8	3,4 %
Åpen makroporøsitet	[% vol.]	0,1	10,0 %
Lukket makroporøsitet	[% vol.]	1,3	5,0 %

4.4 Krav til betongsammensetning

Tabell 22 til 28 gir en oversikt over nødvendige parameterne som må tilfredsstilles, i henhold til kravene i nasjonalt tillegg. Samtidig viser de hvilke justeringer i de enkelte reseptene som må ligge til grunn for å etterleve disse. Under kolonnen "bidrag i m" kan en observere tillatt teoretisk mengde silikastøv- og flyveaskeinnhold. Disse verdiene er justert etter kravet om maks 11% silikastøv, og 35% flyveaske fra den reelle mengden under "mengde". Det betyr at kolonnen viser tillatte mengde bindemidler, hvorav resterende faller inn under kolonne; "betraktes som filler". Underliggende tabell viser så de oppnådde klinker-, silikastøv- og flyveaskeandelene basert på denne nye bindemiddelmengden fra "bidrag i m". Disse er gitt i kolonne "Oppnådd". Som det fremkommer i de ulike reseptene er det ingen som tilfredsstillende samtlige krav. Resept A som har den laveste flyveaskedoseringen tilfredsstillende riktignok de fleste akseptkriteriene, dog med unntak av krav til minste klinkermengde. Resept C og D derimot, havner helt i andre enden med ingen godkjente. Generelt viser de ulike tabellene at kravet til masseforhold er mest overkommelig for de ulike reseptene.

Tabell 22 Kontroll av resept A i henhold til gjeldene akseptkriterier

Resept A					
Bindemiddelkomponent	Mengde [kg/m ³]	Klinker [kg/m ³]	Bidrag i m [kg/m ³]	K-verdi	Betraktes som filler [kg/m ³]
Std FA, CEM II/B-M 42,5R	177,3	138,3	177,3	-	-
Flyveaske	149,7	-	46,8	0,7	102,9
Silikastøv	36,3	-	24,8	1,0	11,5
Vann	145,3	-	145,3	-	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	< 0,90	0,62	✓
Effektiv bindemiddelmengde	> 225	235	✓
Andel FA	< 0,35	0,34	✓
Andel klinker	> 0,65	0,59	x
Andel Silikastøv	< 0,11	0,11	✓
Reell bindemiddelmengde	-	363	-

Tabell 23 Kontroll av resept B i henhold til gjeldende akseptkriterier

Resept B					
Bindemiddelkomponent	Mengde [kg/m ³]	Klinker [kg/m ³]	Bidrag i m [kg/m ³]	K-verdi	Betraktes som filler [kg/m ³]
Std FA, CEM II/B-M 42,5R	130,6	101,9	130,6	-	-
Flyveaske	190,5	-	55,2	0,7	135,3
Silikastøv	35,7	-	24,8	1,0	10,9
Vann	142,7	-	142,7	-	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	< 0,90	0,74	✓
Effektiv bindemiddelmengde	> 225	194	x
Andel FA	< 0,35	0,41	x
Andel klinker	> 0,65	0,53	x
Andel Silikastøv	< 0,11	0,13	x
Reell bindemiddelmengde	-	357	-

Tabell 24 Kontroll av resept C i henhold til gjeldende akseptkriterier

Resept C					
Bindemiddelkomponent	Mengde [kg/m ³]	Klinker [kg/m ³]	Bidrag i m [kg/m ³]	K-verdi	Betraktes som filler [kg/m ³]
Std FA, CEM II/B-M 42,5R	85,5	66,7	85,5	-	-
Flyveaske	229,8	-	63,4	0,7	166,4
Silikastøv	35,0	-	24,8	1,0	10,2
Vann	140,1	-	140,1	-	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	< 0,90	0,91	x
Effektiv bindemiddelmengde	> 225	155	x
Andel FA	< 0,35	0,51	x
Andel klinker	> 0,65	0,43	x
Andel Silikastøv	< 0,11	0,16	x
Reell bindemiddelmengde	-	350	-

Tabell 25 Kontroll av resept D i henhold til gjeldende akseptkriterier

Resept D					
Bindemiddelkomponent	Mengde [kg/m ³]	Klinker [kg/m ³]	Bidrag i m [kg/m ³]	K-verdi	Betraktes som filler [kg/m ³]
Std FA, CEM II/B-M 42,5R	42,0	32,8	42,0	-	-
Flyveaske	267,8	-	71,2	0,7	196,6
Silikastøv	34,4	-	24,8	1,0	9,6
Vann	137,7	-	137,7	-	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	< 0,90	1,18	x
Effektiv bindemiddelmengde	> 225	117	x
Andel FA	< 0,35	0,68	x
Andel klinker	> 0,65	0,28	x
Andel Silikastøv	< 0,11	0,21	x
Reell bindemiddelmengde	-	344	-

Tabell 26 Kontroll av resept C1* i henhold til gjeldende akseptkriterier

Resept C1*					
Bindemiddelkomponent	Mengde [kg/m ³]	Klinker [kg/m ³]	Bidrag i m [kg/m ³]	K-verdi	Betraktes som filler [kg/m ³]
Std FA, CEM II/B-M 42,5R	94,6	73,8	94,6	-	-
Flyveaske	254,4	-	61,7	0,7	192,7
Silikastøv	38,8	-	24,8	1,0	14,0
Vann	124,1	-	124,1	-	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	< 0,90	0,76	✓
Effektiv bindemiddelmengde	> 225	163	x
Andel FA	< 0,35	0,48	x
Andel klinker	> 0,65	0,45	x
Andel Silikastøv	< 0,11	0,15	x
Reell bindemiddelmengde	-	388	-

Tabell 27 Kontroll av resept C6* i henhold til gjeldende akseptkriterier

Resept C6*					
Bindemiddelkomponent	Mengde [kg/m ³]	Klinker [kg/m ³]	Bidrag i m [kg/m ³]	K-verdi	Betraktes som filler [kg/m ³]
Std FA, CEM II/B-M 42,5R	92,7	72,3	92,7	-	-
Flyveaske	249,2	-	62,1	0,7	187,1
Silikastøv	38,0	-	24,8	1,0	13,2
Vann	121,5	-	121,5	-	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	< 0,90	0,76	✓
Effektiv bindemiddelmengde	> 225	161	x
Andel FA	< 0,35	0,49	x
Andel klinker	> 0,65	0,45	x
Andel Silikastøv	< 0,11	0,15	x
Reell bindemiddelmengde	-	380	-

Tabell 28 Kontroll av resept CX i henhold til gjeldende akseptkriterier

Resept CX					
Bindemiddelkomponent	Mengde [kg/m ³]	Klinker [kg/m ³]	Bidrag i m [kg/m ³]	K-verdi	Betraktes som filler [kg/m ³]
Std FA, CEM II/B-M 42,5R	107,0	83,5	107,0	-	-
Flyveaske	287,7	-	59,5	0,7	228,2
Silikastøv	43,9	-	24,8	1,0	19,1
Vann	122,8	-	122,8	-	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	< 0,90	0,71	✓
Effektiv bindemiddelmengde	> 225	173	x
Andel FA	< 0,35	0,45	x
Andel klinker	> 0,65	0,48	x
Andel Silikastøv	< 0,11	0,14	x
Reell bindemiddelmengde	-	439	-

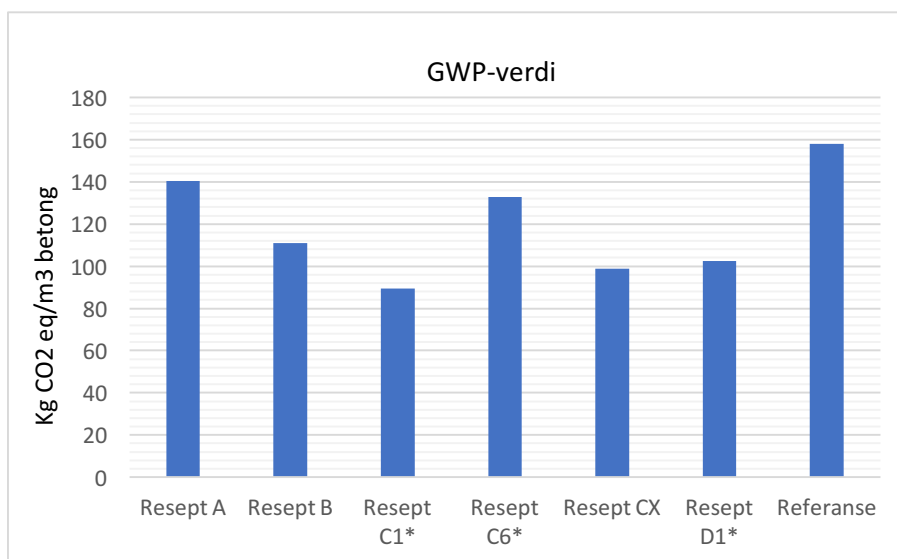
4.5 Miljødeklarasjoner

Tabell 29 og tilhørende figurer 21 og 22, gir en samlet oversikt over de ulike betongreseptenes miljøprestasjon, med hensyn på innebygget energi og GWP bidrag. Reseptene tar utgangspunkt i en betong produsert hos Unicon, ved Havna i Trondheim. Deklarert enhet er 1 m³ betong, gyldig fra fase A1 til A4. EPD'ene gjelder for en betongleveranse mellom Havna og Powerhouse Brattørkaia. Miljødeklarasjonen tilsvarende med andre ord de geografiske forholdene som var utgangspunktet for EPD'en utarbeidet våren 2017, en lavkarbonbetong levert til Powerhouse Brattørkaia. Denne er representert som "referanse" i samme tabell. Dette gjør sammenligning mellom samtlige resepter enklere. Referanse betongen med reseptnavnet PH3, tilsvarende en sammensetning brukt i første dekketøp, med henholdsvis 50% flyveaskedosering, og et masseforhold på 0,38-0,40. Silikastøv inngår også, men med ukjent mengde. Alle EPD'ene er i sin helhet gitt i vedlegget. Verdien for innebygget energi representerer TRPE, "total use of non renewable primary energy resources". Med andre ord er energikonsumet fra fornybare energikilder ikke inkludert i figur 22. Denne er riktignok å finne i en egen rad i EPD'en som kan finnes i vedlegget.

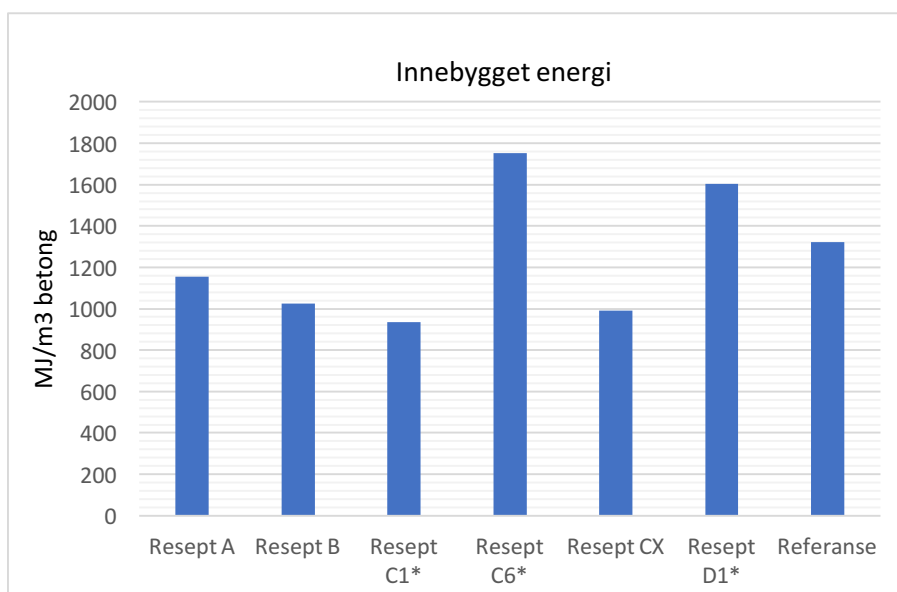
Resultatene viser at samtlige betongresepter tilfredsstiller utslippskravet til en betong ved Gullhaug Torg. Det foreløpige fastsatte målet på maks 170 kg CO₂ eqv/m³ betong ligger med andre ord godt over de beregnede verdiene i tabell 29. I henhold til lavkarbonbetongklassene gitt i tabell 1, vil også reseptene havne godt under en klasse A betong. Her er kravet på 210 kg CO₂ eqv/m³ for en B35 betong. Bortsett fra resept C6* og D1* ligger alle under 1200 MJ/m³, en betraktelig forbedring fra det Powerhouse Brattørkaia tidligere satte seg som mål, på 1500 MJ/m³.

Tabell 29 Kvantitativ fremstilling av miljøprestasjonen til utvalgte resepter fra EPD generatoren

	Innebygget energi [MJ/m ³]	GWP-verdi [kg CO ₂ eqv/m ³]
Resept A	1154,5	140,4
Resept B	1023,5	110,9
Resept C1*	935,5	89,4
Resept C6*	1752,5	132,7
Resept CX	990,5	98,7
Resept D1*	1602,5	102,6
Referanse	1321,7	158,1



Figur 21 Oversikt over de enkelte reseptenes GWP bidrag



Figur 22 Oversikt over de enkelte reseptenes innebygget energi

5 Diskusjon

Dette kapitlet drøfter suksessivt de ulike resultatene som fremkommer i målingene fra kapittel 4. Her redegjøres det for prestasjonen til reseptene, og hvilke av disse som har respondert godt, eller mindre godt ved de ulike testene. Flyveaskens påvirkning og standardens iboende begrensinger blir også diskutert.

5.1 Bearbeidbarhet

5.1.1 Aktivatorens påvirkning av støpelighet

Resultatene fra de visuelle og praktiske konsistensmålingene har vært svært varierende. Særlig gjelder dette den markante forskjellen i støpelighet en ser mellom de med aktivator, og de uten. Nærmest uavhengig av aktivatorinnhold viste disse sammensetningene svært begrensede konsistensegenskaper. Blandingene uten aktivator derimot viste gode støpelighetsegenskaper, selv ved en nedjustering av masseforholdet.

La oss først betrakte reseptene inneholdende aktivatorer, det vil si under del 2. Inngangen til denne støpeprosessen bar preg av usikkerhet rundt evnen til økt fasthetsutvikling og i mindre grad vedrørende problematikken rundt støpelighet. Dette skyldes flere ting. For det første var dette rene mørtelblandinger som i hovedsak skulle betrakte aktivatordoseringens påvirkning av tidlig styrkeutviklingen. Høy matriksmengde og tilsynelatende beskjedne doseringer av aktivator, sammenlignet med tidligere forsøk fra litteraturen[75, 79], ga en forventning om brukbare konsistensegenskaper. Dette viste seg ikke å stemme, selv ved bruk av naftalen som skulle gi antatt bedre effekter i kombinasjon med alkali aktiverte materialer. Reseptene C2 til C5 bar preg av dette, og hadde også de dårligste støpelighetsegenskapene. Under ”våtblending” viste de seg som tunge, tørre blandinger som til tider klumpet seg, selv etter at ekstra mengde SP var tilsatt. Figur 14 av resept C2 illustrerer utfordringene ved konsistensen til disse mørteltypene.

Hos de to siste mørteltypene fra del 2, C6 og D1 observeres en viss bedring i konsistens, som figur 15 og 16 viser. Vannglasset sitt påviselige bidrag til tidlig størkning var en årsak til at denne ble utelatt i disse reseptene. Det begrunnes ut ifra at dette tidligere var en viktig bestanddel i sprøytebetong, samtidig som enkelte forsøk i litteraturen, se punkt 2.13, viser tilsvarende ødeleggende effekter i støpelighet. Da med tanke på bruk av vannglass i en aktivatorløsning, og ikke som tørrstoff. Resultatet fra C6 og D1 var altså en forbedring, men til det beskjedne. Doseringen av naftalen var fortsatt høy, og høyere en anbefalt dosering. Det syntes likevel at SP'en responderte bedre på disse, enn på de tidligere mørtelblandingene. Generelt var konsistensen i alle de alkalisk aktiverte sammensetningene svært krevende, og det har ikke lyktes i å finne en dypere forklaring på hvilke mekanismer som gjør at SP'en ikke fungerer.

Den tidligere oppfatningen om at SP av naftalen skulle gi bedre effekter enn ved SP av copolymer, viser seg vanskelig å forsvare. Jevne[69] som på samme tidspunkt utførte tester på rene slagg- og flyveaskemørtler, hadde heller ingen oppfatning av en bedret konsistens med naftalen, kontra copolymer.

Ett annet poeng som heller ikke styrker troen på naftalen som det riktige alternativet til et vannreducerende tilsetningsstoff, er at de små forbedringene i støpelighet også kan tilskrives den økte vannmengden fra SP løsningen selv. Som en ser fra tabell 7 var det for flere av mørtelblandingene relativt stor prosentvis økning i dosering, fra den proporsjonerte, til den faktiske mørtelsammensetningen. Avslutningsvis under del 2 ble det gjennomført en støp med ytterligere 10% flyveaskeinnhold. Denne resepten, D1 hadde en mer krevende støpelighet enn resept C6. Det er uklart hva dette skyldes, men den store flyveaskeandelen kan tyde på at det var dette som ga blandingen en noe mer seig og klebrig oppførsel.

Under del 3 var det kun resept C6* som inneholdt aktivator av NaOH, og var en videreføring av resept C6 fra mørtelblandingene. Sammen med resept C1 var dette den mest åpenbare sammensetningen og jobbe videre med fra del 2. Selv om resultatene fra del 2 totalt sett ikke svarte til de ønskede forventningene om tilstrekkelig bearbeidbarhet og styrkeutvikling, fremsto resept C6 som mest lovende av de andre alkali aktiverte blandingene. Den markante nedgangen i matriksinnhold, og ny tilslagssammensetning fra C6 til C6* i del 3 skulle vise seg å redusere støpeligheten ytterligere, og forventingen om en bearbeidbar betong med aktivatorinnhold forsvant med dette. Som plasstøpt betong var denne praktisk talt ubrukelig. Noe også avformingen døgnet etter, understreker i figur 12.

5.1.2 Konsekvenser av de praktiske resultatene

På bakgrunn av de erfaringen som er gjort ved bruk av aktivator og naftalen, synes det åpenbart at nye tiltak må fattes for at mørtelblandingene skal kunne videreføres som fullverdige praktiske, håndterbare betonger. Dette studiet viser at aktivatorer gir en sterk begrensning i støpelighet. Foreløpig er det kun betong med høy flyveaskedosering uten aktivator, som i dette studiet både kan gi en hensiktsmessig styrkeutvikling, og tilfredsstillende krav til støpelighet. Om det er ønskelig å gå videre med betong av OPC og alkali aktivert flyveaske bør alternativer til valgt SP vurderes, samtidig som en bør vurdere om vannglasset skal utelates i større grad. Det har også blitt sett på muligheten for å benytte innkapslede natriumsilikatforbindelser i blandingene. Disse skal gi en forsinket oppløsning i betongen, og på den måte sikre en brukbar konsistens i fersk fase[24]. Et tilsvarende tiltak er diskutert i punkt 2.13. Eventuelt kan en forsøke å benytte andre former for kjemisk aktivering. Det er også foreslått bruken av det plastiserende tilsetningsstoffet lignosulfonat, som et alternativ til de tidligere foreslåtte SP'ene. Dette sammenfaller også med forslaget gitt fra De Weerdt[36]. Utstrakt bruk av naftalen i dette studiet, over anbefalt dosering på 0,5-2,0 % av b, vitner også om at økt doseringsmengde har hatt begrensende effekt, og andre tilsetningsstoffer burde slikt sett vurderes.

Det som kan forvirre ytterligere i spørsmålet om bearbeidbarhet i alkali aktiverte materialer, er de tilsynelatende gode støpelighetsresultatene som enkelte forsøk i litteraturen viser til. Og det til tross for høye aktivator doseringer, både med og uten vannreducerende tilsetningsstoff. I en slik sammenheng er det logisk å tenke seg at det er tilstedeværelsen av OPC som er årsaken til den reduserte bearbeidbarheten i dette studiet. Kan det for eksempel være at de alkaliske aktivatorene forringer effekten av gips, ment for å hindre flash-set fra C_3A ? Dette er spørsmål som forsterker inntrykket om at det fortsatt foreligger mye usikkerhet rundt alkali aktiverte materialer, og deres innvirkning på betongens bearbeidbarhet.

5.1.3 Fravær av aktivator dosering

De ulike betongblandningene i del 1 og 3 hadde alle tilfredsstillende synkverdier. Uavhengig av det nedjusterte masseforholdet i del 3, viste konsistensen seg å være fullt ut bearbeidbar også her. Resept C6* inngår forøvrig ikke i denne vurderingen. Som tabell 15 indikerer, viser den høye flyveaskedoseringen at selv et lavt masseforhold ikke forringer støpeligheten til betongen. Samtlige resepter med 70% flyveaske, henholdsvis C, C1* og CX har slumpmålinger godt over 20 cm, ved normal SP dosering. For resept CX sin del, hvor det er snakk om et masseforhold på 0,28, er dette oppsiktsvekkende gode resultater. En vannmengde på knapt 140 l/ m³ som her er tilfellet, ville ikke vært mulig uten effekten fra flyveasken. Som dekkestøpen ved Powerhouse Brattørkaia også demonstrerer, kan et lavt masseforhold kompenseres for med tilstrekkelig flyveaskedosering, og i kombinasjon med SP gi en svært byggeplassvennlig betong. På bakgrunn av egne resultater så vel som observasjonene gjort under dekkestøpen ved Brattørkaia, synes det åpenbart at flyveaskedosering utover 50% bidrar positivt til bearbeidbarheten.

5.2 Fasthetsutvikling

5.2.1 Del 1 Innledende forsøk

Resultatene fra de innledende prøvene understreker en vesentlig egenskap ved flyveaskebetonger. Nemlig at det foregår en kontinuerlig styrkeutvikling helt frem til 56 dager, en trend som er tydelig observerbar for resept A og B. For en ordinær portlandsbasert betong derimot, er det normalt å se en avtagende fasthetsutvikling frem mot 28 dager, og en minimal styrkeøkning i etterkant av dette. Mangelen på denne tidlige styrkeutviklingen kommer særlig til uttrykk etter hvert som flyveaskedoseringen øker. For resept B sin del kan dette observeres ved en noe slakere stigningskurve de første 28 dagene, sammenlignet med resept A. Til gjengjeld kan den vise til en sterkere økning i styrke, fra 28 til 56 dager. Med unntak av denne forskjellen har de to en relativt lik trend i fasthetsutviklingen, slik det fremkommer i figur 18.

En 28-dagers fasthet på 40 MPa for resept B, tyder på at ved hjelp av riktige resept- og byggetekniske tiltak, bør dette anses som en fullt anvendelig betong. Det må understrekes at disse fasthetsverdiene gjelder for betongtærninger. Man må derfor ikke forveksle disse med sylindertykkfastheten, som er den gjeldende metoden for å angi betongens kapasitet etter 28 dager. Det vil si at fastheten ved 28 dager vil være noe lavere, om den skal defineres etter nasjonale regelverk[7].

En videre observasjon av Figur 18 viser at det foregår et tydelig skifte i betongens styrkeutvikling ved overgangen fra 60 til 70 % flyveaske. I dette intervallet sees et markant fall i opparbeidet styrke, både i tidlig og sen fase. For resept D sin del er styrkeutviklingen nærmest fraværende, og det virker åpenbart at det lave OPC innholdet, som i praksis bare er på 10% av b (ettersom silikastøvet er på 10%), er for lavt til at nevneverdig gelproduksjon kan skje. Den svært beskjedne hydratiseringen av OPC gir også redusert varmeutvikling og mindre produksjon av portlanditt, med redusert pozzolanaktivitet som resultat. En slik selvforsterkende effekt med begrenset varmeproduksjon, lite OPC hydratasjon og pozzolanaktivitet, er særlig betegnende for denne resepten. Ved siden av en lav styrkeutvikling, må den også antas å være så temperatursensitiv at den vanskelig vil la seg anvende som plasstøpt betong, under de fleste forhold. En lik, men mindre effekt av dette kan observeres også for resept C, med 70% flyveaske. Forskjellen her er at den får en relativt høy fasthet ved 56 dager, sammenlignet med resept D, på drøye 26 MPa. Fastheten antas også å stige ytterligere etter 56 dager, slik kurvene til resept A og B også indikerer.

Selv om målet om 25 MPa etter 3 dager ikke er mulig, gir prøvene nyttig informasjon om den generelle fasthetsutviklingen for slike sammensetninger. Særlig når og hvordan, det forventede fallet i styrkeutvikling vil opptre underveis i flyveaskedoseringen. Det må nevnes at tilsvarende sammensetninger som resept A, tidligere har tilfredsstilt 3 dagers-kravet. Dette var tilfellet i undertegnede tidligere prosjektoppgave, samt hos Unicon selv. Det er uklart hvorfor resept A ikke kan vise til samme resultat.

Spesielt interessant er den høye slutfastheten hos resept A og B, en egenskap som vitner om mye potensiale i disse sammensetningene. Selv om fokuset omkring styrkeutviklingen har ligget i de første dagene, og spesielt etter 3 døgn, gir disse 56-døgns fasthetene også andre muligheter. Særlig der tidlig styrkeutvikling ikke er like avgjørende for fremdriften. I slike sammenhenger, der behovet for lav varmegenerering er en viktig egenskap, vil disse reseptene kunne fungere godt i anleggsbransjens betongkonstruksjoner. Sammen med de positive porositetsverdiene forsterker dette en slik argumentasjon. Noe også punkt 5.3 redegjør for.

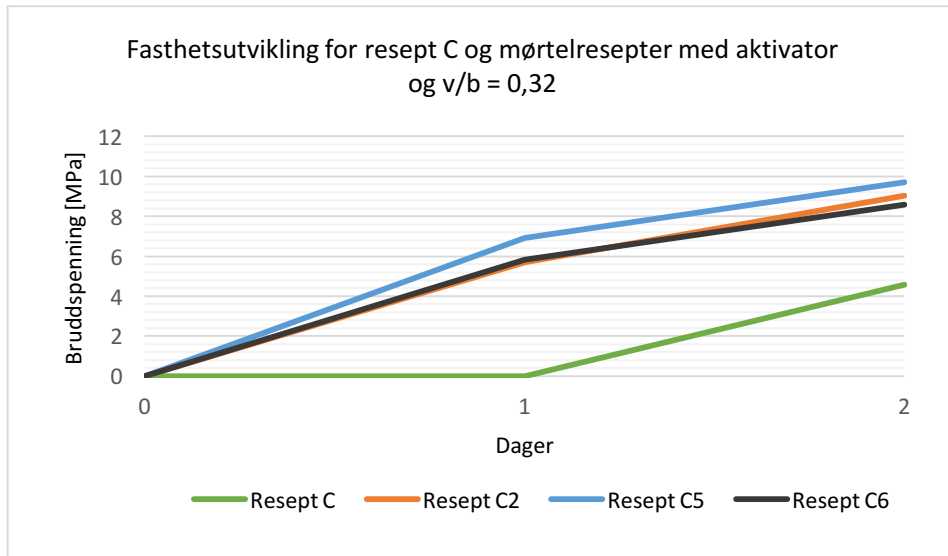
5.2.2 Del 2 Mørtelblandinger

Som det tidligere er vist under metode kapitelet, var det en flyveaskedosering på 70% som skulle dominere del 2. Da resept A og B kunne vise til en fornuftig styrkeutvikling, før det ble foretatt optimaliseringer hva gjelder masseforhold og aktivator tilsetning, fremsto resept C som den mest spennende sammensetningen å jobbe videre med. Del 2 ble derfor en prosess for å optimalisere en slik utgave. Generelt viste målingene at tilførsel av alkalier ga en forbedring i 1 og 2 døgns fasthet, for alle mørteltypene inneholdende aktivator. Om vi utelater D1 selvfølgelig. Slikt sett er effekten av aktivator i de første 24 timene udiskutabel. En økning i trykkfasthet fra 0 til drøye 6 Mpa etter 1 døgn, kan observeres mellom resept C, og de tre mørtelblandingene C2, C5 og C6 vist i figur 23.

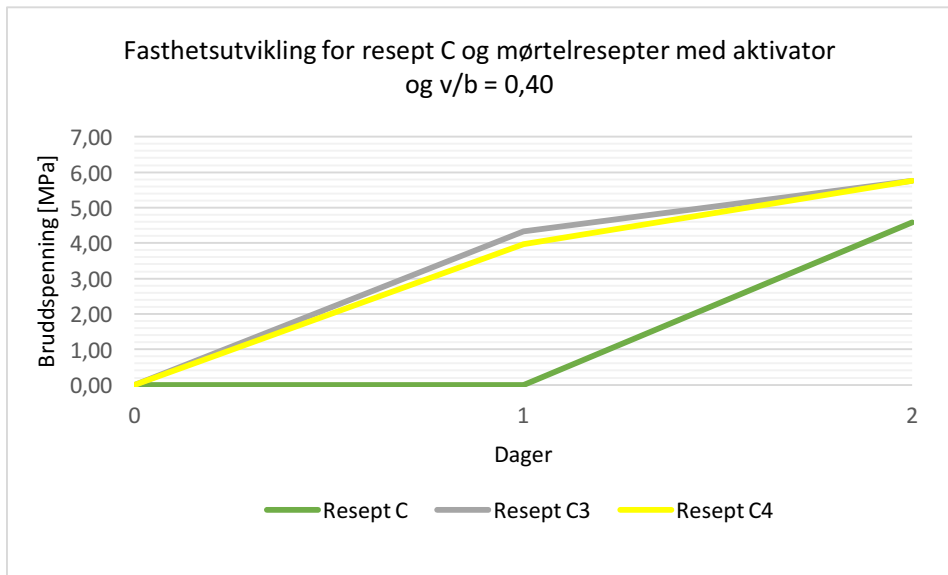
Det er likevel nødvendig å sette spørsmålstegn ved visser sider av aktivatorforsøkene. De høyeste fasthetsmålingen i del 2 kjennetegnes også av et redusert masseforhold, slik tabell 30 viser. Det er grunn til å tro at denne reduksjonen er en viktig bidragsyter for den økte styrken, og ikke kun aktivator doseringen alene. Dette kan tydelig observeres for resept C3 og C4 i figur 24 som begge har et masseforhold tilsvarende resept C, og med nokså tilsvarende lik 2-døgnsfasthet. En ytterligere argumentasjon som heller ikke taler aktivatorens sak, er sammenligningen mellom de tre reseptene gitt i tabell 30. Samtlige kan vise til en fasthet på rundt 9 MPa etter 2 døgn, se figur 23. Den beskjedne variasjonen i oppnådd styrke mellom de tre, later ikke til å stå i stil til den relativt store variasjonen i aktivator dosering. Da er spørsmålet om de ulike fasthetene de imellom, like gjerne kan skyldes usikkerhet rundt den mekaniske integriteten til terningsprøvene, som var sterkt influert av kvaliteten på kompaktgjøringen ved utstøping. Om det i mindre grad er aktivatoren som påvirker fasthetsutviklingen mellom 1 og 2 døgn, insinuerer dette at det er det reduserte masseforholdet som bidrar til denne økningen. Dette kan forsterke oppfatningen om at aktivatorene kun gir et bidrag de første 24 timene.

Tabell 30 Reseptteknisk utforming av et utvalg av de kjemisk aktiverte mørtelblandingene

	v/b	SP [% av b]	Vannglass [% av b]	NaOH [% av b]
Resept C2	0,32	4,0 (6,4)	2,4	2,5
Resept C5	0,32	4,0 (4,9)	1,2	2,5
Resept C6	0,32	4,0 (6,6)	0	2,5



Figur 23 Sammenligning i fasthetsutvikling mellom resept C og mørtelblandingene C2, C5 og C6



Figur 24 Sammenligning i fasthetsutvikling mellom resept C og mørtelblandingene C3 og C4

Som tabell 30 viser er det gjort blandinger med gradvis reduksjon av vannglass. Dette var i utgangspunktet for å gi en mer bearbeidbar mørtel, noe den da i liten grad gjorde. Den viste sågar å påvirke styrkeutviklingen i mindre grad enn en skulle tro. En antatt reduksjon i styrkeutviklingen ble altså ikke registrert om vi betrakter figur 23. Dette kan tyde på at det heller er natriumhydroksid som spiller en mer sentral rolle under tidlig styrkeutvikling, enn tilfellet er for vannglass. Det neste spørsmålet er da om en videre økning av NaOH vil gi ytterligere økt styrke, eller om økte doseringer vil forringe herdeprosessen mer. I en sterk basisk porevannsløsning blir det nevnt at dette hindrer en stabil tilstedeværelse av C-S-H gel, se punkt 2.10.3. Det er med andre ord forbundet med usikkerhet om hva som bør være optimal dosering av aktivator, både med hensyn på vannglass og natriumhydroksid.

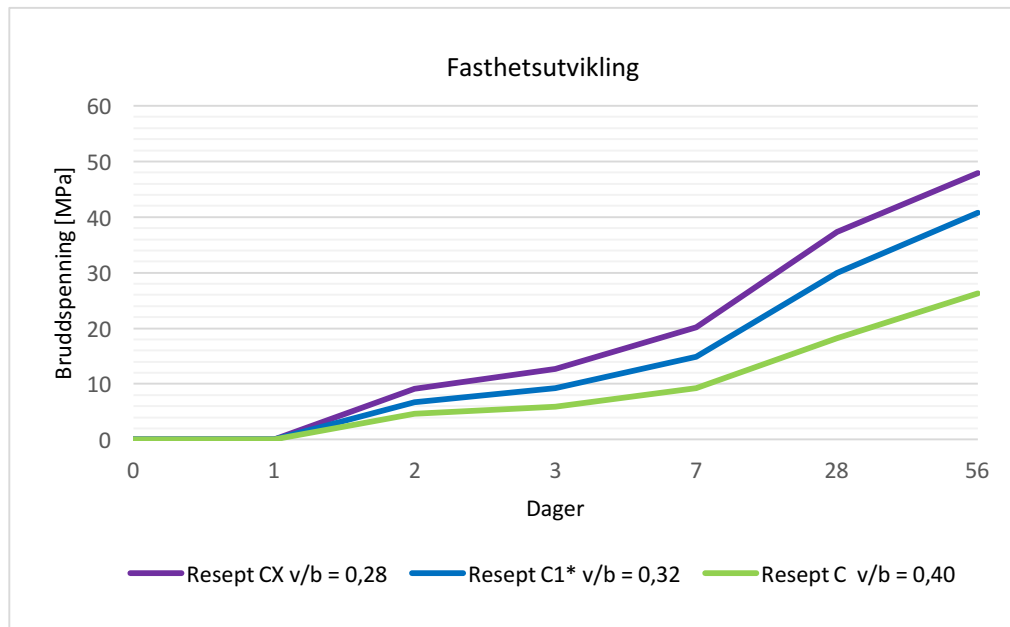
Litteraturen viser til sprikende resultater, og gir dermed ikke alltid entydige svar omkring anbefalt aktivator dosering. Generelt er de fleste målinger av både hybrid og geopolymer betonger gjort for prøver herdet under forhøyede temperaturer. Dette gir et noe vanskelig sammenligningsgrunnlag for styrkeutviklingen til betongen. Likevel er det påfallende og se hvor kraftig økningen har vært ved flere forsøk fra litteraturen. Noen målinger viser eksempelvis oppnådde fastheter som varierer mellom 22-41 MPa, etter 3 døgn for geopolymer betonger[38]. Dette er for tilsvarende terningsprøver på 100x100x100mm, herdet ved 80°C i 24t, og resten av tiden ved romtemperatur. I dette studiet derimot kan eksempelvis resept D1 vise til en 2 dagers fasthet på 3,61 MPa. Riktignok er dette en alkali aktivert sammensetning bestående av 80% flyveaske testet en dag tidligere, men veien synes likevel lang opp til de nevnte fasthetsverdiene. Det forsterker oppfatning av at temperaturen er en avgjørende bidragsyter for styrkeutvikling, og kanskje en forutsetning hvis herdeprosessen i større grad skal styres av alkalisk aktivering. En videre studie av fasthetsutviklingen til slike hybridbetonger, i kombinasjon med å fastsette aktuelle bindmiddelsystemer gjennom SEM, XRF, EDX m. m, vil kunne gi en bedre forståelse av hvilke sammensetninger som tilrettelegger både for OPC hydratasjon, og eventuelle polymeriserings effekter.

Særlig to ting bør derfor tas med videre fra del 2 i forhold til styrkebetragtninger. Betydning av betongens masseforhold, aktivatorens positive bidrag de første 24 timene, og den tilsynelatende minimale effekten vannglass har gitt ved disse doseringsregimene.

5.2.3 Del 3 Betongblandinger

Som både figur 19 og 20 illustrerer, gir aktivator doseringen et vesentlig bidrag de første 24 timene etter vanntilsetting. De alkalisk aktiverte blandingene oppnår de første 24 timene en gjennomsnittlig fasthet på rundt 5,6 MPa. For blandinger uten aktivator, har disse en opparbeidet fasthet lik null, uavhengig av masseforhold. Det vil si; ingen målbar fasthet de første 24 timene. Denne positive effekten er viktig å poengtere, selv om det ikke bestrider det faktum at den totale styrkeutviklingen fra aktivatorene er beskjedne over tid. I figur 20 viser resept C6* en rask styrkeoppbygging det første døgnet, men som gradvis avtar og etter hvert hentes inn av resept C1*. Begge med 70% FA og likt v/b tall. Hvordan dette vil forløpe seg etter 28 døgn fremkommer ikke i denne oppgaven, på grunn av den nevnte reduserte kvaliteten på terningsprøvene i resept C6*. Denne sammenligningen gir grunn til å tro at bidraget fra aktivatorene har størst potensiale i perioden der varmeutviklingen er størst. Det vil si under akselerasjonsperioden der klinkermineralet C_3S dominerer[55]. På bakgrunn av den teorien som foreligger rundt alkalisk aktiverte materialer, tyder dette på at den eksoterme reaksjonen fra OPC hydratasjon, har en avgjørende rolle for reaksjonskinetikken i slike sammensetninger. Ettersom en gradvis dreining mot rene geopolymer betonger gjør at behovet for ekstern varmetilførsel øker, synes denne tanken åpenbar. Etter 1 døgn faller varmeproduksjonen fra OPC hydratasjon, og samtidig kan det observeres et redusert bidrag i styrkeutviklingen fra de alkali aktiverte blandingene.

Resept C1* og CX er motparten til det alkali aktiverte alternativet, resept C6*. Begge har som tidligere nevnt, en treg utvikling, men stiger kraftig fra 1 døgn og utover. Dette er særlig observerbart for resept CX, som med sitt masseforhold på 0,28 gir overraskende gode resultater fra 3 døgn og utover. Figur 25 gir en sammenligning mellom C1* og CX sammen med resept C, der en direkte kan se påvirkningen det reduserte masseforholdet gir på fasthetsutviklingen.



Figur 25 Sammenligning i fasthetsutvikling mellom resept CX, C1* og C

Selv om ingen resepter har tilfredsstilt ønske om 3 døgn fasthet på 25 MPa, har disse målingene likevel vist gode resultater hva gjelder langtidsstyrke oppbygging. Til tross for det høye flyveaskenivået, som i resept C ga svært krevende herdeforhold, viser resept C1* og CX vesentlige forbedrede mekaniske egenskaper. Det opparbeidete styrkenivået på eksempelvis 37 MPa etter 28 døgn hos resept CX, tilfredsstiller en B30 betong definert etter tabell NA.2 i nasjonalt tillegg[7]. Samtidig som den også tilfredsstiller en B35 betong, dog etter 56 dager. En fasthetsklasse som må betraktes som god for en sammensetning med kun 20% portlandsement, allerede etter 28 døgn. Dette studiet har ikke sett på effekten et redusert masseforhold ville gitt for resept B, med 60 % flyveaske, men en kan bare anta at også dette ville gitt gode slutfastheter.

5.3 Bestandighet

Teorikapittelet tar for seg ulike nedbrytende mekanismer i betong, både relatert til betonger basert på OPC og AAM. Særlig redegjøres det for usikkerheten rundt de alkalisk aktiverte hybrid- og geopolymer betongene. For å prøve å samle de løse trådene, og få en nærmere avklaring vedrørende bestandighetsspørsmålene til AAM, kan en litt forenklet ta utgangspunkt i to ting: Kalsiuminnhold og porøsitetsegenskaper. Skadepotensiale til de to nedbrytende mekanismene ASR og sulfatangrep, er i kjemisk sammenheng styrt av tilgangen på kalsium. Med andre ord er en geopolymer til forskjell fra en OPC betong, ikke utsatt for denne type bestandighetsproblematikk. En hybrid betong vil på sin side så lenge kalsiuminnholdet er lavt, og eksponeringen minimal ha gode forutsetninger for å motstå denne type nedbrytende mekanismer. Betrakninger rundt karbonatisering, kloridinntrengning og frostbestandighet bør på sees i sammenheng med betongens porøsitetsegenskaper. Der litteraturen tar for seg inngående målinger av diffusjonskoeffisienter, transportkoeffisienter, klorid og karboniseringsfronter etc. i alkali aktiverte systemer, viser det seg at det er fortsatt knyttet mye usikkerhet til gyldigheten av disse. Det synes derfor mer hensiktsmessig å starte med betongens fysiske struktur. Dette er egenskaper som er lettere å avdekke, og som gir en tryggere indikasjon på betongs samlede bestandighetsegenskaper. Som metode- og resultatkapitlet indikerer, er det nettopp dette som har stått i fokus, og da i første rekke betong med høy flyveaskedosering. Med andre ord, ikke en hybrid betong. Dette skyldes begrensinger i forhold til arbeidsmengde, men også at sammensetningene uten alkalisk aktivering viste til bedre mekaniske og støpelighetsmessige egenskaper, og derfor ble mindre prioritert. Selv om det er tydeliggjort at hybrid betong, og særlig geopolymer kommer gunstig ut hva gjelder bestandighet, er slike målinger fortsatt begrenset til laboratoriske undersøkelser, og med et flust av usikkerhetsfaktorer. Slikt sett er det mer relevant og følge opp tråden med flyveaskedosering uten aktivator, som lettere kan sammenlignes med dagens betongtyper. Det teorikapittelet har forsøkt å avdekke i forhold til AAM og tilhørende bestandighetsegenskaper har således vært begrenset til en litteraturstudie.

Første steg i å avklare de fysiske egenskapene til betong med høy flyveaskedosering, har vært å studere de to minst ”eksperimentelle” betongene under dette studiet; 50% og 60% flyveaskedosering. Porøsitetsmålingene av disse to viser en del oppløftende trekk. Begge reseptene kan vise til høye motstandstall, og porøsitetsverdier som tilsvarer ordinære betonger med masseforhold 0,40. Referanse betongen gitt i tabell 31 består av en ren portlandsement tilsvarende CEM I, standard sement. Den har herdet i vannbad ved romtemperatur på 20°C, før den har gjennomgått tilsvarende testprosedyre som resept A og B[5]. Denne sammensetningen, slik den fremkommer i tabell 31, gir et godt sammenligningsgrunnlag med resept A og B når en skal vurdere effekten av flyveaskedoseringen. Så fremt det tas forbehold om ulik dosering av sillikastøv og ulikt prøvingstidspunkt. Hvorav sistnevnte i så fall taler resept A og B sin sak, ettersom disse er testet flere måneder tidligere.

På den måten har en fortsatt ikke tatt hensyn til eventuelle pågående pozzolanreaksjoner, som flyveasken kan gi etter 2 måneder. For resept A sin del, viser motstandstallet en noenlunde lik verdi som for referanseprøven. Resept B derimot, har en høyere verdi en resept A, noe som kan vitne om en positiv effekt ved videre flyveaskedosering. Ettersom sugporøsiteten styres av masseforhold og bindemiddelmengde, samsvarer dette med de jevnt over like porøsitetsverdiene som gis i tabellen.

Generelt bør disse resultatene indikere betonger med gode bestandighetsegenskaper. Ser en på betongtypene som nyttes i anleggsbransjen der kravet til tilstrekkelig fasthet og ikke minst bestandighet settes høyt, er disse langt på vei sammenlignbare. Statens vegvesen sin egen standard betong, SV 40 har eksempelvis et motstandstall tilsvarende resept A og B[24]. SV 40 har et masseforhold på 0,40, med tradisjonell portlandsement og 5% silikastøv.

Tabell 31 Sammenligning i porøsitetsegenskaper mellom referansetall og resept A og B

	Referanse	Resept A	Resept B	
Motstandstall	1,58E+08	1,56E+08	1,62E+08	[s/m ²]
Sugporøsitet	12,2	13,1	12,8	[% vol.]
v/b	0,40	0,40	0,40	-
SF	5	10	10	[wt% av b]
FA	0	50	60	[wt% av b]
Prøvingstidspunkt	265	56	56	[dager]

Et høyt motstandstall tilsier et redusert vannoppsug, som i sin tur indikerer en betong med redusert kontinuitet i poresystemet. Et slikt tegn på lav permeabilitet, vanskeliggjør derfor inntrengingen av aggressive stoffer som karbondioksid og klorider. For klorider som er avhengig av vanntransport, vil en slik egenskap redusere risikoen for kloridindusert korrosjon. I forbindelse med karbonatisering er også porøsitetsegenskaper en viktig faktor. Ideelle fuktforhold tilsvarende. Likevel er karbonatiseringsproblemet mer krevende når flyveaske inngår i bindemiddelet. Den reduserte motstanden dette gir mot karbonatisering i betong, er som kjent synliggjort gjennom kravene satt i standarden. Dette vil i så måte berøre, ikke bare de to reseptene A og B, men alle de ulike sammensetningene. Mangelen på kalsiumhydroksider vil gi en pH sensitiv betong, som i sin tur tilsier en mindre bestandig betong. Dette synes å komme i konflikt med de positive egenskapene flyveasken tilfører betongens fysiske struktur. Hvilke av disse egenskapene som blir den styrende parameteren for karbonatisering lar seg ikke besvare på her. Til det trengs det ytterligere karbonatiseringsmålinger som kan gi et bedre evalueringsgrunnlag.

At prøvene har ligget lagret i vannbad kan ha bidratt positivt til pozzolanaktiviteten ved økt tilgang på frie alkalier, og dermed bidratt til de gode porøsitetmålingene. Dette kan ha gitt en betong som tilsynelatende gir bedre motstand mot karbonatisering, enn hva det i realiteten ville gitt. Dette kan hende er en minimal feilkilde, men bør nevnes i sammenheng med de åpenbare svakhetene denne type betonger har i sammenheng med fravær av kalsiumhydroksider.

Om en så skal komme med et motargument som forsvarer flyveaskebaserte betonger, kan en sette spørsmålsteget ved gyldigheten til noen av de laboratoriebaserte målingene som gjøres i forbindelse med karbonatisering. Slike målinger vil alltid inneha en viss usikkerhet da det er vanskelig å etterligne de faktiske forholdene i en betongkonstruksjon. Målingene utført av langedal[62] som viste økt karbonatisering for flyveaskeholdig mørtler, var eksponert for et CO₂-holdig miljø på 1,0 og 5 vol%(ved hhv. 60 og 90% RF), allerede to uker etter støp. En slik kunstig høy eksponering kan ha fortrenget mulighetene flyveasken har til å reagere med kalsiumhydroksid. Nettopp fordi flyveaskens behov for lengre herdetid, kan gitt karbontrikoksider, CO₃²⁻ muligheten til å ta opp plassen til de ønskede pozzolanreaksjonene. Da kan en argumentere for at en betong med høy flyveaskedosering i realiteten har en bedre motstandsevne mot karbonatisering, enn hva resultatene skulle tilsi i dette tilfellet. Slike eksempler gjør at de reelle bestandighetsegenskapene er vanskelig å undersøke eksakt i laboratoriesammenheng. Med andre ord er det behov for større erfaring med betong med høy flyveaskedosering også i faktiske betongkonstruksjoner.

I tillegg til de overnevnte mekanismene, er frostbestandighet og ASR viktige faktorer å ta hensyn til. Om de har fått mindre oppmerksomhet skyldes det i første rekk at ASR i mindre grad er styrt av porøsitetsegenskapene til betongen. Dette studie vil i mindre grad kunne vurdere faren for ASR i disse betongene, da dette er styrt av kvaliteten på tilslag, fukttilgang og alkaliske forhold. For betong med høy flyveaskedosering er det likevel nærliggende å tro at den reduserte tilgangen på kalsium på bakgrunn av den lave andelen portlandsement, minimerer faren for ASR, og eventuelle skadelige effekter dette gir fra sulfatangrep. Med tanke på frostbestandighet er igjen porestørrelse og porestørrelsesfordeling relevant. Lavt masseforhold i kombinasjon med pozzolaner, vil gi gode forutsetninger for å redusere risikoen for frostskafer. Hvis en større andel av porevolumet kan tilskrives det fine poresystemet, og ikke makroporene, vil dette minimere andelen vannmettede porer som kan fryse ved normale temperaturer[80].

Det er viktig å merke seg at det de betraktninger som nå gjøres av porøsitetsegenskaper, og hvilke betydninger det gir for de ulike nedbrytende mekanismene, sees i lys av en betong uten alkaliske aktivatorer. I motsatt fall vil dette betydd at eventuelle effekter fra karbonatisering og andre nedbrytende mekanismer måtte vurderes på nytt.

5.4 Begrensninger i standarden

Resultatene fra punkt 4.4 viser tydelig at betongreseptene er lite forenlige med dagens regelverk. Eneste lyspunkt er at masseforholdet for de fleste reseptene lar seg innfri, men dette er også på grunn av den gunstige bestandighetsklassen på M90. For resept A sin del kan riktig reseptjusteringer gjøre at sammensetningen havner innenfor standarden, uten at en reduksjon i flyveaskeandelen må til. Dette synes svært vanskelig for de resterende betongsammensetningene, som alle kjennetegnes av et flyveaskeinnhold på over 50%. Sammenlignes resept C1* og C, ser en at det reduserte masseforholdet gir et bedre utgangspunkt for beregningene. Riktignok er det kun denne parameteren som lar seg innfri for resept C1*. De andre verdiene er nærmere akseptkriteriene enn tilfellet er for resept C, men fortsatt utenfor.

Standarden er som tidligere nevnt i stor grad utformet med hensyn på bestandighetsrelaterte egenskaper. For en flyveaskebasert betong kommer dette særlig til uttrykk i forbindelse med karbonatiseringsspørsmålet. Selv om dette ikke har en direkte betydning for en M90 betong, der k-verdien holdes lik 0,7, er det tydelig at de maksimale doseringsmengdene er styrt av usikkerheten til slike betongers langtidsegenskaper. Da er det interessant og se at de påviste porøsitetsegenskapene hos resept A og B tegner et mer positivt bilde av flyveaskens påvirkning. Målingene viser en tett og lite permeabel betong som til forveksling kan ligne en ordinær portlandsbasert betong, som diskutert under punkt 5.3. Slike porøsitetsverdier kjennetegnes av betongtyper som er å finne innenfor flere eksponeringsklasser enn bare X0. I så måte argumenterer dette for at standarden er moden for oppdateringer. La det være klart, en tettere betong forandrer ikke det faktum at det høye flyveaskenivået gir en mer pH sensitiv betong, som det også har blitt redegjort for. Spørsmålet er om den fysiske porestrukturen legger grunnlaget for at eventuelle karbonatiseringsfronter vil være mindre problematisk med en tettere betong.

Slik det fremstår nå gjør standarden det vanskelig å ta i bruk betonger med flyveaske doseringer på 50%, og uaktuelt for flyveaskedoseringer over dette. For det første må betongen ha en tilfredsstillende reseptutforming, og da helst for den minst konservative bestandighetsklassen M90 slik som i dette studiet. Å tilfredsstillende denne vil likevel gi begrensende bruksområder, da den kun tilfredsstiller eksponeringsklasse X0. Porøsitetsmålingene gir derimot gode argumenter for å gjennomføre ytterligere bestandighetsrelaterte tester, som kan gi et bedre grunnlag for om standarden bør lette på de svært begrensende doseringsmulighetene av flyveaske. Det synes derfor vanskelig å forsvare at reseptene som er studert i denne oppgaven ikke skal kunne tilfredsstillende en bestandighetsklasse tilsvarende M90, som ikke har krav til motstand mot karbonatisering. En videre mulighet for å tilfredsstillende en M60 betong vil i så måte kreve ytterligere forskning og erfaring. Og ut ifra de gode porøsitetsverdiene synes en slik tankegang fornuftig.

5.5 Miljødeklarasjoner

EPD'ene fra Unicon kan vise til generelt lave verdier i innebygget energi og klimagassutslipp. Dette er forsåvidt ingen overraskelse, da det lå en forventning om en slik reduksjon under de gradvis økende flyveaskedoseringene. Flere av reseptene levner likevel ingen tvil om at dette er gode resultater. Spesielt når en sammenligner med dagens bransjenivå. I tillegg til å tallfeste miljøprestasjonene til de respektive reseptene, gir dette også muligheten for en sammenligning mellom de enkelte. Dette gjør miljødeklarasjonene til et nyttig verktøy for å vurdere hvilke parameterjusteringer som påvirker tallverdiene mest. Dette kommer til uttrykk når en sammenligner resept A og B i kraft av flyveaskedosering. Eller når en velger å sammenligne resept C1* og CX, ut ifra varierende masseforhold. En mer inngående utgreiing av de ulike miljøprestasjonene kan være nødvendig for å få et bedre forhold til ulike tallverdiene:

Som tabell 29 illustrerer, er det resept C1* og CX som har de laveste energi- utslippsverdiene. Begge har en flyveaskedosering på 70%, til forskjell fra resept A og B, med henholdsvis 50 og 60% flyveaske. Samtidig har de heller ingen aktivator-dosering, og slipper dermed den tilhørende miljøbelastningen dette gir. Det noe lavere klimagassavtrykket hos C1*, antas å skyldes resept CX sitt reduserte masseforhold på 0,28. Med en slik nedjustering følger også et økt bidrag fra portlandsementen.

Resept C6* og D1* har relativt høye energi- og utslippstall på tross av det økte flyveaskeinnholdet. Resept D1* har riktignok noe lavere enn C6*, men dette er på bakgrunn av det økte flyveaskeinnholdet fra 70 til 80%. Begge er gjenstand for aktivator-tilsetning, noe som tydelig kommer til syne i deres respektive EPD'er i fase A1, hvor produksjonen av råmaterialer foregår. Det er altså aktivatoren som synes å være skyld i denne økningen. Som nevnt er natriumhydroksid i generatoren definert som en herdningsakselerator og vil følgelig ikke være en eksakt representasjon av det reelle aktivatorbidraget. Denne forenklingen kan ha gitt natriumhydroksid en i overkant konservativ vektlegging, uten at dette kan begrunnes ytterligere. Om det mot formodning viser seg at natriumhydroksid har en langt mindre miljøbelastning enn hva som presenteres her, forsvarer ikke det faktum at de alkalisk aktiverte sammensetningene heller ikke har hatt noen utpreget god fasthetsutvikling å vise til. Med andre ord er det betimelig å tenke at økte aktivator-doseringer i et forsøk på å gi nye herdetekniske forsprang, igjen vil etterlate høye energi- og utslippsverdier, så fremt en velger å holde seg på samme flyveaskenivå.

En annen effekt ved å stadig presse betongens energi og CO₂-avtrykk nedover, er at dette også vil kreve ytterligere byggetekniske tiltak. I denne sammenheng eksemplifisert ved den nødvendige fyringen som kreves for å gi betongen tilstrekkelig varme å jobbe med, særlig aktuelt under kalde støpedager. Den økte flyveaskedoseringen gir altså en svært temperatursensitiv betong, med redusert varmegenerering. Da kan fyring være et nødvendig mottiltak. I hvor stor grad utslippene knyttet til fyring faktisk vil prege betongens totale miljøbudsjett er en annen sak. Likefullt er det en nødvendig faktor å ta hensyn til.

5.6 Flyveaskens påvirkning

Å vurdere flyveaskens reaktivitet ut ifra mineralsammensetningen har ikke vært en del forskningsspørsmålene i dette studiet. Som et resultat av at denne oppgaven skal tilfredsstillende praktiske og produksjonstekniske krav til betongen, har omfattende analytiske tester av hver enkelt materialkomponent vært mindre relevant. Å kunne velge ulike typer flyveaske er ingen realitet, og heller ikke en nødvendighet i dagens betongnæring. Importering av flyveaske til betongproduksjon i Norge styres av Norcem selv. Målinger gjennom XRD analyser av flyveasken mineralogiske egenskaper er derfor i første rekke forbeholdt forskningsmiljøene. Det er foreligget så vidt undertegnede bekjent heller ingen regulering av flyveaskens mineralogi i standarden.

Det er likevel ikke til å komme vekk i fra at økende mengder flyveaske vil prege betongens karakter og egenskap. Som teoridelen redegjør for, er det den amorfe glassfasen som styrer flyveaskens reaktivitet. Dette vil direkte påvirke den reelle mengden flyveaske som kan aktiviseres gjennom de alkaliske aktivatorene, og slikt sett avgjøre hvor mye av flyveasken som kan engasjeres i bindemiddelproduksjonen. De krystalline forbindelsene er således uønsket ettersom disse sitter i en fast struktur og er mindre tilgjengelig for de kjemiske prosessene som foregår. Gunasekara et al[38] har ved bruk av to typer flyveasker i en ren geopolymer betong, fått ulike fasthetsverdier som muligens kan forklares på bakgrunn av deres ulike mineralogiske sammensetning. Flyveasken med et amorft innhold på 71,8 wt% kunne vise til en trykkfasthet på 41,5 MPa etter 3 dager, og 57,3MPa etter 90 dager. Flyveasken fra et annet kraftverk hadde derimot et amorft innhold på 59,5 wt%, og med tilhørende fasthetsverdier på 35,3 MPa etter 3 dager, og 43,3 Mpa etter 90 dager. Begge disse blandingene hadde nøyaktig lik sammensetning, kun adskilt av type flyveaske. Slike sammenligningstudier mellom ulike flyveasker vil nok være mer aktuell for en ren geopolymer betong, men tydeliggjør flyveaskens påvirkning av betongens utviklede egenskaper. Det er derfor nødvendig å være klar over at flyveaskens mineralogiske egenskaper også vil påvirke betongens fasthetsutvikling, spesielt ved høye doseringsnivåer.

6 Konklusjon

De ulike betongsammensetningene i denne oppgaven bærer alle preg av en sen styrkeutvikling, og tilfredsstillende ikke fasthetskravet for de etterspente dekkene på powerhouse Brattørkaia og Gullhaug Torg. Langtids styrkeoppbygging har derimot vist gode resultater, med betraktelig herdeaktivitet selv ved 56 dager. De forsøkene som er gjort ved bruk av alkalisk aktivering har vist økte fasthetsverdier etter særlig 1 døgn, men med mindre effekt i etterkant. Alle sammensetningene har herdet i romtemperatur, og mangelen på ekstern varmetilførsel kan forklare aktivatorenes begrensede effekt på dette området. Reduksjon i masseforhold har vært det mest effektive alternativet for økt tidlig fasthet. Et slikt reseptteknisk tiltak viste seg hensiktsmessig da dette også opprettholdt betongens støpelighetsegenskaper, som kun krevde normal dosering av SP. Dette var ikke tilfellet for de alkaliske aktivatorene som i dette doseringsregimet ødela konsistensen i svært stor grad. Av de ulike betongsammensetningene viste resept CX, med 70% flyveaskedosering, gode langtids styrkeegenskaper, med drøye 37 MPa ved 28 dager, og 47,9 MPa ved 56 dager. Sistnevnte tilsvarer sylindetrykkfastheten til en B35 betong. Gjennom hele optimaliseringsprosessen fra del 1 til del 3, står resept C1* og CX frem som de mest interessante hva gjelder fasthetsutvikling, støpelighet og miljøavtrykk, tatt i betraktning 70% flyveaskedosering. Sammenlignet med resept C, har resept CX en tilnærmet dobbel så stor økning i styrke, ved alle måletidspunkt frem mot 28 dager.

Porositetsmålingene av resept A og B med verdier for motstandstall i området 1,5-1,6 s/m², viser til en tett betong med et potensiale av å inneha gode bestandighetsegenskaper. Slike fysiske porositetsmålinger er nødvendig å se i sammenheng med de kjemiske forholdene som styrer de nedbrytende mekanismene i betongen. Litteraturstudie av alkaliske aktiverte materialer gir tidvis uklare svar vedrørende risikoen for nedbrytende mekanismer i slike systemer. Både karbonatisering og risikoen for kloridangrep synes å avhengige av flere forhold, og er spørsmål som ikke lar seg svare på her. Dette skyldes særlig at litteraturen baserer seg på ulike inngangskriterier, målemetoder som er basert på den ordinære portlandsbetongen, samtidig som det foreligger begrenset erfaring med langtidsegenskapene i slike systemer. Det er derimot en tydeligere enighet om at faren for sulfatangrep og ASR reduseres ved gradvis reduksjon av kalsium. Med andre ord ved å begrense innholdet av OPC.

Sammensetningene med flyveaskedoserings på over 50% lar seg ikke forene med kravene gitt i standarden, selv ved den minst konservative bestandighetsklassen M90. Dette setter i praksis en tung begrensning på bruken av slike betongtyper, selv om det tilsynelatende foreligger få argumenter som kan forsvare en slik vurdering ved en eksponeringsklasse tilhørende X0. Det synes derfor vanskelig å forsvare at reseptene som er studert i denne oppgaven ikke skal kunne tilfredsstillende en bestandighetsklasse tilsvarende M90, som ikke har krav til motstand mot karbonatisering. Resultatene fra porositetstestene av resept A og B forsterker en slik tankegang.

Miljødeklarasjonene til de ulike betongsammensetningene viser utslippsverdier som ligger langt under lavkarbon klasse A. De mest aktuelle reseptene, som også har scoret best på styrke og støpelighet, resept C1* og CX har også de mest gunstige GWP verdiene. I underkant av 100 kg CO₂ eqv/m³ betong. Dette er vesentlig lavere enn kravet som er satt på Gullhaug Torg. De alkali aktiverte reseptene D1* og C6*, har en høyere miljøbelastning, men må sees i sammenheng med usikkerheten som ligger i bidraget fra disse aktivatorene.

7 Videre arbeid

7.1 Uten aktivator

Reseptene uten bruk av aktivator, og lavt masseforhold er de som har vist størst potensiale i denne oppgaven. Åpenbart trege, men likevel gode tatt i betraktning det høye flyveaskeinnholdet på 70%. En videre testing av disse sammensetningene vil ha nytte av målinger av aktiveringsenergi, varmeutvikling og tilhørende avbindingstid. Dette vil gi viktig informasjon om betongens temperatursensitivitet, og egen evne til varmeproduksjon. En helt vesentlig egenskap for at såpass trege betonger skal kunne ha en tilfredsstillende herdeprosess, under støpearbeider ute ved byggeplass. Måling av aktiveringsenergi gir muligheten for å vurdere betongens modenhet, og ut av dette betongens beregnede fasthet ved ulike temperaturforhold og tidspunkt.

De avsluttende betongstøpene under del 3 vitner om gode fasthetsegenskaper over tid slik resept A og B viste, dog med enda sterkere 28-døgnfastheter. Det vil være interessant å se videre på de bestandighetsrelaterede egenskapene til henholdsvis resept C1* og CX. De har kunnet vise til økt styrkeutvikling de første dagene sammenlignet med de innledende prøvene, og gode støpelighetsegenskaper. En oppfatning av betongen bestandighetsegenskaper gjennom porositetsmålinger, ville derfor gitt en bredere oppfatning av disse sammensetningene, ved 70% flyveaskeinnhold. Grundigere undersøkelser vedrørende karbonatisering bør også innlemmes i en slik studie. Spesielt når dette er en effekt som særlig rammer flyveaskebaserte betonger.

Herdeegenskapene til disse betongsammensetningene vil på bakgrunn av sitt høye flyveaskeinnhold være avhengig av ekstern varmetilførsel, og tilstrekkelig isolering ved lave temperaturer. Å verifisere byggetekniske tiltak i relasjon til dette vil være hensiktsmessig, og en forutsetning for videre testing og bruk.

7.2 Med aktivator

Ulike alternativer for kjemisk aktivering, ulike doseringsmengder og doseringsforhold åpner for et svært bredt handlingsrom når sammensetningen til en hybrid betong skal proporsjoneres. Denne oppgaven har kun studert et begrenset område i så måte, og de tilsynelatende nedslående resultatene som fremkom, må derfor ikke svartmale metoden som helhet. En bedre oversikt over effektene fra ulike aktivatorer og doseringsregimer vil være med på å verifisere hvilke reseptløsninger som er verdt å jobbe videre med. Dette vil også være med på å klargjøre det som tilsynelatende er et fagområde med mye varierende resultater. Slik også litteraturen gir inntrykk av. At de krevende støpelighets- og fasthetsverdiene for en hybrid betong skyldes et for krevende basisk miljø, kan være et mulig argument for å se på mild kjemisk aktivering isteden.

Sterk kjemisk aktivering kan ha redusert betongens evne til å sikre en stabil tilstedeværelse av C-S-H gel produksjon, en forutsetning for tidlig styrke- og varmeutvikling. Spesielt når annen varmetilførsel ikke er tilgjengelig. Om mild kjemisk aktivering kan gi mindre forstyrrelser i konsistensen vil også være interessant å se videre på. Her kan en metode for å utsette virkningen av vannglass være en metode for å sikre tilfredsstillende støpbarhet i den første perioden etter blanding.

Referanser

1. Smeplass, S., Fredvik T., Sæther Ø., Skagen R., Magerøy H., *Lavkarbonbetong Publikasjon nr.37*. 2015.
2. ZEB. *Pilot Projects*. 2017; Available from: <http://www.zeb.no/index.php/en/pilot-projects>.
3. Deventer, J.V., Provis J., Duxson P., Brice D.G., *Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials*. 2010.
4. Snøhetta. *Gullhaug Torg*. 2017; Available from: <https://snohetta.com/projects/269-gullhaug-torg>.
5. Smeplass, S. and M. Maage, *SINTEF Rapport, STF65 A88028, Kapillærabsorpsjon som kvalitetskriterium*. 1988.
6. Sørensen, S.I., *Betongkonstruksjoner, beregning og dimensjonering etter Eurokode 2*. 2013.
7. Standard, N., *NS-EN 206:2013+A1:2016+NA:2017 Betong - Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar*. 2017.
8. ZEB. *The different phases of a building's life that are included in the various ZEB definition levels*. 2017; Available from: <http://www.zeb.no/index.php/en/about-zeb/zeb-definitions>.
9. UN. *The Paris Agreement, United Nations - Framework Convention on Climate Change*. 2015; Available from: http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php.
10. Miljødepartementet, K.-o., *Klimaforliket, Meld.St. 21*. 2012.
11. Miljødepartementet, K.-o. *Klimaforliket*. 2014; Available from: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimaforliket/id2076645/>.
12. Hamdy, M., *A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010*. 2012.
13. Bohne, R.A., Professor ved Institutt for bygg- og miljøteknikk, pers.med, 2016.
14. Sælen, H., *Konsekvenser av irregulær ytre geometri for bæresystemets klimagassregnskap på Gullhaug Torg*. 2016.
15. UNEP, *Greening Cement Production has a big role to play in Reducing Greenhouse Gas Emission – UNEP, UN Environment Programme - Global Environmental Alert Service (GEAS)* 2010.
16. IPCC. *Working Group III Report, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. kapittel 10*. 2014; Available from: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml.
17. Norcem. *Vår nullvisjon*. 2017; Available from: <http://www.norcem.no/no/nullvisjon>.
18. Kjøren, J., Prosjektleder Powerhouse Brattørkaia i Skanska, pers.med, 2017.
19. Powerhouse. *Partnere*. 2017; Available from: <http://www.powerhouse.no/partnere/>.
20. FutureBuilt. *Forbildeprosjekter, Gullhaug Torg 2A*. 2017; Available from: <https://www.futurebuilt.no/Forbildeprosjekter-!/Forbildeprosjekter/Gullhaug-Torg-2A>.
21. Powerhouse, *The Powerhouse definition*. 2016.
22. Ollendorff, M., *Powerhouse - Innebygget energi og klimagassregnskap for bæresystemene* 2012.

23. Røine, S., Leder for miljøkomiteen i Norsk Betongforening, pers.med, 2017.
24. Smeplass, S., Sjefsrådgiver Skanska, prof. II, pers.med, 2017.
25. BREEAM, *BREEAM-NOR for nybygg 2016, Teknisk manual SD5075NOR- Ver: 1.1.* 2016.
26. FutureBuilt, *FutureBuilt dokumentasjonskrav - byggeprosjekter.* 2016.
27. Standard, N. 2017; Available from: <https://www.standard.no/toppvalg/om-oss/>.
28. Meløysund, V., Prosjektleder i Standard Norge, pers.med, 2017.
29. EPDNorge. *Det norske EPD-programmet.* 2014; Available from: <http://epd-norge.no/retningslinjer/category364.html>.
30. Standard, N., *NS-EN 197-1:2011, Sement, Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper* 2011.
31. Sellevold, E.J., *TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 7 Pozzolana.* 2008.
32. Karlstad, K. *Elkem AS, Elkem Silicon Materials.* 2017; Available from: <https://www.elkem.com/no/elkem-silicon-materials/om-elkem-silicon-materials/>.
33. Standard, N., *NS-EN 450-1:2012, Flygeaske for betong, Del 1: Definisjon, spesifikasjoner og samsvarskriterier.* 2012.
34. Weerdt, K.D., *Geopolymers - State of the art.* 2011.
35. Fredvik, T., Teknisk sjef i FoU avdeling i Norcem AS, pers.med, 2017.
36. Weerdt, K.D., Førsteamanuensis ved Institutt for konstruksjonsteknikk, pers.med, 2017.
37. Weerdt, K.D., Haha M.B., Saout G.L., Kjellsen K.O., Justnes H., Lothenbach B., *Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash.* 2010.
38. Gunasekara, C., Law D, Setunge S, *Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes.* 2016.
39. Myrdal, R., *TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 10 Admixtures.* 2015.
40. Justnes, H. and L. Elfgren, *Mechanism for performance of energetically modified cement versus corresponding blended cement.* 2004.
41. EMCcement. *EMC Activation, the power behind CemPozz.* 2015; Available from: <http://www.emccement.com/landing4a.htm - readmore>.
42. Justnes, H., *How to Make Concrete More Sustainable.* 2015.
43. Justnes, H., Professor og sjefsforsker ved SINTEF, pers.med, 2017.
44. Kjellsen, K.O., *TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 5 Cement.* 2008.
45. Lodeiro, I.G., Donatello S., Jimenez A.F., Palomo A., *Hydration of Hybrid Alkaline Cement Containing a Very Large Proportion of Fly Ash: A Descriptive Model.* 2016.
46. Turner, L. and F. Collins, *Carbon dioxide equivalent emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete.* 2013.

47. Duxson, P., Provis J., Lukey G., Deventer J.V., *The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete*. 2007.
48. Provis, J., Palomo A., Shi C., *Advances in understanding alkali-activated materials*. 2015.
49. McLellan, B.C., Williams R.P., Lay J., Riessen A.V., Corder G.D., *Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement*. 2011.
50. O'Neill, P., *Environmental Chemistry*. 1985.
51. Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Applications, 4th edition*. 2015.
52. Lodeiro, I.G., Jimenez A.F., Palomo A., *Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems*. 2006.
53. Swanepoel, J.C. and C.A. Strydom, *Utilisation of fly ash in a geopolymeric material*. 2002.
54. Davidovits, J. *Recorded Videos of the Free Geopolymer Webinar Spring 2014: Talk 1 and Talk 2, April 8-9, 2014*. 2014; Available from: <https://www.geopolymer.org/conference/webinar/webinar-spring-2014-geopolymer-web-workshop-apr-8-9/>.
55. Sellevold, E.J., *TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 6 Hydration*. 2014.
56. Seehuus, S., Ingeniør ved Institutt for konstruksjonsteknikk, pers.med, 2017.
57. Lodeiro, I.G., Palomo A., Jimenez A.F., Macphee D.E., *Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na₂O–CaO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O*. 2011.
58. Lodeiro, I.G., Jimenez A.F., Palomo A., *Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction stages*. 2013.
59. Jimenes, A.F. and A. Palomo, *Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder*. 2005.
60. Hermansen, F., *Lavkarbonbetong i etteroppspente dekker*. 2017.
61. Maage, M., *TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 2 Standards for concrete structures*. 2010.
62. Langedal, S.L., *Investigation of resistivity, porosity and pore solution composition in carbonated mortar prepared with regular Portland cement and Portland-fly ash cement*. 2018.
63. Bernal, S., Provis J., Walkley B., *Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation*. 2013.
64. Hilsdorf, H.K. and H.S. Müller, *Fib bulletin 1999*. 1999.
65. Winter, N.B., *Understanding Cement: The Fast Star User-friendly Insight into Cement Production, Cement Hydration and Cement and Concrete Chemistry*. 2012.
66. Sellevold, E.J., *TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 14 Permeability, moisture condition*. 2004.
67. Smepllass, S. and O. Skjølvold, *Betongprøving, kapillær sugsevne og porøsitet*. 1996.
68. Smepllass, S., Jacobsen S., Mork J.H., *TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 3 Fresh concrete, workability*. 2004.
69. Jevne, E.R., Stud.techn betongteknologi ved NTNU, pers.med, 2017.
70. Arbi, K., Nedeljkovic M., Zuo Y., *Experimental study on workability of alkali activated fly ash and slag-based geopolymer concretes*. 2015.

71. Collins, F.G. and J.G. Sanjavan, *Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete*. 1998.
72. Bakharev, T., Sanjayan J., Cheng Y., *Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete*. 2000.
73. Tverdal, J., *Betongteknolog i Unicon, pers.med*, 2017.
74. Bocullo, V., Vaiciukyniene D., Kantautas A., Borg R.P., *Alkaline Activation of Hybrid Cement Binders Based on Industrial by-Products*. 2017.
75. Shehab, H., Eisa A., Wahba A., *Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement*. 2016.
76. Smeplass, S. and R. Cepuritis, *TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 4 Fresh concrete - proportioning*. 2015.
77. Jevne, E.R., *Geopolymer mortars with and without Normet accelerating admixture*. 2017.
78. Løbakk, A., *Fagsjef miljø og betong i Unicon, pers.med*, 2017.
79. Assi, L., Deaver E., Batanouny M.E., Ziehl P., *Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete*. 2016.
80. Jacobsen, S. and E.J. Sellevold, *TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 15 - Frost deterioration*. 2014.

Vedlegg

- NS-EN 206, tabell NA.9
- NS-EN 206, tabell NA.10
- NS-EN 206, tabell NA.12
- NS-EN 206, tabell NA.13
- Graf av kapillærabsorpsjon A
- Graf av kapillærabsorpsjon B
- FA-analyse, Norcem
- EPD Resept A
- EPD Resept B
- EPD Resept C1*
- EPD Resept C6*
- EPD Resept CX
- EPD Resept D1*
- EPD Referanse

Tabell NA.9 – *k*-verdi ved innblanding av flygeaske, avhengig av sementtype og bestandighetsklasse

Sementtype	Bestandighetsklasse ^{a, b, c}					
	M90	M60	M45	MF45	M40	MF40
CEM I	0,7	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7
CEM II/A-V, CEM II/A-S ^d , CEM II/A-L ^d , CEM II/A-LL ^d CEM II/A-D ^d , CEM II/A-M ^{e, d}						
CEM II/B-V, CEM II/B-S ^d , CEM II/B-M ^{e, d}				-	-	-
Øvrige sementer	-	-	-	-	-	-

^a Innblanding av flygeaske kan medregnes ved beregning av masseforhold og minste effektive bindemiddelmengde i henhold til kravene i tabell NA.12.

^b "-" i tabellen betyr at Norsk Standard ikke gir regler for dette i denne kombinasjonen av sementtype og bestandighetsklasse. Det henvises også til NA.5.3.2(902).

^c Verdiene gjelder for sement med en styrkeklasse på minst 42,5. For lavere styrkeklasser reduseres verdiene med 0,1.

^d *k*-verdien kan brukes for en mengde tilsatt flygeaske inntil andel Portlandsementklinker (K) er redusert til 65 % av total bindemiddelmengde.

^e Regelen omfatter sementtypene CEM II/A-M og CEM II/B-M som kun er basert på hovedkomponentene klinker (K), flygeaske (V), slagg (S) og kalkfiller (L og LL).

NA.5.2.5.2.2(2) og (3) Den største mengden tilsatt flygeaske som det kan tas hensyn til ved beregning av masseforhold og minste effektive bindemiddelmengde, er gitt av kravet:

$$(\text{tilsatt flygeaske} + \text{flygeaske i sementen}) / \text{bindemiddel} = 0,35 \text{ regnet ut fra masse.}$$

Hvis forholdstallet er høyere enn 0,20, skal bindemiddelkombinasjonen anvendt i MF45 og MF40 dokumenteres for frostbestandighet iht. NA.5.3.2(902).

Tabell NA.10 – *k*-verdi ved innblanding av silikastøv, avhengig av sementtype og bestandighetsklasse

Sementtype	Bestandighetsklasse ^{a, b}					
	M90	M60	M45	MF45	M40	MF40
Sementer som det er gitt regler for i NA.5.3.2, tabell NA.12	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Øvrige sementer	-	-	-	-	-	-

^a Innblanding av silikastøv kan medregnes ved beregning av masseforhold og minste effektive bindemiddelmengde i henhold til kravene i tabell NA.12.

^b "-" i tabellen betyr at Norsk Standard ikke gir regler for dette i denne kombinasjonen av sementtype og bestandighetsklasse. Det henvises også til NA.5.3.2(902).

NA.5.2.5.2.3(2) Den største mengden tilsatt silikastøv som det kan tas hensyn til ved beregning av masseforhold og minste effektive bindemiddelmengde, er gitt av kravet:

$$(\text{tilsatt silikastøv} + \text{silikastøv i sementen}) / \text{bindemiddel} = 0,11 \text{ regnet ut fra masse}$$

Tabell NA.12 – Grenseverdier for luftinnhold, minste effektive bindemiddelmengde og største masseforhold for betong etter nasjonalt tillegg til NS-EN 206

Egenskap	Bestandighetsklasse					
	M90	M60	M45	MF45 ^{a, b, c}	M40 ^d	MF40 ^{a, b, c, d}
Minste luftinnhold i fersk betong				4 %		4 %
Minste effektive bindemiddelmengde (kg/m ³) ^e	225	250	300	300	330	330
Sementtype	Største masseforhold ^{f, g, h}					
CEM I	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/A-S, 6-20 % slagg	0,90	0,55	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/B-S, 21-35 % slagg	0,90	0,55	0,45	-	0,40	-
CEM II/A-D, 6-10 % silikastøv	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/A-V, 6-20 % flygeaske	0,90	0,55	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/B-V, 21-35 % flygeaske	0,90	0,50	0,45	-	0,40	-
CEM II/A-L, 6-20 % kalkfiller L	0,90	0,50	_ i	-	_ i	-
CEM II/A-LL, 6-20 % kalkfiller LL	0,90	0,50	_ i	-	_ i	-
CEM II/A-M, 12-20 % diverse	0,90	_ j, k	_ j, k	_ k	_ j, k	_ k
CEM II/B-M, 21-35 % diverse	0,90	_ j, k	_ j, k	_ k	_ j, k	_ k
CEM III/A, 36-65 % slagg	0,90	0,50	0,45	-	0,40	-
CEM III/B, 66-80 % slagg	0,90	0,45	0,45	-	0,40	-

^a For bestandighetsklasse MF40 og MF45 skal det anvendes frostsikkert tilslag (se NA.5.1.3).

^b Standarden gir ikke regler for produksjon av frostsikker betong uten bruk av luftinnførende tilsetningsstoffer.

^c Standarden gir ikke anvendelsesregler for bestandighetsklassene MF45 og MF40 om den samlede mengden flygeaske og slagg (V + S) er større enn 20 vektprosent i forhold til bindemiddelmengde. Tilfredsstillende frostbestandighet kan likevel dokumenteres iht. NA.5.3.2(902) for sement eller bindemiddelkombinasjoner der samlet innhold (i sement + tilsatt) er over 20 %.

^d Bindemidlet skal minst inneholde 6 % silikastøv eller samlet minst 14 % flygeaske, silikastøv og slagg (V + D + S) i bestandighetsklassene MF40 og M40.

^e Betongens effektive bindemiddelmengde er: sement + (k * flygeaske) + (k * silikastøv) + (k * slagg).

^f Ved bruk av tilsetningsmaterialer gjelder grenseverdien for største masseforhold for den sementtypen som tilsetningsmaterialene tilsettes til.

^g Der flere sementtyper som det er gitt anvendelsesregler for blandes, kan største tillatte masseforhold fastsettes som et vektet middel av kravene til de enkelte sementtypene.

^h "-" i tabellen betyr at Norsk Standard ikke gir anvendelsesregler for denne kombinasjonen av sementtype og bestandighetsklasse. Det henvises også til NA.5.3.2(902).

ⁱ CEM II/A-L og CEM II/A-LL kan anvendes etter reglene for CEM I forutsatt at mengden kalkfiller L og LL ut over 5 % ikke tas med i beregningen av masseforholdet.

^j CEM II/A-M og CEM II/B-M kan benyttes med grenseverdier som for CEM I, CEM II/A-V og CEM II/A-S, dersom det ved beregning av masseforhold ses bort fra andelen materiale (hovedkomponenter) som bringer sementen over grenseverdiene for hhv. CEM I, CEM II/A-V og CEM II/A-S.

^k Det tillates kun sementer som ikke inneholder andre hovedkomponenter enn klinker (K), flygeaske (V), slagg (S) og kalkfiller (L og LL).

Tabell NA.13 – Krav til bindemiddel i sulfatholdig miljø

Sulfatmotstandsklasse	Eksponeringsklasse	Sement	Tilleggskrav
-	XA1	Ingen begrensning	Ingen
SuR1	XA2 og XA3	CEM I	Minst 10 % silikastøv tilsettes, alternativt minst 3 % silikastøv og i tillegg skal summen av slagg og flygeaske (S + V) være minst 14 %
		CEM I-SR 3, CEM I-SR 0, CEM III/B-SR, CEM III/A-V, CEM II/A-M, CEM II/A-S, CEM II/B-M, CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM III	Minst 3 % silikastøv tilsettes. For CEM II skal i tillegg summen av slagg og flygeaske (S + V) være minst 14 %
SuR2	XA2 og XA3 der det kan forekomme alunskifer	CEM I	Minst 8 % silikastøv tilsettes, og i tillegg skal summen av slagg og flygeaske (S + V) være minst 20 %
		CEM I-SR 3, CEM I-SR 0, CEM III/B-SR, CEM III/A-M, CEM III/A-V, CEM II/A-S, CEM II/B-M, CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM III	Minst 8 % silikastøv tilsettes. For CEM II skal i tillegg summen av slagg og flygeaske (S + V) være minst 14 %
<p>Uavhengig av bindemiddelsammensetning skal største innhold av C₃A være 9 % i forhold til klinkermengden.</p> <p>Største innhold av kalkfiller i sement skal ikke være høyere enn grensen for sekundær bestanddel (5 %).</p>			

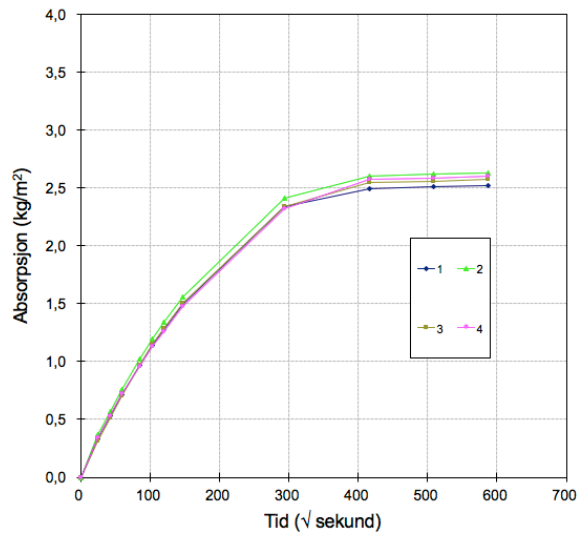
Kapillærabsorpsjon Resept A

KS 14-05-04-110

Oppdrag:

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Motstandstall	1,56E+08 [s/m ²]	5,2 %
Kapillaritetstall	1,01E-02 [kg / m ² √]	2,4 %
Sugporøsitet	13,1 [% vol.]	1,9 %
Åpen makroporøsitet	0,1 [% vol.]	4,5 %
Lukket makroporøsitet	1,4 [% vol.]	1,7 %
PF-verdi (samlet)	0,10	-
Faststoffdensitet	2653 [kg / m ³]	7 [kg / m ³]
Tørredensitet	2265 [kg / m ³]	6 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	363 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	268 [l/m ³]
Antatt hydrasjonsgrad	0,70
Antatt silikainnhold	60 [%]
Estimert masseforhold	0,34



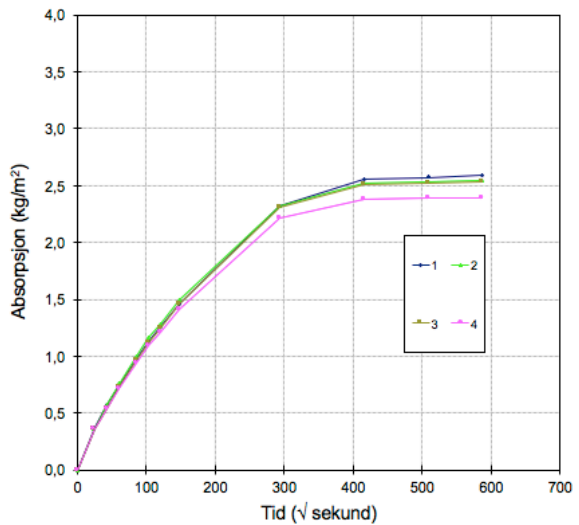
Kapillærabsorpsjon Resept B

KS 14-05-04-110

Oppdrag:

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Motstandstall	1,62E+08 [s/m ²]	1,6 %
Kapillaritetstall	9,70E-03 [kg / m ² √]	2,7 %
Sugporøsitet	12,8 [% vol.]	3,4 %
Åpen makroporøsitet	0,1 [% vol.]	10,0 %
Lukket makroporøsitet	1,3 [% vol.]	5,0 %
PF-verdi (samlet)	0,09	-
Faststoffdensitet	2639 [kg / m ³]	11 [kg / m ³]
Tørredensitet	2262 [kg / m ³]	18 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	370 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	265 [l/m ³]
Antatt hydrasjonsgrad	0,70
Antatt silikainnhold	70 [%]
Estimert masseforhold	0,30



REPORT ON QUALITY TEST

Customer: Tor Magnus Zakkariassen
Date received: 18.08.2017
Sample Marked: Uttak av FA i BigBag
Big Bag nr.4 tatt ut 21.08.17

Your ref.: 84-17
Our ref.: **LN-2017-0009**

Parameter:		Results:		Method:
CHEMICAL COMPOSITION				
Chemical Parameters				
Sulfur Trioxide-IR	SO3	0.81	%	PD1752
Loss On Ignition	LOI	2.36	%	EN196-2
XRF Analysis				
Silica Oxide	SiO2	55.24	%	EN196-2
Aluminum Oxide	Al2O3	21.34	%	EN196-2
Ferric Oxide	Fe2O3	7.11	%	EN196-2
Calcium Oxide	CaO	5.34	%	EN196-2
Potassium Oxide	K2O	2.20	%	EN196-2
Sodium Oxide	Na2O	1.01	%	EN196-2
Magnesium Oxide	MgO	2.20	%	EN196-2
Titanium Dioxide	TiO2	0.918	%	EN196-2
Phosphorous Pentoxide	P2O5	0.693	%	EN196-2
Manganic Oxide	Mn2O3	0.080	%	EN196-2
Sodium Oxide Equivalent	Na2O Eq.	2.46	%	EN196-2
TECHNICAL PARAMETERS				
Fineness				
Specific Weight		2.30	g/cm3	PD1777
Specific surface, Blaine		336	m2/kg	EN196-6
Particle Size Distribution				
Sieve Passing	<24 µm	60.8	%	PD1749
Sieve Passing	<30 µm	67.0	%	PD1749
Sieve Residue	>64 µm	13.9	%	PD1749
Sieve Residue	>90 µm	7.7	%	PD1749

Norcem A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory,

30.08.2017

Laboratory Manager

NORCEM AS

Adress:
Setreveien 2
P.O. Box 38
N-3991 Brevik

Phone:
Telefax:
Ent.no.:
Bank Account:

+47-35-57 20 00
+47-35-57 04 00
NO 934 949145 VAT
6003 06 12488

Head Office:
Lilleakerveien 2b
P.O. Box 143 Lilleaker
0216 Oslo

ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

in accordance with ISO 14025, ISO 21930 and EN 15804

Eier av deklarasjonen:	Unicon AS
Programoperatør:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Utgiver:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Deklarasjonsnummer:	Viser til NEPD 158N
Publiseringsnummer:	Ikke tildelt
ECO Platform registreringsnummer:	Ikke tildelt
Godkjent dato:	04.12.2017
Gyldig til:	

Resept A - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Unicon AS



www.epd-norge.no



Generell informasjon

Produkt:

Resept A - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Programoperatør:Næringslivets stiftelse for Miljødeklarasjoner
Pb. 5250 Majorstuen, 0303 Oslo
Phone: +47 23 08 80 00
e-post: post@epd-norge.no**Deklarasjonsnummer:**

Viser til NEPD 158N

ECO Platform registreringsnummer:**Deklarasjonen er basert på PCR:**EN 15804:2012+A1:2013 tjener som kjerne-PCR
PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011.**Erklæringen 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 Resept A - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Deklarert enhet med opsjon:

A1,A2,A3,A4

Funksjonell enhet:**Verifikasjon:**

Uavhengig verifikasjon av data, annen miljøinformasjon og EPD er foretatt etter ISO 14025:2010, kapittel 8.1.3 og 8.1.4

Ekstern

Tredjeparts verifikator:

Sign



Seniorforsker Anne Rønning

(Uavhengig verifikator godkjent av EPD Norge)

Eier av deklarasjonen:Unicon AS
Kontaktperson: Øyvind Sæter
Telefon: +47 67 55 54 44
e-post: info@unicon.no**Produsent:**

Unicon AS

Produksjonssted:

Unicon Trondheim Havn

Kvalitet/Miljøsystem:

NS-EN 14001 No. S-024

Org. no.:

No 942822979

Godkjent dato:

04.12.2017

Gyldig til:**Årstall for studien:**

2016

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 utviklet ved bruk av EPDGen-Version 2

Godkjenning:

Bedriftsspesifikke data er

Samlet og registrert av: Agnar Løbakk

Kontrollert av: Agnar Løbakk

Godkjent:

Sign

(Daglig leder av EPD-Norge)

Produkt

Produktbeskrivelse:

Resept A - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Produktspesifikasjon:

Materials	Percent
Cement	7,52
Aggregate	78,20
Water	6,16
Chemicals	0,23
SCM	7,89

Tekniske data:

Resept A - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Markedsområde:

Levetid, produkt:

Levetid, bygg:

LCA: Beregningsregler

Deklarert enhet:

1 m3 Resept A - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

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.

Alle viktige råmaterialer og all viktig energibruk er inkludert. Produksjonsprosessen for råmaterialene og energistrømmer som inngår med veldig små mengder (<1%) er ikke inkludert

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. 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. Påvirkning for primærproduksjonen av resirkulerte materialer er allokert til hovedproduktet der materialet ble brukt. Resirkuleringsprosessen og transport av materialet er allokert til denne analysen.

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 LCA databaser. Datakvaliteten for råmaterialene i A1 er presentert i tabellen nedenfor.

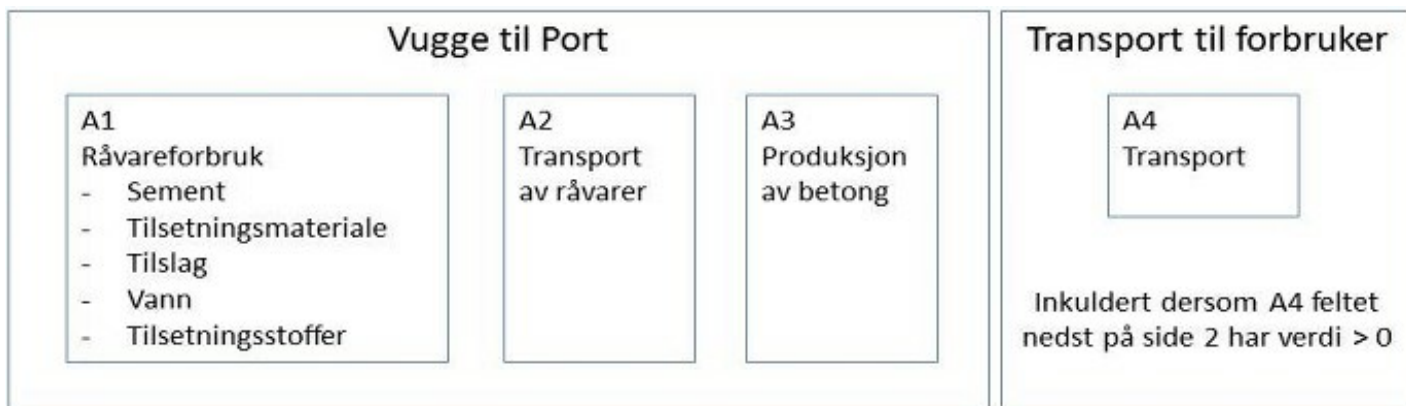
Energiforbruk på fabrikk er gjennomsnitt for 2014

Materials	Source	Data quality	Year
Water	0	0	0
SCM	0	Waste	0
Aggregate	Modified EcoInvent	Database	2012
Aggregate	Østfoldforskning	Database	2012
SCM	TI, Denmark	EPD	2013
Chemicals	EPD-EFC-20150091-IAG1-EN	EPD	2015
Cement	NEPD 211, 15	EPD	2016

Systemgrenser:

Alle prosesser fra råvareuttak til produktet ut fra fabrikkporten er inkludert i analysen.

Flytskjemaet nedenfor illustrerer systemgrensene for analysen:



Teknisk tilleggsinformasjon

Registrert EPD for Unicon: NEPD158N

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	2	0,020216	l/tkm	0,04
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Byggefase A5

.	Enhet	Verdi
Hjelpematerialer	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
Materialer fra avfallsbehandling	kg	
Støv i luften	kg	
VOC utslipp	kg	

Monterte produkter i bruk (B1)

.	Unit	Value

Vedlikehold (B2)/Reparasjon (B3)

.	Enhet	Verdi
Vedlikeholdsfrekvens*	.	
Hjelpematerialer	kg	
Andre ressurser	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
VOC utslipp	kg	

Utskifting (B4)/Renovering (B5)

.	Enhet	Verdi
Utskiftingsfrekvens*	stk	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Utskifting av slitte deler	0	

* Tall eller referanselevetid

Driftsenergi (B6) og vannbruk (B7)

.	Enhet	Verdi
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Utstyrets varmeeffekt	kW	

Sluttfase (C1,C3,C4)

.	Enhet	Verdi
Farlig avfall	kg	
Blandet avfall	kg	
Gjenbruk	kg	
Resirkulering	kg	
Energigjenvinning	kg	
Til deponi	kg	

Transport avfallsbehandling (C2)

Type	Kapasitetsutnyttelse inkl retur %	Kjøretøytype	Distanse km	Brennstoff/Energi forbruk	Enhet	Verdi (l/t)
Bil					l/tkm	
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Gevinst og belastninger etter endt levetid (D)

LCA: Resultater

Systemgrenser (X=inkludert, MND=modul ikke deklarerert, 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	MND	MND	MND	MND	MND	

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
GWP	kg CO ₂ -eq	1,26E+02	8,83E+00	5,15E+00	4,06E-01
ODP	kg CFC11 -eq	3,23E-06	1,65E-06	1,05E-06	7,68E-08
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	2,17E-02	1,63E-03	1,11E-03	7,20E-05
AP	kg SO ₂ -eq	3,90E-01	4,45E-02	3,76E-02	1,43E-03
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	5,29E-02	9,73E-03	1,00E-02	2,98E-04
ADPM	kg Sb -eq	9,26E-05	1,38E-05	1,93E-05	8,98E-07
ADPE	MJ	8,81E+02	1,30E+02	7,03E+01	6,20E+00

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 $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Ressursbruk (Resource use)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
RPEE	MJ	1,31E+02	1,69E+00	2,77E+01	9,53E-02
RPEM	MJ	1,18E+01	4,72E-01	1,78E-01	2,92E-02
TPE	MJ	1,43E+02	2,16E+00	2,78E+01	1,25E-01
NRPE	MJ	8,91E+02	1,33E+02	9,82E+01	6,33E+00
NRPM	MJ	2,60E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TRPE	MJ	9,17E+02	1,33E+02	9,82E+01	6,33E+00
SM	MJ	1,83E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
RSF	MJ	1,41E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	MJ	1,21E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
W	m ³	2,90E+00	8,58E-02	4,42E-01	5,64E-03

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 $9,0 \text{ E-03} = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Livsløpets slutt - Avfall (End of life - Waste)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
HW	kg	7,81E-04	7,26E-05	6,13E-05	4,80E-06
NHW	kg	2,91E+01	8,87E+00	1,22E+00	6,27E-01
RW	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-03} = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
CR	kg	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-02	0,00E+00
MR	kg	2,10E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
MER	kg	4,74E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EEE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ETE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-03} = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Norske tilleggskrav

Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

Nasjonal produksjonsmiks inkludert import, produksjon av overføringslinjer og tap i nett (lav spenning), er brukt som elektrisitetsmiks. Bakgrunnsdata er presentert i tabellen under. Karakteriseringsfaktorer fra EN15804:2012+A1:2013 er benyttet.

Elektrisitetsmiks	Datakilde	Mengde	Enhet
El-mix Nordic (kWh)	Østfoldforskning	77,59	g CO2-ekv/kWh

Farlige stoffer

Produktet er ikke tilført stoffer fra REACH kandidatliste eller stoffer på den norske prioritetslisten

Inneklima

Produktet har ingen påvirkning på inneklima

Bibliografi

NS-EN ISO 14025:2010 Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer.

NS-EN ISO 14044:2006 Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Krav og retningslinjer

NS-EN 15804:2012+A1:2013 Bærekraftig byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer

ISO 21930:2007 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products.

ecoinvent v3, Alloc Rec, Swiss Centre of Life Cycle Inventories.

Iversen et al., (2017) EPD generator v2.0 - Background information for system verification, OR 10.17, Østfoldforskning, Fredrikstad.

• PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011, www.epd-norge.no
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Bakgrunnsinformasjon for verifisering, OR 04.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Brukerveiledning, OR 05.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.

	Programoperatør og utgiver Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner Pb. 5250 Majorstuen 0303 Oslo Norway	Telefon: +47 23 08 82 92 e-post: post@epd-norge.no web: www.epd-norge.no
	Eier av deklarasjon Unicon AS Prof. Birkelandsvei 27B 1081 Oslo	Telefon: +47 67 55 54 44 Fax: e-post: info@unicon.no web:
	Forfatter av livsløpsrapporten Østfoldforskning AS Stadion 4 1671 Kråkerøy	Telefon: +47 69 35 11 00 Fax: +47 69 34 24 94 e-post: post@ostfoldforskning.no web: www.ostfoldforskning.no

ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

in accordance with ISO 14025, ISO 21930 and EN 15804

Eier av deklarasjonen:	Unicon AS
Programoperatør:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Utgiver:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Deklarasjonsnummer:	Viser til NEPD 158N
Publiseringsnummer:	Ikke tildelt
ECO Platform registreringsnummer:	Ikke tildelt
Godkjent dato:	04.12.2017
Gyldig til:	

Resept B - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Unicon AS



www.epd-norge.no



Generell informasjon

Produkt:

Resept B - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Programoperatør:Næringslivets stiftelse for Miljødeklarasjoner
Pb. 5250 Majorstuen, 0303 Oslo
Phone: +47 23 08 80 00
e-post: post@epd-norge.no**Deklarasjonsnummer:**

Viser til NEPD 158N

ECO Platform registreringsnummer:**Deklarasjonen er basert på PCR:**EN 15804:2012+A1:2013 tjener som kjerne-PCR
PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011.**Erklæringen 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 Resept B - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Deklarert enhet med opsjon:

A1,A2,A3,A4

Funksjonell enhet:**Verifikasjon:**

Uavhengig verifikasjon av data, annen miljøinformasjon og EPD er foretatt etter ISO 14025:2010, kapittel 8.1.3 og 8.1.4

Ekstern

Tredjeparts verifikator:

Sign



Seniorforsker Anne Rønning

(Uavhengig verifikator godkjent av EPD Norge)

Eier av deklarasjonen:Unicon AS
Kontaktperson: Øyvind Sæter
Telefon: +47 67 55 54 44
e-post: info@unicon.no**Produsent:**

Unicon AS

Produksjonssted:

Unicon Trondheim Havn

Kvalitet/Miljøsystem:

NS-EN 14001 No. S-024

Org. no.:

No 942822979

Godkjent dato:

04.12.2017

Gyldig til:**Årstall for studien:**

2016

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 utviklet ved bruk av EPDGen-Version 2

Godkjenning:

Bedriftsspesifikke data er

Samlet og registrert av: Agnar Løbakk

Kontrollert av: Agnar Løbakk

Godkjent:

Sign

(Daglig leder av EPD-Norge)

Produkt

Produktbeskrivelse:

Resept B - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Produktspesifikasjon:

Materials	Percent
Cement	5,56
Aggregate	78,50
Water	6,08
Chemicals	0,23
SCM	9,63

Tekniske data:

Resept B - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Markedsområde:

Levetid, produkt:

Levetid, bygg:

LCA: Beregningsregler

Deklarert enhet:

1 m3 Resept B - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

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.

Alle viktige råmaterialer og all viktig energibruk er inkludert. Produksjonsprosessen for råmaterialene og energistrømmer som inngår med veldig små mengder (<1%) er ikke inkludert

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. 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. Påvirkning for primærproduksjonen av resirkulerte materialer er allokert til hovedproduktet der materialet ble brukt. Resirkuleringsprosessen og transport av materialet er allokert til denne analysen.

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 LCA databaser. Datakvaliteten for råmaterialene i A1 er presentert i tabellen nedenfor.

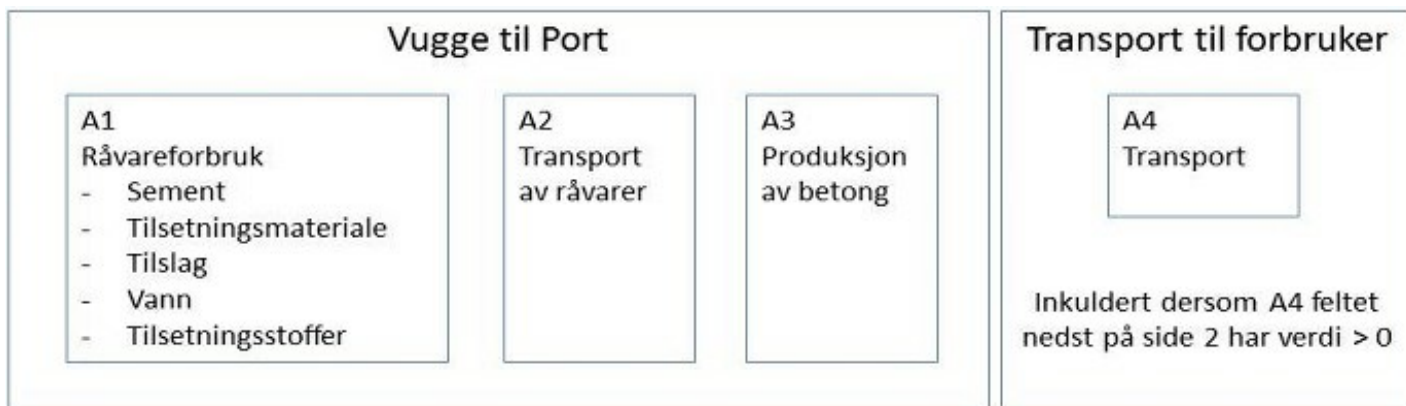
Energiforbruk på fabrikk er gjennomsnitt for 2014

Materials	Source	Data quality	Year
Water	0	0	0
SCM	0	Waste	0
Aggregate	Modified EcoInvent	Database	2012
Aggregate	Østfoldforskning	Database	2012
SCM	TI, Denmark	EPD	2013
Chemicals	EPD-EFC-20150091-IAG1-EN	EPD	2015
Cement	NEPD 211, 15	EPD	2016

Systemgrenser:

Alle prosesser fra råvareuttak til produktet ut fra fabrikkporten er inkludert i analysen.

Flytskjemaet nedenfor illustrerer systemgrensene for analysen:



Teknisk tilleggsinformasjon

Registrert EPD for Unicon: NEPD158N

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	2	0,020216	l/tkm	0,04
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Byggefase A5

.	Enhet	Verdi
Hjelpematerialer	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
Materialer fra avfallsbehandling	kg	
Støv i luften	kg	
VOC utslipp	kg	

Monterte produkter i bruk (B1)

.	Unit	Value

Vedlikehold (B2)/Reparasjon (B3)

.	Enhet	Verdi
Vedlikeholdsfrekvens*	.	
Hjelpematerialer	kg	
Andre ressurser	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
VOC utslipp	kg	

Utskifting (B4)/Renovering (B5)

.	Enhet	Verdi
Utskiftingsfrekvens*	stk	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Utskifting av slitte deler	0	

* Tall eller referanselevetid

Driftsenergi (B6) og vannbruk (B7)

.	Enhet	Verdi
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Utstyrets varmeeffekt	kW	

Sluttfase (C1,C3,C4)

.	Enhet	Verdi
Farlig avfall	kg	
Blandet avfall	kg	
Gjenbruk	kg	
Resirkulering	kg	
Energigjenvinning	kg	
Til deponi	kg	

Transport avfallsbehandling (C2)

Type	Kapasitetsutnyttelse inkl retur %	Kjøretøytype	Distanse km	Brennstoff/Energi forbruk	Enhet	Verdi (l/t)
Bil					l/tkm	
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Gevinst og belastninger etter endt levetid (D)

LCA: Resultater

Systemgrenser (X=inkludert, MND=modul ikke deklarerert, 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	MND	MND	MND	MND	MND	

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
GWP	kg CO ₂ -eq	9,65E+01	8,83E+00	5,15E+00	4,06E-01
ODP	kg CFC11 -eq	3,04E-06	1,65E-06	1,05E-06	7,68E-08
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	1,79E-02	1,63E-03	1,11E-03	7,20E-05
AP	kg SO ₂ -eq	3,23E-01	4,45E-02	3,76E-02	1,43E-03
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	4,73E-02	9,73E-03	1,00E-02	2,98E-04
ADPM	kg Sb -eq	8,92E-05	1,38E-05	1,93E-05	8,98E-07
ADPE	MJ	7,52E+02	1,30E+02	7,03E+01	6,20E+00

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*10⁻³ = 0,009

Ressursbruk (Resource use)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
RPEE	MJ	1,03E+02	1,69E+00	2,77E+01	9,53E-02
RPEM	MJ	9,15E+00	4,72E-01	1,78E-01	2,92E-02
TPE	MJ	1,12E+02	2,16E+00	2,78E+01	1,25E-01
NRPE	MJ	7,60E+02	1,33E+02	9,82E+01	6,33E+00
NRPM	MJ	2,60E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TRPE	MJ	7,86E+02	1,33E+02	9,82E+01	6,33E+00
SM	MJ	2,15E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
RSF	MJ	1,04E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	MJ	8,90E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
W	m ³	2,89E+00	8,58E-02	4,42E-01	5,64E-03

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 $9,0 \text{ E-03} = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Livsløpets slutt - Avfall (End of life - Waste)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
HW	kg	7,64E-04	7,26E-05	6,13E-05	4,80E-06
NHW	kg	2,50E+01	8,87E+00	1,22E+00	6,27E-01
RW	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-03} = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
CR	kg	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-02	0,00E+00
MR	kg	1,54E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
MER	kg	3,49E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EEE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ETE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-03} = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Norske tilleggskrav

Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

Nasjonal produksjonsmiks inkludert import, produksjon av overføringslinjer og tap i nett (lav spenning), er brukt som elektrisitetsmiks. Bakgrunnsdata er presentert i tabellen under. Karakteriseringsfaktorer fra EN15804:2012+A1:2013 er benyttet.

Elektrisitetsmiks	Datakilde	Mengde	Enhet
El-mix Nordic (kWh)	Østfoldforskning	77,59	g CO2-ekv/kWh

Farlige stoffer

Produktet er ikke tilført stoffer fra REACH kandidatliste eller stoffer på den norske prioritetslisten

Inneklima

Produktet har ingen påvirkning på inneklima

Bibliografi

NS-EN ISO 14025:2010 Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer.

NS-EN ISO 14044:2006 Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Krav og retningslinjer

NS-EN 15804:2012+A1:2013 Bærekraftig byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer

ISO 21930:2007 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products.

ecoinvent v3, Alloc Rec, Swiss Centre of Life Cycle Inventories.

Iversen et al., (2017) EPD generator v2.0 - Background information for system verification, OR 10.17, Østfoldforskning, Fredrikstad.

• PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011, www.epd-norge.no
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Bakgrunnsinformasjon for verifisering, OR 04.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Brukerveiledning, OR 05.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.

	Programoperatør og utgiver Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner Pb. 5250 Majorstuen 0303 Oslo Norway	Telefon: +47 23 08 82 92 e-post: post@epd-norge.no web: www.epd-norge.no
	Eier av deklarasjon Unicon AS Prof. Birkelandsvei 27B 1081 Oslo	Telefon: +47 67 55 54 44 Fax: e-post: info@unicon.no web:
	Forfatter av livsløpsrapporten Østfoldforskning AS Stadion 4 1671 Kråkerøy	Telefon: +47 69 35 11 00 Fax: +47 69 34 24 94 e-post: post@ostfoldforskning.no web: www.ostfoldforskning.no

ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

in accordance with ISO 14025, ISO 21930 and EN 15804

Eier av deklarasjonen:	Unicon AS
Programoperatør:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Utgiver:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Deklarasjonsnummer:	Viser til NEPD 158N
Publiseringsnummer:	Ikke tildelt
ECO Platform registreringsnummer:	Ikke tildelt
Godkjent dato:	04.12.2017
Gyldig til:	

Resept C1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Unicon AS



www.epd-norge.no



Generell informasjon

Produkt:

Resept C1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Programoperatør:

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

Deklarasjonsnummer:

Viser til NEPD 158N

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

EN 15804:2012+A1:2013 tjener som kjerne-PCR
PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011.

Erklæringen 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 Resept C1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Deklarert enhet med opsjon:

A1,A2,A3,A4

Funksjonell enhet:**Verifikasjon:**

Uavhengig verifikasjon av data, annen miljøinformasjon og EPD er foretatt etter ISO 14025:2010, kapittel 8.1.3 og 8.1.4

Ekstern

Tredjeparts verifikator:

Sign



Seniorforsker Anne Rønning

(Uavhengig verifikator godkjent av EPD Norge)

Eier av deklarasjonen:

Unicon AS
Kontaktperson: Øyvind Sæter
Telefon: +47 67 55 54 44
e-post: info@unicon.no

Produsent:

Unicon AS

Produksjonssted:

Unicon Trondheim Havn

Kvalitet/Miljøsystem:

NS-EN 14001 No. S-024

Org. no.:

No 942822979

Godkjent dato:

04.12.2017

Gyldig til:**Årstall for studien:**

2016

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 utviklet ved bruk av EPDGen-Version 2

Godkjenning:

Bedriftsspesifikke data er

Samlet og registrert av: Agnar Løbakk

Kontrollert av: Agnar Løbakk

Godkjent:

Sign

(Daglig leder av EPD-Norge)

Produkt

Produktbeskrivelse:

Resept C1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Produktspesifikasjon:

Materials	Percent
Cement	4,01
Aggregate	78,07
Water	5,26
Chemicals	0,25
SCM	12,42

Tekniske data:

Resept C1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Markedsområde:

Levetid, produkt:

Levetid, bygg:

LCA: Beregningsregler

Deklarert enhet:

1 m3 Resept C1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

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.

Alle viktige råmaterialer og all viktig energibruk er inkludert. Produksjonsprosessen for råmaterialene og energistrømmer som inngår med veldig små mengder (<1%) er ikke inkludert

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. Allokering er gjort i hht bestemmelser i EN 15804 Inngående energi og vann, samt produksjon av avfall i egen produksjon er allokert likt mellom alle produktene gjennom masseallokering. Påvirkning for primærproduksjonen av resirkulerte materialer er allokert til hovedproduktet der materialet ble brukt. Resirkuleringsprosessen og transport av materialet er allokert til denne analysen.

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 LCA databaser. Datakvaliteten for råmaterialene i A1 er presentert i tabellen nedenfor.

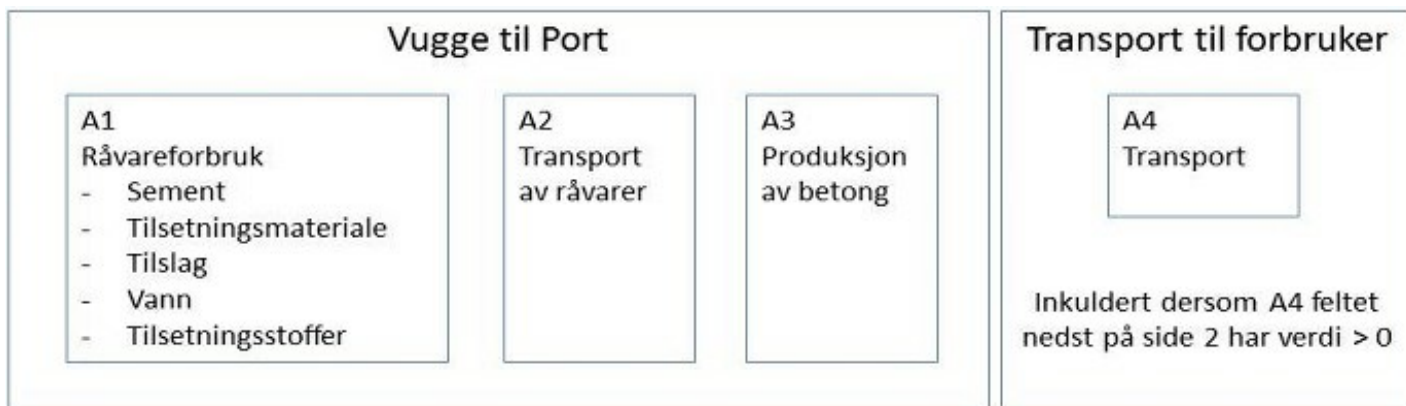
Energiforbruk på fabrikk er gjennomsnitt for 2014

Materials	Source	Data quality	Year
Water	0	0	0
SCM	0	Waste	0
Aggregate	Modified EcoInvent	Database	2012
Aggregate	Østfoldforskning	Database	2012
SCM	TI, Denmark	EPD	2013
Chemicals	EPD-EFC-20150091-IAG1-EN	EPD	2015
Cement	NEPD 211, 15	EPD	2016

Systemgrenser:

Alle prosesser fra råvareuttak til produktet ut fra fabrikkporten er inkludert i analysen.

Flytskjemaet nedenfor illustrerer systemgrensene for analysen:



Teknisk tilleggsinformasjon

Registrert EPD for Unicon: NEPD158N

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	2	0,020216	l/tkm	0,04
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Byggefase A5

.	Enhet	Verdi
Hjelpematerialer	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
Materialer fra avfallsbehandling	kg	
Støv i luften	kg	
VOC utslipp	kg	

Monterte produkter i bruk (B1)

.	Unit	Value

Vedlikehold (B2)/Reparasjon (B3)

.	Enhet	Verdi
Vedlikeholdsfrekvens*	.	
Hjelpematerialer	kg	
Andre ressurser	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
VOC utslipp	kg	

Utskifting (B4)/Renovering (B5)

.	Enhet	Verdi
Utskiftingsfrekvens*	stk	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Utskifting av slitte deler	0	

* Tall eller referanselevetid

Driftsenergi (B6) og vannbruk (B7)

.	Enhet	Verdi
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Utstyrets varmeeffekt	kW	

Sluttfase (C1,C3,C4)

.	Enhet	Verdi
Farlig avfall	kg	
Blandet avfall	kg	
Gjenbruk	kg	
Resirkulering	kg	
Energigjenvinning	kg	
Til deponi	kg	

Transport avfallsbehandling (C2)

Type	Kapasitetsutnyttelse inkl retur %	Kjøretøytype	Distanse km	Brennstoff/Energi forbruk	Enhet	Verdi (l/t)
Bil					l/tkm	
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Gevinst og belastninger etter endt levetid (D)

LCA: Resultater

Systemgrenser (X=inkludert, MND=modul ikke deklarerert, 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	MND	MND	MND	MND	MND	

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
GWP	kg CO ₂ -eq	7,50E+01	8,83E+00	5,15E+00	4,06E-01
ODP	kg CFC11 -eq	2,90E-06	1,65E-06	1,05E-06	7,68E-08
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	1,52E-02	1,63E-03	1,11E-03	7,20E-05
AP	kg SO ₂ -eq	2,72E-01	4,45E-02	3,76E-02	1,43E-03
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	4,33E-02	9,73E-03	1,00E-02	2,98E-04
ADPM	kg Sb -eq	8,71E-05	1,38E-05	1,93E-05	8,98E-07
ADPE	MJ	6,65E+02	1,30E+02	7,03E+01	6,20E+00

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*10⁻³ = 0,009

Ressursbruk (Resource use)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
RPEE	MJ	8,14E+01	1,69E+00	2,77E+01	9,53E-02
RPEM	MJ	7,08E+00	4,72E-01	1,78E-01	2,92E-02
TPE	MJ	8,85E+01	2,16E+00	2,78E+01	1,25E-01
NRPE	MJ	6,70E+02	1,33E+02	9,82E+01	6,33E+00
NRPM	MJ	2,80E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TRPE	MJ	6,98E+02	1,33E+02	9,82E+01	6,33E+00
SM	MJ	2,72E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
RSF	MJ	7,53E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	MJ	6,45E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
W	m ³	2,88E+00	8,58E-02	4,42E-01	5,64E-03

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 $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Livsløpets slutt - Avfall (End of life - Waste)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
HW	kg	7,53E-04	7,26E-05	6,13E-05	4,80E-06
NHW	kg	2,19E+01	8,87E+00	1,22E+00	6,27E-01
RW	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
CR	kg	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-02	0,00E+00
MR	kg	1,12E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
MER	kg	2,53E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EEE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ETE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Norske tilleggskrav

Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

Nasjonal produksjonsmiks inkludert import, produksjon av overføringslinjer og tap i nett (lav spenning), er brukt som elektrisitetsmiks. Bakgrunnsdata er presentert i tabellen under. Karakteriseringsfaktorer fra EN15804:2012+A1:2013 er benyttet.

Elektrisitetsmiks	Datakilde	Mengde	Enhet
El-mix Nordic (kWh)	Østfoldforskning	77,59	g CO2-ekv/kWh

Farlige stoffer

Produktet er ikke tilført stoffer fra REACH kandidatliste eller stoffer på den norske prioritetslisten

Inneklima

Produktet har ingen påvirkning på inneklima

Bibliografi

NS-EN ISO 14025:2010 Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer.

NS-EN ISO 14044:2006 Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Krav og retningslinjer

NS-EN 15804:2012+A1:2013 Bærekraftig byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer

ISO 21930:2007 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products.

ecoinvent v3, Alloc Rec, Swiss Centre of Life Cycle Inventories.

Iversen et al., (2017) EPD generator v2.0 - Background information for system verification, OR 10.17, Østfoldforskning, Fredrikstad.

• PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011, www.epd-norge.no
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Bakgrunnsinformasjon for verifisering, OR 04.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Brukerveiledning, OR 05.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.

	Programoperatør og utgiver Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner Pb. 5250 Majorstuen 0303 Oslo Norway	Telefon: +47 23 08 82 92 e-post: post@epd-norge.no web: www.epd-norge.no
	Eier av deklarasjon Unicon AS Prof. Birkelandsvei 27B 1081 Oslo	Telefon: +47 67 55 54 44 Fax: e-post: info@unicon.no web:
	Forfatter av livsløpsrapporten Østfoldforskning AS Stadion 4 1671 Kråkerøy	Telefon: +47 69 35 11 00 Fax: +47 69 34 24 94 e-post: post@ostfoldforskning.no web: www.ostfoldforskning.no

ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

in accordance with ISO 14025, ISO 21930 and EN 15804

Eier av deklarasjonen:	Unicon AS
Programoperatør:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Utgiver:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Deklarasjonsnummer:	Viser til NEPD 158N
Publiseringsnummer:	Ikke tildelt
ECO Platform registreringsnummer:	Ikke tildelt
Godkjent dato:	04.12.2017
Gyldig til:	

Resept C6 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Unicon AS



www.epd-norge.no



Generell informasjon

Produkt:

Resept C6 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Programoperatør:Næringslivets stiftelse for Miljødeklarasjoner
Pb. 5250 Majorstuen, 0303 Oslo
Phone: +47 23 08 80 00
e-post: post@epd-norge.no**Deklarasjonsnummer:**

Viser til NEPD 158N

ECO Platform registreringsnummer:**Deklarasjonen er basert på PCR:**EN 15804:2012+A1:2013 tjener som kjerne-PCR
PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011.**Erklæringen 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 Resept C6 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Deklarert enhet med opsjon:

A1,A2,A3,A4

Funksjonell enhet:**Verifikasjon:**

Uavhengig verifikasjon av data, annen miljøinformasjon og EPD er foretatt etter ISO 14025:2010, kapittel 8.1.3 og 8.1.4

Ekstern

Tredjeparts verifikator:

Sign



Seniorforsker Anne Rønning

(Uavhengig verifikator godkjent av EPD Norge)

Eier av deklarasjonen:Unicon AS
Kontaktperson: Øyvind Sæter
Telefon: +47 67 55 54 44
e-post: info@unicon.no**Produsent:**

Unicon AS

Produksjonssted:

Unicon Trondheim Havn

Kvalitet/Miljøsystem:

NS-EN 14001 No. S-024

Org. no.:

No 942822979

Godkjent dato:

04.12.2017

Gyldig til:**Årstall for studien:**

2016

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 utviklet ved bruk av EPDGen-Version 2

Godkjenning:

Bedriftsspesifikke data er

Samlet og registrert av: Agnar Løbakk

Kontrollert av: Agnar Løbakk

Godkjent:

Sign

(Daglig leder av EPD-Norge)

Produkt

Produktbeskrivelse:

Resept C6 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Produktspesifikasjon:

Materials	Percent
Cement	3,90
Aggregate	77,55
Water	5,11
Chemicals	1,36
SCM	12,08

Tekniske data:

Resept C6 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Markedsområde:

Levetid, produkt:

Levetid, bygg:

LCA: Beregningsregler

Deklarert enhet:

1 m3 Resept C6 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

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.

Alle viktige råmaterialer og all viktig energibruk er inkludert. Produksjonsprosessen for råmaterialene og energistrømmer som inngår med veldig små mengder (<1%) er ikke inkludert

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. 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. Påvirkning for primærproduksjonen av resirkulerte materialer er allokert til hovedproduktet der materialet ble brukt. Resirkuleringsprosessen og transport av materialet er allokert til denne analysen.

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 LCA databaser. Datakvaliteten for råmaterialene i A1 er presentert i tabellen nedenfor.

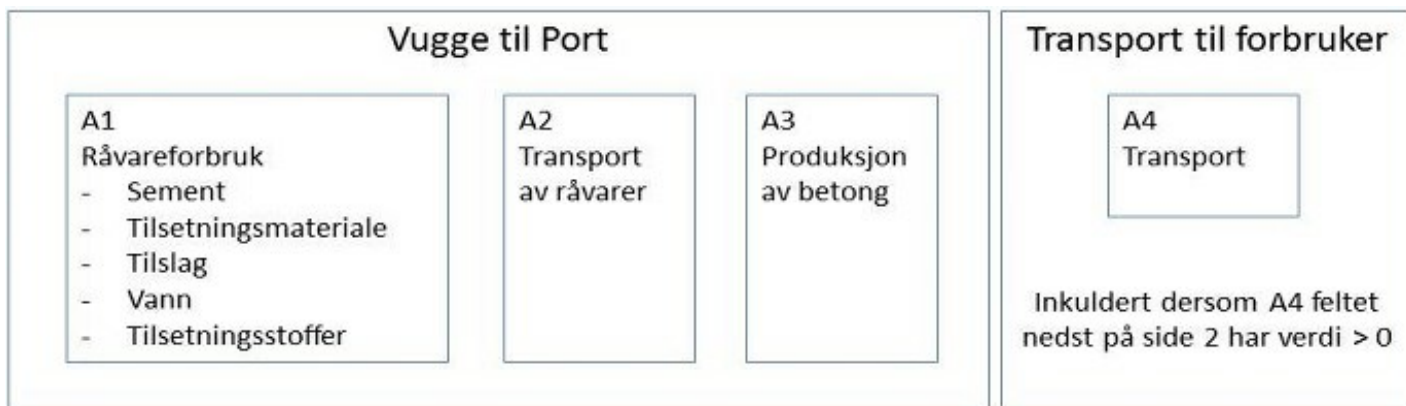
Energiforbruk på fabrikk er gjennomsnitt for 2014

Materials	Source	Data quality	Year
Water	0	0	0
SCM	0	Waste	0
Aggregate	Modified EcoInvent	Database	2012
Aggregate	Østfoldforskning	Database	2012
SCM	TI, Denmark	EPD	2013
Chemicals	EPD-EFC-20150087-IAG1-EN	EPD	2015
Chemicals	EPD-EFC-20150091-IAG1-EN	EPD	2015
Cement	NEPD 211, 15	EPD	2016

Systemgrenser:

Alle prosesser fra råvareuttak til produktet ut fra fabrikkporten er inkludert i analysen.

Flytskjemaet nedenfor illustrerer systemgrensene for analysen:



Teknisk tilleggsinformasjon

Registrert EPD for Unicon: NEPD158N

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	2	0,020216	l/tkm	0,04
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Byggefase A5

.	Enhet	Verdi
Hjelpematerialer	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
Materialer fra avfallsbehandling	kg	
Støv i luften	kg	
VOC utslipp	kg	

Monterte produkter i bruk (B1)

.	Unit	Value

Vedlikehold (B2)/Reparasjon (B3)

.	Enhet	Verdi
Vedlikeholdsfrekvens*	.	
Hjelpematerialer	kg	
Andre ressurser	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
VOC utslipp	kg	

Utskifting (B4)/Renovering (B5)

.	Enhet	Verdi
Utskiftingsfrekvens*	stk	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Utskifting av slitte deler	0	

* Tall eller referanselevetid

Driftsenergi (B6) og vannbruk (B7)

.	Enhet	Verdi
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Utstyrets varmeeffekt	kW	

Sluttfase (C1,C3,C4)

.	Enhet	Verdi
Farlig avfall	kg	
Blandet avfall	kg	
Gjenbruk	kg	
Resirkulering	kg	
Energigjenvinning	kg	
Til deponi	kg	

Transport avfallsbehandling (C2)

Type	Kapasitetsutnyttelse inkl retur %	Kjøretøytype	Distanse km	Brennstoff/Energi forbruk	Enhet	Verdi (l/t)
Bil					l/tkm	
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Gevinst og belastninger etter endt levetid (D)

LCA: Resultater

Systemgrenser (X=inkludert, MND=modul ikke deklarerert, 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	MND	MND	MND	MND	MND	

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
GWP	kg CO ₂ -eq	1,18E+02	9,19E+00	5,15E+00	4,06E-01
ODP	kg CFC11 -eq	2,89E-06	1,71E-06	1,05E-06	7,68E-08
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	2,38E-02	1,69E-03	1,11E-03	7,20E-05
AP	kg SO ₂ -eq	3,43E-01	4,57E-02	3,76E-02	1,43E-03
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	6,44E-02	9,99E-03	1,00E-02	2,98E-04
ADPM	kg Sb -eq	1,11E-04	1,45E-05	1,93E-05	8,98E-07
ADPE	MJ	1,42E+03	1,36E+02	7,03E+01	6,20E+00

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*10⁻³ = 0,009

Ressursbruk (Resource use)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
RPEE	MJ	1,15E+02	1,77E+00	2,77E+01	9,53E-02
RPEM	MJ	6,98E+00	4,97E-01	1,78E-01	2,92E-02
TPE	MJ	1,22E+02	2,27E+00	2,78E+01	1,25E-01
NRPE	MJ	1,33E+03	1,38E+02	9,82E+01	6,33E+00
NRPM	MJ	1,82E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TRPE	MJ	1,51E+03	1,38E+02	9,82E+01	6,33E+00
SM	MJ	2,67E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
RSF	MJ	7,38E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	MJ	6,32E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
W	m ³	3,05E+00	9,07E-02	4,42E-01	5,64E-03

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 $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Livsløpets slutt - Avfall (End of life - Waste)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
HW	kg	1,07E-03	7,68E-05	6,13E-05	4,80E-06
NHW	kg	2,24E+01	9,42E+00	1,22E+00	6,27E-01
RW	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
CR	kg	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-02	0,00E+00
MR	kg	1,10E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
MER	kg	2,48E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EEE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ETE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Norske tilleggskrav

Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

Nasjonal produksjonsmiks inkludert import, produksjon av overføringslinjer og tap i nett (lav spenning), er brukt som elektrisitetsmiks. Bakgrunnsdata er presentert i tabellen under. Karakteriseringsfaktorer fra EN15804:2012+A1:2013 er benyttet.

Elektrisitetsmiks	Datakilde	Mengde	Enhet
El-mix Nordic (kWh)	Østfoldforskning	77,59	g CO2-ekv/kWh

Farlige stoffer

Produktet er ikke tilført stoffer fra REACH kandidatliste eller stoffer på den norske prioritetslisten

Inneklima

Produktet har ingen påvirkning på inneklima

Bibliografi

NS-EN ISO 14025:2010 Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer.

NS-EN ISO 14044:2006 Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Krav og retningslinjer

NS-EN 15804:2012+A1:2013 Bærekraftig byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer

ISO 21930:2007 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products.

ecoinvent v3, Alloc Rec, Swiss Centre of Life Cycle Inventories.

Iversen et al., (2017) EPD generator v2.0 - Background information for system verification, OR 10.17, Østfoldforskning, Fredrikstad.

• PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011, www.epd-norge.no
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Bakgrunnsinformasjon for verifisering, OR 04.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Brukerveiledning, OR 05.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.

	Programoperatør og utgiver Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner Pb. 5250 Majorstuen 0303 Oslo Norway	Telefon: +47 23 08 82 92 e-post: post@epd-norge.no web: www.epd-norge.no
	Eier av deklarasjon Unicon AS Prof. Birkelandsvei 27B 1081 Oslo	Telefon: +47 67 55 54 44 Fax: e-post: info@unicon.no web:
	Forfatter av livsløpsrapporten Østfoldforskning AS Stadion 4 1671 Kråkerøy	Telefon: +47 69 35 11 00 Fax: +47 69 34 24 94 e-post: post@ostfoldforskning.no web: www.ostfoldforskning.no

ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

in accordance with ISO 14025, ISO 21930 and EN 15804

Eier av deklarasjonen:	Unicon AS
Programoperatør:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Utgiver:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Deklarasjonsnummer:	Viser til NEPD 158N
Publiseringsnummer:	Ikke tildelt
ECO Platform registreringsnummer:	Ikke tildelt
Godkjent dato:	04.12.2017
Gyldig til:	

Resept CX - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Unicon AS



www.epd-norge.no



Generell informasjon

Produkt:

Resept CX - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Programoperatør:Næringslivets stiftelse for Miljødeklarasjoner
Pb. 5250 Majorstuen, 0303 Oslo
Phone: +47 23 08 80 00
e-post: post@epd-norge.no**Deklarasjonsnummer:**

Viser til NEPD 158N

ECO Platform registreringsnummer:**Deklarasjonen er basert på PCR:**EN 15804:2012+A1:2013 tjener som kjerne-PCR
PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011.**Erklæringen 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 Resept CX - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Deklarert enhet med opsjon:

A1,A2,A3,A4

Funksjonell enhet:**Verifikasjon:**

Uavhengig verifikasjon av data, annen miljøinformasjon og EPD er foretatt etter ISO 14025:2010, kapittel 8.1.3 og 8.1.4

Ekstern

Tredjeparts verifikator:

Sign



Seniorforsker Anne Rønning

(Uavhengig verifikator godkjent av EPD Norge)

Eier av deklarasjonen:Unicon AS
Kontaktperson: Øyvind Sæter
Telefon: +47 67 55 54 44
e-post: info@unicon.no**Produsent:**

Unicon AS

Produksjonssted:

Unicon Trondheim Havn

Kvalitet/Miljøsystem:

NS-EN 14001 No. S-024

Org. no.:

No 942822979

Godkjent dato:

04.12.2017

Gyldig til:**Årstall for studien:**

2016

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 utviklet ved bruk av EPDGen-Version 2

Godkjenning:

Bedriftsspesifikke data er

Samlet og registrert av: Agnar Løbakk

Kontrollert av: Agnar Løbakk

Godkjent:

Sign

(Daglig leder av EPD-Norge)

Produkt

Produktbeskrivelse:

Resept CX - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Produktspesifikasjon:

Materials	Percent
Cement	4,54
Aggregate	75,90
Water	5,21
Chemicals	0,28
SCM	14,07

Tekniske data:

Resept CX - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Markedsområde:

Levetid, produkt:

Levetid, bygg:

LCA: Beregningsregler

Deklarert enhet:

1 m3 Resept CX - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

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.

Alle viktige råmaterialer og all viktig energibruk er inkludert. Produksjonsprosessen for råmaterialene og energistrømmer som inngår med veldig små mengder (<1%) er ikke inkludert

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. 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. Påvirkning for primærproduksjonen av resirkulerte materialer er allokert til hovedproduktet der materialet ble brukt. Resirkuleringsprosessen og transport av materialet er allokert til denne analysen.

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 LCA databaser. Datakvaliteten for råmaterialene i A1 er presentert i tabellen nedenfor.

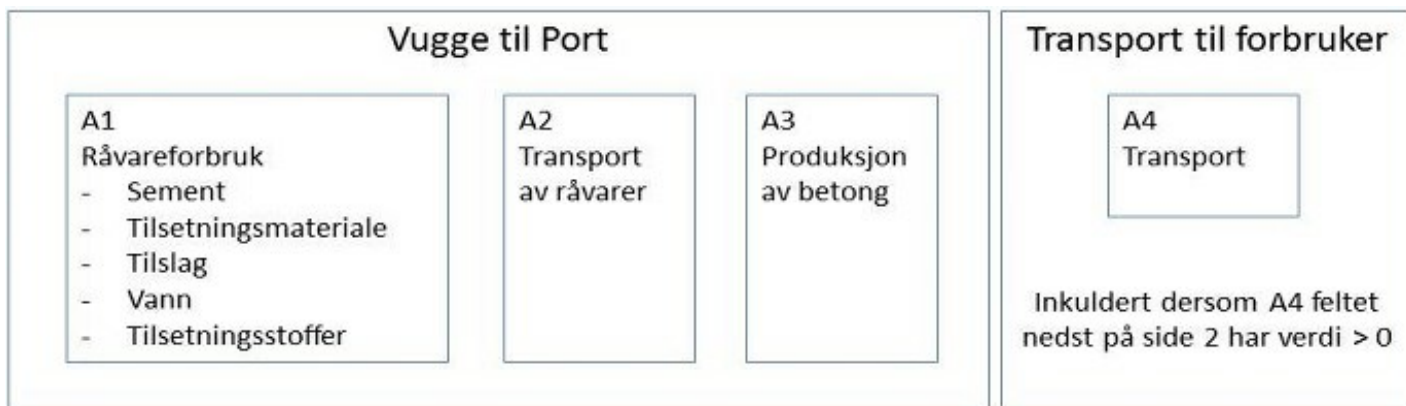
Energiforbruk på fabrikk er gjennomsnitt for 2014

Materials	Source	Data quality	Year
Water	0	0	0
SCM	0	Waste	0
Aggregate	Modified EcoInvent	Database	2012
Aggregate	Østfoldforskning	Database	2012
SCM	TI, Denmark	EPD	2013
Chemicals	EPD-EFC-20150091-IAG1-EN	EPD	2015
Cement	NEPD 211, 15	EPD	2016

Systemgrenser:

Alle prosesser fra råvareuttak til produktet ut fra fabrikkporten er inkludert i analysen.

Flytskjemaet nedenfor illustrerer systemgrensene for analysen:



Teknisk tilleggsinformasjon

Registrert EPD for Unicon: NEPD158N

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	2	0,020216	l/tkm	0,04
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Byggefase A5

.	Enhet	Verdi
Hjelpematerialer	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
Materialer fra avfallsbehandling	kg	
Støv i luften	kg	
VOC utslipp	kg	

Monterte produkter i bruk (B1)

.	Unit	Value

Vedlikehold (B2)/Reparasjon (B3)

.	Enhet	Verdi
Vedlikeholdsfrekvens*	.	
Hjelpematerialer	kg	
Andre ressurser	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
VOC utslipp	kg	

Utskifting (B4)/Renovering (B5)

.	Enhet	Verdi
Utskiftingsfrekvens*	stk	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Utskifting av slitte deler	0	

* Tall eller referanselevetid

Driftsenergi (B6) og vannbruk (B7)

.	Enhet	Verdi
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Utstyrets varmeeffekt	kW	

Sluttfase (C1,C3,C4)

.	Enhet	Verdi
Farlig avfall	kg	
Blandet avfall	kg	
Gjenbruk	kg	
Resirkulering	kg	
Energigjenvinning	kg	
Til deponi	kg	

Transport avfallsbehandling (C2)

Type	Kapasitetsutnyttelse inkl retur %	Kjøretøytype	Distanse km	Brennstoff/Energi forbruk	Enhet	Verdi (l/t)
Bil					l/tkm	
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Gevinst og belastninger etter endt levetid (D)

LCA: Resultater

Systemgrenser (X=inkludert, MND=modul ikke deklarerert, 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	MND	MND	MND	MND	MND	

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
GWP	kg CO ₂ -eq	8,43E+01	8,83E+00	5,15E+00	4,06E-01
ODP	kg CFC11 -eq	2,87E-06	1,65E-06	1,05E-06	7,68E-08
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	1,63E-02	1,63E-03	1,11E-03	7,20E-05
AP	kg SO ₂ -eq	2,89E-01	4,45E-02	3,76E-02	1,43E-03
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	4,50E-02	9,73E-03	1,00E-02	2,98E-04
ADPM	kg Sb -eq	8,67E-05	1,38E-05	1,93E-05	8,98E-07
ADPE	MJ	7,18E+02	1,30E+02	7,03E+01	6,20E+00

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 $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Ressursbruk (Resource use)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
RPEE	MJ	9,07E+01	1,69E+00	2,77E+01	9,53E-02
RPEM	MJ	7,75E+00	4,72E-01	1,78E-01	2,92E-02
TPE	MJ	9,84E+01	2,16E+00	2,78E+01	1,25E-01
NRPE	MJ	7,22E+02	1,33E+02	9,82E+01	6,33E+00
NRPM	MJ	3,18E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TRPE	MJ	7,53E+02	1,33E+02	9,82E+01	6,33E+00
SM	MJ	3,08E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
RSF	MJ	8,52E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	MJ	7,29E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
W	m ³	2,81E+00	8,58E-02	4,42E-01	5,64E-03

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 $9,0 \text{ E-03} = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Livsløpets slutt - Avfall (End of life - Waste)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
HW	kg	7,41E-04	7,26E-05	6,13E-05	4,80E-06
NHW	kg	2,30E+01	8,87E+00	1,22E+00	6,27E-01
RW	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-03} = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
CR	kg	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-02	0,00E+00
MR	kg	1,26E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
MER	kg	2,86E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EEE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ETE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-03} = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Norske tilleggskrav

Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

Nasjonal produksjonsmiks inkludert import, produksjon av overføringslinjer og tap i nett (lav spenning), er brukt som elektrisitetsmiks. Bakgrunnsdata er presentert i tabellen under. Karakteriseringsfaktorer fra EN15804:2012+A1:2013 er benyttet.

Elektrisitetsmiks	Datakilde	Mengde	Enhet
El-mix Nordic (kWh)	Østfoldforskning	77,59	g CO2-ekv/kWh

Farlige stoffer

Produktet er ikke tilført stoffer fra REACH kandidatliste eller stoffer på den norske prioritetslisten

Inneklima

Produktet har ingen påvirkning på inneklima

Bibliografi

NS-EN ISO 14025:2010 Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer.

NS-EN ISO 14044:2006 Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Krav og retningslinjer

NS-EN 15804:2012+A1:2013 Bærekraftig byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer

ISO 21930:2007 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products.

ecoinvent v3, Alloc Rec, Swiss Centre of Life Cycle Inventories.

Iversen et al., (2017) EPD generator v2.0 - Background information for system verification, OR 10.17, Østfoldforskning, Fredrikstad.

• PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011, www.epd-norge.no
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Bakgrunnsinformasjon for verifisering, OR 04.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Brukerveiledning, OR 05.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.

	Programoperatør og utgiver Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner Pb. 5250 Majorstuen 0303 Oslo Norway	Telefon: +47 23 08 82 92 e-post: post@epd-norge.no web: www.epd-norge.no
	Eier av deklarasjon Unicon AS Prof. Birkelandsvei 27B 1081 Oslo	Telefon: +47 67 55 54 44 Fax: e-post: info@unicon.no web:
	Forfatter av livsløpsrapporten Østfoldforskning AS Stadion 4 1671 Kråkerøy	Telefon: +47 69 35 11 00 Fax: +47 69 34 24 94 e-post: post@ostfoldforskning.no web: www.ostfoldforskning.no

ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

in accordance with ISO 14025, ISO 21930 and EN 15804

Eier av deklarasjonen:	Unicon AS
Programoperatør:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Utgiver:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Deklarasjonsnummer:	Viser til NEPD 158N
Publiseringsnummer:	Ikke tildelt
ECO Platform registreringsnummer:	Ikke tildelt
Godkjent dato:	04.12.2017
Gyldig til:	

Resept D1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Unicon AS



www.epd-norge.no



Generell informasjon

Produkt:

Resept D1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Programoperatør:Næringslivets stiftelse for Miljødeklarasjoner
Pb. 5250 Majorstuen, 0303 Oslo
Phone: +47 23 08 80 00
e-post: post@epd-norge.no**Deklarasjonsnummer:**

Viser til NEPD 158N

ECO Platform registreringsnummer:**Deklarasjonen er basert på PCR:**EN 15804:2012+A1:2013 tjener som kjerne-PCR
PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011.**Erklæringen 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 Resept D1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Deklarert enhet med opsjon:

A1,A2,A3,A4

Funksjonell enhet:**Verifikasjon:**

Uavhengig verifikasjon av data, annen miljøinformasjon og EPD er foretatt etter ISO 14025:2010, kapittel 8.1.3 og 8.1.4

Ekstern

Tredjeparts verifikator:

Sign



Seniorforsker Anne Rønning

(Uavhengig verifikator godkjent av EPD Norge)

Eier av deklarasjonen:Unicon AS
Kontaktperson: Øyvind Sæter
Telefon: +47 67 55 54 44
e-post: info@unicon.no**Produsent:**

Unicon AS

Produksjonssted:

Unicon Trondheim Havn

Kvalitet/Miljøsystem:

NS-EN 14001 No. S-024

Org. no.:

No 942822979

Godkjent dato:

04.12.2017

Gyldig til:**Årstall for studien:**

2016

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 utviklet ved bruk av EPDGen-Version 2

Godkjenning:

Bedriftsspesifikke data er

Samlet og registrert av: Agnar Løbakk

Kontrollert av: Agnar Løbakk

Godkjent:

Sign

(Daglig leder av EPD-Norge)

Produkt

Produktbeskrivelse:

Resept D1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Produktspesifikasjon:

Materials	Percent
Cement	1,92
Aggregate	77,88
Water	5,04
Chemicals	1,34
SCM	13,82

Tekniske data:

Resept D1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

Markedsområde:

Levetid, produkt:

Levetid, bygg:

LCA: Beregningsregler

Deklarert enhet:

1 m3 Resept D1 - Masteroppgave Frederic Hermansen - 334 Havna

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.

Alle viktige råmaterialer og all viktig energibruk er inkludert. Produksjonsprosessen for råmaterialene og energistrømmer som inngår med veldig små mengder (<1%) er ikke inkludert

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. 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. Påvirkning for primærproduksjonen av resirkulerte materialer er allokert til hovedproduktet der materialet ble brukt. Resirkuleringsprosessen og transport av materialet er allokert til denne analysen.

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 LCA databaser. Datakvaliteten for råmaterialene i A1 er presentert i tabellen nedenfor.

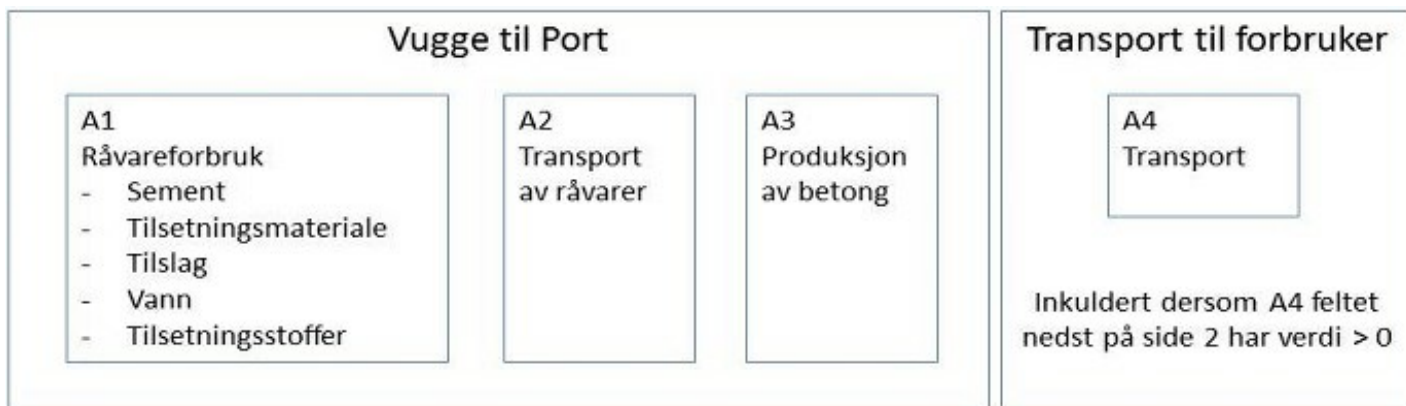
Energiforbruk på fabrikk er gjennomsnitt for 2014

Materials	Source	Data quality	Year
Water	0	0	0
SCM	0	Waste	0
Aggregate	Modified EcoInvent	Database	2012
Aggregate	Østfoldforskning	Database	2012
SCM	TI, Denmark	EPD	2013
Chemicals	EPD-EFC-20150087-IAG1-EN	EPD	2015
Chemicals	EPD-EFC-20150091-IAG1-EN	EPD	2015
Cement	NEPD 211, 15	EPD	2016

Systemgrenser:

Alle prosesser fra råvareuttak til produktet ut fra fabrikkporten er inkludert i analysen.

Flytskjemaet nedenfor illustrerer systemgrensene for analysen:



Teknisk tilleggsinformasjon

Registrert EPD for Unicon: NEPD158N

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	2	0,020216	l/tkm	0,04
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Byggefase A5

.	Enhet	Verdi
Hjelpematerialer	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
Materialer fra avfallsbehandling	kg	
Støv i luften	kg	
VOC utslipp	kg	

Monterte produkter i bruk (B1)

.	Unit	Value

Vedlikehold (B2)/Reparasjon (B3)

.	Enhet	Verdi
Vedlikeholdsfrekvens*	.	
Hjelpematerialer	kg	
Andre ressurser	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
VOC utslipp	kg	

Utskifting (B4)/Renovering (B5)

.	Enhet	Verdi
Utskiftingsfrekvens*	stk	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Utskifting av slitte deler	0	

* Tall eller referanselevetid

Driftsenergi (B6) og vannbruk (B7)

.	Enhet	Verdi
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Utstyrets varmeeffekt	kW	

Sluttfase (C1,C3,C4)

.	Enhet	Verdi
Farlig avfall	kg	
Blandet avfall	kg	
Gjenbruk	kg	
Resirkulering	kg	
Energigjenvinning	kg	
Til deponi	kg	

Transport avfallsbehandling (C2)

Type	Kapasitetsutnyttelse inkl retur %	Kjøretøytype	Distanse km	Brennstoff/Energi forbruk	Enhet	Verdi (l/t)
Bil					l/tkm	
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Gevinst og belastninger etter endt levetid (D)

LCA: Resultater

Systemgrenser (X=inkludert, MND=modul ikke deklarerert, 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	MND	MND	MND	MND	MND	

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
GWP	kg CO ₂ -eq	8,79E+01	9,18E+00	5,15E+00	4,06E-01
ODP	kg CFC11 -eq	2,71E-06	1,71E-06	1,05E-06	7,68E-08
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	1,99E-02	1,69E-03	1,11E-03	7,20E-05
AP	kg SO ₂ -eq	2,73E-01	4,57E-02	3,76E-02	1,43E-03
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	5,82E-02	9,98E-03	1,00E-02	2,98E-04
ADPM	kg Sb -eq	1,07E-04	1,45E-05	1,93E-05	8,98E-07
ADPE	MJ	1,27E+03	1,36E+02	7,03E+01	6,20E+00

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*10⁻³ = 0,009

Ressursbruk (Resource use)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
RPEE	MJ	8,55E+01	1,77E+00	2,77E+01	9,53E-02
RPEM	MJ	4,26E+00	4,96E-01	1,78E-01	2,92E-02
TPE	MJ	8,97E+01	2,26E+00	2,78E+01	1,25E-01
NRPE	MJ	1,18E+03	1,38E+02	9,82E+01	6,33E+00
NRPM	MJ	1,79E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TRPE	MJ	1,36E+03	1,38E+02	9,82E+01	6,33E+00
SM	MJ	2,98E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
RSF	MJ	3,62E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	MJ	3,10E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
W	m ³	3,04E+00	9,06E-02	4,42E-01	5,64E-03

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 $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Livsløpets slutt - Avfall (End of life - Waste)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
HW	kg	1,05E-03	7,67E-05	6,13E-05	4,80E-06
NHW	kg	1,81E+01	9,40E+00	1,22E+00	6,27E-01
RW	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
CR	kg	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-02	0,00E+00
MR	kg	5,38E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
MER	kg	1,22E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EEE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ETE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Norske tilleggskrav

Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

Nasjonal produksjonsmiks inkludert import, produksjon av overføringslinjer og tap i nett (lav spenning), er brukt som elektrisitetsmiks. Bakgrunnsdata er presentert i tabellen under. Karakteriseringsfaktorer fra EN15804:2012+A1:2013 er benyttet.

Elektrisitetsmiks	Datakilde	Mengde	Enhet
El-mix Nordic (kWh)	Østfoldforskning	77,59	g CO2-ekv/kWh

Farlige stoffer

Produktet er ikke tilført stoffer fra REACH kandidatliste eller stoffer på den norske prioritetslisten

Inneklima

Produktet har ingen påvirkning på inneklima

Bibliografi

NS-EN ISO 14025:2010 Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer.

NS-EN ISO 14044:2006 Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Krav og retningslinjer

NS-EN 15804:2012+A1:2013 Bærekraftig byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer

ISO 21930:2007 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products.

ecoinvent v3, Alloc Rec, Swiss Centre of Life Cycle Inventories.

Iversen et al., (2017) EPD generator v2.0 - Background information for system verification, OR 10.17, Østfoldforskning, Fredrikstad.

• PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011, www.epd-norge.no
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Bakgrunnsinformasjon for verifisering, OR 04.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.
 • Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Brukerveiledning, OR 05.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.

	Programoperatør og utgiver Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner Pb. 5250 Majorstuen 0303 Oslo Norway	Telefon: +47 23 08 82 92 e-post: post@epd-norge.no web: www.epd-norge.no
	Eier av deklarasjon Unicon AS Prof. Birkelandsvei 27B 1081 Oslo	Telefon: +47 67 55 54 44 Fax: e-post: info@unicon.no web:
	Forfatter av livsløpsrapporten Østfoldforskning AS Stadion 4 1671 Kråkerøy	Telefon: +47 69 35 11 00 Fax: +47 69 34 24 94 e-post: post@ostfoldforskning.no web: www.ostfoldforskning.no

ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

in accordance with ISO 14025 ISO 21930 EN 15804

Eier av deklarasjonen:	Unicon AS
Programoperatør:	The Norwegian EPD Foundation
Utgiver:	The Norwegian EPD Foundation
Deklarasjon nummer:	Viser til NEPD 158N
Publiserings nummer:	Ikke tildelt
ECO Platform registreringsnummer:	Ikke tildelt
Godkjent dato:	
Gyldig til:	

B35 M90 PH3 Powerhouse,334 Havna

Unicon AS



www.epd-norge.no



Generell informasjon

Produkt:

B35 M90 PH3 Powerhouse,334 Havna

Programoperatør:Næringslivets stiftelse for Miljødeklarasjoner
Pb. 5250 Majorstuen, 0303 Oslo
Phone: +47 23 08 80 00
e-post: post@epd-norge.no**Deklarasjon nummer:**

Viser til NEPD 158N

ECO Platform registreringsnummer:**Deklarasjonen er basert på PCR:**EN 15804:2012+A1:2013 tjener som kjerne-PCR
PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011.**Erklæringen 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 B35 M90 PH3 Powerhouse,334 Havna

Deklarert enhet med opsjon:

A1,A2,A3,A4

Funksjonell enhet:**Verifikasjon:**

Uavhengig verifikasjon av data, annen miljøinformasjon og EPD er foretatt etter ISO 14025:2010, kapittel 8.1.3 og 8.1.4

Ekstern

Tredjeparts verifikator:

Sign



Seniorforsker Anne Rønning

(Uavhengig verifikator godkjent av EPD Norge)

Eier av deklarasjonen:Unicon AS
Kontaktperson: Øyvind Sæter
Telefon: +47 67 55 54 44
e-post: info@unicon.no**Produsent:**

Unicon AS

Produksjonssted:

Unicon Havna

Kvalitet/Miljøsystem:

NS-EN 14001 No. S-024

Org. no.:

No 942822979

Godkjent dato:**Gyldig til:****Årstill for studien:**

2016

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 utviklet ved bruk av EPDGen-Version 2

Godkjenning:

Bedriftsspesifikke data er

Samlet og registrert av: Jonny Tverdal,

Kontrollert av: Agnar Løbakk

Godkjent:

Sign

(Daglig leder av EPD-Norge)

Produkt

Produktbeskrivelse:

B35 M90 D-max 22mm Kons 240mm. Powerhouse

Produktspesifikasjon:

1 m3 ferdigbetong styrkeklasse B35 og bestandighetsklasse M90

Materials	Percent
Cement	7,79
Aggregate	77,77
Water	6,16
Chemicals	0,17
SCM	8,11

Tekniske data:

B35 M90 D-Max 22mm Konsistens 240mm

Markedsområde:

Levetid, produkt:

LCA: Beregningsregler

Deklarert enhet:

1 m3 B35 M90 PH3 Powerhouse,334 Havna

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.

Alle viktige råmaterialer og all viktig energibruk er inkludert. Produksjonsprosessen for råmaterialene og energistrømmer som inngår med veldig små mengder (<1%) er ikke inkludert

Allokering:

Allokering er gjort i hht bestemmelser i EN 15804. Inngående energi og vann, samt produksjon av avfall i egen produksjon er allokert likt mellom alle produktene gjennom masseallokering. Påvirkning for primærproduksjonen av resirkulerte materialer er allokert til hovedproduktet der materialet ble brukt. Resirkuleringsprosessen og transport av materialet er allokert til denne analysen.

Allokering er gjort i hht bestemmelser i EN 15804. Inngående energi og vann, samt produksjon av avfall i egen produksjon er allokert likt mellom alle produktene gjennom masseallokering. Påvirkning for primærproduksjonen av resirkulerte materialer er allokert til hovedproduktet der materialet ble brukt. Resirkuleringsprosessen og transport av materialet er allokert til denne analysen.

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 hht til EN 15804, Østfoldforskning sine databaser, ecoinvent og andre LCA-databaser. Datakvaliteten for råmaterialene i A1 er presentert i tabellen under:

Energiforbruk på fabrikk er gjennomsnitt for 2014

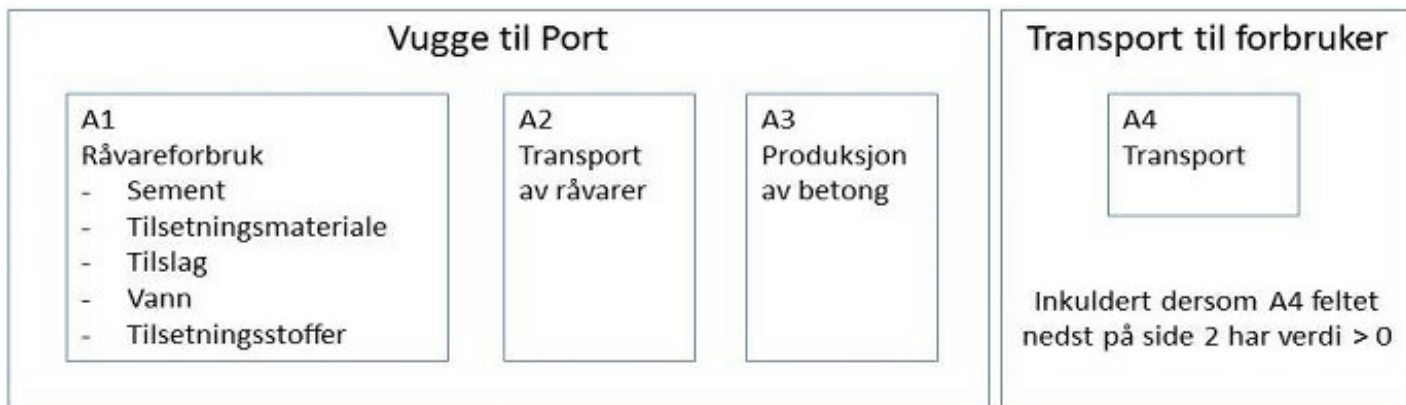
Materials	Source	Data quality	Year
Water	0	0	0
SCM	0	Waste	0
Aggregate	Modified EcoInvent	Database	2012
Aggregate	Østfoldforskning	Database	2012
SCM	TI, Denmark	EPD	2013
Chemicals	EPD-EFC-20150086-IAG1-EN	EPD	2015
Chemicals	EPD-EFC-20150091-IAG1-EN	EPD	2015
Cement	NEPD 211, 15	EPD	2016

Systemgrenser:

Alle prosesser fra råvareuttak til produktet ut fra fabrikkporten er inkludert i analysen.

Flytskjemaet nedenfor illustrerer systemgrensene for analysen:

Flytskjema:



Teknisk tilleggsmasjon

Registrert EPD for Unicon: NEPD158N

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	3	0,020216	l/tkm	0,06
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Byggefase A5

.	Enhet	Verdi
Hjelpematerialer	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
Materialer fra avfallsbehandling	kg	
Støv i luften	kg	
VOC utslipp	kg	

Monterte produkter i bruk (B1)

.	Unit	Value

Vedlikehold (B2)/Reparasjon (B3)

.	Enhet	Verdi
Vedlikeholdsfrekvens*	.	
Hjelpematerialer	kg	
Andre ressurser	kg	
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Materialtap	kg	
VOC utslipp	kg	

Utskifting (B4)/Renovering (B5)

.	Enhet	Verdi
Utskiftingsfrekvens*	stk	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Utskifting av slitte deler	0	

* Tall eller referanselevetid

Drifts energi (B6) og vannbruk (B7)

.	Enhet	Verdi
Vannforbruk	m ³	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Utstyrets varmeeffekt	kW	

Sluttfase (C1,C3,C4)

.	Enhet	Verdi
Farlig avfall	kg	
Blandet avfall	kg	
Gjenbruk	kg	
Resirkulering	kg	
Energigjenvinning	kg	
Til deponi	kg	

Transport avfallsbehandling (C2)

Type	Kapasitetsutnyttelse inkl retur %	Kjøretøytype	Distanse km	Brennstoff/Energi forbruk	Enhet	Verdi (l/t)
Bil					l/tkm	
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

Gevinst og belastninger etter endt levetid (D)

LCA: Resultater

Systemgrenser (X=inkludert, MND=modul ikke deklarerert, 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	MND	MND	MND	MND	MND	

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
GWP	kg CO ₂ -eq	1,28E+02	2,43E+01	5,15E+00	6,09E-01
ODP	kg CFC11 -eq	3,03E-06	2,00E-06	1,05E-06	1,15E-07
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	2,16E-02	1,33E-02	1,11E-03	1,08E-04
AP	kg SO ₂ -eq	3,90E-01	9,69E-02	3,76E-02	2,15E-03
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	5,09E-02	1,24E-01	1,00E-02	4,46E-04
ADPM	kg Sb -eq	8,81E-05	1,77E-05	1,93E-05	1,35E-06
ADPE	MJ	8,47E+02	3,29E+02	7,03E+01	9,30E+00

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*10⁻³ = 0,009

Ressursbruk (Resource use)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
RPEE	MJ	1,34E+02	3,21E+00	2,77E+01	1,43E-01
RPEM	MJ	1,22E+01	8,28E-01	1,78E-01	4,38E-02
TPE	MJ	1,46E+02	4,04E+00	2,78E+01	1,87E-01
NRPE	MJ	8,60E+02	3,35E+02	9,82E+01	9,49E+00
NRPM	MJ	1,92E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TRPE	MJ	8,79E+02	3,35E+02	9,82E+01	9,49E+00
SM	MJ	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
RSF	MJ	1,47E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	MJ	1,26E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
W	m ³	2,89E+00	1,34E+00	4,42E-01	8,47E-03

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 $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Livsløpets slutt - Avfall (End of life - Waste)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
HW	kg	6,99E-04	1,33E-04	6,13E-05	7,20E-06
NHW	kg	2,90E+01	8,59E+00	1,22E+00	9,41E-01
RW	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
CR	kg	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-02	0,00E+00
MR	kg	2,19E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
MER	kg	4,95E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EEE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ETE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

Leseeksempel $9,0 \text{ E-}03 = 9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

Norske tilleggskrav

Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

Datsett fra databasen ecoinvent v3 (juni 2012) for produksjonsmiks inkludert import, på lavspenning er benyttet; Electricity, low voltage {} market for | Alloc Def, U. Produksjon av overføringsnett, i tillegg til direkte utslipp og tap ved overføring, er inkludert. Karakteriseringsfaktorer fra EN15804:2012+A1:2013 er benyttet.

Elektrisitetsmiks	Datakilde	Mengde	Enhet
El-mix Nordic (kWh)	Østfoldforskning	77,59	g CO2-ekv/kWh

Farlige stoffer

The product contains no substances given by the REACH Candidate list (or the Norwegian Priority list, for EPDs intended for the Norwegian market)

Inneklima

Produktet har ingen påvirkning på inneklima

Bibliografi

NS-EN ISO 14025:2010 Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer.

NS-EN ISO 14044:2006 Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Krav og retningslinjer

NS-EN 15804:2012+A1:2013 Bærekraftig byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer

ISO 21930:2007 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products.

ecoinvent v3, Alloc Rec, Swiss Centre of Life Cycle Inventories.

Iversen et al., (2017) EPD generator v2.0 - Background information for system verification, OR 10.17, Østfoldforskning, Fredrikstad.

- PCR for Precast Concrete Products, NPCR 20.2011, www.epd-norge.no
- Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Bakgrunnsinformasjon for verifisering, OR 04.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.
- Vold M. og Edvardsen T. (2014); EPD-generator for betongindustrien, Brukerveileding, OR 05.14 Østfoldforskning, Fredrikstad, Januar 2014.

	Programoperatør og utgiver Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner Pb. 5250 Majorstuen 0303 Oslo Norway	Telefon: +47 23 08 82 92 e-post: post@epd-norge.no web: www.epd-norge.no
	Eier av deklarasjon Unicon AS Prof. Birkelandsvei 27B 1081 Oslo	Telefon: +47 67 55 54 44 Fax: e-post: info@unicon.no web:
	Forfatter av livsløpsrapporten Østfoldforskning AS Stadion 4 1671 Kråkerøy	Telefon: +47 69 35 11 00 Fax: +47 69 34 24 94 e-post: post@ostfoldforskning.no web: www.ostfoldforskning.no