

# Betong med redusert klimagassutslipp til Gullhaug Torg 2A-prosjektet

**Anders Raastad Elgen**  
**Jo Håvard A. Vogt**

Master i Bygg- og miljøteknikk  
Innlevert: juni 2018  
Hovedveileder: Sverre Smeplass, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk





## MASTEROPPGAVE 2018

FAGOMRÅDE: TKT4925 Betongteknologi	DATO: 11 juni 2018	ANTALL SIDER: 83 + 59 sider vedlegg
---------------------------------------	-----------------------	--

TITTEL: <b>Betong med redusert klimagassutslipp til Gullhaug Torg 2A - prosjektet</b> Low GWP Concrete for the Gullhaug Torg 2A – project	
UTFØRT AV: Anders Raastad Elgen & Jo Håvard Andresen Vogt	 

### SAMMENDRAG:

Prosjektet Gullhaug Torg 2A er en del av FutureBuilt-programmet. Det innebærer at prosjektet skal være et forbildeprosjekt i bransjen, der blant annet klimagassutslippet skal reduseres med 50 % i forhold til et tenkt referanseprosjekt. Bæresystemet skal blant annet utføres i plasstøpt betong, noe som medfører store mengder betong. Prosjektet har satt som mål at det samlede klimagassutslippet fra betongen ikke skal overstige  $170 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$  for å sikre en mest mulig bærekraftig materialbruk. Dette er betydelig lavere enn hva som er nødvendig for å oppnå Lavkarbonklasse A, som regnes som beste praksis i bransjen, og krever dermed tiltak helt utenom det vanlige.

I denne oppgaven er ulike betongsammensetninger utviklet og testet med mål om å tilfredsstille dette målet, samt krav til fasthetsutvikling. Reseptene er utviklet basert på tidligere resepter av samme karakter som har vist gode resultater. Betongene skal i utgangspunktet tilfredsstille kravene i henhold til NS-EN 206+NA. Likevel fraviker enkelte av reseptene standarden ved å teste ytterligere bindemiddelkombinasjoner for å oppnå enda lavere GWP-verdier.

For å utvikle betongresepter med et lavt klimagassutslipp er det hovedsakelig tatt utgangspunkt i å redusere klinkerandelen i betongen ved å erstatte med andre materialer. Det er testet resepter med 50, 60 og 70 % flygeaske av bindemiddelet og med 70 % slagg. Ulempen med disse betongtypene er en langsom fasthetsutvikling samt økt temperaturfølsomhet. Reseptene er derfor herdet ved ulike temperaturer for å kartlegge påvirkningen på fasthetsutviklingen.

Totalt er det utviklet 10 forskjellige resepter. For hver av disse er det utarbeidet en EPD for å kartlegge og sammenligne klimagassutslippet. Alle reseptene ligger godt under kravet på  $170 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$  med verdier fra 160 og helt ned mot  $88 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$ .

I tillegg er herdeforløpet til etterspent dekke og -bunnplate simulert med og uten varmekabler for noen av reseptene. Varmekabler har vist seg å være et effektivt hjelpemiddel for å akselerere fasthetsutviklingen til betongene.

Resultatene fra fasthetsmålingene til de ulike reseptene viser en god fasthetsutvikling for de fleste av reseptene, men er gjennomgående treg ved romtemperatur. I motsetning er fasthetsutviklingen ved økt herdetemperatur enorm og enkelte av reseptene overstiger  $100 \text{ MPa}$ . For flygeaskebetongene overstiger dette det som kan beskrives med gjeldene teori og tyder på at det mer som skjer enn vann/semment- og pozzolanreaksjonen. Den ekstra reaksjonen antas å være en geopolymereffekt som gjør denne betongen til en slags hybridbetong. Med de reseptene som er utviklet er det flere som tilfredsstiller kravene til Gullhaug Torg med tanke på klimagassutslipp og fasthet.

FAGLÆRER: Prof. II Sverre Smeplass  
VEILEDER: Prof. II Sverre Smeplass  
UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk





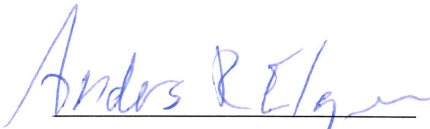
## Forord

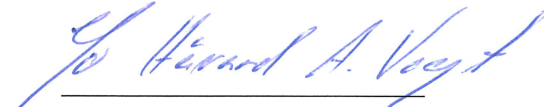
Som en avslutning på et fem år langt studieløp, har arbeidet med denne masteroppgaven bydd på mange spennende oppgaver. Vi har fått benyttet en god variasjon av kunnskap fra ulike deler av studieløpet, samt lært mye nytt for å kunne besvare oppgaven på en god måte. Gjennom laboratoriearbeidet har vi virkelig fått et tettere forhold til betong gjennom testing og vurdering av den ferske betongens egenskaper og oppførsel. Det er ingen tvil om at en stor del av denne masteroppgaven heller har vært preget av fysisk arbeid enn en vanlig studiehverdag, med hele 1130 liter betong blandet i det glohete laboratoriet i løpet av semesteret.

Vi vil gjerne rette en stor takk til vår veileder Prof. II Sverre Smeplass og Skanska Norge AS for muligheten til å være med på denne spennende forskingen. Mange hyggelige møter med god veiledning underveis har vært viktig for arbeidet og utfallet av oppgaven. En takk rettes også Håkon Sælen for oppfølging knyttet til Gullhaug Torg.

Vi vil også benytte muligheten til å takke Solfrid Vevatne hos Ølen Betong AS og Agnar Løbak hos Unicon AS som begge har vært behjelpelige og utarbeidet EPDer til reseptene våre.

Studietiden har vært en utrolig morsom og fin periode som vil savnes mye, men vi ser begge frem mot mange nye spennende utfordringer som vil møte oss når vi nå går ut i arbeidslivet.

  
Anders Raastad Elgen

  
Jo Håvard Andresen Vogt





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

## **MASTEROPPGAVE 2018**

*for stud. techn.*  
*Anders Raastad Elgen og*  
*Jo Håvard A. Vogt*

### ***Betong med redusert klimagassutslipp til Gullhaug Torg 2A - prosjektet*** *Low GWP Concrete for the Gullhaug Torg 2A - project*

#### **Innledning**

Futurebuilt-prosjektet Gullhaug Torg i Nydalen i Oslo har en ambisjon om å oppnå 50% reduksjon i klimagassutslipp knyttet til materialbruk, transport og energibruk. Bæresystemet skal utføres i plasstøpt betong, med bl.a. etterspente dekker. Betongen utgjør en betydelig andel av det totale klimagassutslippet i prosjektet, og det er derfor nødvendig å iverksette ekstraordinære tiltak for å sikre tilstrekkelige bidrag til reduksjonsmålet. I utgangspunktet vil ikke Lavkarbonbetong klasse A iht. Norsk Betongforenings publikasjon nr. 37 gi et tilstrekkelig bidrag til reduksjonsmålet.

#### **Oppgave**

Oppgaven går ut på å utvikle, prøve og dokumentere betongsammensetninger som kan bidra til å tilfredsstille ambisjonen om klimagassreduksjon i prosjektet. I dette arbeidet skal det tas hensyn til produksjonstekniske forhold på anlegget, dvs. betongen må tilpasses de mulighetene og begrensningene som ligger i styring og kontroll av framdrift, herdetiltak, værforhold og naturlige årstidsvariasjoner. Det vil være naturlig å utvikle et utvalg betongsammensetninger med egenskaper tilpasset de ulike rammebetingelsene, slik at det totale betongvolumet samlet har en akseptabel klimagassreduksjon.

Betongene skal i utgangspunktet tilfredsstille kravene til materialsammensetning i NS-EN 206 + NA. Det kan være aktuelt å foreslå fravik fra standarden der dette vurderes forsvarlig ut fra sikkerhets- og bestandighetsmessige hensyn.

## **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 15. januar 2018. Besvarelsen skal innleveres innen 11. juni 2018.

Trondheim 15. januar 2018.



Sverre Smeplass  
Prof. II

# Sammendrag

Byggebransjen preges i dag av et voksende fokus på miljø, blant annet gjennom miljøsertifiseringer og prosjekter kategorisert som passivhus, nullhus og plusshus. Både for å etterlate seg et mindre avtrykk på jorda, men også for å bedre livskvaliteten i byene og for å redusere driftskostnader i løpet av byggets levetid. Dette fører med seg et voksende behov for innovasjon og setter større krav på både leverandører og entreprenører om å levere produkter med lave karbonavtrykk.

Prosjektet Gullhaug Torg 2A er en del av FutureBuilt-programmet, og har planlagt byggestart i Oslo sommeren 2018. Det innebærer at prosjektet skal være et forbildeprosjekt i bransjen, der blant annet klimagassutslippet skal reduseres med 50 % i forhold til et referanseprosjekt. Bæresystemet skal blant annet utføres i plasstøpt betong, noe som medfører store mengder betong. Prosjektet har satt som mål at det samlede klimagassutslippet fra betongen ikke skal overstige  $170 \text{ kg CO}_2\text{-eqv/m}^3$  for å sikre en mest mulig bærekraftig materialbruk. Dette er betydelig lavere enn hva som er nødvendig for å oppnå Lavkarbonklasse A, som regnes som beste praksis i bransjen, og krever dermed tiltak helt utenom det vanlige.

I denne oppgaven er ulike betongsammensetninger utviklet og testet med mål om å tilfredsstille dette målet, samt krav til fasthetsutvikling. Reseptene er utviklet basert på tidligere resepter av samme karakter som har vist gode resultater. Betongene skal i utgangspunktet tilfredsstille kravene i henhold til NS-EN 206+NA. Likevel fraviker enkelte av reseptene standarden ved å teste ytterligere bindemiddelkombinasjoner for å oppnå enda lavere GWP-verdier.

For å utvikle betongresepter med et lavt klimagassutslipp er det hovedsakelig tatt utgangspunkt i å redusere klinkerandelen i betongen ved å erstatte med andre materialer. Det er testet resepter med 50, 60 og 70 % flygeaske av bindemiddelet og med 70 % slagg. Ulempen med disse betongtypene er en langsom fasthetsutvikling samt økt temperaturfølsomhet. Reseptene er derfor herdet ved ulike temperaturer for å kartlegge påvirkningen på fasthetsutviklingen.

Totalt er det utviklet 10 forskjellige resepter. For hver av disse er det utarbeidet en EPD for å kartlegge og sammenligne klimagassutslippet. Alle reseptene ligger godt under kravet på  $170 \text{ kg CO}_2\text{-eqv/m}^3$ , med verdier fra 160 og helt ned mot  $88 \text{ kg CO}_2\text{-eqv/m}^3$ .

I tillegg er herdeforløpet til etterspent dekke og -bunnplate simulert med og uten varmekabler for noen av reseptene. Varmekabler har vist seg å være et effektivt hjelpemiddel for å akselerere fasthetsutviklingen til betongene.

Resultatene fra fasthetsmålingene til de ulike reseptene viser en god fasthetsutvikling for de fleste av reseptene, men er gjennomgående treg ved romtemperatur. I motsetning er fasthetsutviklingen ved økt herdetemperatur enorm og enkelte av reseptene overstiger  $100 \text{ MPa}$ . For flygeaskebetongene overstiger dette det som kan beskrives med gjeldene teori og tyder på at det mer som skjer enn vann/semment- og pozzolanreaksjonen. Den ekstra reaksjonen antas å være en geopolymereffekt som gjør denne betongen til en slags hybridbetong. Med de reseptene som er utviklet er det flere som tilfredsstiller kravene til Gullhaug Torg med tanke på klimagassutslipp og fasthet.



# Abstract

The norwegian construction industry is today characterized by a growing focus on the environment through environmental certifications and projects categorized as passive houses, zero emission buildings and energy plus houses. Both to leave a smaller impact on earth, but also to improve the quality of life in the cities and to reduce operating costs for the building. This brings a growing need for innovation and imposes greater demands on both suppliers and contractors to deliver products with reduced greenhouse gas emission.

The Gullhaug Torg 2A-project is a part of the FutureBuilt program, and has planned construction work in Oslo in the summer of 2018. This means that the project will be a role model project in the industry, which will reduce greenhouse gas emissions by 50 % compared to a reference project. The structural system is to be carried out in concrete, which results in large amounts of concrete. The project has an overall aim that the total greenhouse gas emissions from the concrete should not exceed 170 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m to ensure a sustainable use of materials. This is significantly lower than what is necessary to achieve the Low Carbon Class A, which is considered as best practice in the industry, thus requiring action beyond the ordinary to achieve.

In this assignment, various concrete compositions are developed and tested with the aim of satisfying this goal as well as requirements for strength development. The recipes are developed based on previous recipes of the same nature that have shown good results. The concrete should initially meet the requirements of NS-EN 206+NA. Nevertheless, some of the concrete compositions differ from the standard by testing additional binder combinations to achieve even lower GWP values.

In order to develop concrete preserves with a low greenhouse gas emissions, it is mainly based on reducing the clinker in the concrete by replacing it with different materials. There are tested recipes with 50, 60 and 70 % fly ash of the binder and with 70 % blast furnace slag. The disadvantage of these concrete types is a slow strength development and increased temperature sensitivity. The concrete compositions are therefore cured at different temperatures to map the impact on the properties of the concrete.

A total of 10 recipes have been developed and tested. For each of these, an EPD has been prepared to map and compare greenhouse gas emissions. All recipes are well below the requirement of 170 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup>, with values from 160 and down to 88 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup>.

In addition, the curing process to different types of post tensioned slabs simulated with and without heating cables some of the recipes. Heating cables have proven to be an effective aid to accelerate the curing of the concrete.

The results from the strength tests for the various recipes have shown a good strength development, but are generally slow at room temperature. In contrast, strength development at increased curing temperature is enormous and some of the recipes exceed 100 MPa. For the fly ash concrete, this exceeds what can be described by the current theory and suggests that more is happening than the water/cement and pozzolan reaction. The additional reaction is believed to be a geopolymereffect that makes this concrete a kind of hybrid concrete. With the recipes developed, there are several that meet the requirements of Gullhaug Torg with regard to greenhouse gas emissions and strength.





# INNHold

<b>Figurer</b>	<b>ix</b>
<b>Tabeller</b>	<b>x</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Gullhaug Torg 2A . . . . .	2
1.3 Mål for oppgaven . . . . .	3
1.4 Innhold og oppbygning . . . . .	3
1.5 Avgrensninger . . . . .	4
<b>2 Teoretisk grunnlag</b>	<b>5</b>
2.1 Global Warming Potential (GWP) . . . . .	5
2.2 Environmental Product Declaration (EPD) . . . . .	5
2.3 Tradisjonell betong . . . . .	6
2.4 Lavkarbonbetong . . . . .	7
2.4.1 Lavkarbonbetongklasser . . . . .	7
2.5 Tilsetningsmaterialer . . . . .	8
2.5.1 Silikastøv . . . . .	9
2.5.2 Flygeaske . . . . .	9
2.5.3 Slagg . . . . .	10
2.5.4 K-verdi for pozzolane tilsetningsstoffer . . . . .	10
2.6 Lover og regler . . . . .	13
2.6.1 Bruksbetingelser etter NS-EN 206+NA . . . . .	13
2.6.2 Utvidede bruksbetingelser i NS-EN 206+NA . . . . .	14
2.6.3 Trykkfasthetsklasser . . . . .	16
2.7 Herdeteknologi . . . . .	17
2.7.1 Temperaturutvikling i betong . . . . .	17
2.7.2 Aktiveringsenergi . . . . .	17
2.7.3 Hastighetsfunksjonen . . . . .	18
2.7.4 Påvirkning av pozzolane bindemidler . . . . .	18
2.7.5 Aktivering av sement . . . . .	19
2.8 Geopolymerer . . . . .	20
2.8.1 Bakgrunn . . . . .	20
2.8.2 Aktivering . . . . .	20
2.8.3 Bearbeidbarhet . . . . .	20
2.9 Hybridbetong . . . . .	21
2.9.1 Reaksjonsprosessen . . . . .	22
2.9.2 Effekt av aktivator . . . . .	22
2.10 Programvare - CrackTeSt COIN . . . . .	23
<b>3 Metode</b>	<b>24</b>
3.1 Litteraturstudie . . . . .	24
3.2 Litteratursøk og kildekritikk . . . . .	24
3.3 Oppfølging av Powerhouse Brattørkaia . . . . .	26
3.4 Fortsettelse på tidligere masterprosjekt . . . . .	27

3.5	Laboratoriearbeid . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Laboratorieprogram</b>	<b>29</b>
4.1	Materialer . . . . .	30
4.2	Fremgangsmåte . . . . .	31
4.3	Herdetemperaturer . . . . .	33
4.4	Dosering av X-seed . . . . .	33
4.5	Resepter . . . . .	34
4.5.1	Innledende forsøk med Standard FA . . . . .	34
4.5.2	Del 1 - Aalborg Rapid . . . . .	35
4.5.3	Del 2 - Cemex lavvarmesement . . . . .	36
4.6	Akseptkriterier etter NS-EN 206 . . . . .	38
4.7	Miljødeklarasjoner . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Laboratorieresultater</b>	<b>40</b>
5.1	Bearbeidbarhet . . . . .	40
5.2	Fasthetsutvikling . . . . .	41
5.2.1	Innledende forsøk med Standard FA . . . . .	41
5.2.2	Del 1 - Aalborg Rapid . . . . .	43
5.2.3	Del 2 - Cemex Lavvarmesement . . . . .	45
5.3	Akseptkriterier etter NS-EN 206+NA . . . . .	48
5.3.1	Aksept for resepter med Standard FA . . . . .	48
5.3.2	Aksept for resepter med Aalborg Rapid . . . . .	50
5.4	Miljødeklarasjon . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Simuleringer</b>	<b>53</b>
6.1	Avgrensninger . . . . .	53
6.2	Fremgangsmåte . . . . .	54
6.2.1	Reseptenes aktiveringsenergi . . . . .	54
6.2.2	Måling av varmeutvikling . . . . .	55
6.3	Simulering av dekke . . . . .	56
6.4	Simulering av bunnplate . . . . .	58
6.5	Beregning av fasthetsutvikling . . . . .	59
6.6	Resultat fra simuleringer . . . . .	60
6.6.1	Reseptenes varmeutvikling . . . . .	61
6.6.2	Fasthets- og temperaturutvikling i dekke . . . . .	63
6.6.3	fasthets- og temperaturutvikling i bunnplate . . . . .	67
6.7	Oppsummering . . . . .	68
6.7.1	Dekke . . . . .	68
6.7.2	Bunnplate . . . . .	69
6.8	Egnethet . . . . .	69
6.9	Feilkilder . . . . .	70
<b>7</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>71</b>
7.1	Bearbeidbarhet . . . . .	71
7.1.1	Høy andel flygeaske . . . . .	71
7.1.2	Slagg . . . . .	71
7.2	Fasthetsutvikling . . . . .	72
7.2.1	Innledende forsøk med Standard FA . . . . .	72
7.2.2	Del 1 - Aalborg Rapid . . . . .	73

7.2.3	Geopolymereffekt . . . . .	73
7.2.4	Utnyttelse av økt sluttfasthet . . . . .	74
7.2.5	Del 2 - Cemex Lavvarmesement . . . . .	74
7.3	Gyldighet av Arrheniusligningen . . . . .	75
7.4	Akseptkriterier etter NS-EN 206 . . . . .	77
7.5	Karbonavtrykk . . . . .	78
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>80</b>
9.1	Fasthetsutvikling ved varierende temperatur . . . . .	80
9.2	Ny herdeteknologi . . . . .	80
9.3	Ytterligere testing av hybridbetonger . . . . .	80
9.4	Standardiserte løsninger . . . . .	81
9.5	Elementproduksjon . . . . .	81
9.6	Mild aktiviering av flygeaske . . . . .	81
	<b>Bibliografi</b>	<b>82</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>84</b>

# FIGURER

1.1	Gullhaug Torg 2A (Avantor AS 2017) . . . . .	2
2.1	Tabell NA.9 (Standard Norge 2017) . . . . .	11
2.2	Tabell NA.10 (Standard Norge 2017) . . . . .	11
2.3	Tabell NA.11 (Standard Norge 2017) . . . . .	12
2.4	Utdrag fra tabell NA.12 (Standard Norge 2017) . . . . .	14
2.5	Tabell NA.14 (Standard Norge 2017) . . . . .	15
2.6	Plassering av hybridbetong sammenlignet med ren OPC, OPC med pozzolaner og AAFA (Garcia-Lodeiro et al. 2016) . . . . .	21
3.1	Dekkestøp, Powerhouse Brattørkaia [Foto: Anders Raastad Elgen] . . . . .	26
4.1	Prøvestykke fra resept Slagg 0,55 før testing [Foto: Anders Raastad Elgen] . . . . .	31
5.1	Synkmål for resepter . . . . .	40
5.2	Fasthetsutvikling for Standard FA ved 5 °C . . . . .	41
5.3	Fasthetsutvikling for Standard FA ved 20 °C . . . . .	42
5.4	Fasthetsutvikling for Standard FA ved 35 °C . . . . .	42
5.5	Fasthetsutvikling for Aalborg Rapid ved 20 °C . . . . .	44
5.6	Fasthetsutvikling for Aalborg Rapid ved 35 °C . . . . .	44
5.7	Fasthetsutvikling for resept Slagg 0,55 ved ulike temperaturer . . . . .	46
5.8	Fasthetsutvikling for Cemex Lavvarmesement ved 20 °C . . . . .	47
5.9	Fasthetsutvikling for Lavvarmesement ved 35 °C . . . . .	47
5.10	GWP for betongresepter i A1-A3 . . . . .	52
6.1	Dekkegeometri . . . . .	56
6.2	Bunnplategeometri . . . . .	58
6.3	Varmeutvikling – Aal 50A . . . . .	61
6.4	Varmeutvikling – Slagg 0,45 . . . . .	62
6.5	Temperaturforløp i dekke - Aal 50A . . . . .	63
6.6	Fasthetsutvikling i dekke - Aal 50A . . . . .	64
6.7	Temperaturforløp i dekke - Slagg 0,45 . . . . .	65
6.8	Fasthetsutvikling dekke - Slagg 0,45 . . . . .	66
6.9	Temperaturforløp i bunnplate - Slagg 0,45 . . . . .	67
6.10	Fasthetsutvikling i bunnplate - Slagg 0,45 . . . . .	68
7.1	Oppnådd og beregnet fasthetsutvikling for Aal 70 . . . . .	76

# TABELLER

2.1	Mineraler i sement . . . . .	6
2.2	Lavkarbonbetongklasser med grenseverdier for klimagassutslipp . . . . .	8
2.3	Tabell NA.2 Trykkfasthetsklasser for normalbetong, NS-EN 206+NA. . . . .	16
4.1	Sammensetning av resepter . . . . .	29
4.2	Materialoversikt . . . . .	30
4.3	Fremgangsmåte . . . . .	32
4.4	Herdetemperatur . . . . .	33
4.5	Tilslagets sammensetning . . . . .	34
4.6	Sammensetning av resepter med Standard FA . . . . .	35
4.7	Sammensetning av resepter med Aalborg Rapid . . . . .	36
4.8	Sammensetning av resepter med Cemex Lavvarmesement . . . . .	37
5.1	Fasthetsutvikling for resepter med Standard FA . . . . .	41
5.2	Fasthetsutvikling for resepter med Aalborg Rapid . . . . .	43
5.3	Fasthetsutvikling for resepter med Cemex Lavvarmesement . . . . .	45
5.4	Aksept for Std FA 50 etter NS-EN 206+NA . . . . .	48
5.5	Aksept for Std FA 60 etter NS-EN 206+NA . . . . .	49
5.6	Aksept for Aal 50 etter NS-EN 206+NA . . . . .	50
5.7	Aksept for Aal 60 etter NS-EN 206+NA . . . . .	51
5.8	Aksept for Aal 70 etter NS-EN 206+NA . . . . .	51
6.1	Randbetingelser for dekke . . . . .	56
6.2	Dekkeparametere . . . . .	57
6.3	Utførte simuleringer av dekke . . . . .	57
6.4	Randbetingelser for bunnplate . . . . .	58
6.5	Bunnplateparametere . . . . .	59
6.6	Utførte simuleringer av bunnplate . . . . .	59
6.7	Betongparametere . . . . .	60
6.8	Tid til oppnådd 25 MPa . . . . .	66



# KAPITTEL 1 INTRODUKSJON

## 1.1 BAKGRUNN

Samfunnet står i dag foran store utfordringer knyttet til miljøet og utslipp av klimagasser. Byggebransjen står for en stor del av dette, med hele 36 % av CO<sub>2</sub>-utslippet (Hamdy et al. 2013). Dette er mye på grunn av det store forbruket av ulike byggematerialer, og da spesielt betong som er det mest brukte byggematerialet på verdensbasis. Bindemiddelet som blir benyttet i betongen består i hovedsak av portlandsement. Produksjon av portlandsement alene står for 5–8 % av det globale menneskeskapt CO<sub>2</sub>-utslippet (Sharp et al. 2010), og har derfor et stort miljømessig forbedringspotensiale.

Til tross for det store utslippet blir betong fortsatt valgt fremfor andre materialer i større eller mindre grad i omtrent alle byggeprosjekter. Grunnen til dette er at betong har veldig gode materialegenskaper knyttet til styrke, allsidighet, bestandighet og kostnad, som er vanskelig å konkurrere med.

Arbeidet med å utvikle nye konkurransedyktige materialer og løsninger er uten tvil viktig. Problemet med dette er at arbeidet med å finne langvarige og gode løsninger tar lang tid, mens det allerede på dagens prosjekter er stor etterspørsel etter løsninger som kan tas i bruk med en gang for å redusere klimagassutslippet. Denne etterspørselen skaper et behov for å finne løsninger som kan iverksettes umiddelbart. Selv om løsningene som velges ikke nødvendigvis er de beste langsiktige løsningene på klimagassutslipp, så vil de gi en umiddelbar forbedring, samtidig som de vil gi god lærdom og erfaring å ta med seg videre.

Det bygges og planlegges stadig flere plussusprosjekter, og etterhvert som størrelsen på byggene øker, stilles det større krav til materialene som benyttes for å kunne oppnå et energioverskudd i løpet av byggets livsløp. Det betyr i praksis at jo mindre energikrevende løsninger og materialer som benyttes, jo færre solceller trengs for å oppnå dette energioverskuddet.

I tidligfasen til et byggeprosjekt legges de første forutsetningene for hvor miljøvennlig bygget kan og vil bli. Arkitektens valg om hvordan bygget skal se ut legger store føringer for materialbruk og valg av bæresystem. Geometrien vil avgjøre hvilket bæresystem som lønner seg, og for å holde karbonavtrykket nede bør det etterstresves å optimalisere konstruksjonen med tanke på materialbruk.

Plasseringen av bygget legger også føringer for energibruken, og det er viktig å undersøke hvilke produkter som tilgjengelig i nærområdet. Store transportavstander kan gi unødvendig tillegg i karbonregnskapet. Utslippet for ulike bygningsdeler kan kalkuleres spesifikt for hvert prosjekt for å ta høyde for transportavstander og lokale forhold hos produsentene. På denne måten kan ulike alternativer sammenlignes både på grunnlag av miljøhensyn og på pris.

I denne oppgaven undersøkes mulighetene for å redusere utslippene fra selve betongen ved hjelp av resepttekniske tiltak. Samtidig med dette arbeidet ble det første energipositive kontor-nybygget i Norge oppført på Brattørkaia i Trondheim. Dette bygget består av etterspente betongdekker og har presset grensene på flygeaske-innhold langt for å redusere den innebygde energien. Prosjektet er på flere måter et pionérprosjekt og har bidratt til

mange nye erfaringer som nå videreutvikles for å benyttes i flere prosjekter fremover.

## 1.2 GULLHAUG TORG 2A

Gullhaug Torg, illustrert i Figur 1.1, er nå under planlegging og har byggestart sommeren 2018. Dette prosjektet er et forbildeprosjekt i FutureBuilt-programmet med høye ambisjoner knyttet til både miljø og arkitektur, der det arkitektoniske og det tekniske skal utfylle hverandre. På bakgrunn av byggets irregulære geometri og erfaringene gjort ved Powerhouse Brattørkaia er det valgt å benytte samme type bæresystem; etterspente betongdekker.

Bygget består av et 16 etasjes høyhus med et tilstøtende bygg på 6 etasjer. Det skal bli et kombinasjonsbygg med kontorer, bolig og næring, og har et mål om 50 % samlet reduksjon av det totale klimagassutslippet. Betongen utgjør en stor del av materialbruken og vil derfor bidra med et vesentlig utslipp. Lærdommen fra betongen som er benyttet på Powerhouse Brattørkaia vil derfor være viktig for å nå disse målene, og ambisjonen er å presse disse grensene enda lenger.



Figur 1.1: Gullhaug Torg 2A (Avantor AS 2017)

Valget om å benytte etterspente dekker kommer som sagt på bakgrunn av byggets irregulære geometri, ettersom bæresystem av stål i kombinasjon med hulldekker i større grad behøver en enkel geometri hvor monteringen kan skje uten store tilpasninger. Plasstøpte betongdekker kan derimot formes etter ønske, og gir større frihet til plassering av bærevegger og søyler. Ved å armere betongdekkene med spennarmering kan dekkene ta større spenn og tykkelsen på dekkene kan reduseres betraktelig. Dette fører til en reduksjon i materialforbruket, som gir et positivt bidrag til klimagassregnskapet.

For å sikre fremdriften i produksjonen er det satt enkelte krav til betongen. Det er satt et mål om at armeringen skal spennes opp etter 3 døgn, og på grunn av de store kreftene som påføres betongen ved oppspenning kreves det en minimum trykkfasthet i betongen på 25 MPa.



Armeringskabelen er forankret i den ene siden av dekket og spennes opp fra den andre enden. Dette skaper tykkspenninger i hele dekke. Trykkspenningene fra spennkabelen vil motvirke strekkspenningene som oppstår i strekksonen som følge av de vertikale kreftene. Dette muliggjør store spenn og slankere dekkekonstruksjoner. På den måten utnyttes materialet enda bedre enn tradisjonell slakkarmering. Sammenlignet med slakkarmert alternativ, kan dekketykkelsen reduseres med opptil 30 prosent. Dette reduserer egenvekten til dekket og dermed også belastningene på søyler og fundamenter. (Spenneteknikk 2011).

### 1.3 MÅL FOR OPPGAVEN

Hovedmålet for denne oppgaven er å prøve og teste ulike betongsammensetninger som kan bidra til å tilfredstille ambisjonsnivået til Gullhaug Torg med reduksjon av klimagassutslipp. For å bistå dette overordnede målet, er målet for totalt klimagassutslipp for det totale betongvolumet for prosjektet satt til 170 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup>. Ulike betongresepter testes ut med hensyn til å være innenfor dette målet og allikevel ha tilstrekkelig fasthet.

Pozzolaner har vist seg å spille en viktig rolle i utviklingen av betonger med et lavt karbonavtrykk og redusert bunden energi – enten som erstatningsmateriale for sement eller som et selvstendig bindemiddel. Flygeaske betraktes som et slikt materiale og brukes ofte sammen med vanlig portlandsement, men har også en kjemisk sammensetning som gir den muligheten til å virke som et selvstendig bindemiddel. Dette åpner opp for å redusere store deler av sementen i betongen og dermed senke karbonavtrykket betraktelig.

Et av målene i denne oppgaven er å teste ulike betongresepter med høye flygeaskeandeler for å bedømme i hvilken grad flygeaske kan være med på å redusere klimagassutslippet og allikevel tilfredsstille de krav og forhold som forekommer. I likhet med flygeaske er masovnslagg også et materiale med bindemiddelegenskaper og lavt klimagassutslipp. Derfor går en del av oppgaven ut på å teste hvordan slagget kan være med på å redusere klimagassutslippet.

I tillegg til å teste ulike betongsammensetninger skal de vurderes opp mot de produksjonstekniske forholdene på anlegget – både framdrift, herdetiltak og værforandringer. Egenskapene til betongsammensetningene skal vurderes opp mot de ulike rammebetingelsene som oppstår som følge av dette. Herdetemperatur er derfor en viktig del av denne oppgaven.

Det endelige målet med oppgaven er at resultatene fra laboratoriet skal benyttes til å vurdere hvilke resepter som anbefales å bruke i de ulike konstruksjonsdelene til Gullhaug Torg ved ulik tid. Dette innebærer at betongsammensetningene skal oppnå et lavt karbonavtrykk og tilstrekkelig fasthet, samtidig som forhold på byggeplassen og utetemperatur tas hensyn til.

### 1.4 INNHOLD OG OPPBYGNING

Som et innledende arbeid til denne masteroppgaven ble det skrevet et prosjektoppgave om betong med høyt flygeaskeinnhold, både med og uten kjemisk aktivering. Dette dannet et godt teoretisk grunnlag som har blitt benyttet i denne rapporten. Mye av det teoretiske innholdet fra prosjektoppgaven er videreført i denne avhandlingen.

Laboratoriearbeidet i denne oppgaven bygger videre på arbeidet som er utført av Stud.techn Frederic Aarnæs Hermansen høsten 2017 og Stud.techn Fredrik Magnussen Hanserud våren 2017. I arbeidet utførte de laboratorieforsøk med lavenergibetong til Powerhouse Brattørkaia. De tok for seg betong med høy andel flygeaske, slaggbetong og alkaliaktivering av flygeaske. På bakgrunn av funnene fra dette arbeidet ble noen av de mest lovende reseptene med høy andel flygeaske videreført. I tillegg ble nye resepter utarbeidet med andre typer sement.

Rapporten tar for seg fasthetsmålinger for et utvalg betongresepter herdet ved ulike temperaturer. Reseptene består av to ulike typer sementer med et totalt flygeaskeinnhold på 50, 60 og 70 % av bindemiddelet, i tillegg til 10 % Silikastøv for å redusere klinkerinnholdet ytterligere. I tillegg til disse reseptene blir også et utvalg resepter med slaggsement testet.

For å danne et bilde av hvordan disse reseptene vil oppføre seg i praksis blir også simuleringer av herdeforløpet utført. Disse blir utført i programmet CrackTeSt COIN på bakgrunn av målt fasthets- og varmetvikling. Med dette grunnlaget kan reseptene vurderes for Gullhaug Torg 2A.

For hver resept er det utarbeidet en EPD for å kunne sammenligne hvor stort utslag de ulike reseptene vil gi på byggets totale klimagassutslipp.

### 1.5 AVGRENSNINGER

Rapporten omhandler i hovedsak bestandighetsklasse M90, med unntak av én resept som tilfredsstiller bestandighetsklasse M45. Bestandighetsklassene utover M90 innebærer andre eksponeringsmekanismer resulterer i ytterligere krav som ikke tilfredstilles av de utvalgte reseptene.

Arbeidet fokuserer kun på fasthetsutvikling for de observerte reseptene, det er valgt å ikke utføre noen tester knyttet bestandighet.

Simuleringer i oppgaven avgrenser seg til kun to ulike resepter og ved et lite utvalg varierende herdeforhold. Simuleringene er kun utført for å danne et bilde av noen tenkelige situasjoner, ikke for å gjøre en fullstendig simulering av de ulike alternativene til prosjektet.

# KAPITTEL 2 TEORETISK GRUNNLAG

## 2.1 GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)

Alle materialer og produkter som benyttes i et prosjekt fører med seg et utslipp av ulike klimagasser. Både type klimagasser og mengder avhenger blant annet av hvilke prosesser som kreves, energikilder på fabrikken, transportmetoder og avstander.

For å gjøre utslippet fra ulike prosesser sammenlignbart har Global Warming Potential (GWP) blitt utviklet. GWP gir et mål på hvor mye energi som absorberes i 1 tonn av gassen over en gitt tidsperiode, sammenlignet med 1 tonn karbondioksid, CO<sub>2</sub> (United States Environmental Protection Agency u.å). Levetiden til gassene varierer, derfor settes ofte 100 år som en fornuftig tidsperiode for sammenligningen. GWP verdien oppgis med benevnningen kg CO<sub>2</sub>-eqv.

## 2.2 ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION (EPD)

En miljødeklarasjon er definert av EPD-Norge (2017) som et kortfattet dokument som oppsummerer miljøprofilen til en komponent, et ferdig produkt eller en tjeneste på en standardisert og objektiv måte. EPDen lages på bakgrunn av en LCA (Life Cycle Assessment/livssyklusanalyse) for produktet etter standardisert metode. Standardiseringen gjør det mulig å sammenligne lignende produkter mot hverandre, uavhengig av leverandør eller produksjonsland – blant annet ved hjelp av GWP.

EPDen skiller mellom hvor i prosessen eller levetiden miljøpåvirkningen kommer fra, ved å benytte standard faser fra uttak av råmaterialer og frem til håndteringen av avfallet etter endt livssløp. Kravene til betongen i denne oppgaven er satt til å gjelde produktfasen A1-A3, men vil også ta for seg tiltak som vil føre til et økt bidrag i konstruksjons-/installasjonsfasen, som f.eks oppvarming av betongen etter støp.

- A1 - Råmaterialer
- A2 - Transport av råvarer
- A3 - Tilvirkning av betongen
- A4 - Transport til byggeplass
- A5 - Konstruksjon og installasjon

For betong er det fase A1 som gir det største utslaget, spesielt siden produksjonen av sement faller under denne kategorien. Når råvarer fra ulike land sammenlignes, vil det kunne gi et betydelig utslag i både A1 og A2 ettersom produsentene benytter ulike produksjonsmetoder og energikilder i tillegg til at det kan gi store forskjeller i transportavstand.

EPDene for hvert produkt som benyttes i prosjektet brukes igjen ved utarbeidelsen av en LCA for bygningen og viser dermed hvordan produktet bidrar til det totale energiforbruket bygningen vil ha i hele sin levetid. Desto lavere GWP hvert delmateriale eller produkt i bygget har, desto lavere vil det totale regnskapet for bygget bli. Ved å redusere utslippet

fra betongen mest mulig, vil man få større frihet til å velge produkter senere i prosessen uten at det går på bekostning av den totale målsetningen.

## 2.3 TRADISJONELL BETONG

Tradisjonell betong består hovedsaklig av vann, sement, og tilslag – stein, grus og sand. Forholdet mellom disse tre bestanddelene varieres for å påvirke betongens egenskaper. Andre tilsetningsmaterialer tilsettes gjerne for å påvirke betongens egenskaper ytterligere, eller for å oppnå spesielle egenskaper – både i fersk og herdet tilstand (Gjerp et al. 2004).

Den mest brukte sementen i bygningsindustrien idag er portlandsement (OPC). Portlandsement produseres ved at kalkstein og mindre mengder kvarts, jernoksid og aluminiumoksid males til et fint pulver – såkalt råmel. Deretter brennes råmelet i roterovner ved en temperatur på ca. 1400°C. Ved brenningen spaltes CO<sub>2</sub> av kalsiumkarbonatet, CaCO<sub>3</sub>, i kalksteinandelen av råmelet. Denne kalsineringen danner kalk (CaO) som sammen med de andre mineralene danner sementklinker, se ligning 2.1. Klinkeren males opp og danner portlandsement. I tillegg kan pozzolane materialer tilsettes eller males inn sammen med klinkeren (Kjellsen 2015).



Vann sammen med sement starter en kjemisk reaksjon som gir et fast reaksjonsprodukt. Bindemiddelegenskapene til sement er bestemt av dens sammensetning, finhet og pozzolaninnhold. I løpet av denne kjemiske reaksjonen hydratiserer sementen og danner sementgel som består av C-S-H-forbindelser. Det er C-S-H-forbindelsene som gir betongen fasthet, stivhet og bestandighet (Gjerp et al. 2004).

Størstedelen av portlandsement – 90-95 % – utgjør de fire hovedmineralene. Disse klinkermineralene har innvirkning på sementens egenskaper som varmeutvikling, fasthetsutvikling, endelig fasthet og bestandighetsegenskaper (Gjerp et al. 2004). Disse mineralene er oppsummert i Tabell 2.1.

Tabell 2.1: Mineraler i sement

Navn	Kjemisk formel	Symbol	Vektprosent
Trikalsiumsilikat	$3CaO * SiO_2$	$C_3S$	55-60 %
Dikalsiumsilikat	$2CaO * SiO_2$	$C_2S$	14-20 %
Trikalsiumaluminat	$3CaO * Al_2O_3$	$C_3A$	5-10 %
Tetrakalsiumaluminatferritt	$4CaO * Al_2O_3 * Fe_2O_3$	$C_4AF$	5-10 %

Av de fire mineralene er det  $C_3S$  og  $C_2S$  som bidrar vesentlig til fastheten og dannelsen av C-S-H. Reaksjonene er vist i formel 2.2 for  $C_3S$  og 2.3 for  $C_2S$ .



## 2.4 LAVKARBONBETONG

Lavkarbonbetong defineres som betong der det er gjort ekstra tiltak for å begrense klimagassutslipp. Lavkarbonbetong rangeres ved å beregne hvor stort klimagassutslipp betongen bidrar med målt i  $CO_2$ -ekvivalenter. Tiltak for å redusere klimagassutslipp er å erstatte en del av sementen med alternative bindemidler. De aktuelle bindemidlene er silikastøv (SF), flygeaske (FA) og slagg. Silikastøv og flygeaske defineres som pozzolane bindemidler, mens slagg defineres som et latent hydraulisk bindemiddel. Silikastøv, flygeaske og slagg regnes som klimanøytrale som følge av at de er restprodukter fra industri der klimagassutslippet knyttes til hovedproduktene. Ved å erstatte klinkerandelen i bindemiddelet med disse materialene reduseres klimagassutslippet til betongen gjennom redusert klinkerandel. Bruk av pozzolaner påvirker betongens egenskaper – derfor er det viktig med en forståelse av fordeler og utfordringer ved bruk av disse som erstatningsmateriale for klinker.

### 2.4.1 LAVKARBONBETONGKLASSER

Norsk betongforening (2015) har definert en bransjenorm for lavkarbonbetong i Norge. Klimagassutslippet er målsatt som  $CO_2$ -ekvivalenter der bidraget fra en gass er sammenlignet med ett tonn utslipp av  $CO_2$  vektet i henhold til Global Warming Potential (GWP). Norsk betongforening gir grenser for klimagassutslippet for tre ulike nivåer av lavkarbonbetong:

- Lavkarbonklasse A – Strengest. Krever spesielle tiltak.
- Lavkarbonklasse B – Kan oppnås med ordinære resepttekniske tiltak.
- Lavkarbonklasse C – Kan oppnås med enkle resepttekniske tiltak.

Disse klassene er definert med grenseverdier for klimagassutslipp for et utvalg av kombinasjoner med fasthetsklasser og bestandighetsklasser etter NS-EN 206+NA. Alle verdiene for klassene er vist i Tabell 2.2. Kravene er ikke påvirket av frostbestandighet. Det vil si at det samme kravet stilles for M45 og MF45, og samme for M40 og MF40. Bransjereferansen er basert på innhentede EPDer fra forskjellige betongprodusenter i alle regioner. Referanseverdien representerer en konservativ verdi for klimagassutslipp ved ordinær produksjon. Bransjeverdien kan benyttes til å anslå redusert utslipp ved bruk av lavkarbonbetong (Norsk betongforening 2015).

Tabell 2.2: Lavkarbonbetongklasser med grenseverdier for klimagassutslipp

	B20	B25	B30	B35	B35	B45	B55
	M90	M90	M60	M(F)45	M(F)40	M(F)40	M(F)40
	Maksimalt tillatt klimagassutslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv. pr. m <sup>3</sup> 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

Klimagassutslippet oppgis for 1 m<sup>3</sup> betong og tar for seg alt utslipp fra råvareuttak til produsentens fabrikkport. Grenseverdiene skal kontinuerlig oppdateres slik at miljømålene til ulike byggeprosjekt er avstemt med de produktene som er tilgjengelige på markedet (Norsk betongforening 2015).

## 2.5 TILSETNINGSMATERIALER

Tilsetningsmaterialer som benyttes er som regel pozzolaner eller latent hydrauliske bindemidler. Disse tilsetningsmaterialene fungerer som bindemiddel når de kombineres med sement ved at de reagerer med kalsiumhydroksiden (CH) fra vann/sement-reaksjonen – det må derfor alltid være en viss mengde sementklinker i sementen.

Pozzolan:

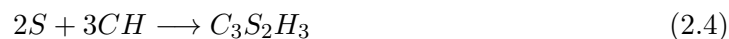
- Flygeaske – restprodukt fra kullfyrte kraftverk
- Silikastøv – kondensert røykgass fra produksjon av ferrosilisium- eller silisiummetall

Latent hydraulisk:

- Slagg – masovnslag fra råjernproduksjon

(Norsk betongforening 2015)

Pozzolanreaksjonen er som følger, se ligning 2.4



### 2.5.1 SILIKASTØV

Silikastøv blir filtrert ut av røykgassene ved silisium- og ferrosilisiumproduksjon, og har et høyt  $\text{SiO}_2$ -innhold (S) samtidig som det er veldig finkornet. Dette gjør silikastøv svært reaktivt, og danner C-S-H-gel med kalsiumhydroksid fra hydratiseringsprosessen til sement. Det at silikastøv er meget finkornet gjør den til en veldig effektiv filler. Samtidig bidrar silikastøvet til betydelig bedre stabilitet mot vannutskillelse og steinseparasjon. Dermed gir silikastøv betongen økt støpelighet og styrke, samtidig som det vil ha gunstig effekt for betongens klimagassutslipp (Norsk betongforening 2015).

- $\text{SiO}_2$ -innhold – 85–98 %
- Sfæriske partikler – 0,1  $\mu\text{m}$  i diameter
- Spesifikk overflate – 20 000  $\text{m}^2/\text{kg}$

(Sellevold 2008)

### 2.5.2 FLYGEASKE

Flygeaske er et biprodukt fra kullfyrte kraftverk. Slike kraftverk er ikke benyttet i Norge, derfor er mesteparten av flygeaske importert – hovedsaklig fra Danmark. Mer enn 85 % av de fleste flygeasker består av kjemiske forbindelser mellom silisium, aluminium, jern, kalsium og magnesium (Malhotra og Ramezani-pour 1992). Flygeaskens sammensetning er avhengig av den kjemiske sammensetningen til kullet som brennes på kraftverket og varierer i stor grad ulike steder i verden.

Flygeaske benyttes både som tilsetningsmateriale og innmalt i sementen ved betongproduksjon. Flygeaske innmalt i sementen blir mye mer finkornet enn flygeaske tilsatt ved betongproduksjon, og vil derfor ha en annen påvirkning på betongens støpelighet og fasthet. Allikevel er det vanlig å male flygeaskesementer en del finere enn standard portlandsementer for å kompensere for en tregere fasthetsutvikling. Betonger med flygeaske vil som regel ha minst like god støpelighet som betonger uten flygeaske, og ofte bedre stabilitet (Norsk betongforening 2015).

- $\text{SiO}_2$ -innhold – 45–55 %
- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -innhold – 20–30 %
- Sfæriske partikler – 10–20  $\mu\text{m}$  i diameter
- Spesifikk overflate – 300–500  $\text{m}^2/\text{kg}$

(Sellevold 2008)

## 2.5.3 SLAGG

Slagg er et biprodukt fra produksjon av råjern, og er latent hydraulisk. Det vil si at slagg er potensielt selvhydratiserende i kontakt med vann. Denne prosessen skjer for sakte for at slagg kan benyttes som et selvstendig bindemiddel, og trenger derfor aktivering av enten kalsiumhydroksid eller sulfater for å fremskynde hydratiseringsprosessen. I portland-slaggsementer er aktivatoren kalsiumhydroksid. Dermed vil det alltid være sement i slaggbetong, og slagg kan benyttes i mye større mengder enn silikastøv og flygeaske som følge av kalkinnholdet. Sammensetningen til slagg kommer an på fremstilling av hovedproduktet, og burde alltid ha et høyt kalkinnhold –  $\sim 40\%$  – for bruk i sement. Slagg er for det meste innmalt med sement på forhånd på fabrikk – skjeldent tilsatt (Sellevold 2008).

- $\text{SiO}_2$ -innhold – 33–43 %
- CaO-innhold – 35–45 %
- Formløse partikler – 10–20  $\mu\text{m}$  i diameter
- Spesifikk overflate – 300–500  $\text{m}^2/\text{kg}$

(Sellevold 2008)

## 2.5.4 K-VERDI FOR POZZOLANE TILSETNINGSSTOFFER

K-verdimetoden er basert på sammenligning av bestandighetsegenskaper mellom en betong med ren portlandsement, og en betong der en del av sementen er erstattet med tilsetningsmaterialer. Dette gjøres ved å erstatte termen vann/sement-forhold med  $\text{vann}/(\text{sement} + k \times p)$  der  $p$  er tilsetningsmaterialet og  $k$  er en virkningsfaktor for det aktuelle tilsetningsmaterialet. Denne termen omtales som effektivt masseforhold. Sementen som omtales er alltid portlandsement alene, og omregnet mengde tilsetningsmateriale er vekten av materialet multiplisert med faktoren  $k$  for det aktuelle materialet. Merk at denne faktoren kan variere om materialet er innmalt eller tilsatt.

K-verdien gir uttrykk for hvor mange deler sement som kan erstattes med et tilsetningsmateriale uten at egenskapene endres og er definert i NS-EN 206+NA. Dette gjør det mulig å beregne et ekvivalent masseforhold  $m$  og effektiv bindemiddelmengde  $c_{eqv}$ , gitt i formel 2.5.

$$m = \frac{w}{c_{eqv}} = \frac{w}{c + k \times p} \quad (2.5)$$

Virkningsfaktoren  $k$  sier noe om tilsetningsmaterialets effekt på betongens egenskaper, og varierer på bakgrunn av hvilke egenskaper man er ute etter. Dette kommer frem i grenseverdiene som er satt for de ulike bestandighetsklassene. Ved beregning av masseforhold og effektiv bindemiddelmengde med flygeaske benyttes  $k$  som fastsatt i tabell NA.9 i NS-EN 206+NA, se Figur 2.1. Merk at dette gjelder tilsatt flygeaske – ikke innmalt. Innmalt flygeaske, som i Standard FA, har  $k = 1,0$ .



Sementtype	Bestandighetsklasse <sup>a, b, c</sup>					
	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 <sup>d</sup> , CEM II/A-L <sup>d</sup> , CEM II/A-LL <sup>d</sup> CEM II/A-D <sup>d</sup> , CEM II/A-M <sup>e, d</sup>						
CEM II/B-V, CEM II/B-S <sup>d</sup> , CEM II/B-M <sup>e, d</sup>				-	-	-
Øvrige sementer	-	-	-	-	-	-

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

<sup>b</sup> "-" 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).

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

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

<sup>e</sup> 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).

Figur 2.1: Tabell NA.9 (Standard Norge 2017)

Det at *k*-verdien ligger på 0,4 for M60 har med å gjøre at flygeaske er mindre effektiv mot karbonatisering som er eksponeringsmekanismen en M60 skal tåle. Fotnote «d» i NA.9, Figur 2.1, sier at *k*-verdier kan brukes for en mengde tilsatt flygeaske inntil andelen portlandsementklinker er redusert til 65 % av total bindemiddelmengde. Dette gir en øvre grense for hvor mye tilsatt flygeaske man kan benytte ved at en viss andel klinker må være i bindemiddelet. Øvrige sementer har ingen *k*-verdi. Dette har med å gjøre at disse allerede inneholder store mengder innmalte tilsetningsstoffer, som for eksempel slagg, dermed tilatter ikke standarden å ytterligere erstatte klinkeren i sementen. Flygeaske og silikastøv kan derimot benyttes som filler.

Silikastøv er et meget effektivt tilsetningsmateriale grunnet høyt SiO<sub>2</sub>-innhold og høy spesifikk overflate sammenlignet med flygeaske. Som følge av dette og silikastøvet høye SiO<sub>2</sub>-innhold blir *k*-verdien høy. Ved beregning av masseforhold og effektiv bindemiddelmengde med silikastøv benyttes *k* slik som det fremkommer i tabell NA.10, se Figur 2.2.

Sementtype	Bestandighetsklasse <sup>a, b</sup>					
	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	-	-	-	-	-	-

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

<sup>b</sup> "-" 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).

Figur 2.2: Tabell NA.10 (Standard Norge 2017)

Ved beregning av av masseforhold og effektiv bindemiddelmengde med slagg benyttes *k* slik som det fremkommer i tabell NA.11 i NS-EN 206+NA, se Figur 2.3. Merk at det her også gjelder tilsatt materiale – ikke innmalt.

Sementtype	Bestandighetsklasse <sup>a, b, c, d</sup>					
	M90	M60	M45	MF45	M40	MF40
CEM I	0,7	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8
CEM II/A-V, CEM II/A-S, CEM II/A-L <sup>e</sup> , CEM II/A-LL <sup>e</sup> , CEM II/A-D <sup>e</sup> , CEM II/A-M <sup>e, f</sup>						
CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II/B-M <sup>e, f</sup>				-	-	
CEM III/A, CEM III/B	-	-	-	-	-	-
Øvrige sementer	-	-	-	-	-	-

a Innblanding av slagg 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 CEM 42,5. For lavere styrkeklasser reduseres verdiene med 0,1.

d Angitt *k*-verdi brukes for hele den tilsatte mengden slagg (ut over eventuelt innhold i sementen) inntil beregningsmessig grense for totalt slagginhold er nådd, se under.

e *k*-verdien kan brukes for en mengde tilsatt slagg inntil andel Portlandsementklinker (K) er redusert til 40 % av total bindemiddelmengde.

f 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).

Figur 2.3: Tabell NA.11 (Standard Norge 2017)

Fotnote «e» i NA.11, Figur 2.3, sier at *k*-verdier kan brukes for en mengde tilsatt slagg inntil en andel portlandsementklinker er redusert til 40 % av total bindemiddelmengde.

For innmalte tilsetningsstoffer settes  $k = 1,0$  for både slagg og flygeaske. Dette betyr at et pozzolant materiale kan ha flere *k*-verdier – noe som må tas hensyn til ved beregning av ekvivalent masseforhold og effektiv bindemiddelmengde.

## 2.6 LOVER OG REGLER

Som andre byggearbeider styres også betongarbeider gjennom offentlige lover og forskrifter. I tillegg benyttes både norske og internasjonale standarder. Mesteparten av byggevirksomheten i Norge er regulert igjennom tre lover: Plan- og bygningsloven, vegloven og lov om oljeutvinning (Gjerp et al. 2004). Dette er kun generelle lover som ikke gir noen tekniske løsninger eller krav til utførelse, men ansvarsforhold og -område.

NS-EN 206+NA gjelder betong til plasstøpte konstruksjoner, prefabrikkerte konstruksjoner og lastbærende prefabrikkerte produkter for bygg- og anleggskonstruksjoner. Betongen kan være blandet på byggeplass, ferdigbetong eller framstilt på fabrikk. Standarden tar for seg produksjon av betong samt transport til byggeplassen. NS-EN 206+NA inneholder preaksepterte løsninger som man kan følge, og ved å følge disse løsningene skal betongen med trygghet tilfredstille den tiltenkte bruken.

### 2.6.1 BRUKSBETINGELSER ETTER NS-EN 206+NA

Standarden gir retningslinjer for bruken av tilsetningsmaterialer som erstatningsmateriale for sement. Reglene i nasjonalt tillegg overstyrer anbefalingene gitt i standardens hoveddel knyttet til bruk av tilsetningsmaterialer. Det settes ingen øvre grense for hvor mye tilsetningsmateriale som kan anvendes, men en grense for hvor mye som kan tas hensyn til i den effektive bindemiddelmengden, og kan derfor fritt brukes som filler uten bindemiddelegenskaper. Disse grenseverdiene avhenger av type sement og type tilsetningsmateriale. NA.5.2.5.2.2, NA.5.2.5.2.3 og NA.5.2.5.2.4 gir den største mengden flygeaske, silikastøv og slagg som det kan tas hensyn til ved beregning av masseforhold og minste effektive bindemiddelmengde, som er følgende:

- (Tilsatt flygeaske + flygeaske i sementen)/bindemiddel = 0,35
- (Tilsatt silikastøv + silikastøv i sementen)/bindemiddel = 0,11
- (Tilsatt slagg + flygeaske og slagg i sementen)/bindemiddel = 0,60
- (Tilsatt slagg + slagg i sementen)/bindemiddel = 0,80

Bruk av slagg har et enormt potensiale siden det kan benyttes i såppas store mengder. Slagg er kun tilgjengelig i ferdige sementer med svært høy prosentandel – ikke som tilsetningsmateriale (Norsk betongforening 2015). NS-EN 206+NA setter regler for kombinasjoner av flere tilsetningsmaterialer i samme betongresept. Der det benyttes en kombinasjon av tilsetningsmaterialer, skal kravene til hvert enkelt materiale oppfylles. Høyere doseringer kan benyttes, men da regnes den overskridende mengden som filler – altså  $k = 0,0$ .

Standarden setter også krav til minste effektive bindemiddelmengde for de ulike bestandighetsklassene med største masseforhold for de ulike sementtypene. Dette er for å sikre betongens støpelighet. Betongens effektive bindemiddelmengde er «*sement* +  $\sum k * p$ ». Det er i forhold til denne mengden kravet til tilsatt pozzolan og minste klinkermengde er. Kravet for minste effektive bindemiddelmengde kan ses i sin helhet i tabell NA.12 i standarden, og et utdrag av denne tabellen kan ses i Figur 2.4.

Egenskap	Bestandighetsklasse					
	M90	M60	M45	MF45 <sup>a, b, c</sup>	M40 <sup>d</sup>	MF40 <sup>a, b, c, d</sup>
Minste luftinnhold i fersk betong				4 %		4 %
Minste effektive bindemiddelmengde (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>e</sup>	225	250	300	300	330	330

Figur 2.4: Utdrag fra tabell NA.12 (Standard Norge 2017)

Standarden setter også krav til største masseforhold for bestandighetsklassene. Denne grensen er 0,90 for M90, 0,60 for M60 osv. Det er noen ytterligere variasjoner for sementtypene. Disse kan ses i tabell NA.12 i NS-EN 206+NA.

### 2.6.2 UTVIDEDE BRUKSBETINGELSER I NS-EN 206+NA

Selv om standarden åpner for en rekke bindemiddelkombinasjoner som bidrar til et redusert klimagassutslipp, kan det være hensiktsmessig å utvide disse grensene ytterligere for et enda mer redusert klimagassutslipp. Det er mulig å gjøre dette og allikevel være i samsvar med standarden.

Standarden åpner for at en kan dokumentere nye eller endrede bruksbetingelser for spesifikke produkter eller kombinasjoner av produkter. Det kan være hensiktsmessig å utvide bruksbetingelsene for sementer og bindemiddelkombinasjoner, for eksempel kan man oppnå miljømessige gevinster ved å benytte enda høyere doseringer av tilsetningsmaterialer enn det standarden anbefaler. For eksempel kan en høyere  $k$ -verdi for innblanding av tilsetningsmaterialer dokumenteres, og på den måten oppnå et større bidrag fra disse.  $k$ -verdier for flygeaske og slagg kan derimot ikke dokumenteres til å være høyere enn 1,0. Standarden beskriver klare regler for hvordan betongens egenskaper skal dokumenteres.

Sementer og bindemiddelkombinasjoner skal ha dokumentert egnethet i henhold til de eksponeringsmekanismene som bestandighetsklassen er beregnet for ut ifra tabell NA.15 i NS-EN 206+NA. Denne egnetheten dokumenteres gjennom metoder for prøving av eksponeringsmekanismer som det er beskrevet i tabell NA.14 i NS-EN 206+NA, se Figur 2.5. Om en benytter en betong med endrede bruksbetingelser som er dokumentert for egnethet, er betongen i samsvar med NS-EN 206+NA.

Påkjenningsmekanisme	Prøvmingsmetode	Kommentarer	Akseptkriterium
Karbonatisering <sup>a</sup>	NS-EN 13295	Forlenget eksponeringstid til 16 uker	Ikke større karboniseringsdybde etter avsluttet eksponering enn i referanseprøven
	CEN/TS 12390-10 (langtidsprøving)	Eksponeringstid minst 2 år. Karboniseringsdybden bestemmes etter henholdsvis 1 og 2 år	
Klorider	CEN/TS 12390-11 <sup>b</sup>	Konsentrasjonen av NaCl økes til 6 %	Ikke høyere diffusjonskoeffisient enn for referanseprøven
	CEN/TS 12390-11 <sup>b</sup> (langtidsprøving)	Eksponeringstiden forlenges til 2 år	
Frost i våt tilstand <sup>c</sup>	CEN/TS 12390-9	"Slab test" med saltløsning som frysemedium <sup>d, e</sup>	Avskallet materiale; $m_{s,56} \leq 0,50 \text{ kg/m}^2$
Kjemiske angrep <sup>f</sup>	For sementtyper og bindemiddelkombinasjoner som er kvalifisert for bestandighetsklassene M45 og M40, kreves ingen ytterligere prøving for kjemisk aggressivitet i jord og grunnvann. Bestemmelsene i NA.5.3.2(901) gjelder		

<sup>a</sup> For både dokumentasjonsprøver og referanseprøver utføres prøvingen ved minst 3 forskjellige masseforhold slik at masseforholdsområdet fra høyeste tillatte masseforhold for betong med referansesementen og ned dekkes i trinn på om lag 0,05.

<sup>b</sup> Herdetiden før eksponering skal være minst 90 døgn.

<sup>c</sup> Det kreves ikke frostprøving for å kvalifisere en sement for bruk i betong i klasse M60 ved eksponering i klasse XF1.

<sup>d</sup> Der den samlede slaggmengden overstiger 35 % av bindemiddelmengden, skal tiden i klimakammeret være 14 uker  $\pm$  1 for å oppnå karbonatisering.

<sup>e</sup> Prøvingen utføres på betong tilsatt luftinnførende tilsetningsstoff til maksimalt 6 % luftinnhold i den ferske betongen.

<sup>f</sup> De konsentrasjoner som er gitt i tabell 2 kan ikke benyttes for valg av bestandighetsklasse for andre situasjoner enn i naturlig jord og grunnvann. Slike situasjoner vurderes særskilt. For sulfatholdig miljø, se tabell NA.13.

Figur 2.5: Tabell NA.14 (Standard Norge 2017)

Det er mulig å fravike fullstendig fra NS-EN 206+NA, men alltid på byggherres ansvar. Alle fravik skal derfor presiseres av byggherre eller prosjekterende, eller avtales direkte mellom entreprenør og byggherre (Norsk betongforening 2015). Dette betyr at med byggherres godkjenning, kan en benytte en betongresept helt utenfor standarden. Dette forutsetter nøye utprøving og dokumentasjon, og kunden må forsikre seg om at de endrede bruksreglene gir en konstruksjon med egenskaper, pålitelighet og levetid som er krevd i lovverk og forskrifter.

## 2.6.3 TRYKKFASTHETSKLASSER

NS-EN 206+NA angir trykkfasthetsklasser for normalbetong med tilhørende karakteristiske sylinter- og terningfastheter. Tabell NA.2 i NS-EN 206+NA viser sammenhengen mellom den europeiske notasjonen og notasjonen som benyttes i Norge med «B» som prefiks og enkeltnotasjon med sylinterfastheten. Tabell NA.2 er gjengitt i Tabell 2.3.

Tabell 2.3: Tabell NA.2 Trykkfasthetsklasser for normalbetong, NS-EN 206+NA.

Nasjonal trykkfasthetsklasse	B10	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65	B75	B85	B95
Europeisk betegnelse		C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C55/67				
Karakteristisk sylinterfasthet, $f_{ck,cyl}$	10	20	25	30	35	45	55	65	75	85	95
Karateristisk terningfasthet, $f_{ck,cube}$ <sup>a</sup>	12	25	30	37	45	55	67	80	90	100	110

<sup>a</sup> For trykkfasthetsklasse B55 og høyere kan andre verdier for karakteristisk terningfasthet benyttes hvis forholdet mellom disse og karakteristisk sylinterfasthet er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen.

Etter punkt 5.5.1.2(3) åpnes det for å angi trykkfastheten ved annet tidspunkt enn 28 døgn, eller etter lagring under spesielle forhold, som for eksempel annen herdetemperatur enn 20 °C. Betongen kan dermed kategoriseres etter en høyere fasthetsklasse dersom det settes krav til herdetemperatur ved produksjon.

## 2.7 HERDETEKNOLOGI

Herdeteknologi er den viten om hvordan ulike faktorer samlet spiller en rolle og innvirker på betongens temperatur og fasthetsutvikling. Dette kan være blant annet hvilken sementtype og sementmengde vi bruker, samt pozzolane bindemidler. Temperatur er også en vesentlig faktor som blandetemperatur, lufttemperatur og isolering. De fleste kjemiske reaksjoner skjer raskere ved høyere temperaturer – dette gjelder også vann/sement-reaksjonen og pozzolanreaksjonen. Dermed er temperatur en viktig faktor innen herdeteknologi. Noen betonger er avhengige av mye varme for å herde, mens andre er mindre temperaturavhengig. Høy herdetemperatur vil med dette gi en høy tidligfasthet, men dette kan gå på bekostning av slutfastheten som kan bli noe redusert (Gjerp et al. 2004).

### 2.7.1 TEMPERATURUTVIKLING I BETONG

Reaksjonen mellom vann og sement er eksoterm reaksjon, som med andre ord betyr at reaksjonen fører til en temperaturøkning etterhvert som hydratiseringen pågår. Det er flere faktorer som påvirker hvor stor temperaturøkningen er og hvor fort den skjer, men det er først og fremst mengden sement i betongresepten og klinkersammensetningen som avgjør hvor mye energi som potensielt kan frigjøres. Dette kan beregnes ved å se på den kjemiske sammensetningen av sementen, og vil for en OPC være omtrent i området 400 - 500 kJ/kg ved 100 % hydratisering (Smeplass 2003).

Betongen vil i praksis aldri oppnå en hydratiseringsgrad på 100 % av ulike grunner og er avhengig av flere forhold – blant annet av masseforhold, klinkersammensetningen, finhetsgrad på partiklene og herdeforhold som f.eks fuktforhold og temperatur.

Den potensielle adiabatisk temperaturstigningen,  $\Delta\theta$  kan beregnes med ligning 2.6.

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty} * C}{\rho_r * c_b} \quad (2.6)$$

$Q_{\infty}$  = energimengde pr. kg sement,  $kJ/kg$  sement

$C$  = mengde sement,  $kg/m^3$

$\rho_r$  = betongens spesifikke varmekapasitet,  $kJ/kg^{\circ}C$

$c_b$  = betongens densitet,  $kg/m^3$

### 2.7.2 AKTIVERINGSENERGI

Aktiveringsenergien til sement er den energien som trengs for at sementen skal hydratisere. Aktiveringsenergien sier noe om temperaturfølsomheten til blandingen. Ved høy aktiveringsenergi trengs det en større energi, eller høyere temperatur, for at den kjemiske prosessen skal reagere. Ved å kartlegge aktiveringsenergien kan man videre finne ut hydratiseringsgraden sammenlignet en referansetemperatur på 20 °C. Aktiveringsenergien,  $E$ , for en betong er gitt i ligning 2.7.

$$E = A + B * (20 - \theta) \quad \theta \leq 20^{\circ}C$$

$$E = A \quad \theta > 20^{\circ}C \quad (2.7)$$

A og B er konstanter som avhenger av sementtype, pozzolaner og til en viss grad masseforholdet. Typiske verdier for A og B er vist i ligning 2.8.

$$\begin{aligned} A &= 33,5 \text{ kJ/mol} \quad (\text{Normalt } 20 - 40 \text{ kJ/mol}) \\ B &= 1,47 \text{ kJ/mol} \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{Normalt } 1,0 - 1,5 \text{ kJ/mol}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

### 2.7.3 HASTIGHETSFUNKSJONEN

Arrheniusligningen, ligning 2.9, gir hastighetsfunksjonen til en betong ut ifra temperatur og aktiveringsenergi.  $H(\theta)$  er reaksjonshastigheten til betongen ved en gitt temperatur sammenlignet med hastigheten ved 20 °C. Ved hjelp av denne kan betongens modenhet ved ulike temperaturforløp beregnes, som vil si hvor mange døgn herding ved 20 °C den oppnådde styrken tilsvarende.

$$H(\theta) = e^{\frac{E(\theta)}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + \theta}\right)} \quad (2.9)$$

$E(\theta)$  = aktiveringsenergien, kJ/mol

$\theta$  = temperaturen, °C

R = gasskonstanten, 0,008314 kJ/mol·°C

Ligning 2.7 viser at reaksjonshastigheten reduseres drastisk under 20 °C. Dette viser at det er svært gunstig å opprettholde en temperatur på over 20 °C for å oppnå en god fasthetsutvikling. I tillegg kan oppvarming av betongen over 20 °C være et nyttig herdetiltak for å sikre en hurtig fasthetsutvikling.

Den økte temperaturen vil ifølge modenhetsprinsippet ikke gi betongen høyere styrke, men bare akselerere hydratiseringen så styrken oppnås forttere – slutfastheten er uforandret. Herding ved økt temperatur kan derimot ha en negativ innvirkning på slutfastheten. Modenhetsprinsippet bør derfor ikke benyttes ved herding utover omtrent 60 % av slutfastheten, ettersom slutfastheten ikke sammenfaller utover dette (Smeplass 2003). Hvor mye slutfastheten påvirkes avhenger av betongens sammensetning. Eksempelvis vil betong med innblandet silikastøv være mer robust mot varme og vil gi et mindre utslag på denne negative effekten (Gjerp et al. 2004).

### 2.7.4 PÅVIRKNING AV POZZOLANE BINDEMIDLER

Pozzolaner i kombinasjon med sement er svært vanlig i dagens betongmarked – enten innmalt i sementen eller tilsatt i betongen. Dette er som regel silikastøv, flygeaske og slagg. Slike betonger vil ha en langsom fasthetsutvikling, liten varmeutvikling og økt temperaturfølsomhet i forhold til vanlig sement. Dette kan by på praktiske problemer, særlig ved utstrakt bruk. Den reduserte fasthetsutviklingen til betongen kan blant annet påvirke fremdriften til et prosjekt. Det finnes ulike metoder for å øke hydreringen til betongen, og på den måten oppnå en høyere fasthetsutvikling.



## 2.7.5 AKTIVERING AV SEMENT

Det er blitt veldig vanlig å bruke pozzolane tilsetningsstoffer, som flygeaske, for å oppnå betonger med lavt klimagassutslipp. Dette påvirker hydratiseringen av sement og fører til betonger med treg fasthetsutvikling med lav varmeutvikling. Dette kan ha påvirke ulike produksjonsprosesser negativt ved at betongen ikke oppnår tilstrekkelig fasthet i tide. Det kan derfor være ønskelig å aktivere sementen for å oppnå en raskere fasthetsutvikling. Sementen kan aktiveres ved hjelp av herdeakseleratorer. Disse akseleratorene øker hydreringen av  $C_3S$  som bidrar til høy fasthetsutvikling. Forhandlere av herdeakseleratorer røper ofte ikke produktinnholdet, men den mest vanligste herdeakseleratoren i skandinavia er NaSCN, sodium thiocyanate (Myrdal 2015). Disse herdeakseleratorene er beregnet for betonger med høy klinkerandel, og kan derfor anses som mindre effektiv i betonger med store mengder pozzolane bindemidler og lite klinker.

I tillegg til ulike herdeakseleratorer har tilført varme vist seg å være et effektivt hjelpemiddel for å sette igang de kjemiske reaksjonene tidlig – spesielt under kalde værforhold som fort kan oppstå i Norge og for betonger med høy aktiveringsenergi. Dette kan være i form av for eksempel varmekabler og fyring, og er et enkelt redskap for å oppnå en akselerert fasthet.

## 2.8 GEOPOLYMERER

### 2.8.1 BAKGRUNN

Geopolymerer er en betegnelse på faste materialer fremstilt av reaksjonen mellom aluminasilikatholdig pulver og alkaliske løsninger. Denne alkaliske aktiveringen kan gjøres med en rekke ulike materialer, som for eksempel flygeaske, slagg eller metakaolin. Det er ikke valgt å fokusere for mye på rene geopolymerer i denne avhandlingen, men det nevnes ettersom dette er mekanismer som kan i større eller mindre grad kan skje i reseptene som testes og bør derfor være kjent. For en grundigere beskrivelse av geopolymerer henvises det til undertegnede forprosjekt «Hybridbetong med alkaliaktivert flygeaske».

Kjent fra tradisjonell betongteknologi er flygeaske et pozzolan som ikke har bindemiddelegenskaper på egenhånd, men som trenger vann og kalsiumhydroksid,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , for å danne et reaksjonsprodukt med egnede egenskaper (Sellevold 1990). Kalsiumhydroksid er et reaksjonsprodukt fra hydratiseringsreaksjonen av OPC og danner C-S-H-gel i reaksjon med flygeaske. Denne reaksjonen forteller ikke hele sannheten, ettersom flygeaske kan benyttes til geopolymer. Denne reaksjonen avhenger derimot hverken av vann eller  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , og er dermed ikke en hydratiseringsreaksjon og er helt uavhengig av OPC.

Denne typen betong er ikke dekket i noen standard og har dermed ingen preaksepterte løsninger for materialsammensetning eller utførelse. Det er derfor nødvendig å dokumentere oppnådd sikkerhetsnivå for hvert enkelt byggeprosjekt der denne typen materialer benyttes i bærende konstruksjoner. Dette vil føre med seg mer arbeid og større behov til kompetanse, og vil i praksis begrense bruken av geopolymerer.

### 2.8.2 AKTIVERING

Ved aktivering av FA kan det benyttes en rekke ulike alkalier, men de mest vanlige kan hovedsaklig deles inn i enten alkaliske hydroksider eller alkaliske silikater. I begge tilfeller er det løsninger bestående av enten natrium eller kalium er mest brukt (Provis og Bernal 2014). Kjemikaliene som benyttes skaper en høy pH-verdi i blandingen og bryter ned den sfæriske strukturen til flygeasken, som deretter skaper et nytt reaksjonsprodukt.

I tillegg til en alkalisk aktivator krever denne reaksjonen høy temperatur. Den nødvendige temperaturen er avhengig av hvilken type aktivator som benyttes, men vil ligge i området 60 - 85 °C (Provis og Bernal 2014) (Garcia-Lodeiro et al. 2016).

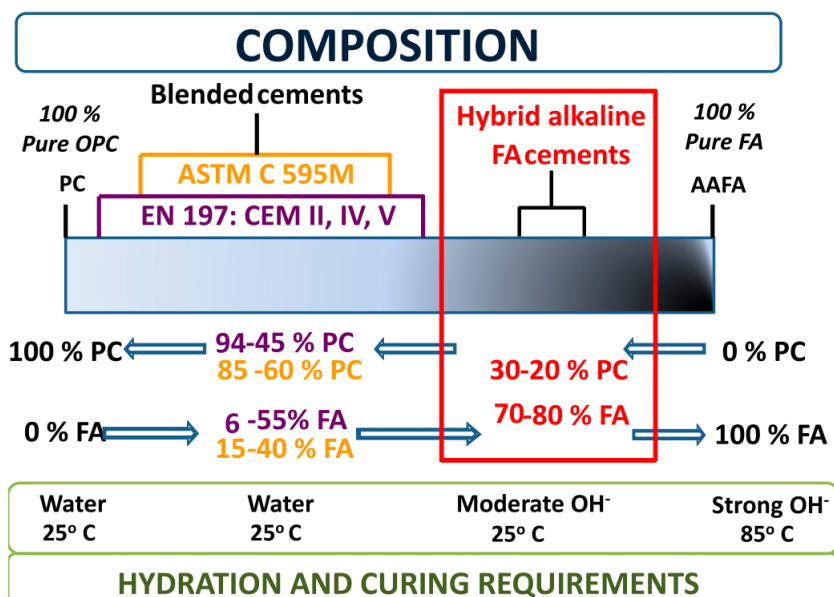
### 2.8.3 BEARBEIDBARHET

Kjemiske aktivatorer påvirker betongens bearbeidbarhet i stor grad og fører fort til egenskaper som ikke egner seg til plasstøping av betong. Dette avhenger i stor grad av type aktivator, dosering og temperatur. Ved å øke temperaturen reduseres viskositeten betraktelig (Yang et al. 2008).

Aktivatorer har også vist seg å påvirke effekten av tradisjonelle plastiserende stoffer. Forsøk utført av Nematollahi og Sanjayan (2014) viser at superplastiserende tilsetningsstoffer (SP) i noen tilfeller ga null effekt og samtidig reduserte betongens trykkfasthet. Mange kjemiske aktivatorer fungerer derfor dårlig med dagens tilgjengelige produkter som er ment for betong.

## 2.9 HYBRIDBETONG

En kombinasjon av en tradisjonell betong og en geopolymer kan betegnes som en hybridbetong og vil bestå av en relativt lav mengde OPC, på bare 20–30 % og hele 70–80 % alkali-aktivert flygeaske (AAFA/geopolymer). Dette medfører mange endringer sammenlignet med tradisjonell betong og ren geopolymer av flygeaske. Figur 2.6 hentet fra Garcia-Lodeiro et al. (2016) viser hvordan hybridbetongen plasseres i forhold til en ren OPC, ren AAFA og en OPC med pozzolaner, med hensyn til gjeldene standarder, dosering og krav til miljø for herding.



Figur 2.6: Plassering av hybridbetong sammenlignet med ren OPC, OPC med pozzolaner og AAFA (Garcia-Lodeiro et al. 2016)

Som Figur 2.6 viser, så blir blandingssementer av OPC og FA dekket av ulike standarder, blant annet den europeiske standarden EN 197-1, men ikke med en høyere andel FA enn 55 % av bindemiddelet. I området 70–80 % FA er det ikke utarbeidet en standard enda. Dette betyr ikke at denne blandingen ikke kan brukes, men at det ikke er fastsatt noen preaksepterte løsninger, og det kreves derfor mer arbeid for å dokumentere den valgte betongens egenskaper.

En av bakdelene ved å bruke en ren geopolymerbetong er at det kreves en sterk alkalisk aktivator for at betongen skal herde. Dette fører til et stort forbruk av kjemikalier og ekstra tiltak med tanke på HMS på byggeplassen. I en hybrid kreves det ikke en like sterk alkalisk aktivator, noe som kan være en stor fordel med tanke på klimagassregnskapet, avhengig av hvilken aktivator som brukes og hvordan den er produsert.

En geopolymer krever, i tillegg til en sterk aktivator, også høy herdetemperatur på omtrent 85 °C. Hybridbetongen krever derimot ikke den samme høye temperaturer, noe som er svært gunstig med tanke på plasstøping av betong.

## 2.9.1 REAKSJONSPROSESSEN

Reaksjonsprosessene for både OPC og AAFA har blitt godt dokumentert i en rekke publikasjoner, og danner grunnlaget for å forstå reaksjonen i en hybridbetong. Det som gjør reaksjonen i en hybridbetong komplisert er at begge disse reaksjonene skjer samtidig, og påvirkes både av hverandre og av type og styrke på den alkaliske aktivatoren. En beskrivelse av hydratiseringen til den alkaliske hybridsementen gis etter Garcia-Lodeiro et al. (2016).

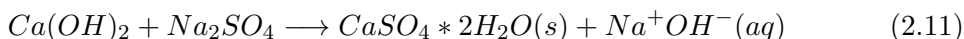
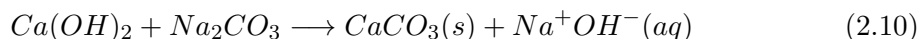
Reaksjonsprosessen starter med at flygeasken og klinkermineralene begynner å løses opp i den alkaliske løsningen og fyller den med ioner. Disse ionene er spredd rundt i løsningen med ulik konsentrasjon, og skaper dermed ulikt utgangspunkt for videre reaksjon. Når disse lokale konsentrasjonene mettes vil C-S-H- og N-A-S-H- gel felles ut samtidig, avhengig av hvilke ioner som er dominante. Etterhvert som dette skjer frigis mer silikon i løsningen, som deretter tas opp av begge geltypene.

Samtidig som denne reaksjonen, vil  $\text{Ca}^{2+}$  og  $\text{Al}^{3+}$  ioner trekke inn i sementpastaen ved hjelp av diffusjon.  $\text{Ca}^{2+}$ -ionene vil delvis bytte ut  $\text{Na}^+$ -ionene i N-A-S-H-gelen og forme en type (N,C)-A-S-H-gel. Så lenge det er  $\text{Ca}^{2+}$ -ioner tilgjengelig vil disse trekke gjennom pastaen ved diffusjon og reagere med (N,C)-A-S-H-gelen, og gradvis gå over til en (N)-C-A-S-H-gel. Ettersom det ikke er tilstrekkelig  $\text{Ca}^{2+}$  i løsningen vil ikke all N-A-S-H-gelen reagere og forme C-A-S-H-gel. I likhet med denne reaksjonen vil C-S-H-gelen ta til seg  $\text{Al}^{3+}$ -ioner til en C-(A)-S-H-gel og frigir etterhvert C-A-S-H-gel-når aluminiummengden øker.

## 2.9.2 EFFEKT AV AKTIVATOR

Forsøk med ulike aktivatorer utført av Garcia-Lodeiro et al. (2013) tyder på at valg av aktivator ikke påvirker hvilket hovedreaksjonsprodukt som dannes ((N,C)-A-S-H-/C-A-S-H-gel), men at det vil påvirke reaksjonshastigheten og hvilke sekundære reaksjonsprodukter man får. Mengden av hver type gel kan derimot variere i forhold til hverandre avhengig av aktivatoren. Grunnen til dette er blant annet at sterkt alkaliske aktivatorer vil hemme hydratisering av klinker-fasen i hybridbetongen, og vil dermed gi en pasta med større andel (N,C)-A-S-H-gel (Garcia-Lodeiro et al. 2013). En sterk alkalisk aktivator kan typisk være NaOH eller en blanding av NaOH og vannglass. Disse løsningene har gjerne en høyere pH enn 13.

Alternativt kan mildere aktivatorer benyttes, som for eksempel svake (natriumkarbonat) eller sterke (natriumsulfat) alkaliske salter. Disse gir gjerne en lavere pH i området 7 til 13 (Garcia-Lodeiro et al. 2016). Saltene er løselige i vann og består vanligvis av  $\text{Na}^+$  eller  $\text{K}^+$ , og øker pH-verdien ved at det tilhørende anionet danner en uløselig binding med  $\text{Ca}^{2+}$  fra portlanditt ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Reaksjonsligningen ved bruk av natriumkarbonat eller natriumsulfat er vist i ligning 2.10 og 2.11 og vil være lignende ved bruk av andre salter.



Fordelen med dette er at hydratiseringen av sementen blir påvirket i mindre grad ved at den først får reagere med vann for å danne C-S-H-gel og portlanditt, som deretter kan reagere med saltene og øke pH verdien. En annen viktig egenskap ved bruk av denne typen milde aktivatorer er hvilke sekundære reaksjonsprodukter som lages som følge av det tilhørende anionet i saltet.

Donatello et al. (2013) studerer den tidlige hydratiseringsprosessen av en hybridsement med 80 % FA aktivert med natriumsulfat. Prøvene i testen ble herdet på 23 °C, noe som gir et godt sammenligningsgrunnlag for plasstøpt betong. Donatello et al. konkluderer i rapporten med at tilstedeværelsen av  $\text{SO}_4^{2-}$  i stor grad forsterker den tidlige oppløsningen av alitt, korter ned avbindingstiden og øker tidligstyrken.

## 2.10 PROGRAMVARE - CRACKTEST COIN

CrackTeSt COIN er et FEM-basert beregningsprogram for herdeteknologi, og utfører beregninger for herdende betong. Geometrien for konstruksjonen tegnes todimensjonalt i x-y-planet, og kriterier for fastholding normalt på planet i z-retning bestemmes. Dette gjør programmet til et  $2\frac{1}{2}$ -dimensjonalt program.

Det ligger en del materialer og randbetingelser i programmets database som blant annet treverk, kryssfinér, diverse isolasjonsmateriale og luft, samt noen generelle betonger. I tillegg tillater programmet å legge inn og justere disse slik at man oppnår ønskelige parametere. I tillegg kan varmekabler og kjølerør legges inn.

Programmet beregner temperaturutvikling og temperaturfordelingen i konstruksjonen basert på randbetingelser og materialer som er satt, samt egenskapene til betongen basert på modenhetsprinsippet. Deretter beregnes spenningene som oppstår som følge av selvut-tørking, fastholdning og termisk dilatasjon.

Programmet er godt egnet for følgende:

- Simulere temperaturforløp
- Simulere trykk- og fasthetsutvikling
- Valg av herdetiltak under ulike forhold
- Beregning av spenninger som følge av fastholding
- Beregning av rissindeks basert på strekkspenninger i konstruksjonen

I denne rapporten er programmet kun benyttet til å simulere temperaturforløpet til to konstruksjonsdeler – dekke og bunnplate. Her er varmeutviklingen til egne resepter lagt manuelt inn i programmet.

# KAPITTEL 3 METODE

## 3.1 LITTERATURSTUDIE

I forkant av arbeidet med denne avhandlingen ble det utført et forprosjekt som tok utgangspunkt i studier av eksisterende litteratur og forskning knyttet til OPC, flygeaskebasert geopolymerer og noe ny, men begrenset forskning, om hybridbetong. Både geopolymer og tradisjonell betong er emner som er mye forsket på, og som det foreligger mye litteratur og lærebøker på. Målet med litteraturstudiet var derfor å komme frem til en beskrivelse av strukturen og egenskapene til geopolymerbetong og tradisjonellbetong for å finne ut hva som skiller de og hvilke fordeler og ulemper de to har. Ved å danne et bilde av dette ble det dannet et bedre grunnlag for å vurdere hvilke muligheter en kombinasjon av de to vil ha, og om det er noen eventuelle utfordringer knyttet til dette.

Studier av publikasjoner om hybridbetong ble i tillegg benyttet for å danne en oversikt over resepter som har blitt testet ut og hvilke av disse som tilsynelatende har potensiale til å kunne brukes til plaststøping på byggeplasser i Norge. Noen av disse publikasjonene studerer strukturen i bindemiddelet og har utarbeidet en beskrivende modell av denne, som er svært nyttig for å foreta en sammenligning av de førstnevnte bindemidlene.

I tillegg til å beskrive materialegenskapene til de ulike bindemidlene ble en undersøkelse av Norsk Standard utført. Her ble det undersøkt hvilke begrensninger denne gir og hvilke muligheter som finnes for å dokumentere om materialet har tilfredstillende egenskaper uten å følge de preaksepterte løsningene som står beskrevet.

Hensikten med dette var å kartlegge mulighetene for å bytte ut klinkeren i tradisjonell betong med andre materialer for å oppnå et redusert klimagassutslipp.

## 3.2 LITTERATURSØK OG KILDEKRITIKK

Parallelt med forprosjektet ble det utarbeidet en litteratursøkrapport i forbindelse med faget TBA4151 Anleggsteknikk, videregående kurs. Litteratursøkrapporten tok utgangspunkt i samme tema som prosjektrapporten, og hadde som formål å finne og vurdere litteratur som kunne benyttes i arbeidet med rapporten. For å søke etter litteratur ble Universitetsbibliotekets søkemotor Oria, Scopus, Ei Compendex, Google Scholar og Google benyttet. Ved å bruke flere uavhengige søkemotorer ble det funnet litteratur som ikke var tilgjengelig i alle databasene, og ga dermed flere gode treff sammenlignet med hva én søkemotor ville gitt alene.

I tillegg til å finne frem til litteraturen, var kildekritikk svært viktig for å anslå om kildene er troverdig. Kildene som benyttes må vurderes, og relevant informasjon skilles fra spekulasjoner. Det er viktig å forholde seg kritisk til kildematerialet som benyttes slik at forskningsspørsmålet blir besvart med relevant informasjon. Det er viktig å vurdere gyldighet, holdbarhet og relevans når en vurderer en kilde (Dalland 2012).

Litteraturen som ble funnet ble vurdert etter kriteriene i huskeregen TONE som anbefales av blant annet NTNU Universitetsbiblioteket (u.å) og som står for:

- Troverdighet
- Objektivitet
- Nøyaktighet
- Egnethet

Vurderingen av disse kriteriene var viktig for blant annet å finne ut hvem forfatterene er og vurdere hvilken kompetanse de har, eller om det var andre ting som gjorde litteraturen mer eller mindre god.

Funnene fra litteratursøket viste at det fantes lite publisert forskning på hybridbetong med OPC og alkali-aktivert flygeaske (AAFA), men de artiklene som ble funnet styrket påstanden om at denne typen betong har et stort potensiale med tanke på gode egenskaper og et lavt klimagassutslipp.

### 3.3 OPPFØLGING AV POWERHOUSE BRATTØRKAIA

Samtidig som arbeidet med denne avhandlingen har også betongarbeidet på Powerhouse Brattørkaia pågått. Her ble lavkarbonbetong med svært lavt klimagassutslipp benyttet for første gang – som førte med seg utfordringer og erfaringer som har vært nyttig for videre i arbeidet. Gjennom oppfølging og befaring på prosjektet ble det gjort observasjoner på hvilke problemstillinger entreprenøren stod ovenfor knyttet til materialegenskaper og praktisk utførelse.

Figur 3.1 viser støpefronten ved en dekkestøp på Powerhouse Brattørkaia høsten 2017. I tillegg vises spennarmeringens passive forankring i underkant av bildet og den blå varmekabelen som ble benyttet for å sikre tilstrekkelig modenhet rundt forankringen.



Figur 3.1: Dekkestøp, Powerhouse Brattørkaia [Foto: Anders Raastad Elgen]

Utførelsen av støpingen ved Powerhouse Brattørkaia har innebært støping under forskjellige forhold. Dette har ført til ulike tiltak for å sikre at betongen oppnår tilstrekkelig fasthet. Erfaringer knyttet til dette prosjektet har vært med på å danne forståelse av bruken av lavkarbonbetong av denne typen. Temperaturen i betongen ble logget for å beregne trykkfastheten basert på modenhetsprinsippet. Disse målingene ga i tillegg gode erfaringstall på hvilke temperaturer som er realistiske å oppnå med fornuftige tiltak under ulike forhold på byggeplassen.



### 3.4 FORTSETTELSE PÅ TIDLIGERE MASTERPROSJEKT

Under arbeidet med forprosjektet til denne avhandlingen ble det delvis samarbeidet med Stud.techn Frederic Aarnæs Hermansen som utførte sin mastergradsavhandling om samme tema. Denne avhandlingen bygger videre på funnene til Stud.techn Hermansen.

I avhandlingen til Hermansen (2018) undersøkes mørtel- og betongblandinger med et høyt innhold av flygeaske i tillegg til å aktivere bindemiddelet ved hjelp av tilsatte kjemikalier. Målet med denne oppgaven var å redusere det totale klimagassutslippet fra betongen, samtidig som støpeligheheten er tilfredsstillende og trykkfastheten oppnår minimum 25 MPa etter tre dager.

Som et innledende forsøk testet Hermansen blandinger med ulik mengde flygeaske. Dette gir en indikasjon på hvor mye som kan tilsettes før mengden portlanditt,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , blir for liten for pozzolanreaksjonen, og dermed gå på bekostning av videre fasthetsutvikling. I alle forsøkene er det benyttet sementen Standard FA tilsatt 10 % silikastøv herdet ved romtemperatur.

Det ble testet mørtelprøver med ulike masseforhold og med og uten kjemisk aktivering – med for å se om det var mulig å utnytte den potensielle hybrideffekten som den ekstra flygeasken bidrar med.

I disse testene ble kun 1 og 2 døgns fasthet målt, men bruk av aktivator viste tydelig økning i trykkfastheten. Det er derimot usikkert i hvor stor grad aktiveringen bidrar ettersom ulike doseringer av aktivator ikke viste betydelig variasjon i styrken. En stor negativ side ved bruk av aktivator var en drastisk reduksjon av støpligheten, som førte til problemer ved utstøping av prøveterningene. Hermansen (2018) nevner at en mulig grunn til manglene variasjon blant prøvene med aktivator skyldes dårlig utstøping av prøvene.

Blandingen som viste størst potensiale ble deretter støpt som en betongblanding for å gjøre en mer fullverdig vurdering av bearbeidbarhet sammen med en referanse uten aktivator og en med redusert masseforhold. Den kjemiske aktiveringen ga en økning trykkfastheten det første døgnet, men ikke noe mer. Med tanke på det store tapet i bearbeidbarhet er denne gevinsten i fasthetsutvikling veldig liten og tyder ikke på at en brukbar resept vil oppnås med denne typen aktivator.

Hermansen (2018) beskriver en mulig grunn til det lave bidraget kan være for lav temperatur i betongen med tanke på at bidraget er tydelig det første døgnet der varmeutviklingen fra vann/semment-reaksjonen er størst. Det kan dermed hende at aktiveringen med alkalier vil gi et større bidrag ved høyere temperaturer enn ved 20 °C. Denne forklaringen støttes av det som allerede er kjent om geopolymerer som krever oppvarming for å herde.

På bakgrunn av resultatene til Hermansen ble det vurdert at resepten med 60 % FA, uten aktivator, har et stort potensiale for å oppnå en tilfredsstillende 3 døgns fasthet ved bruk av tiltak som f.eks oppvarming. Kjemisk aktivator ble derimot vurdert til å ikke være like interessant å studere videre.

### 3.5 LABORATORIEARBEID

Hovedtyngden til oppgaven er basert på laboratoriearbeid. Dette innebærer at laboratoriet ved NTNU er benyttet for å blande og teste utvalgte betongsammensetninger. Dette tillater blanding og prøving av ulike resepter for å komme frem til ønskede egenskaper. Opplæring i bruk av laboratoriets utstyr er gjennomført på NTNU sammen med laboratoriepersonell.

For å komme frem til ulike resepter til Gullhaug Torg er det gjennomført ulike praktiske forsøk for å teste ulike betongsammensetninger. Hvilke betongsammensetninger som er blandet og testet er avgjort underveis, og alle materialer og utstyr som er benyttet har instituttet bistått med.

Hensikten med laboratoriearbeidet er å teste bruksmulighetene til ulike resepter. Dette gjøres i form av proporsjonering av reseptene som blandes i laboratoriet. Blandingene er testet, både fersk og herdet tilstand, og støpt i prøveterninger som er trykktestet.

For at det praktiske arbeidet skal holdes troverdig er blandeprosedyrene utført av samme personer. Dette gjelder all utførelse på laboratoriet for å eliminere feilkilder og styrke resultatene. Der prøvestykker støpes skal tilstrekkelig med prøvestykker støpes for å unngå at dårlig utstøpninger lager feilkilder.

Parallelt med oppgaven har underteignede vært studieassistenter i faget TKT4215 Betongteknologi ved NTNU, som har innebåret mye laboratoriearbeid. Med dette er mye betong blandet i forkant av denne avhandlingen med samme fremgangsmetode og samme tester som for reseptene i denne oppgaven. Dette har ført til god kjennskap til laboratoriet og tilhørende utstyr, og har trolig redusert sannsynligheten for feil.

# KAPITTEL 4 LABORATORIEPROGRAM

Laboratorieforsøkene tar utgangspunkt i funnene til Hermansen (2018) knyttet til resultatene til Standard FA med 50 og 60 % flygeaske. Det med stor sannsynlighet at Standard FA ikke vil bli benyttet i prosjektet ettersom ferdigbetongleverandøren ikke tilbyr denne sementen, men Aalborg Rapid tilsatt tilsvarende mengde flygeaske. Ulike betongsammensetninger med Aalborg rapid er derfor utarbeidet for å teste fasthetsutvikling og GWP fasthetsutviklingen tilfredsstillende kravet på 25 MPa etter 3 døgn og samtidig oppnå en lav GWP-verdi, og for å gjøre en sammenligning av GWP og fasthet for tilsvarende resepter med de to sementene.

Standard FA inneholder 18 % FA og har aktivitetsfaktor  $k = 1,0$  for den innmalte flygeasken. Resterende flygeaske som tilsettes har i henhold til NS-EN 206+NA en aktivitetsfaktor  $k = 0,7$ . I blandingene med Aalborg Rapid er all flygeaske tilsatt – dermed får all flygeasken  $k = 0,7$ . Ulike  $k$ -verdier for flygeaske gir et dårlig sammenligningsgrunnlag mellom resepter med Standard FA og Aalborg Rapid. For enkelhetsskyld er derfor  $k$ -verdien for all flygeaske satt til  $k = 1,0$  ved proposjonering. Med andre ord blir  $v/b = v/c+p = v/c + \sum kp$  ved at  $k = 1,0$ . Valg av masseforhold tok utgangspunkt i Standard FA-reseptene benyttet i Hermansens (2018). Disse hadde et ekvivalent masseforhold på 0,4. Masseforholdet benyttet i denne oppgaven er justert ned for å oppnå tilsvarende mengder klinker, FA, SF og vann i reseptene ettersom  $k = 1,0$ .

I tillegg til å teste betong med høyt flygeaskeinnhold er det testet resepter med slaggsement – Cemex Lavvarmesement som inneholder 70 % slagg. Under prøvestøp hos Ølen Betong AS viste den veldig gode støpelighetsegenskaper og rekordlav GWP som gjør en videreføring aktuell. Alle målinger og resultater er vurdert underveis, og har dannet grunnlaget for videre arbeid og testing. Utgangspunktet for reseptene er å tilfredstille kravet til B35M90. Alle reseptene som er utviklet er oppsummert i Tabell 4.1.

Tabell 4.1: Sammensetning av resepter

Resept	v/b	Matriks	Tot b	Klinker (% av b)	Tilsatt FA (% av b)	Tot FA (% av b)	SF (% av b)	SP (% av b)*	Akselerator (% av b)
Std FA 50	0,35	300	369	38,1	41,2	50	10	1,5 (1,77)	-
Std FA 60	0,34	300	364	28,5	53,4	60	10	1,5	-
Aal 50	0,35	300	364	38,0	50,0	50	10	1,5 (1,87)	-
Aal 60	0,34	300	363	28,5	60,0	60	10	1,5	-
Aal 70	0,35	300	353	19,0	70,0	70	10	1,5	-
Aal 50A	0,35	300	362	38,0	50,0	50	10	1,5	3,0
Aal 60A	0,34	300	361	28,5	60,0	60	10	1,5	3,3
Slagg 0,55	0,55	280	279	28,5	-	-	5	1,5 (0,70)	-
Slagg 0,55A	0,55	280	277	28,5	-	-	5	1,5 (0,78)	4,3
Slagg 0,45	0,45	280	320	28,5	-	-	5	1,5 (1,00)	-

\*Tall i parentes viser den faktiske doseringen

## 4.1 MATERIALER

Sementene som ble benyttet er Standard FA, Aalborg Rapid og Cemex Lavvarmesement. Hovedforskjellene mellom Aalborg rapid og Standard FA er at Standard FA har 18 % innmalt flygeaske, mens Aalborg Rapid er en ren portland sement. Det at flygeasken er innmalt med sementen, som i Standard FA, øker reaksjonsgraden sammenlignet med flygeaske som er tilsatt. Dette skyldes at flygeasken blir svært finkornet under oppmalingsprosessen, og dermed øker den spesifikke overflaten og videre reaksjonsgraden. Dette gir et positivt bidrag i og med at vi ønsker tidlig fasthetsutvikling. For Aalborg Rapid gjelder ikke dette i og med at all flygeaske er tilsatt. Denne tilsatte flygeasken er grovere og vil derfor reagere tregere enn den innmalte.

Cemex Lavvarmesement er den sementen som skiller seg mest ut. Her er det en slaggandel på 70 % noe som resulterer i en svært lav klinkerandel i sementen. Dette gir svært gode miljøgevinster, men økt temperaturfølsomhet, høy aktiveringsenergi og lav varmeutvikling. Dette kan gå på bekostning av fasthetsutviklingen.

Aalborg Rapid og Cemex slaggsement er i hovedsak benyttet i og med at det er de som anses som aktuelle for Gullhaug Torg. Det er derimot ønskelig å sammenligne alle de tre sementene med tanke på miljøgevinst og fasthet. Alle materialer som er benyttet er illustrert i Tabell 4.2, tekniske datablader kan finnes på produsentenes hjemmesider. Kjemisk sammensetning for flygeasken kan ses i Vedlegg A.

Tabell 4.2: Materialoversikt

Navn	Type	Produsent
Standard FA	CEM II/B-M 42,5R	Norcem
Aalborg Rapid	CEM I 52,5N	Aalborg Portland
Cemex Lavvarmesement	CEM III/B 42,5N	Cemex
Flygeaske	Klasse V	Steag
Mikrosilika 940D	Silikastøv	Elkem
Tilslag	Sand 0/8 mm	Norstone Årdal
	Stein 8/16 mm	Norstone Årdal
Dynamon SX-23	Superplastiserer av akrylpolymer	Mapei
Master X-seed 100	Herdeakselerator	BASF

## 4.2 FREMGANGSMÅTE

For å eliminere flest mulig feilkilder er fremgangsmåten i laboratoriearbeidet den samme for hver resept. Blandeprosedyrer som er utført er standard blandeprosedyre for labarbeid ved NTNU, og er gjennomgått nøye slik at resultatene får et best mulig sammenligningsgrunnlag. Fukt i sand er målt for hver blanding slik at fukten blir tatt hensyn til ved oppveining av de andre materialene. Delmaterialene til betongen er målt opp like før blanding, og så fort blandingen var ferdig ble tester på den ferske betongen utført. Først ble test for synkmålet utført for å kunne kontrollere at betongene hadde tilstrekkelig bearbeidbarhet. Deretter ble luftinnhold og densitet målt for alle blandinger.



Figur 4.1: Prøvestykke fra resept Slagg 0,55 før testing [Foto: Anders Raastad Elgen]

Like etter ferskbetongtestene ble prøvestykker for fasthetstesting støpt ut og plassert direkte i ønsket temperatur – 5, 20 og 35 °C. Figur 4.1 viser et av prøvestykkene fra resept Slagg 0,55, i utgangspunktet skulle prøvene herdes i 38 °C, derav merkingen på terningen. Etter logging av temperaturen i varmeskapet over 8 dager ble det bevist at skapet holdt en konstant temperatur på 35 °C.

Prøvene ble trykktestet etter henholdsvis 1, 2, 3, 7 og 28 døgn, på omtrent samme klokkeslett som blandetidspunkt, så nøyaktig det lot seg gjøre. I tillegg ble 56 døgns styrke testet for enkelte resepter der antall terninger og herdetid tillot dette. Dette gir en god oversikt over herdeforløpet de første dagene, som er svært viktig med tanke på fremdriften til prosjektet og de krav som settes til betongen, samt sluttfastheten. Langtidsstyrken er også interessant ettersom samtlige av reseptene er forholdsvis trege betonger sammenlignet med en «vanlig» betong.

Tabell 4.3 viser fullstendig fremgangsmåte og utførelse av støpingen. Tabellen er generell alle reseptene – ikke hver enkelt resept. Ikke alle reseptene er blandet likt med tanke på volum og målinger, men blandeprosedyren og ferskbetongtester forblir det samme.

Tabell 4.3: Fremgangsmåte

Faser	Utførelse
Oppveiing	<p>Delmaterialer veies til ønsket volum er oppnådd. Fukttinnhold i sand måles.</p> <p>Et totalt volum på 35, 40 eller 50 liter er benyttet avhengig av hvilke målinger som skal utføres.</p>
Blanding	<p>Sement, tilslag, flygeaske og silikastøv blandes i ett minutt.</p> <p>Etter ett minutt blandes våtblandingen inn og blandes i 2 minutter.</p> <p>Tilsetning av SP ble gjort gradvis for å oppnå ønskelig konsistens.</p>
Utsøping	<p>Terninger på 100mm x 100mm x 100mm ble utstøpt for fasthetstesting.</p> <p>Det ble støpt enten 24 eller 36 terninger avhengig av hvor mange prøvestykker som var ønskelig for den aktuelle resepten.</p> <p>Utsøpingen av formen ble gjort med murerspade og murerskje.</p> <p>Formen ble først fylt halvfull, og deretter komprimert med murerspade etterfulgt av vibrobord i omlag 2 sekunder. Samme prosedyre ble gjort for andre halvdel av formen.</p>
Målinger	<p>Slump - etter NS-EN 12350-2:2009</p> <p>Luftinnhold - etter NS-EN 12350-7:2009</p> <p>Densitet - etter NS-EN 12350-6:2009</p> <p>Trykkfasthet - etter NS-EN 12390-3:2009</p> <p>Varmeutvikling - etter N3657</p> <p>Trykkfasthet ble testet etter 1, 2, 3, 7, 28 og 56 dager á 2 terninger under 5, 20 og 35 °C.</p> <p>Alle prøvestykker avformes etter 1 døgn og plasseres i vannbad.</p> <p>Herdekske i varmeskap på 35 °C.</p>

### 4.3 HERDETEMPERATURER

For å dokumentere de ulike reseptenes påvirkning av temperatur, ble alle herdet på både 20 og 35 °C, i tillegg ble noen også herdet ved 5 °C, som vist i Tabell 4.4. I utgangspunktet var herdetemperaturen satt til 38 °C, men etter logging av temperaturen viste det seg at varmeskapet holdt 35 °C. Herding ved 5 °C ble gjort for å bekrefte antagelser om høy temperaturfølsomhet og for å danne et grovt bilde om aktiveringsenergien. Resultatene fra de innledene prøvene med Standard FA og første blanding med slaggsement viste at reseptene ikke ga tilstrekkelig fasthetsutvikling under 20 °C. Det ble derfor valgt å kun fokusere på herding ved 20 og 35 °C for resten av reseptene. Resultatene fra reseptene som ble herdet ved 5 °C vil gi et grovt bilde over hvordan de resterende reseptene oppfører seg ved samme temperatur i og med at reseptene har et svært likt klinker- og pozzolaninnhold.

Rett etter terningene var ferdig støpt, ble formene satt inn i riktig temperatur. Terningene i 20 og 35 °C ble avformet etter 1 døgn og deretter lagt i vannbad. Ingen av terningene i 5 °C hadde tilstrekkelig styrke til å avformes etter 1 døgn og ble derfor avformet etter 2 døgn for å unngå skade på terningene.

Tabell 4.4: Herdetemperatur

Resept	5 °C	20 °C	35 °C
Std FA 50	✓	✓	✓
Std FA 60	✓	✓	✓
Aal 50	-	✓	✓
Aal 60	-	✓	✓
Aal 70	-	✓	✓
Aal 50A	-	✓	✓
Aal 60A	-	✓	✓
Slagg 0,55	✓	✓	✓
Slagg 0,55A	-	✓	✓
Slagg 0,45	-	✓	✓

### 4.4 DOSERING AV X-SEED

Herdeakseleratoren Master X-seed 100 er benyttet i reseptene Aal 50A, Aal 60A og Slagg 0,55A. Hensikten med dette er for å akselerere betongens hydratisering i den tidlige fasen og på den måten oppnå høy fasthet raskt. X-seed akselererer dannelsen av C-S-H-krystaller som skal gi en vesentlig høyere hydratisering i løpet av de første 6-12 timene, og er upåvirket av temperatur. Produsenten BASF AS (2010) anbefaler en dosering på 2-4 liter X-seed pr. 100 kg sement. For tradisjonelle betonger tilsvarer dette omlag 8 l/m<sup>3</sup>. I og med at de aktuelle reseptene er veldig klinkerfattige antas effekten å være redusert. Det anbefales derfor en mengde på 10-12 l/m<sup>3</sup> X-seed for at effekten skal opprettholdes (Myklebust 2018).

## 4.5 RESEPTER

Reseptene som er utarbeidet er først og fremst en videreføring av funnene til Hermansen (2018). Dette gjelder reseptene med sementen Standard FA, og videre er reseptene med Aalborg Rapid utarbeidet på grunnlag av funnene med Standard FA. Til slutt er en slaggsement testet.

Reseptene er blandet i tre deler; Innledende forsøk med Standard FA, Del 1 - Aalborg Rapid og Del 2 - Cemex Lavvarmesement. Alle reseptene kan finnes i sin helhet i Vedlegg G til P.

Tilslaget som er benyttet er produsert av Norstone Årdal, og har vært i fraksjonene 0/8 mm sand og 8/16 mm puk. Det samme tilslaget er benyttet for alle reseptene, det vil si at samme siktekurve og sammensetning er benyttet. Sammensetningen for tilslaget er illustrert i Tabell 4.5. Siktekurven kan ses i Vedlegg F.

Tabell 4.5: Tilslagets sammensetning

Navn	Andel	
	Volum	Vekt
Årdal 0/8 mm	0,566	0,560
Årdal 8/16 mm	0,434	0,440

### 4.5.1 INNLEDENDE FORSØK MED STANDARD FA

Som innledende forsøk ble det blandet to resepter med Standard FA – én med 50 % FA av bindemiddelet og én med 60 %. Reseptene er tilsvarende som brukt i Hermansens (2018) forsøk, og ble utført for å forsikre om at det ikke var noen ukjente feilkilder som ville gi avvik i resultatene, samt teste disse reseptene ytterligere. Disse reseptene hadde tidligere gitt tilfredstillende resultater og ble derfor ansett som et godt utgangspunkt for videreføring. I tillegg var det tenkelig at resultatene skulle fungere som en slags referanseverdi for senere resepter.

For å ytterligere teste de to reseptene ble det valgt å herde betongen på forskjellige temperaturer – 5, 20 og 35 °C – først og fremst for å danne et sammenligningsgrunnlag for videre testing med Aalborg rapid, men også for å kartlegge temperaturfølsomheten til denne typen resepter som antas å være forholdsvis høy.



Ved utarbeidelse av reseptene ble de øvre grensene gitt i standarden for innblanding av flygeaske og silikastøv satt til side. Reseptene regner altså med at alt av innblandet flygeaske og silikastøv har bindemiddelegenskaper. Sammensetningen av reseptene er illustrert i Tabell 4.6.

Tabell 4.6: Sammensetning av resepter med Standard FA

Resept	v/b	Matriks	Tot b	Klinker (% av b)	Tilsatt FA (% av b)	Tot FA (% av b)	SF (% av b)	SP (% av b)*	Akselerator (% av b)
Std FA 50	0,35	300	369	38,1	41,2	50	10	1,5 (1,77)	-
Std FA 60	0,34	300	364	28,5	53,4,0	60	10	1,5	-

#### 4.5.2 DEL 1 - AALBORG RAPID

Det er med stor sannsynlighet at Standard FA ikke skal benyttes på prosjektet Gullhaug Torg, men istedet Aalborg Rapid. Det er derfor valgt å fokusere på denne sementen istedet for Standard FA. Resultatene og erfaringene fra de innledende forsøkene med Standard FA – Std FA 50 og Std FA 60 – fungerer som et godt sammenligningsgrunnlag for nye resepter med tanke på å sammenligne egenskapene til de to sementene. I første omgang ble to resepter utarbeidet med mål om å bli mest mulig identisk med disse reseptene – nemlig Aal 50 og Aal 60. For å nå dette målet ble total mengde flygeaske, silikastøv, klinker og matriksvolum låst.

Reseptene med Aalborg Rapid ble herdet i 20 og 35 °C. De innledende reseptene ga dårlige resultater i 5 °C og svært gode resultater i 35 °C, derfor ble det valgt å fokusere videre testing med herding i 35 °C for å kartlegge hvilken gevinst varme kan ha. Ved å herde i 5 °C kunne aktiveringsenergien estimeres til en større grad, men dette ble ikke vektlagt. Herdetemperaturer på 20 °C og 35 °C ses på som tilstrekkelig for å vise hvilken gevinst som oppnås ved temperaturøkning for reseptene.

I tillegg til reseptene Aal 50 og Aal 60 ble en resept med enda høyere flygeaskeandel utarbeidet – Aal 70 med 70 % tilsatt flygeaske. Dette ble gjort for å kartlegge hvor mye flygeaske det er mulig å tilsette, og allikevel oppnå tilfredstillende resultater. Reseptene med 50 og 60 % FA ga overaskende gode resultater – derfor var det ønskelig å se hva slags resultater en så klinkerfattig resept som Aal 70 ville gi ved 20 °C og 35 °C. Her ble v/b-tallet holdt likt som Aal 50. På den måten ble klinkermengden halvert og lettere sammenlignbart.

\*Tall i parentes viser den faktiske doseringen

Gjennom testene kom det tidlig frem at både Aal 50 og Aal 60 hadde bruksmessig potensiale. Det ble derfor valgt å teste disse reseptene ytterligere, men denne gangen med akseleratoren X-seed for å oppnå en enda høyere tidligfasthet. Dermed ble reseptene Aal 50A og Aal 60A utarbeidet. Disse reseptene er helt like forgjengerne Aal 50 og Aal 60 med unntak av tilsatt X-seed. Effekten av X-seed er noe redusert for resepter med høyt flygeaskeinnhold (Myklebust 2018). Derfor er den tilsatte mengden X-seed svært høy, og er avgjort, i samråd med Myklebust (2018), til å være mellom 10 og 12 l/m<sup>3</sup> for å oppnå ønsket effekt. For Aal 60A ble X-seedinnholdet avgjort til å bli noe høyere enn for Aal 50A grunnet høyere flygeaskeinnhold. Reseptene med Aalborg rapid er som vist i Tabell 5.2.

Tabell 4.7: Sammensetning av resepter med Aalborg Rapid

Resept	v/b	Matriks	Tot b	Klinker (% av b)	Tilsatt FA (% av b)	Tot FA (% av b)	SF (% av b)	SP (% av b)*	Akselerator (% av b)
Aal 50	0,35	300	364	38,0	50,0	50	10	1,5 (1,87)	-
Aal 60	0,34	300	363	28,5	60,0	60	10	1,5	-
Aal 70	0,35	300	353	19,0	70,0	70	10	1,5	-
Aal 50A	0,35	300	362	38,0	50,0	50	10	1,5	3,0
Aal 60A	0,34	300	361	28,5	60,0	60	10	1,5	3,3

#### 4.5.3 DEL 2 - CEMEX LAVVARMESEMENT

Basert på prøvestøper utført av Ølen Betong AS, i samarbeid med Skanska og Cemex, kom det frem at Cemex lavvarmesement ga rekordlav GWP-verdi, samtidig som resepten ga god bearbeidbarhet. Det ble derfor valgt å ta med Cemex Lavvarmesement som en del av denne oppgaven med tanke på den lave GWP-verdien. Tre ulike resepter ble utarbeidet – Slagg 0,55, Slagg 0,55A og Slagg 0,45. Slagg 0,55 og Slagg 0,55A, med et masseforhold på 0,55 tilfredsstillende bestandighetsklasse M90, mens Slagg 0,45, med et masseforhold på 0,45, tilfredsstillende bestandighetsklasse M45.

Denne sementen er en slaggsement med omtrent 70 % slagg, som gir en svært lav klinkerandel. Ved å benytte erstatte sement med silikastøv vil det hovedsaklig være slagg som byttes ut – ikke klinker. Det gir derfor ikke stor reduksjon i GWP på samme måte som for Aalborgreseptene. På bakgrunn av dette ble det valgt å kun benytte 5 % silikastøv i reseptene, i motsetning til 10 % som i de tidligere reseptene. Dette er gjort for å utnytte den stabiliserende effekten silikastøv har. Det betyr at for disse reseptene, i motsetning til de andre, er silikastøv hovedsaklig brukt som et verktøy for å bedre stabiliteten for betongen – ikke for å redusere klimagassutslippet.

Først ble Slagg 0,55 utviklet som en videreføring av resepten som ble benyttet av Ølen Betong. Slaggsementer er kjent for å ha svært høy aktiveringsenergi – derfor ble det valgt å herde denne betongen på 5 °C i tillegg til 20 og 35 °C for å få et innblikk i aktiveringsenergien.

\*Tall i parentes viser den faktiske doseringen

Slagg 0,55A er tilnærmet identisk til Slagg 0,55, men med akseleratoren X-seed. På den måten kan effekten av X-seed enkelt kartlegges. På grunn av den lave klinkerandelen har resepten blitt dosert med en større andel akselerator enn det som vanligvis anbefales av produsenten, etter anbefaling av Myklebust (2018). Hensikten med dette var å se hvilken effekt herdeakseleratoren har på en slaggsement og om det kan være et hjelpemiddel for å oppnå høy tidligfasthet. Slagg 0,45 ble utviklet for å se hvordan masseforholdet påvirker fasthetsutviklingen. Denne resepten skiller seg ut ved at den tilsvarer en bestandighetsklasse på M45. Slagg 0,55A og Slagg 0,45 ble herdet på 20 og 35 °C.

Cemex lavvarmesement gjør det mulig å operere med et lavt matriksvolum uten at det går ut over bearbeidbarheten. Dette muliggjør et matriksvolum på 280 l/m<sup>3</sup> kontra 300 l/m<sup>3</sup> som er benyttet for de andre reseptene. Et lavt matriksvolum vil være med på å redusere GWP-verdien ytterligere. Reseptene med Cemex Lavvarmesement er vist i Tabell 4.8.

Tabell 4.8: Sammensetning av resepter med Cemex Lavvarmesement

Resept	v/b	Matriks	Tot b	Klinker (% av b)	SF (% av b)	SP (% av b)*	Akselerator (% av b)
Slagg 0,55	0,55	280	279	28,5	5	1,5 (0,70)	-
Slagg 0,55A	0,55	280	277	28,5	5	1,5 (0,78)	4,3
Slagg 0,45	0,45	280	320	28,5	5	1,5 (1,00)	-

\*Tall i parentes viser den faktiske doseringen

## 4.6 AKSEPTKRITERIER ETTER NS-EN 206

Betongen som skal benyttes i dekkene faller under eksponeringsklasse X0, og vil med dette kreve en betong med bestandighetsklasse M90. Denne bestandighetsklassen gir stor frihet i utforming av betongresepten, men setter likevell noen krav for å sikre blant annet støplighet og bestandighet. Når flygeaskeinnholdet øker i det omfanget som observeres i denne oppgaven vil noen av de gitte kravene overstiges.

Det settes en begrensning på hvor stor andel flygeaske og silikastøv som kan tas med i beregningen av effektivt masseforhold og effektiv bindemiddelmengde. Kravet bestemmer derimot ikke direkte hvor mye som kan tilsettes i betongen utenom beregningene. Det kan med andre ord tilsettes større andeler, men vil ikke regnes som en del av effektiv bindemiddelmengde. Det vil si at det anses som en passivt materiale, på lik linje med sand.

For flygeaske er kravet maks 35 % av bindemiddelet, imens kravet for silikastøv er 11 %. For å imøtekomme disse kravene, samt resterende krav i NS-EN 206+NA, blir store deler av flygeasken og silikastøvet ansett som filler. Denne tilnærmingen vil være akseptabel ettersom de ekstra mengdene ikke påvirker betongen på noen negativ måte for denne eksponeringsklassen.

For CEM II stilles det et krav om at minste tillatte klinkerandel av bindemiddelet skal være 65 %. Dette gjelder dermed for Standard FA – ikke for Aalborg Rapid som er en CEM I. Andel flygeaske, silikastøv og klinker vil alle gå på bekostning av hverandre, så ved å redusere flygeaske- og silikastøvandelen som regnes å gi et bidrag, vil andelen klinker øke og tilfredstille dette kravet.

Ved å redusere bidragsandelen fra flygeaske og silikastøv på denne måten vil derimot effektiv bindemiddelmengde reduseres. Kravet for minste tillatte effektive bindemiddelmengde blir derfor vanskeligere å tilfredstille for flygeaskebetongen. For en M90 er minste effektive bindemiddelmengde  $225 \text{ kg/m}^3$ . Effektivt bindemiddel er derfor regnet ut for hver resept, for å se hvordan andel effektiv flygeaske og silikastøv kan balanseres for å tilfredstille de ulike kravene på best måte.

Slaggsementen er en CEM III/B og følger dermed andre krav enn de resterende reseptene. Samtlige av slaggsementene er utarbeidet innenfor standardens grenser, og behøver ingen ytterligere argumentasjon for å dokumentere at betongen kan benyttes. Slagg 0,55 og Slagg 0,55A tilfredsstiller kravene for bestandighetsklasse M90, imens Slagg 0,45 tilfredsstiller bestandighetsklasse M45.

## 4.7 MILJØDEKLARASJONER

EPD for hver enkelt resept ble utarbeidet for å kunne sammenligne GWP og vurdere hvordan valg av sementtype og dosering av flygeaske påvirker klimagassutslippet til materialet. Ettersom det ikke foreligger noe offentlig verktøy for å utarbeide EPDer, er disse bestilt fra betongleverandører med tilgjengelige verktøy og data for delmaterialene. EPD for reseptene med Cemex sement ble utarbeidet av Ølen Betong AS, mens reseptene med Standard FA og Aalborg Rapid ble utarbeidet av Unicon AS.

EPDen for hver enkelt resept lages helt spesifikt for prosjektet, fabrikken hvor betongen blandes og hvilke delmaterialer som blir benyttet. Det er derfor viktig å ha oversikt over hvilken informasjon som legges inn i EPDen. En viktig antagelse som ble gjort for EPDene i denne oppgaven var at tilslaget som skal benyttes kommer fra Svelvik og har samme mengder som brukt i laboratoriet. Grunnen til dette er at det ble benyttet Årdal tilslag på laboratoriet, men dette tilslaget blir ikke benyttet av fabrikken som mest sannsynlig skal levere betong til prosjektet. Ved å bytte tilslag er det viktig å være klar over at siktekurvene for tilslaget vil være annerledes og kan føre til endring i mengden sement som trengs for å oppnå samme konsistens på betongen. I denne oppgaven er det viktigere at sammenligningsgrunnlaget for de ulike reseptene er likt enn at verdiene i EPDen er nøyaktig likt som for sluttproduktet som velges for produksjon på prosjektet.

I tillegg ble følgende forutsetninger satt:

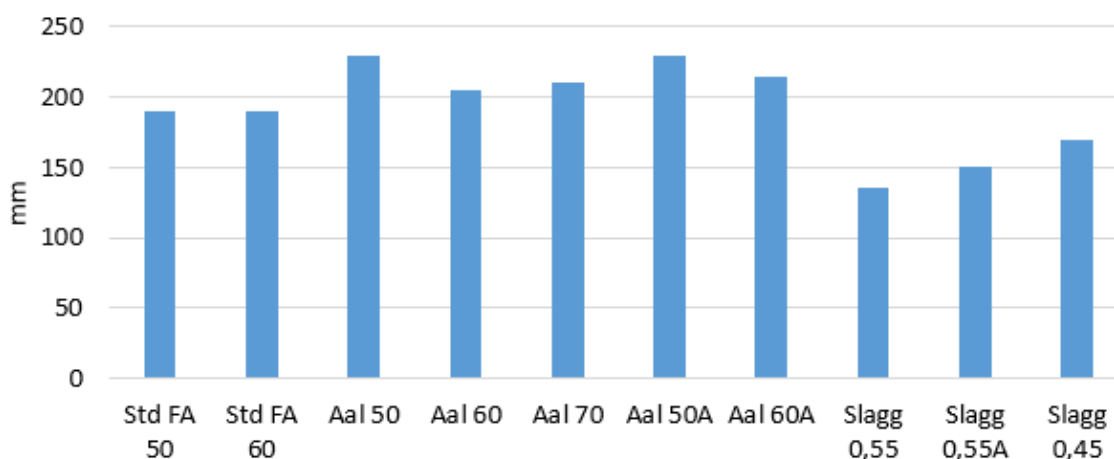
- Cemex har silo i Oslo - 10 km transport fra silo til fabrikk.
- Silica fra Elkem fabrikk i Kristiansand - Transport til Oslo med Euro 5.
- Tilsetningsstoff – Transport med Euro 5 fra Mapei Sagstua til Oslo.
- Tilslag - båttransport fra Svelvik til Oslo havn + 10 km til fabrikk.

# KAPITTEL 5 LABORATORIERESULTATER

## 5.1 BEARBEIDBARHET

Som utgangspunkt ble det forsøkt å oppnå en konsistens for alle reseptene med omtrent 200 mm i synk. Gjennomgående for reseptene med høy flygeaskedosering var en seig konsistens som fløt sakte ut ved synktest. Blandingene fløt på tross av dette godt og oppnådde alle et synkmål på omtrent 200 mm, som vist i Figur 5.1. Dette stemmer godt overens med erfaringene som ble gjort med 50 % FA på Powerhouse Brattørkaia.

Blandingene med Cemex Lavvarmesement viste andre egenskaper. Dette var ikke ikke overraskende i og med at de ikke innholdt noe FA. Disse blandingene hadde tilsynelatende en matriks med lavere viskositet og dårligere bæreevne. Dette førte til at spesielt reseptene Slagg 0,55 og Slagg 0,55A viste tegn til separasjon, og ville trolig ikke oppnådd en bedre synk med høyere dosering av SP. På tross for dette var all betongen god å jobbe med og lett å støpe ut i former. Det ble derfor ikke valgt å gjøre justeringer i noen av reseptene for å oppnå en bedre konsistens.



Figur 5.1: Synkmål for resepter

## 5.2 FASTHETSUTVIKLING

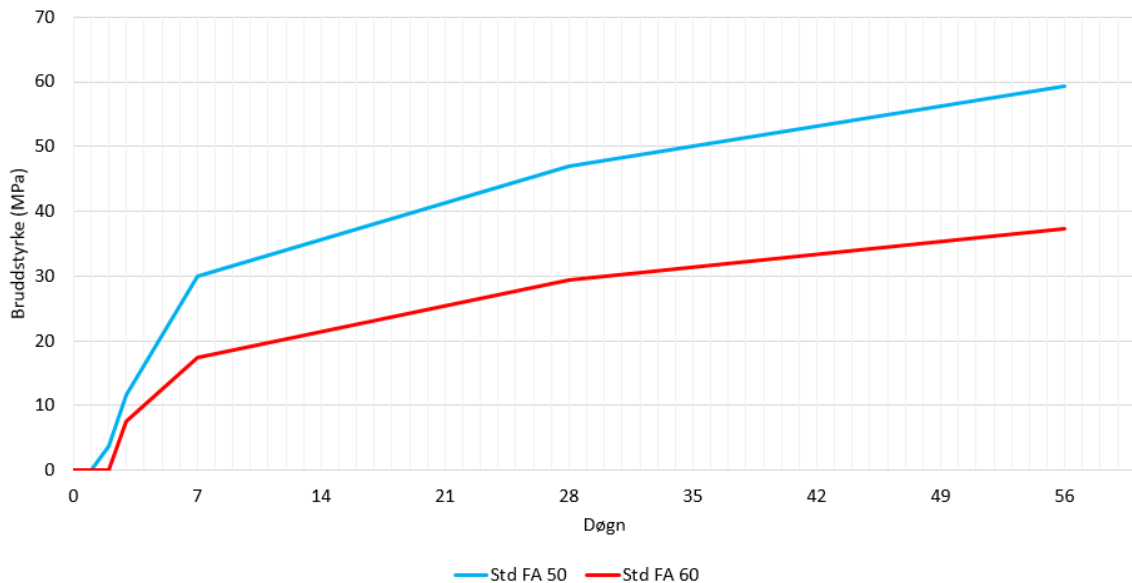
## 5.2.1 INNLEDENDE FORSØK MED STANDARD FA

Tabell 5.1 viser den målte fasthetsutviklingen til de innledende forsøkene med Standard FA-sement ved ulike herdetemperaturer. Det er viktig å merke seg at det ikke ble laget tilstrekkelig med prøveteringer for første blanding med Std FA 50. Det mangler derfor resultater ved 3, 7 og 56 døgn for denne resepten ved 20 °C.

For begge reseptene hadde terningene, som herdet ved 5 °C, for lav fasthet til å avformes etter ett døgn uten å skade terningene. De ble derfor avformet og testet først etter 2 døgn. Det bør også bemerkes at fastheten til Std FA 60 etter to døgn viser 0 MPa. Dette er fordi trykkpressen som benyttes for testing ikke kan måle styrke før 17-18 kN trykk oppnås. Det vil si at bruddspenningen etter 2 døgn er i området mellom 0 og 1,7-1,8 MPa.

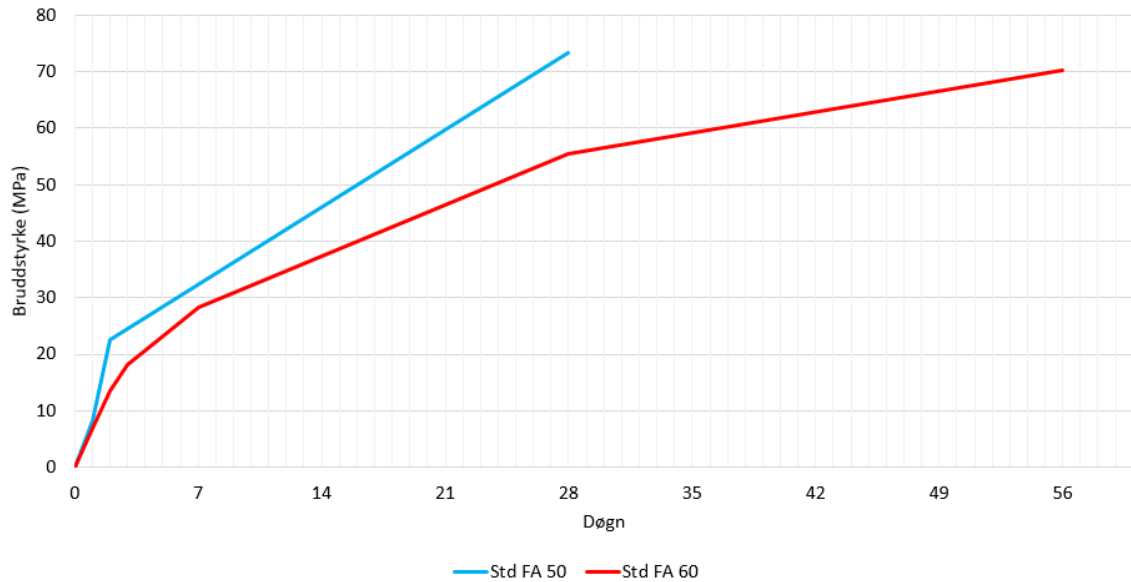
Tabell 5.1: Fasthetsutvikling for resepter med Standard FA

Resept	Herdetemperatur (°C)	Bruddspenning (MPa)					
		1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn	56 døgn
Std FA 50	5	-	3,70	11,68	30,00	46,90	59,29
	20	8,28	22,48	-	-	73,24	-
	35	26,21	43,72	57,61	79,14	100,07	111,74
Std FA 60	5	-	0	7,53	17,47	29,35	37,33
	20	7,00	13,50	18,18	28,23	55,50	70,21
	35	14,56	27,32	42,31	60,21	86,30	95,11



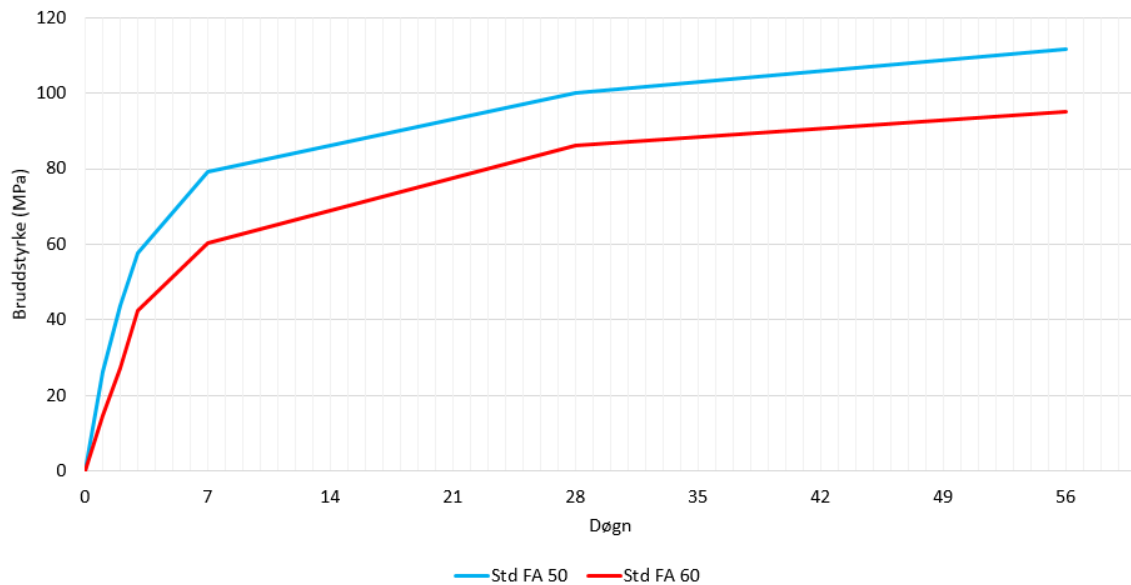
Figur 5.2: Fasthetsutvikling for Standard FA ved 5 °C

Som forventet har begge reseptene sen fasthetsutvikling ved 5 °C og er forhåndsvis langt unna målet om 25 MPa etter 3 døgn, som vist i Figur 5.2. Heller ingen av reseptene oppfyller kravet ved 20 °C, som vist i Figur 5.3. Den første blandingen med Std FA 50 ser ut til å være svært nærme. Ettersom 2 døgn fastheten er på hele 22,48 MPa kan det tenkes at den ville målt over 25 MPa om det hadde blitt utført en test etter 3 døgn. Dette er derimot bare antagelser.



Figur 5.3: Fasthetsutvikling for Standard FA ved 20 °C

Herding ved 35 °C viser en betydelig økt fasthetsutvikling og når kravet på 25 MPa etter allerede 1 døgn for Std FA 50 og etter 2 døgn for Std FA 60, som vist i Figur 5.4. Det må også merkes at 56 døgn fastheten for begge reseptene er overraskende høy, og langt over det som forventes av blandinger med så lave klinkerandeler.



Figur 5.4: Fasthetsutvikling for Standard FA ved 35 °C

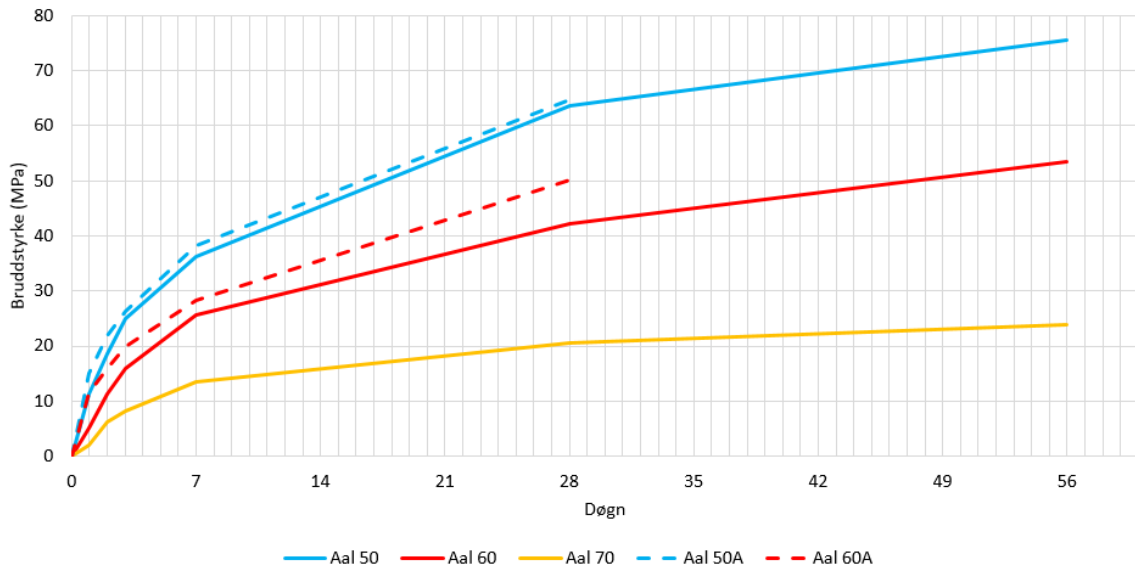


## 5.2.2 DEL 1 - AALBORG RAPID

Tabell 5.2 viser den målte fasthetsutviklingen for alle resepter med Aalborg Rapid sement, både med og uten herdeakseleratoren X-seed. For å lettere kunne sammenligne de ulike reseptene er fasthetsutviklingen ved 20 °C illustrert i Figur 5.5 og ved 35 °C i Figur 5.6. Målinger som ikke er utført ved 56 døgn skyldes at reseptene ikke ble blandet i tide for å rekke dette før innlevering av oppgaven, dette gjelder også for to resepter i Del 2.

Tabell 5.2: Fasthetsutvikling for resepter med Aalborg Rapid

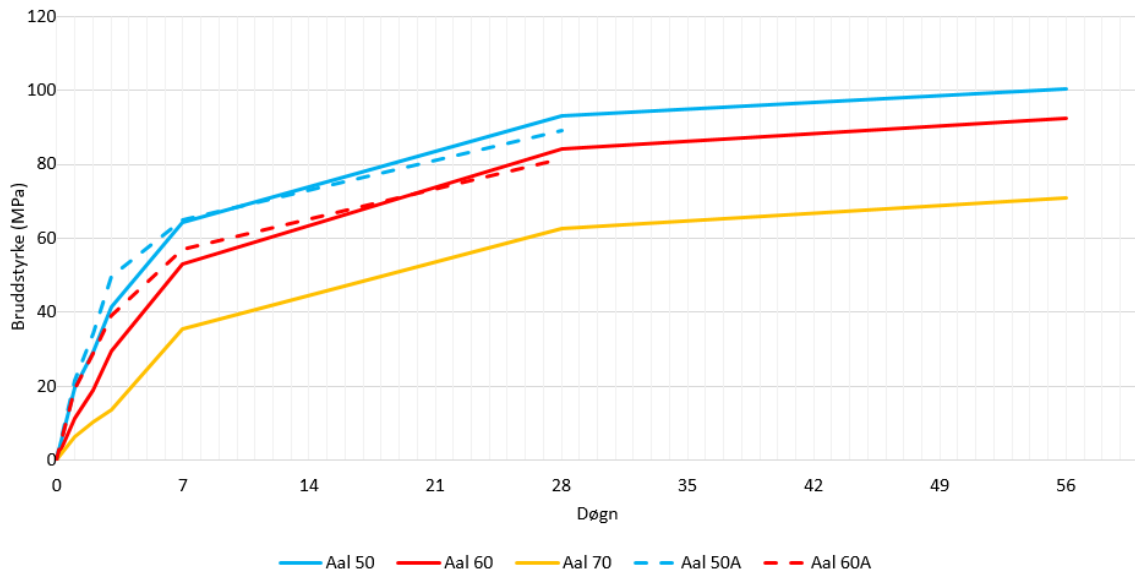
Resept	Herdetemperatur (°C)	Bruddspenning (MPa)					
		1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn	56 døgn
Aal 50	20	11,29	18,64	24,97	36,35	63,59	75,53
	35	19,61	29,20	41,54	64,45	92,96	100,36
Aal 60	20	5,23	11,42	15,92	25,55	42,21	53,49
	35	11,27	18,86	29,57	52,95	84,12	92,31
Aal 70	20	2,00	6,21	8,27	13,52	20,66	23,99
	35	6,25	10,28	13,82	35,60	62,63	70,96
Aal 50A	20	15,00	21,98	26,39	38,13	64,64	-
	35	21,59	34,28	49,63	65,01	88,97	-
Aal 60A	20	11,46	16,01	20,02	28,26	50,20	-
	35	19,38	28,83	39,12	56,86	81,45	-



Figur 5.5: Fasthetsutvikling for Aalborg Rapid ved 20 °C

Som Figur 5.5 viser er det kun de to reseptene med 50 % FA som klarer målet om 25 MPa etter 3 døgn ved 20 °C. Fasthetsutviklingen er derimot stor for både 50 og 60 % FA helt frem til 56 dager.

Fasthetsutviklingen ved 35 °C vises i Figur 5.6 Her sees en kraftig akselerert effekt som følge av den økte temperaturen. Bruddspenningen de første dagene er like i underkant av det dobbelte sammenlignet med 20 °C.



Figur 5.6: Fasthetsutvikling for Aalborg Rapid ved 35 °C

For prøvene herdet ved 20 og 35 °C ser man en liten økning i fastheten de første dagene ved bruk av herdeakselerator. Denne økningen er derimot ikke veldig stor og endrer fasthetsutviklingen i liten grad.

Det er viktig å merke seg at 56 døgns fasthetene til de tre reseptene herdet ved 35 °C er overraskende høye og overgår fastheten oppnådd ved 20 °C betydelig. Dette er ikke å forvente ettersom økt herdetemperatur vanligvis ikke gir økt slutfasthet, men heller det motsatte. Det som forventes av økt herdetemperatur er kun en akselerert effekt, gjerne med en redusert slutfasthet som vanligvis er tilfellet.

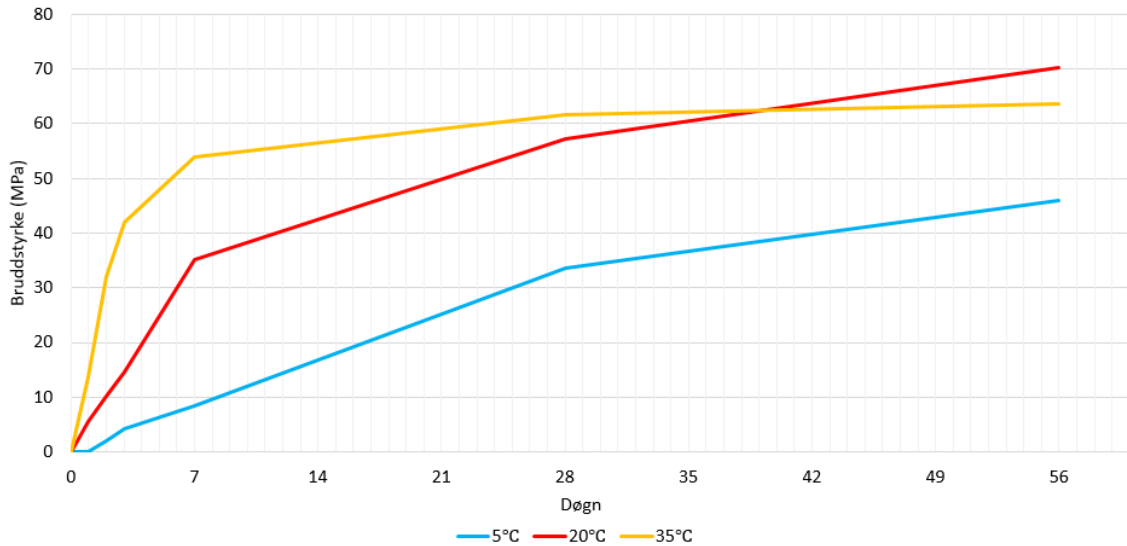
### 5.2.3 DEL 2 - CEMEX LAVVARMESEMENT

Tabell 5.3 viser den målte fasthetsutviklingen for de tre blandingene med Cemex Lavvarmesement. Slaggsement er som kjent svært temperaturfølsom, noe som kommer tydelig frem i prøven herdet ved 5 °C.

Tabell 5.3: Fasthetsutvikling for resepter med Cemex Lavvarmesement

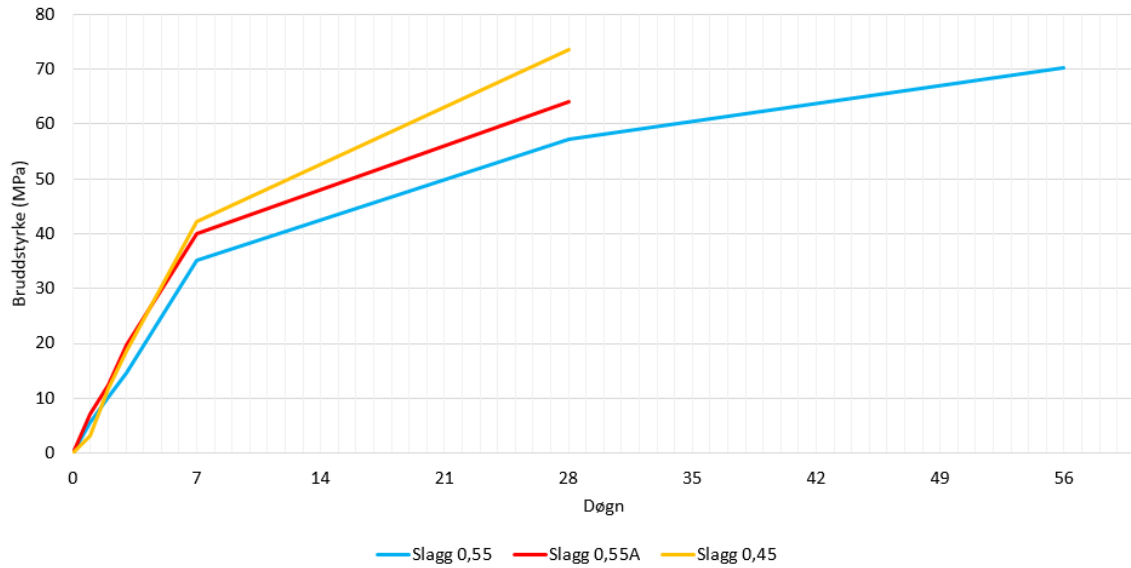
Resept	Herdetemperatur (°C)	Bruddspenning (MPa)					
		1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn	56 døgn
Slagg 0,55	5	-	1,99	4,19	8,45	33,61	46,00
	20	5,62	10,31	14,65	35,05	57,31	70,12
	35	13,65	31,95	41,69	54,00	61,58	63,51
Slagg 0,55A	20	7,16	12,42	19,65	39,91	64,15	-
	35	21,37	40,94	50,39	60,16	68,49	-
Slagg 0,45	20	3,10	11,72	18,55	42,26	73,60	-
	35	20,70	45,15	54,52	62,79	69,49	-

Påvirkningen ved ulike temperaturer er illustrert i Figur 5.7 for Slagg 0,55, og viser at den oppfylder kravet om 25 MPa med god margin om den varmes opp til 35 °C. Resultatene viser også at den økte herdetemperaturen har negativ innvirkning på sluttstyrken, og gir prøvene herdet ved 35 °C 6,6 MPa lavere trykkfasthet enn ved 20 °C. Det er å forvente at prøvene herdet ved 5 °C også vil ende med en høyere sluttfasthet enn prøvene herdet ved 35 °C. Disse prøvene ser derimot ikke ut til å ha nådd sin sluttfasthet og vil trenge lenger herdetid enn 56 døgn på å nå samme styrke som de andre prøvene.



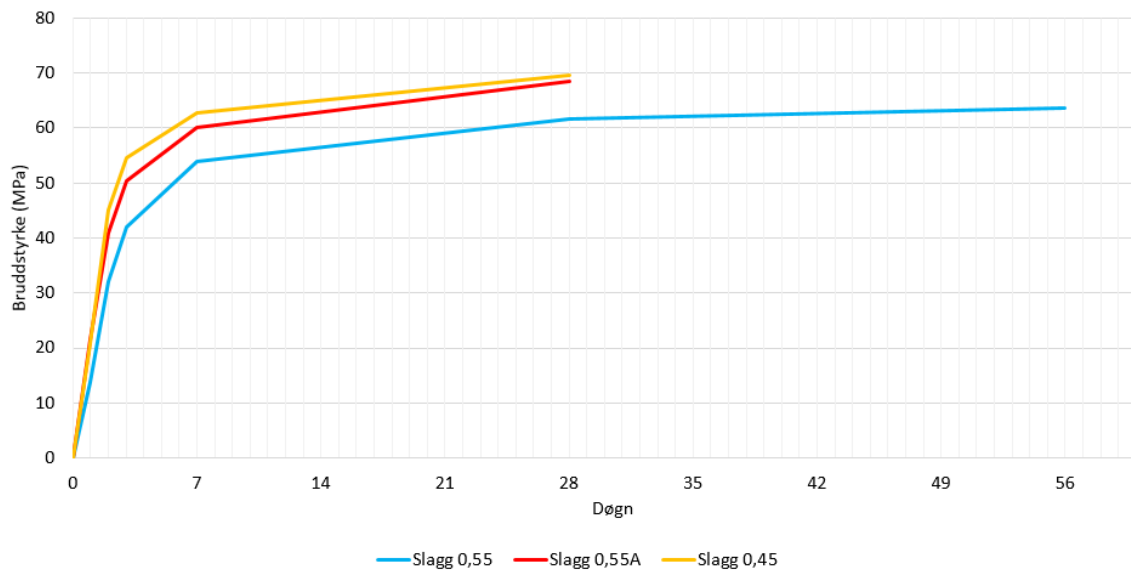
Figur 5.7: Fasthetsutvikling for resept Slagg 0,55 ved ulike temperaturer

I Figur 5.8 vises de tre slagg-reseptenes fasthetsutvikling ved 20 °C. Samtlige resepter viser en sen fasthetsutvikling som er karakteristisk for slaggsement, og oppfylder ikke kravet til 3 døgn fasthet. Resept Slagg 0,55A som er akselerert med X-seed, gir ikke bemerkelsesverdig økning i tidligfastheten. Herdeakseleratoren forventes kun å gi en akselerert herding de første døgnene, og deretter havne på lik linje med referansen. Akseleratoren ser derimot ut til å gi betongen en høyere sluttfasthet, og har gir en økning på 6,9 MPa ved 28 døgn både ved herding i 20 og 35 °C.



Figur 5.8: Fasthetsutvikling for Cemex Lavvarmesement ved 20 °C

Figur 5.9 viser fasthetsutviklingen til de ulike slagg-reseptene ved 35 °C, og viser at alle tre reseptene blir kraftig påvirket av temperaturen og oppnår nærmest full styrke de første 7 døgnene. Samtlige resepter har en todøgnsfasthet på over 30 MPa og klarer kravet på 25 MPa med god margin ved hjelp av økt temperatur. Etter 7 døgn er fasthetsutviklingen lav og tyder på at prøvene nærmer seg full styrke.



Figur 5.9: Fasthetsutvikling for Lavvarmesement ved 35 °C

### 5.3 AKSEPTKRITERIER ETTER NS-EN 206+NA

Tabell 5.4 til 5.8 viser reseptene med Standard FA og Aalborg Rapid og hvordan de oppfyller de ulike kravene gitt i NS-EN 206+NA. Kolonne «Resept» viser de faktiske bestanddelene i resepten, mens kolonne «bidrag» viser hvor mye av bestanddelene som regnes med i den effektive bindemiddelmengden og masseforholdet i samsvar med standarden.

Den tilsatte andelen til både flygeaske og silikastøv er høyere enn makskravet for alle reseptene. For å vise at standarden oppfylles anses deler av flygeasken og silikastøvet som filler. De oppnådde andelene flygeaske, silikastøv og klinker er andelene av det observerte bidraget. Det er dermed ikke de faktiske andelene i resepten, men de oppnådde andelene etter standarden.

#### 5.3.1 AKSEPT FOR RESEPTER MED STANDARD FA

Som Tabell 5.4 viser, så tilfredsstillers ikke Std FA 50 kravet om minste effektive bindemiddelmengde, ettersom flygeaske og silikastøv er redusert for å oppfylle kravet om minste andel klinker.

Tabell 5.4: Aksept for Std FA 50 etter NS-EN 206+NA

Bindemiddelkomponent	Resept ( $kg/m^3$ )	Klinker ( $kg/m^3$ )	Bidrag ( $kg/m^3$ )	k
Norcem Std FA	179,7	140,2	179,7	1,0
Silikastøv	36,8	-	23,5	1,0
Flygeaske	151,7	-	17,5	0,7
Fritt vann	129,1	-	129,1	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	<0,90	0,60	✓
Eff. bindemiddelmengde	>225	215	x
Andel FA	<0,35	0,23	✓
Andel klinker	>0,65	0,65	✓
Andel silikastøv	<0,11	0,11	✓
Reell bindemiddelmengde		368	

KAPITTEL 5. LABORATORIERESULTATER

I likhet med Std FA 50 vil heller ikke Std FA 60 oppfylle minstekravet til effektiv bindemiddelmengde etter standarden, som vist i Tabell 5.5.

Tabell 5.5: Aksept for Std FA 60 etter NS-EN 206+NA

Bindemiddelkomponent	Resept (kg/m <sup>3</sup> )	Klinker (kg/m <sup>3</sup> )	Bidrag (kg/m <sup>3</sup> )	k
Norcem Std FA	133,4	104,1	133,4	1,0
Silikastøv	36,4	-	17,5	1,0
Flygeaske	194,6	-	13,0	0,7
Fritt vann	122,4	-	122,4	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	<0,90	0,77	✓
Eff. bindemiddelmengde	>225	160	x
Andel FA	<0,35	0,23	✓
Andel klinker	>0,65	0,65	✓
Andel silikastøv	<0,11	0,11	✓
Reell bindemiddelmengde		364	

## 5.3.2 AKSEPT FOR RESEPTER MED AALBORG RAPID

CEM I har som nevnt tidligere ingen krav til minste klinkerandel av effektivt bindemiddel. Reseptene med Aalborg Rapid kan dermed ha en lavere andel klinker og fortsatt være i samsvar med standarden. Dermed er bidraget fra flygeaske og silikastøv økt til maksimumsgrensene. Som Tabell 5.6 viser vil Aal 50 være innenfor standardens grenser.

Tabell 5.6: Aksept for Aal 50 etter NS-EN 206+NA

Bindemiddelkomponent	Resept ( $kg/m^3$ )	Bidrag ( $kg/m^3$ )	k
Aalborg Rapid	145,5	145,5	1,0
Silikastøv	36,4	25,0	1,0
Flygeaske	181,9	79,0	0,7
Fritt vann	127,3	127,3	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	<0,90	0,56	✓
Eff. bindemiddelmengde	>225	226	✓
Andel flygeaske	<0,35	0,35	✓
Andel silikastøv	<0,11	0,11	✓
Reell bindemiddelmengde		364	

Som vist i Tabell 5.7 og 5.8 på neste side, vil hverken Aal 60 eller Aal 70 tilfredstille kravet om minste effektive bindemiddelmengde. Aal 70 tilfredstiller heller ikke makskravet om 0,90 i masseforhold.



Tabell 5.7: Aksept for Aal 60 etter NS-EN 206+NA

Bindemiddelkomponent	Resept ( $kg/m^3$ )	Bidrag ( $kg/m^3$ )	k
Aalborg Rapid	108,9	108,9	1,0
Silikastøv	36,3	18,5	1,0
Flygeaske	217,7	59,0	0,7
Fritt vann	123,4	123,4	-

Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	<0,90	0,73	✓
Eff. bindemiddelmengde	>225	169	x
Andel flygeaske	<0,35	0,35	✓
Andel silikastøv	<0,11	0,11	✓
Reell bindemiddelmengde		363	

Tabell 5.8: Aksept for Aal 70 etter NS-EN 206+NA

Bindemiddelkomponent	Resept ( $kg/m^3$ )	Bidrag ( $kg/m^3$ )	k
Aalborg Rapid	70,5	70,5	1,0
Silikastøv	35,3	23,3	1,0
Flygeaske	246,8	38,0	0,7
Fritt vann	123,4	123,4	-

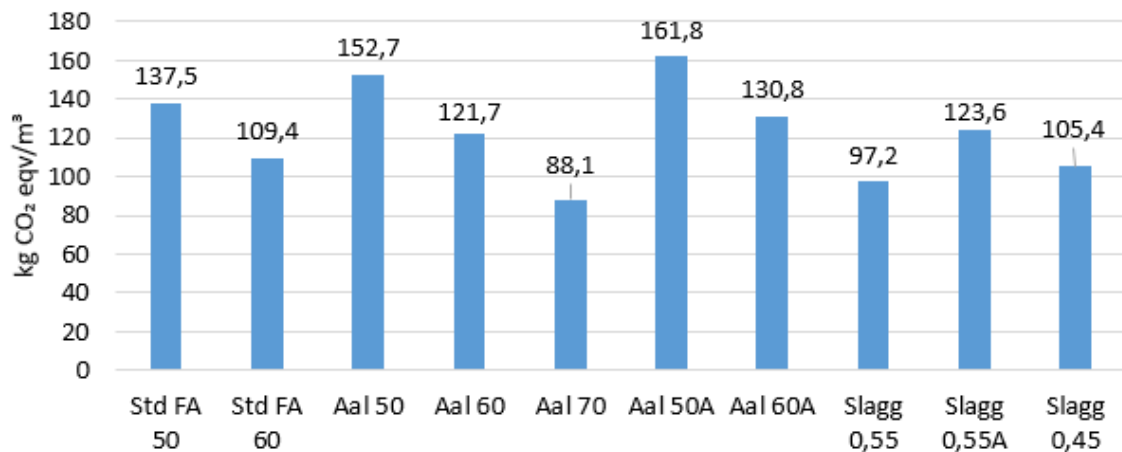
Parameter	Krav	Oppnådd	Aksept
Masseforhold	<0,90	1,13	x
Eff. bindemiddelmengde	>225	109	x
Andel flygeaske	<0,35	0,35	✓
Andel silikastøv	<0,11	0,11	✓
Reell bindemiddelmengde		353	

## 5.4 MILJØDEKLARASJON

GWP verdi for hver enkelt resept er presentert i Figur 5.10 og viser en spredning fra 88,1 til 161,8 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup>. Dette er en stor spredning, men alle reseptene ligger innenfor prosjektets mål om 170 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup>. Til sammenligning er vil en B35 i Lavkarbonklasse A ha en maksverdi på 210 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup> mens bransjereferansen for samme betong er på 370 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup> etter NB37 (Norsk betongforening 2015).

Av figuren kan vi se at reseptene med Standard FA har en GWP på omtrent 15 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup> mindre enn tilsvarende resepter med Aalborg Rapid. Den lave verdien er som forventet grunnet lenger transportavstand fra fabrikk i Danmark og gode miljøtiltak på Norcem sin fabrikk på Brevik som produserer Standard FA.

Levert på lokal silo har Aalborg Rapid en GWP verdi på 911 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup>, som er relativt høyt sammenlignet med Standard FA på 607 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup>. Det må da merkes at Aalborg Rapid er en ren klinker, mens Standard FA er blandet inn FA som reduserer GWP verdien. Cemex Lavvarmesement blir produsert i Schwelger i Tyskland, og har den lengste transportavstanden, men en GWP verdi på kun 293 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup> levert på silo i Norge, grunnet den høye andelen slagg.



Figur 5.10: GWP for betongresepter i A1-A3

EPDene ligger vedlagt i Vedlegg B til D. Forutsetningene for EPDene er lik for de ulike reseptene av hver sementtype, med kun variasjon i andel av hvert delmateriale. Det er derfor vedlagt en fulstendig EPD fra Unicon og en fra Ølen Betong, for de resterende reseptene er det kun resultatene fra EPDen som er vedlagt.

# KAPITTEL 6 SIMULERINGER

Dette kapitlet tar kun for seg simuleringer av dekke- og bunnplatestøp slik det tenkelig kan utføres ved Gullhaug Torg. Hensikten med simuleringene er å illustrere fasthetsutviklingen til denne typen resepter og hvordan tilført varme kan være et redskap for å oppnå enda bedre tidlig fasthet.

Temperaturutviklingen for dekke og bunnplate er simulert i CrackTeSt COIN for å kunne regne ut tilhørende fasthetutvikling. Dette gjør det mulig å kartlegge hvordan tilført varme kan påvirke fasthetsutviklingen, og om tilført varme kan være et redskap for å oppnå kravet på 25 MPa etter 72 timer. Hensikten med simuleringene er for å se hvordan de aktuelle reseptene faktisk fungerer under de eksterne forholdene som forekommer under støping. Det er også interessant å se hvilken effekt tilført varme har å si for herdeforløpet da alle reseptene har gitt svært gode resultater ved herding i 35 °C. Med dette er det simulert med og uten varmekabler.

Det er benyttet to resepter for denne simuleringen – Aal 50A og Slagg 0,45. Disse reseptene er benyttet fordi de anses som relevante for Gullhaug Torg i og med at de tilfredstiller akseptkriteriene gitt i standarden samtidig som de har vist god fasthetsutvikling i labarbeidet. Av reseptene er Aal 50A tiltenkt dekke, mens Slagg 0,45 er tiltenkt bunnplate. I tillegg er det interessant å sammenligne hvordan fasthetsutviklingen påvirkes av tilført varme for de to forskjellige reseptene med forskjellig aktiveringsenergi. Geometriens rolle vil også påvirke fasthetsutviklingen. Dette kartlegges ved å sammenligne resultatene fra dekke- og bunnplatesimuleringene.

For simulering av dekke er begge sementene tatt i bruk for å sammenligne de to sementene. For simulering av bunnplate er kun Slagg 0,45 benyttet da en slaggsement er ønskelig å benytte i bunnplaten med tanke på blant annet miljøgevinst. Bunnplaten skal i tillegg tilfredsstillende en bestandighetsklasse på M45 som kun Slagg 0,45 tilfredsstiller. I tillegg er dette en resept med høy aktiveringsenergi – som passer en bunnplate godt i og med at bunnplaten er såppas massiv og derfor holder bedre på varmen.

## 6.1 AVGRENSNINGER

For å holde simuleringene til et fornuftig nivå ble enkelte avgrensninger gjort. Simuleringene er i bunn og grunn ment til å være et supplement til de andre resultatene. Det er valgt å kun se på to resepter – Aal 50A og Slagg 0,45 – da det er noe lignende disse reseptene som anses som aktuelt å benytte i Gullhaug Torg-prosjektet. Ved simuleringene er det valgt å bruke tilført varme som en variabel for de to reseptene – resten av parameterne konstante. Dette gjelder for eksempel omgivelsetemperatur, starttemperatur for betongen, geometri og isolasjon. I tillegg kan dekke og bunnplate sammenlignes slik at rollen geometrien har kommer til syne. Dette er gjort for å holde støpesituasjonen mest mulig realistisk uten for mange variasjoner. Med dette ble det avgjort å simulere et herdeforløp for ett dekke og bunnplate i en omgivelsetemperatur på 5 °C for de to reseptene. Ytterligere randbetingelser fremkommer henholdsvis i kapittel 6.3 Simulering av dekke og 6.4 Simulering av bunnplate.

## 6.2 FREMGANGSMÅTE

Simuleringsprogrammet CrackTeSt COIN er benyttet for å simulere den gjennomsnittlige temperaturutviklingen for betongen under ulike betingelser. Deretter er fastheten regnet ut etter modenhetsprinsippet. CrackTeSt COIN inneholder noen standard resepter – disse er ikke representative for de aktuelle reseptene, og reseptene måtte derfor legges inn manuelt. Dette gjøres ved å kartlegge reseptenes varmetvikling ved ulik modenhet. Verdiene legges inn i CrackTeSt COIN som ut i fra dette kan simulere temperaturen i betongen.

Fremgangsmåten for simuleringen har vært som følgerne:

- Aktiveringsenergien kartlegges for reseptene
- Temperaturen i betongen målt ved hjelp av herdekasseforsøk – semi-adiabatisk kalorimeter
- Varmetviklingen beregnes etter modenhet og aktiveringsenergi
- Varmetviklingen for ulik modenhet legges inn i CrackTeSt COIN
- Temperaturutvikling for dekke og bunnplate simuleres
- Fastheten utregnes i eget regneark etter modenhetsprinsippet

Det er mulig å simulere fasthetsutvikling i CrackTeSt COIN. Grunnen til at dette gjort er at den versjonen av programmet som er benyttet ikke tillater å forandre på nødvendige parametere for fasthetsberegninger som aktiveringsenergi og slutfasthet.

### 6.2.1 RESEPTENES AKTIVERINGSENERGI

Første steg i simuleringsprosessen var å kartlegge reseptens aktiveringsenergi. Aktiveringsenergien ble avgjort ved hjelp av regnearket «Aktiveringsenergi.xlsm» utviklet av Sverre Smeplass (2013). I regnearket plottes først fasthetsdata for betongen ved 5, 20 og 35 °C inn. Deretter danner regnearket en empirisk graf som viser fasthetsutviklingen til betongen som funksjon av modenheten ved referansetemperaturen 20 °C ved hjelp av formel 6.1. Deretter justeres aktiveringsenergien slik at fasthetsmålingene ved alle temperaturer sammenfaller med den empiriske grafen med hensyn til modenheten. Se Vedlegg Q for eksempel på regnearket.

$$f(M) = f_{c\infty} * e^{-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha} \quad (6.1)$$

Her er  $M$  modenheten til betongen,  $f_{c\infty}$  slutfasthet,  $\tau_e$  retardasjonparameter (h) og  $\alpha$  krumningsparameter for grafen. Regnearket estimerer disse verdiene, og aktiveringsenergien justeres slik at fasthetsdataene for de ulike temperaturene sammenfaller med hensyn til betongens modenhet. Dette regnearket forutsetter at betongens fasthetsutvikling kun er akselerert av varme – slutfastheten forblir uforandret.

For enkelhetsskyld er det kun benyttet fasthetsdata ved 20 og 35 °C. Som beskrevet i kapittel 2.7 er aktiveringsenergien lik A-leddet ved  $\theta > 20$  °C. Om betongtemperaturen havner under 20 °C kommer B-leddet i tillegg, men dette ble neglisjert siden betongen kun ble herdet i 20 og 35 °C i utgangspunktet. Det ble med andre ord kun sett på herding

ved over 20 °C da aktiveringsenergien er uforandret ved  $\theta \geq 20$  °C (Smepllass 2003). B-leddet vil spille en rolle om betongen faller under 20 °C i simuleringene. Standardverdier for B-leddet er derfor antatt for simuleringene.

Fasthetesmålinger etter 1, 2, 3 og 7 dager ble utført for betongene. Målingene ble deretter plottet inn i regnearket og aktiveringsenergien ble avlest. Dette ga en grov oversikt over aktiveringsenergien til reseptene – flere målinger mellom 0 og 7 dager ville gitt en mer nøyaktig aktiveringsenergi. Allikevel ble det avgjort at det var tilstrekkelig med de målingene som ble gjort.

### 6.2.2 MÅLING AV VARMEUTVIKLING

For å kunne utføre en simulering av herdeforløpet ble varmeutviklingen til de kjemiske reaksjonene i betongen målt for de to reseptene. Semi-adiabatisk kalorimeter, ofte omtalt som herdekasse, utføres ved å logge temperaturen i betongen i en godt isolert kasse for å oppnå et så nært adiabatisk system som mulig. Det ble benyttet en herdekasse av kryssfinér med 10 cm isolering av polystyren som rommer omtrent 15 l betong. Temperaturen i betongen og i luften på utsiden ble logget hvert 30 minutt i 7 døgn.

Varmetapet til omgivelsene blir kompensert for ved å anta at varmestrømmen ut av kassen er proporsjonal med temperaturdifferansen mellom betongen og omgivelsene (Smepllass 2003). For å minimere varmetapet ytterligere ble herdekassene satt i et varmeskap på 35 °C – dette er vanlig å gjøre for betonger med lav varmeutvikling. Presisjonen av beregningene økes ved at korreksjonsleddet for temperaturtap i regnearket blir mindre (Smepllass 2018).

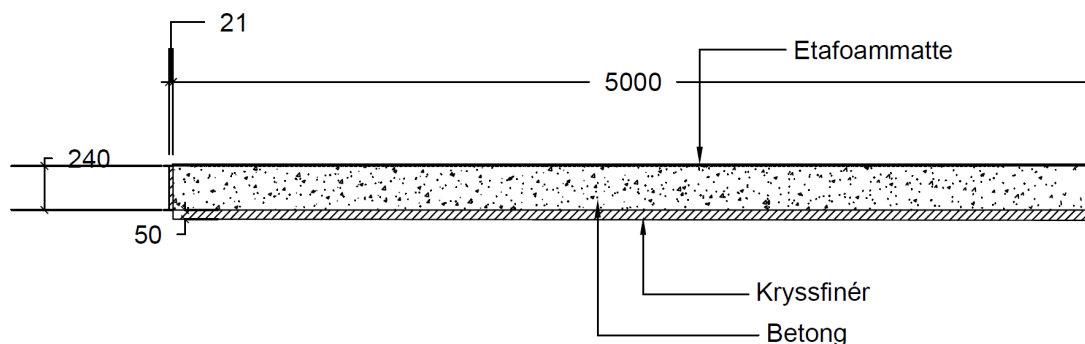
Den totale temperaturutviklingen fra betongen blir dermed den målte temperaturen pluss et temperaturtap til omgivelsene beregnet ved hjelp av regnearket «Herdekasse.xlsm» utviklet av Sverre Smepllass.

Etter at alle fasthetsdata var innhentet for reseptene ble disse dataene plottet inn i regnearket sammen med aktiveringsenergien som tidligere ble definert. I tillegg ble betongens densitet, varmekapasitet, sementinnhold, avbindingstid og starttemperatur plottet inn.

De resultatene som ble hentet ut av regnearket for videre bruk var varmeutviklingen til betongen ved ulik modenhet som ligger under «Heat polygon» i regnearket «Herdekasse.xlms». Eksempel på dette kan ses i Vedlegg R.

## 6.3 SIMULERING AV DEKKE

De 5 første meterne av et etteroppspent dekke er simulert. Høyden på dekket er satt til 240 mm etter antatt dekkeshøyde for prosjektet (Sælen 2018). Gjennomsnittstemperaturen i dette området er simulert. Figur 6.1 illustrerer geometrien som benyttet. Denne geometrien er modellert i CrackTeSt COIN og kan ses som Vedlegg T.



Figur 6.1: Dekkegeometri

For å simulere et mest mulig realistisk temperaturforløp i betongen er det benyttet randbetingelser for de ulike sidene av dekke. På oversiden av dekke er det lagt etafoam-matte (isolasjonsmatte) etter 4 timer. Yttersiden består av forskaling av kryssfinér à 21 mm, og undersiden kryssfinér à 50 mm. Den indre randen er satt til adiabatisk – altså ingen temperaturtap – i og med at kun de fem første meterne er simulert. Simuleringstiden her er satt til 72 timer da tidlig fasthet anses som mest vesentlig, og dekke skal på denne tiden oppnå kravet på 25 MPa. Varmekonduktiviteten til de ulike randbetingelsene ligger inne CrackTeST COIN foruten etafoam-matten som er hentet fra Haucon (2007) sitt datablad. Randbetingelsene er benyttet for alle simuleringene og er oppsummert i Tabell 6.1.

Tabell 6.1: Randbetingelser for dekke

Randbetingelse	Materiale	Tid	Varmegjennomgang
Overside	Fri overflate 0-4 timer	0-4 timer	1000,00 $w/m^2K$
	Etafoam-matte 10 mm 4-72 timer	4-72 timer	5,00 $w/m^2K$
Underside	Forskaling av kryssfinér à 50 mm	0-72 timer	2,80 $w/m^2K$
Ytre rand	Forskaling av kryssfinér à 21 mm	0-72 timer	6,67 $w/m^2K$
Indre rand	Adiabatisk rand	0-72 timer	0,00 $w/m^2K$

Det er utført flere simuleringer av dekke – både med og uten varmekabler for begge reseptene. De resterende parameterne er låst og gjelder for alle simuleringene. Dette gjelder blant annet en omgivelsetemperatur på 5 °C, vind på 2 m/s og betongens starttemperatur på 20 °C. Hensikten med dette er å simulere en høststøp – på sommeren kan det tenkes at omgivelsestemperaturen er enda høyere. Alle parameterne som er benyttet er oppsummert i Tabell 6.2.

Tabell 6.2: Dekkeparametere

Parameter	Verdi
Omgivelsetemperatur	5 °C
Betong starttemperatur	20 °C
Betongresept	Aal 50A
	Slagg 0,45
Vind	2 m/s
Høyde	240 mm
Lengde	5000 mm
	cc30 cm
	cc45 cm
Varmekabler á 30 W/m	cc45 cm
	cc60 cm

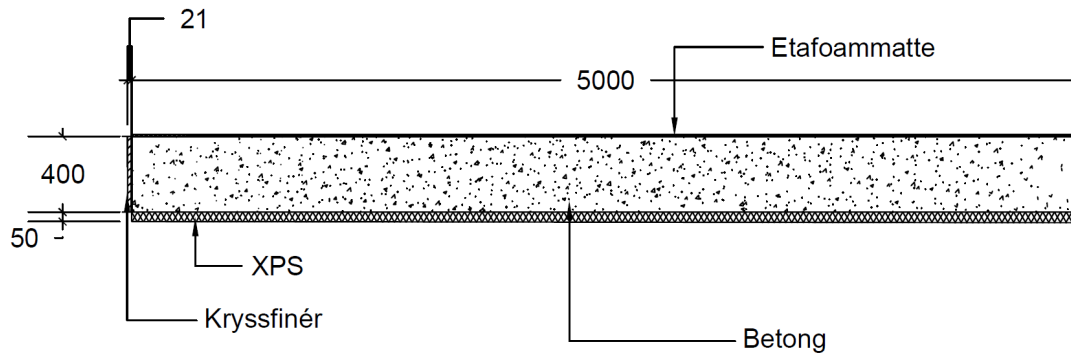
Med ovennevnte randbetingelser og parametere ble følgende simuleringer utført, se Tabell 6.3.

Tabell 6.3: Utførte simuleringer av dekke

Varmekabler	Aal 50A	Slagg 0,45
Uten	✓	✓
cc 30 cm	✓	✓
cc 45 cm	✓	✓
cc 60 cm	✓	✓

## 6.4 SIMULERING AV BUNNPLATE

På samme måte som dekke er de fem første meterne av bunnplaten simulert. Tykkelsen på bunnplaten er satt til 400 mm da det er en 400 mm tykk etteroppspent bunnplate som skal benyttes ved Gullhaug Torg (Sælen 2018). Figur 6.2 illustrerer geometrien som er benyttet. Denne geometrien er modellert i CrackTeSt COIN og kan ses som Vedlegg U.



Figur 6.2: Bunnplategeometri

De randbetingelsene som ble benyttet for dekke ble stort sett benyttet for bunnplaten foruten undersiden. Her er valgt å benytte 50 mm tykk isolasjon av polystyren i og med at bunnplaten ligger på mark. Dette gir vesentlig bedre isolering mot varmetap. På oversiden av dekke er det lagt etafoam-matte etter 4 timer. Yttersiden består av forskaling av kryssfinér à 21 mm, og den andre siden er satt til adiabatisk – altså ingen temperaturløstap. Simuleringstiden her er satt til 120 timer siden kravet på 25 MPa ikke anses å være like viktig ved at bunnplaten ikke er i veien for annet arbeid – herdeforløpet over en lenger periode kan derfor være interessant. Randbetingelsene er benyttet for alle simuleringene og er oppsummert i Tabell 6.1.

Tabell 6.4: Randbetingelser for bunnplate

Randbetingelse	Materiale	Tid	Varmegjennomgang
Overside	Fri overflate 0-4 timer	0-4 timer	1000,00 $w/m^2K$
	Etafoam-matte 10 mm	4-120 timer	5,00 $w/m^2K$
Underside	XPS à 50 mm	0-120 timer	0,72 $w/m^2K$
Ytre rand	Forskaling av kryssfinér à 21 mm	0-120 timer	6,67 $w/m^2K$
Indre rand	Adiabatisk rand	0-120 timer	0,00 $w/m^2K$

De parameterne som ble benyttet for dekke er også benyttet for bunnplaten. Her er det derimot kun benyttet resepten Slagg 0,45. Bunnplaten er simulert med og uten varmekabler à cc30, cc45 og cc60 cm. De resterende parameterne er låst og gjelder for alle simuleringene. Alle parameterne som er benyttet er oppsummert i Tabell 6.5.



Tabell 6.5: Bunnplateparametere

Parameter	Verdi
Omgivelsetemperatur	5 °C
Betong starttemperatur	20 °C
Betongresept	Slagg 0,45
Vind	2 m/s
Høyde	400 mm
Lengde	5000 mm
	cc30 cm
Varmekabler á 30 W/m	cc45 cm
	cc60 cm

Med de ovennevnte randbetingelser og parametere ble følgende simuleringer utført, se Tabell 6.6.

Tabell 6.6: Utførte simuleringer av bunnplate

Varmekabler	Slagg 0,45
Uten	✓
cc 30 cm	✓
cc 45 cm	✓
cc 60 cm	✓

## 6.5 BEREGNING AV FASTHETSUTVIKLING

Ved hjelp av modenheten til betongen kan fastheten bestemmes. Modenheten er kartlagt gjennom den simulerte temperaturutviklingen i betongen sammen med den tilhørende aktiveringsenergien. For utregning av fasthet er regnearket «Fasthet-temperatur,FIB.xlsm» benyttet som er utarbeidet av Sverre Smeplass. Eksempel på regnearket ligger som Vedlegg S. Her legges aktiveringsenergien, varierende betongtemperatur og fasthetsmålinger for betongen ved 20 °C inn. Deretter blir modenheten til betongen utregnet, og fastheten til betongen er til slutt beregnet ut fra formel 6.2.

$$f_c(M) = f_{c28} * e^{s*(1-\sqrt{\frac{672}{M-t_0}})} \quad (6.2)$$

Dette er gjort for hver andre time i løpet av simuleringstiden, og på den måten er fasthetsutviklingen til betongen kartlagt.

## 6.6 RESULTAT FRA SIMULERINGER

For at simuleringene skulle bli mest mulig korrekt i forhold til de utviklede reseptene ble følgende betongparametere kartlagt. B-leddet til aktiveringsenergien er kun et estimat basert på standardverdier. Betongparameterne er som følger, se Tabell 6.7.

Tabell 6.7: Betongparametere

		Aal 50A	Slagg 0,45
Densitet	$[kg/m^3]$	2380,3	2393,0
Varmekapasitet	$[kJ/kg*^{\circ}C]$	0,99	1,03
Sementinnhold	$[kg/m^3]$	362	305
Aktiveringsenergi	A $[J/mol]$	37000	54000
	B $[J/mol*^{\circ}C]$	1000*	1000*
Avbindingstid	$[h]$	9	14,5
Starttemperatur	$[^{\circ}C]$	20	20

Det eneste som varieres i simuleringene er resept og tilført varme, og der varmekabler er simulert er kablene lagt med 30 cm avstand til dekkekanten og plassert i midten av dekketykkelsen. Resultatene sammenlignes med tanke på hvordan aktiveringsenergien påvirker herdeforløpet til betongen, samt hvilke herdetiltak som er effektive for denne slags betonger. I tillegg er det interessant å se hvordan en mer massiv konstruksjon påvirker fasthetsutviklingen – altså dekke kontra bunnplate. Dette gir en indikasjon på hvor de ulike reseptene presterer best. Dette er med på å danne et grunnlag for å drøfte de ulike reseptenes muligheter og bruksområder, samt hva som kan være aktuelt å benytte ved Gullhaug Torg.

---

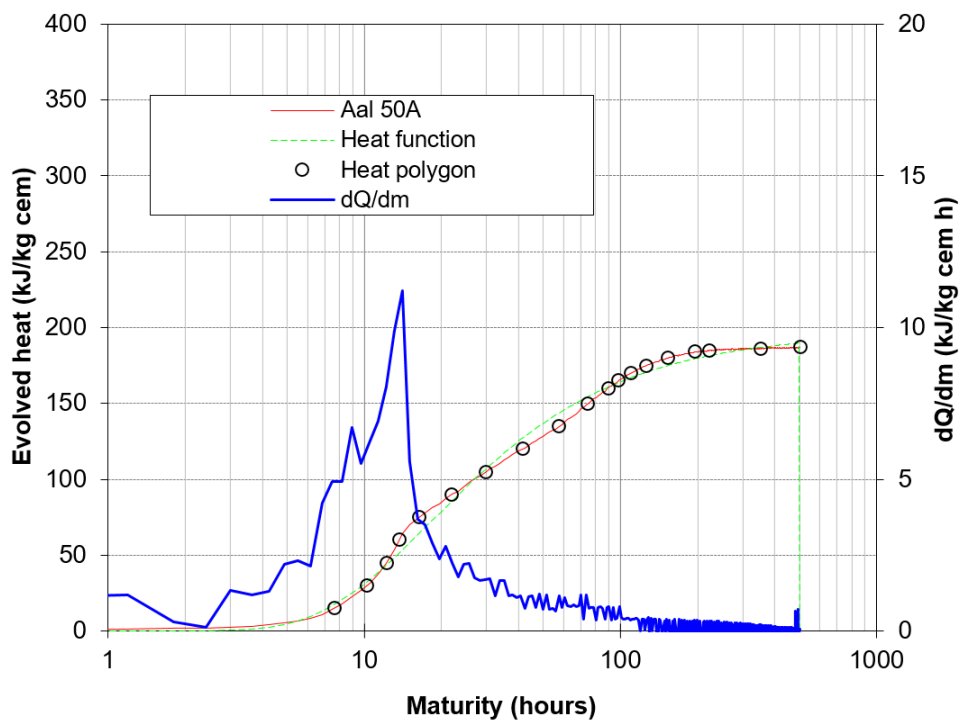
\* Estimert standardverdi (Smeplass 2003)

## 6.6.1 RESEPTENES VARMEUTVIKLING

Fra herdekasseforsøket ble temperaturen i de aktuelle betongene logget. Ved hjelp av betongparameterne i Tabell 6.7 kunne den totale varmeutviklingen avgjøres, og videre varmeutviklingen for betongene ved ulik modenhet. Disse dataene har gjort det mulig å simulere temperaturutviklingen i dekke og bunnplate.

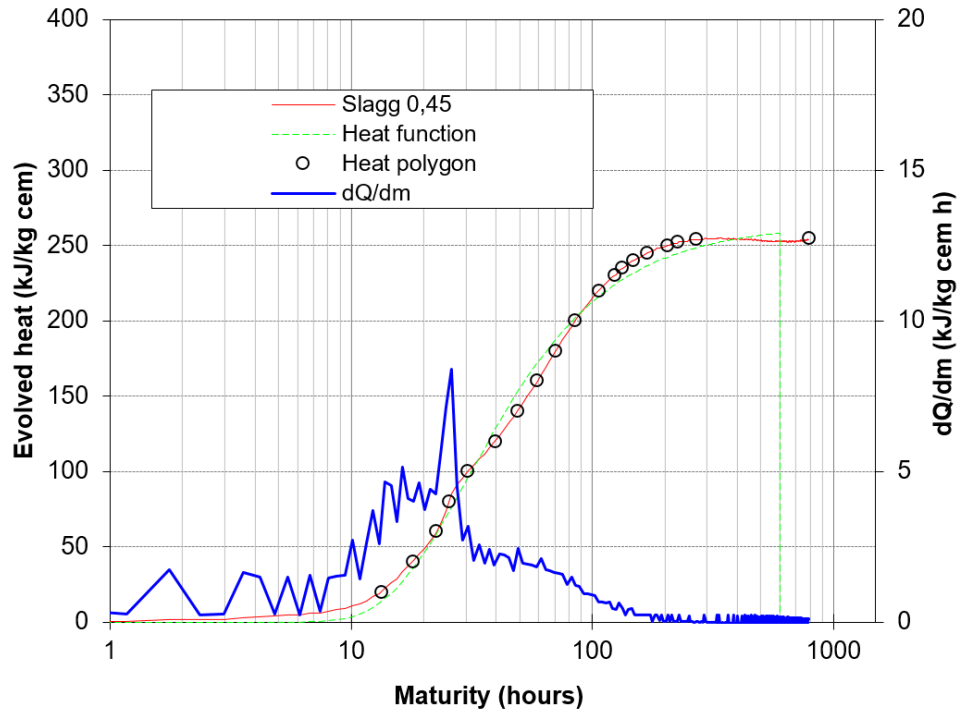
Figur 6.3 viser varmeutviklingen til Aal 50A slik den er målt og beregnet ut fra herdekasseforsøket. Det er verdiene til «Heat polygon» som er tatt med videre til simulering. Dette er verdier som viser hvor mye varme betongen utvikler pr. kilo bindemiddel med hensyn til modenheten.

Slik som grafen viser har betongen en jevn varmeutvikling frem til omlag 200 modenhetstimer. Etter 200 modenhetstimer utvikler ikke betongen noe mer varme.



Figur 6.3: Varmeutvikling – Aal 50A

Figur 6.4 viser varmeutviklingen til resepten Slagg 0,45. På samme måte som for Aal 50A er disse dataene beregnet ut fra herdekasseforsøket. Grafen viser at denne resepten har en høyere varmeutvikling enn Aal 50A. På samme måte som Aal 50A avtar varmeutviklingen etter 200 modenhetstimer.

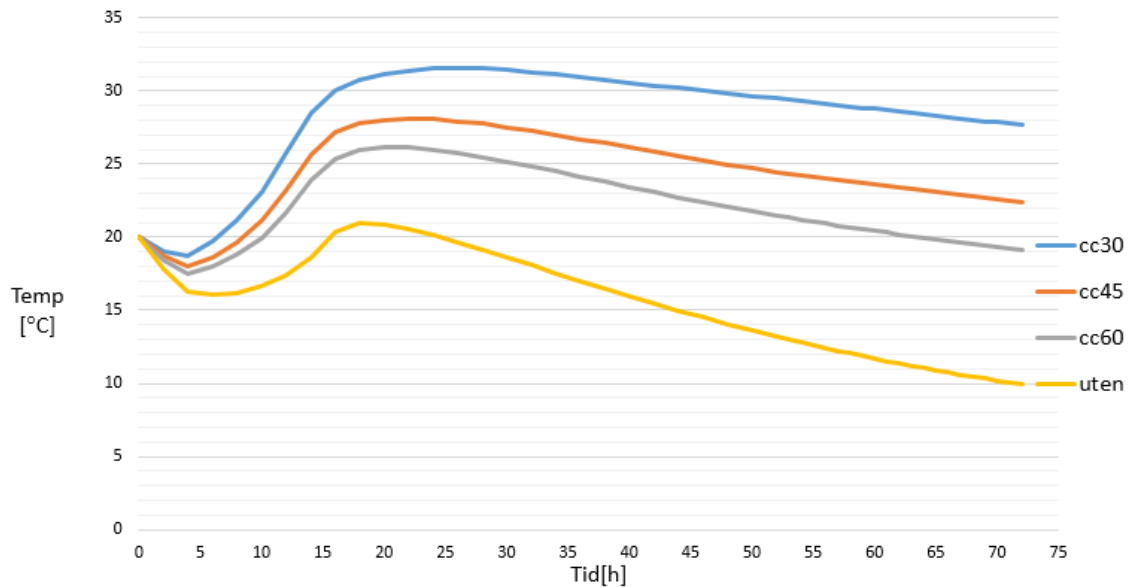


Figur 6.4: Varmeutvikling – Slagg 0,45

Ved å bruke disse dataene i CrackTeSt COIN kan temperaturutviklingen simuleres ved at vi vet hvor mye varme reseptene utvikler. I tillegg vet vi aktiveringsenergien til reseptene – altså hvor mye energi som skal til for å initiere hydratiseringen.

## 6.6.2 FASTHETS- OG TEMPERATURUTVIKLING I DEKKE

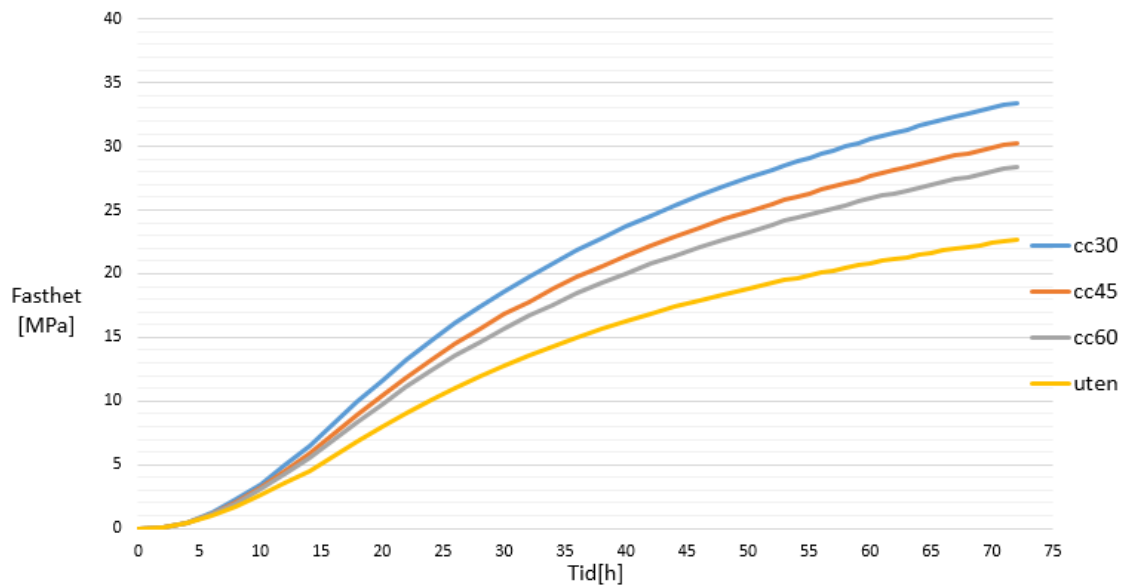
Den gjennomsnittlige temperaturutvikling for dekke er kartlagt gjennom simuleringer, og viser i hvilken grad temperaturutviklingen påvirkes av tilført varme. Denne temperaturutviklingen kommer både fra varmen produsert fra de kjemiske reaksjonene og fra varmekablene i dekke. For dekke med resepten Aal 50A er denne temperaturen illustrert i Figur 6.5.



Figur 6.5: Temperaturforløp i dekke - Aal 50A

Figuren viser at varmekabler gir en god effekt på temperaturen i betongen, og viser at med en gang varmekabler er tilstede vil betongen oppnå en vesentlig høyere temperatur. Dette gjelder både for hele simuleringstiden og de første timene. Betongen får et mye mindre fall i temperatur i løpet av de første timene, som gjør at de kjemiske reaksjonene til betongen skjer forttere i løpet av denne perioden. Dette påvirker avbindingstiden, og man oppnår et fast produkt forttere. Temperaturstigningen til grafene viser i hvilken grad betongen produserer varme med tanke på at den tilførte varmen er konstant.

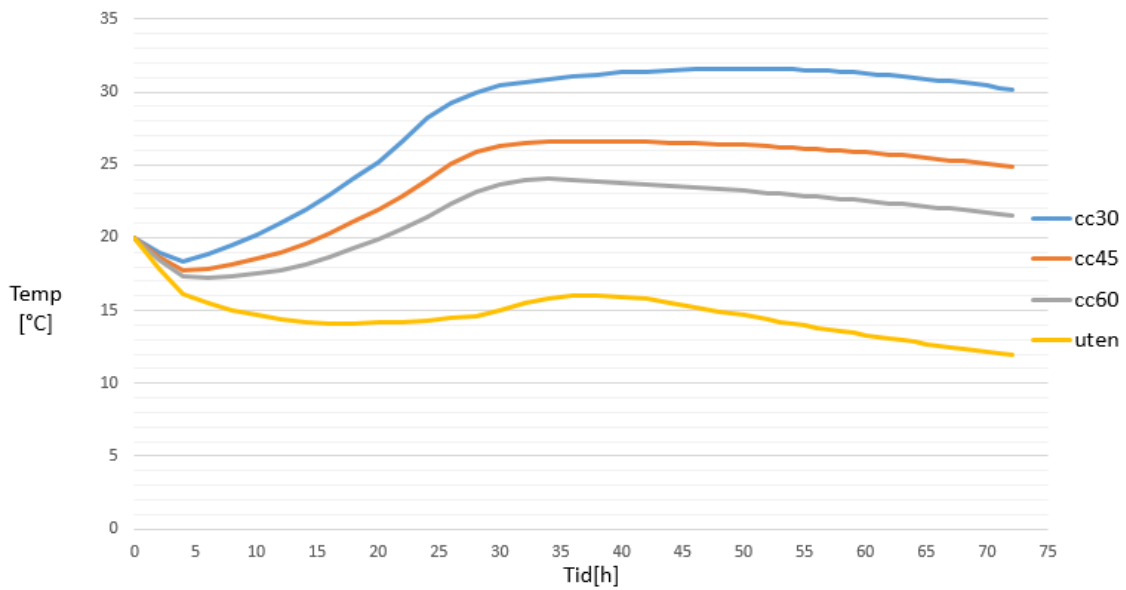
Fasthetsutviklingen for simulert dekke med Aal 50A er beregnet ut ifra modenhetsprinsippet og temperaturen som er simulert, og er illustrert i Figur 6.6.



Figur 6.6: Fasthetsutvikling i dekke - Aal 50A

Resultatene viser en god økning i fasthet ved bruk av varmekabler. Fasthetsutviklingen med varmekabler er nokså lik for cc30, cc45 og cc60 cm. Dette skyldes at temperaturfølsomheten til resepten er ganske moderat. Figuren viser at varmekablene effektivt akselererer fasthetsutviklingen, og viser tydelig økning fra ingen kabel til varmekabler med cc60 cm.

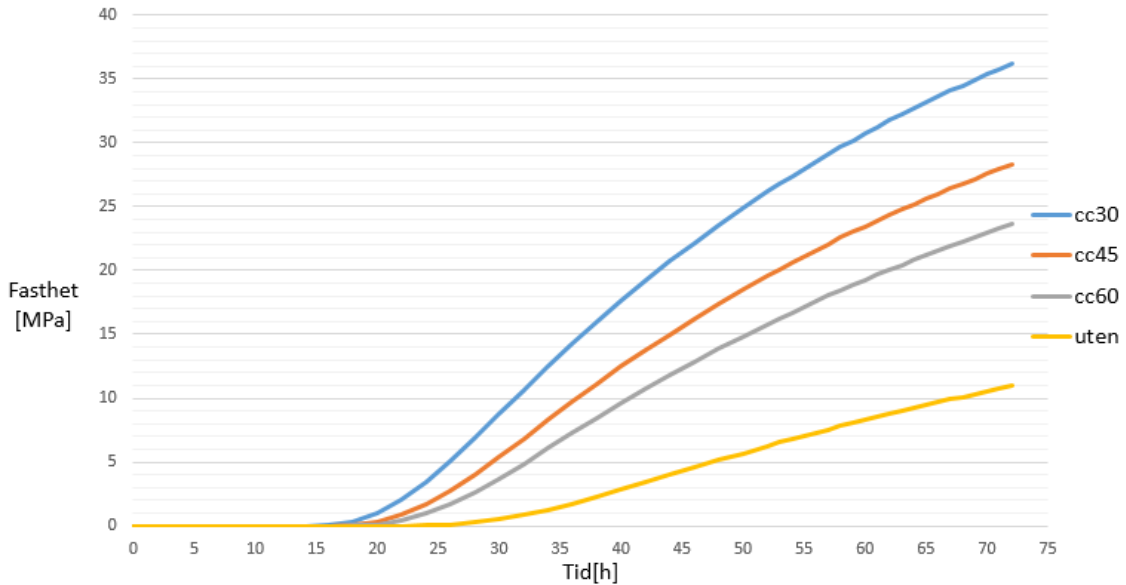
På samme måte som for resept Aal 50A, er dekke simulert med resept Slagg 0,45. Dette er en helt annerledes betong, og er i utgangspunktet dårlig egnet til dekke i kaldt vær med tanke på den svært høye aktiveringsenergien. Dette gjør det imidlertid interessant å se hvordan betongen reagerer på tilført varme. Det simulerte temperaturforløpet i dekke med de forskjellige varmekablene er illustrert i Figur 6.7.



Figur 6.7: Temperaturforløp i dekke - Slagg 0,45

Som Figur 6.7 viser, er det en mye større temperaturforskjell for denne resepten kontra Aal 50A selv med like mye tilført varme. Dette har med å gjøre at denne betongen er såpass temperaturfølsom. Dermed trenger betongen mye varme for at de kjemiske prosessene skal initieres, og så fort de initieres vil betongen produsere egenvarme. Dette kan ses på figuren ved at temperaturøkningen er svært lav uten varmekabler noe som tyder på svært lav kjemisk aktivitet. Med varmekabler stiger temperaturen mye mer, noe som tyder på varmeutvikling i betongen i og med at tilført mengde varme er konstant. Ellers er tendensene mye av de samme som for Aal 50A – temperaturen blir vesentlig høyere, samtidig som at temperaturfallet de første timene er svært redusert.

Fasthetsutviklingen for dekke med Slagg 0,45 viser en helt annen fasthetsutvikling enn for dekke med Aal 50A. Dette er som forventet med tanke på temperaturfølsomheten. Aal 50A er mye mindre avhengig av temperatur for å hydratisere i motsetning til Slagg 0,45. Ut ifra modenhetsprinsippet og temperaturutviklingen er fastheten beregnet som vist i Figur 6.8.



Figur 6.8: Fasthetsutvikling dekke - Slagg 0,45

Her er forskjellen i fasthetsutvikling mye større enn for samme dekke med Aal 50A. Varmekabler gir her et betydelig utslag på fasthetsutviklingen. Dette kommer av at den høye aktiveringsenergien, og tilført varme vil derfor ha en svært god innvirkning på fasthetsutviklingen. Det store spriket i fasthet for de ulike grafene i figuren samsvarer bra med hvordan temperaturen også har et stort sprik.

Fasthets- og temperaturutviklingen til dekke med de ulike reseptene samsvarer godt med forventningene knyttet til hvordan aktiveringsenergien påvirker herdeforløpet.

Målet med simuleringene var å kartlegge hvordan tilført varme kunne hjelpe til å nå 25 MPa i løpet av 72 timer. Tabell 6.8 illustrerer hvor lang tid det tar før dekke har tilstrekkelig fasthet med ulik varmetilførsel.

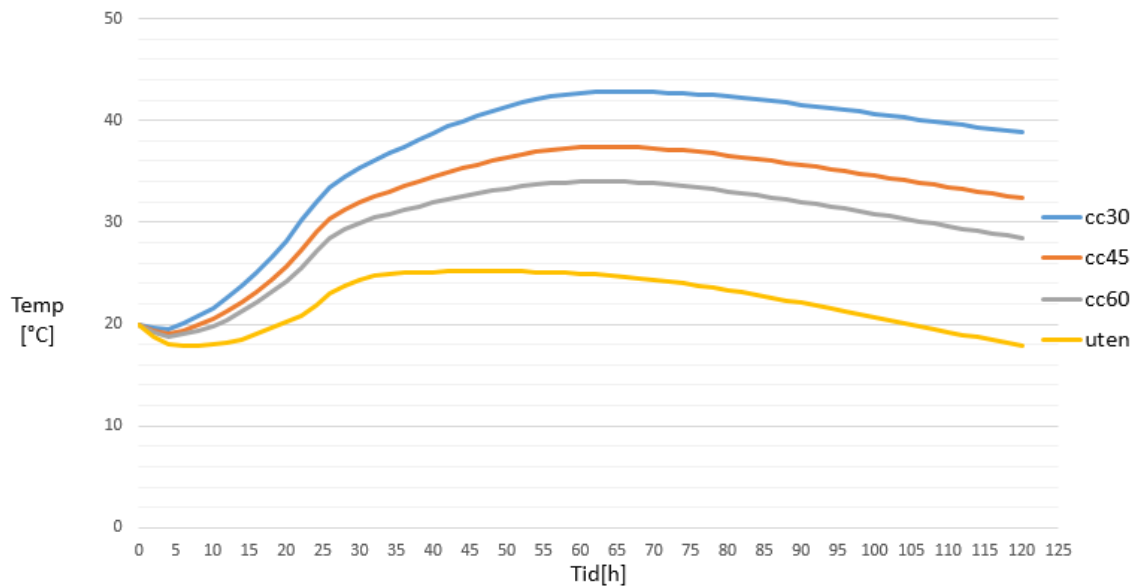
Tabell 6.8: Tid til oppnådd 25 MPa

	Aal 50A				Slagg 0,45			
	uten	cc60 cm	cc45 cm	cc30 cm	uten	cc60 cm	cc45 cm	cc30 cm
Fasthet [MPa]	25	25	25	25	25	25	25	25
Tid [h]	-	57	52	44	-	-	64	51



## 6.6.3 FASTHETS- OG TEMPERATURUTVIKLING I BUNNPLATE

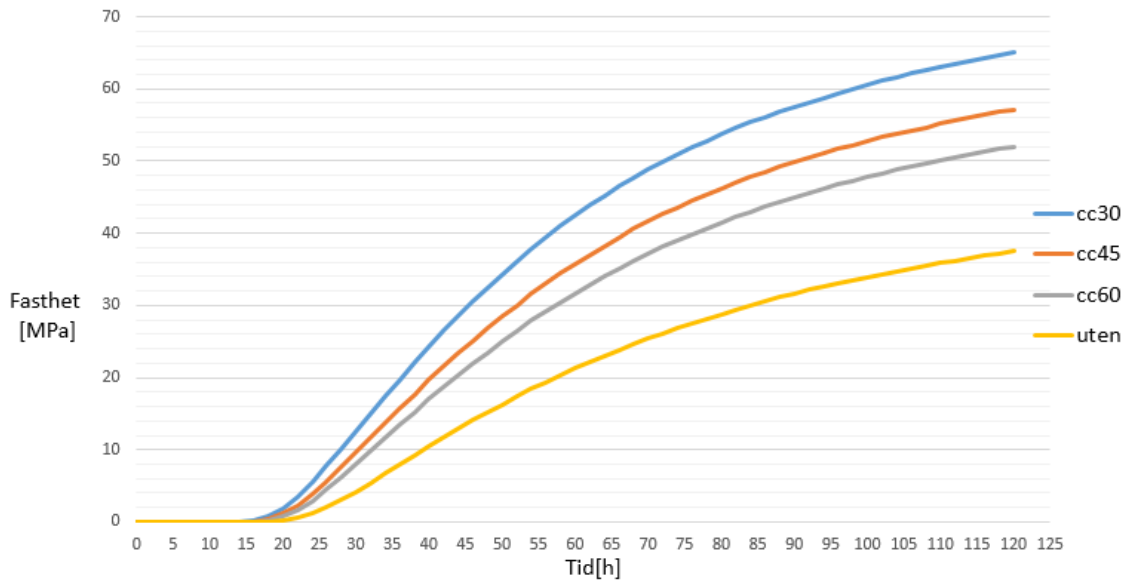
Bunnplaten er kun simulert med resepten Slagg 0,45. For bunnplaten er ikke kravet om 25 MPa etter 72 timer like viktig som for dekke ved at denne støpen ikke går utover øvrig fremdrift. Dermed er det ikke like relevant med varmekabler for denne konstruksjonsdelen. Allikevel er de samme varmekabelvariasjonene simulert for bunnplate som for dekke. På den måten kan virkningen av varmekabler for bunnplate kartlegges, og videre sammenlignes med samme variasjon for dekke. Temperaturforløpet i bunnplaten er illustrert i Figur 6.9.



Figur 6.9: Temperaturforløp i bunnplate - Slagg 0,45

Temperaturutviklingen ligner veldig på resultatene fra samme resept i dekkensimuleringene med tanke på spriket i temperatur for de ulike variasjonene. Temperaturen er derimot betydelig høyere og viser i mye større grad tegn til kjemisk reaktivitet gjennom temperaturøkning med samme variasjon av varme som for dekket. Dette kommer av at bunnplaten er vesentlig mer massiv enn dekket. Dermed er betongvolumet større som fører til mer varme fra de kjemiske prosessene og mer masse til å holde på varmen.

På samme måte som dekket er fastheten til bunnplaten beregnet etter modenhetsprinsippet og simulert temperaturforløp. Ved å gjøre dette for bunnplaten, med samme variasjoner som for dekke, kan effekten av tilført varme og geometri vises. Fasthetsutviklingen til bunnplaten med de ulike variasjonene er illustrert i Figur 6.10.



Figur 6.10: Fasthetsutvikling i bunnplate - Slagg 0,45

Fasthetsutviklingen for bunnplaten er betydelig større enn for de simulerte dekkene. Dette skyldes geometrien til bunnplaten som er vesentlig større enn dekkene. Dette fører til at betongen holder bedre på varmen og hydratiseringen skjer fortere. Dette er en gunstig effekt i og med at resepten – Slagg 0,45 – er såpass temperaturfølsom. Varmekabler vil gi en god økning fasthet, men selv uten varmekabler oppnår bunnplaten god fasthet fort.

## 6.7 OPPSUMMERING

### 6.7.1 DEKKE

Resultatene med Aal 50A viser at uten varmekabler oppnår dekke en gjennomsnittlig fasthet på ca. 23 MPa etter 72 timer. Dette er ikke tilstrekkelig med tanke på kravet på 25 MPa. Det er derfor tenkelig at noen tiltak må gjøres for at betongen skal oppnå tilstrekkelig fasthet. Ved å benytte varmekabler vil betongen fort få tilstrekkelig fasthet – enten om det legges i hele dekke, eller kun ved forankringene. Det er ved forankringene det er kritisk at betongen oppnår tilstrekkelig fasthet. Det kan derfor være holdbart å kun legge varmekabler i dette område. Som simuleringene viser vil betongens fasthet øke med omtrent 5 MPa etter 72 timer ved å benytte varmekabler i avstand på 60 cm. Dermed er man raskt over innenfor kravet på 25 MPa. Gevinsten er enda høyere ved å plassere varmekablene tettere – henholdsvis en økning på 8 MPa og 10 MPa ved cc45 og cc30 cm etter 72 timer. Økningen er ganske moderat, derfor trengs nødvendigvis ikke for mange varmekabler for å oppnå ønskelige resultater.

Resultatene for Slagg 0,45 viser en helt annen fasthetsutvikling. Dette skyldes den høye aktiveringsenergien til resepten. Slagg 0,45 har en veldig høy aktiveringsenergi og er derfor svært avhengig av varme for å herde. Fasthetsutviklingen fra simuleringene illustrerer dette godt. Uten noen varmekabler faller fastheten ned på 11 MPa etter 72 timer, men ender helt opp mot 36 MPa med varmekabler lagt med cc30 cm. Dette er en veldig stor økning sammenlignet med Aal 50A. Slagg 0,45 trenger, i motsetning til Aal 50A, svært mye tilført varme for å oppnå tilstrekkelig fasthet, og er derfor ikke særlig godt egnet til dekke, sammenlignet med Aal 50A, under disse forholdene. En varm sommerdag ville trolig gitt en helt annen fasthetsutvikling.

Med en gang været blir kaldere vil betongen prestere mye dårligere med tanke på aktiveringsenergien og komplikasjoner kan oppstå. Dette kan være svært ugunstig med tanke på fremdrift. Slagg 0,45 egner seg derfor best der en har litt mer spillerom på herdetiden eller under varmere forhold.

### 6.7.2 BUNNPLATE

For bunnplaten viser Slagg 0,45 svært mye bedre resultater enn for dekke. Etter 72 timer har betongen oppnådd 26 MPa uten varmekabler, som er tilstrekkelig i henhold til kravet på 25 MPa. Dette har med å gjøre at konstruksjonen er mye mer massiv enn dekke og holder derfor bedre på varmen samtidig som mer varme produseres, og denne varmen vil være med på initiere hydratiseringen til betongen. Ved å sammenligne fasthetsutviklingen for bunnplate og dekke med Slagg 0,45, Figur 6.10 og 6.8, ser man hvordan fasthetsutviklingen øker gjennom større geometri. Etter 72 timer har dekke oppnådd ca. 11 MPa mens bunnplaten har oppnådd ca. 26 MPa. Dette er en vesentlig økning.

Kravet om 25 MPa etter 72 døgn anses ikke som like viktig for bunnplaten i og med at dette er gjerne det første man støper og kommer derfor ikke i veien for annet arbeid. Dermed kan man starte støpen litt tidligere for å oppnå en høyere fasthet istedet for å benytte andre herdetiltak som varmekabler. Om varmekabler skulle vært aktuelt for bunnplaten gir dette svært god økning i fasthetsutvikling. Dette anses ikke som nødvendig da resepten allerede presterer bra alene.

## 6.8 EGNETHET

Aal 50A er mer egnet for dekke enn Slagg 0,45 i og med at den er mindre temperaturfølsom, og er derfor mer robust mot lave temperaturer som fort kan oppstå. Slagg 0,45 egner seg ikke for dekke ved at den trenger mye varme for å oppnå tilstrekkelig fasthet, og kan derfor by på komplikasjoner om den ikke oppnår tilstrekkelig fasthet. Slagg 0,45 har en lenger avbindingstid enn Aal 50A og ved lav temperatur vil dette føre til at tildekking av betongen ikke kan skje før på et senere tidspunkt. Dette vil føre til et mye større varmetap fra betongen i starten og vil påvirke hele herdeforløpet betraktelig.

Aal 50A bør benyttes sammen med tilført varme for å sikre tilfredstillende fasthetsutvikling. Samtidig bør temperaturen logges slik at man er sikker på at betongen har den ønskelige fastheten før oppspenning. Det er viktig å ha god oppfølging på slike betonger. Slurv med herdetiltak kan ha konsekvenser som går hardt utover fremdriften ved at oppspenning ikke kan utføres som planlagt. Denne type betonger er lite brukt og kompetansen rundt bruken er derfor forholdshvis lav og bør tas i betraktning.

Slagg 0,45 presterer godt som betong til bunnpalte. Ingen tilført varme er her nok for å oppnå 25 MPa etter 72 timer med de gitte betingelsene. Dette er imidlertid ikke representativt for en vinterstøp med enda lavere temperaturer. Ved å ta utgangspunkt i at bunnplaten støpes rundt høsttider vil betongen uten problemer oppnå tilstrekkelig fasthet for oppspenning.

Ved å benytte varme for å oppnå fasthet er det viktig med nøye oppfølging for å oppnå ønskelig resultat – om temperaturen faller vil det gå på bekostning av fastheten og videre fremdrift. Temperaturlogger er et billig og enkelt redskap for å estimere betongens fasthet. Fasthet etter modenhetsprinsippet stemmer ikke helt overrens for betonger med høy andel flygeaske, men kan gi et konservativt estimat.

Slagg 0,45 har svært god GWP-verdi – 105,4 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup> – som gjør at den er svært gunstig å benytte i bunnplaten ved at bunnplaten tilsvarer et stort betongvolum. Dette vil ha en veldig positiv innvirkning på det totale karbonregnskapet.

## 6.9 FEILKILDER

Den største feilkilden i simuleringene er aktiveringsenergien. For å kartlegge en mest mulig nøyaktig aktiveringsenergi trengs det enda fler målinger mellom 0 og 7 døgn. Dette er ikke blitt gjort da denne delen av oppgaven ikke har blitt vektlagt og derfor blitt litt forenklet. En uøyaktig aktiveringsenergi påvirker fasthetsutviklingen til de simulerte geometriene.

Verdiene for B-leddet er antatt til 1000 J/mol\*K. Dette er en standardverdi, men er trolig fortsatt alt for lav for reseptene i og med at de er ganske temperaturfølsomme – spesielt Slagg 0,45. Dette vil gi et utslag de første timene der betongen faller under 20 °C.

I tillegg er det gjennomsnittfastheten som er beregnet. Dette vil ikke gi helt korrekte verdier med tanke på yttersiden som spennes opp. Det er denne siden som er kritisk med tanke på tilstrekkelig fasthet. Dermed kunne det vært tenkelig å vurdere simuleringene for et mindre område nærmere kanten. Simuleringene ser heller på geometrien i sin helhet i stedet for lokale deler.

Lengden på bunnplate og dekke ble satt til 5 meter med adiabatisk rand. Et kortere lengde ville gitt en mer realistisk fasthetsutvikling i og med at de kalde endene i større grad ville bli tatt hensyn til.

Fasthetsberegninger er basert på modenhetsprinsippet. De forsøk som er utført gjennom laboratoriarbeid viser derimot at denne teorien stemmer dårlig overens for Aal 50A grunnet det høye flygeaskeinnholdet. Ved høy temperatur ga reseptene mye bedre resultater enn estimert med modenhetsprinsippet. Dermed kan det tenkes at simuleringene med varmekabler gir en lavere fasthetsutvikling enn reel fasthetsutvikling. Kurvene for Aal 50A vil derfor sprike mer ved korrekt fasthetsutvikling.

Varmekabler vil gi et negativt utslag på GWP-verdiene. Dette er sett bort ifra og er ikke tatt med i beregningene.

Som nevnt tidligere vil avbindingstiden påvirke temperaturforløpet, ettersom det avgjør når betongen kan dekkes til, med støpen lar seg dekkes til uten at betongen har størknet. Tidspunktet for tildekking er derfor en stor usikkerhet i simuleringen, og vil trolig gi et negativt utslag i fasthetsutviklingen ettersom denne er satt til 4 timer i simuleringen med tanke på at avbindingstiden er noe høyere.

# KAPITTEL 7 DISKUSJON

## 7.1 BEARBEIDBARHET

Bearbeidbarheten til reseptene er hovedsaklig målt ved å observere hvordan de har oppført seg under blanding og støping med hensyn til stabilitet, mobilitet og komprimerbarhet. Foruten synkmål er ingen ytterligere gjennomført målinger for å teste bearbeidbarhet.

### 7.1.1 HØY ANDEL FLYGEASKE

Alle reseptene med høy andel flygeaske oppleves som nokså like i form av bearbeidbarhet. Stabiliteten var god, og betongen holdt seg homogen uten problemer. Betongene viste heller ingen tegn til vannseparasjon, noe som kan skyldes det høye flygeaskeinnholdet og det lave  $v/b$ -tallet for reseptene. Dette er med på å forhindre vannseparasjon og viser god effekt på betongens stabilitet. Betongen oppleves derimot som ganske seig og tung å jobbe med – trolig som følge av det lave  $v/b$ -tallet.

Forskjellen i mobiliteten mellom 50, 60 og 70 % FA er svært lav – betongene oppfører seg ganske likt. Til tross for at reseptene oppleves som tunge og litt seige med lavt  $v/b$ -tall flyter de godt ut, men ganske sakte, med omtrent likt synkmål samtidig som betongen holdes homogen. Synkmålet for disse reseptene har vært rundt 200 mm og konsistensen var nokså lik. Ut ifra synkmål oppfattes mobiliteten til disse blandingen som god og ga en jevn utbredelse.

Ved støping av terninger har ingen av betongene hatt noe problem med å fylle formen eller la seg komprimere. For utstøpningen er samme fremgangsmåte benyttet for alle reseptene, og ingen av reseptene har skilt seg ut på noen som helst måte. Støpelighetsegenskapene til disse reseptene har med dette vist seg å være gode.

Om det ønskes betong med høyere synkmål er det ingen observasjoner som tilsier at reseptene vil ta skade av økt andel SP. Matriksen ser ut til å ha god bæreevne og viser ikke tegn til separasjon. Dette indikerer at økt SP-innhold er uproblematisk med mindre doseringen økes betraktelig.

### 7.1.2 SLAGG

Førsteintrykket av betongblandingene var at betongen fløt godt og var lett å jobbe med. Det viste seg derimot at matriksen hadde dårlig bæreevne. For resept Slagg 0,55 viste blandingen tegn til separasjon allerede i blandebeholderen, og testing av synk viste tegn til segregering ved at tilslaget lå igjen som en haug i midten med en dam av matriks rundt.

Blandingene har vært veldig lett og jobbe med med en god konsistens. Ved støping av terninger hadde imidlertid partiklene en liten tendens til å synke til bunn av formen, men likevel ble terningene godt utstøpt og godt komprimert. I forhold til reseptene med høy flygeaske var disse resepten vesentlig lettere å arbeide med.

Mobiliteten var god og betongen fløt lett, men dårlig stabilitet førte til at betongen delvis skilte seg. Dette var gjennomgående for alle reseptene med slagg, men Slagg 0,45 pres-

terte bedre – særlig med tanke på stabilitet. Det kan tenkes at det skyldes det reduserte masseforholdet.

Om disse reseptene skal benyttes må det gjøres tiltak for å forbedre konsistensen. Ved å øke fillerandelen i resepten vil matriksen få bedre bærevne og vil trolig gi betongen bedre stabilitet. Et alternativ til filler kan være å benytte viskositetsmodifiserende tilsetningsstoff som reduserer separasjon og blødning fra betongen samtidig som flyteegenskapene opprettholdes. Ettersom betongblandingene fløt så godt som de gjorde kan trolig matriksvolumet også reduseres når stabiliteten økes og fortsatt oppnå en god bearbeidbarhet. Ulike typer plastiserende-/superplastiserende stoffer kan også ha ulik innvirkning på stabiliteten og bør vurderes for å forbedre konsistensen.

## 7.2 FASTHETSUTVIKLING

### 7.2.1 INNLEDENDE FORSØK MED STANDARD FA

Selv om den første blandingen i de innledende forsøkene var noe mangelfull ved 20 °C ble det valgt å ikke legge fokus på å støpe en ny fullstendig runde med denne. Målet med reseptene var å danne et bilde av temperaturfølsomheten, samt sammenligne resepter med Standard FA med tilsvarende resepter med Aalborg Rapid.

Temperaturfølsomheten kommer derimot relativt godt frem, foruten tre målinger ved 20 °C. Som forventet var fasthetsutviklingen betydelig lavere ved lav temperatur. Fasthetsutviklingen fra herding ved 35 °C var veldig overraskende, og overgikk forventningene til og med etter 28 døgn. Dette styrkes også ved at det sees en lik trend for Std FA 60, som viser at selv ved 56 døgn er forskjellen i trykkfasthet stor ved de ulike temperaturene. Den høye slutfastheten ved 35 °C viser tydelig at det er fler reaksjoner tilstede i tillegg til vann/ment- og pozzolanreaksjonen.

For Std FA 50 er sammenligningsgrunnlaget noe tynt med Aal 50 ettersom det mangler tre målinger ved 20 °C. Det er likevell tydelig å se at resepten med Standard FA gir en betydelig høyere styrke enn med Aalborgsementen. Resultatene fra Std FA 60 og Aal 60 gir derimot et godt sammenligningsgrunnlag og viser samme trend som 50 % FA. En ting som er interessant å merke seg er at forskjellen mellom de to er på hele 16,7 MPa ved 56 døgn herdet i 20 °C, men ved 35 °C er forskjellen betydelig mindre – kun 2,8 MPa.

Reseptene er satt sammen for å få en tilnærmet lik mengde klinker, flygeaske og silikastøv, og burde i utgangspunktet prestere ganske likt. Aalborg Rapid er i utgangspunktet en raskere sement enn Standard FA, så det var forventet at Aalborg Rapid skulle gi en raskere fasthetsutvikling. Standard FA-sement er i motsetning til Aalborg Rapid tilsatt 4 % kalkmel. I forsøkene til De Weerd (2011) på resepter med opptil 35 % FA tilsatt kalkmel, konkluderes det med at høyere styrke oppnås om 5 % av flygeasken erstattes med kalkmel. Dette kan være en faktor som spiller inn i forskjellen mellom Standard FA og Aalborg Rapid. I tillegg er 18 % av Standard FA flygeaske som er malt inn med sementen. Dette vil male ned flygeasken i mindre fraksjoner og gjør den mer reaktiv. Den høye fasthetsutviklingen til Std FA 50 og 60 sammenlignet med Aalborgreseptene kan også skyldes feilblanding i laboratoriet.

### 7.2.2 DEL 1 - AALBORG RAPID

Resultatene til resepten Aal 70 gir ikke tilstrekkelig fasthetsutvikling. Selv med akselerert hydratisering ved hjelp av varme er ikke Aal 70 i nærheten av å oppnå 25 MPa etter 3 døgn. Denne resepten er derfor ikke å anbefale for bruk til plasstøpt betong. Etter tre døgn øker derimot fasthetsutviklingen enormt ved 35 °C. Dette resulterer i at langtidsstyrken til denne resepten er overraskende god med tanke på at den kun inneholder 19 % klinker av bindemiddelmengden. Det er tydelig at flygeasken bidrar betraktelig til fasthetsutviklingen utover pozzolanreaksjonen, men denne reaksjonen er for treg for å kunne utnyttes i denne sammenhengen. Om denne reaksjonen kan akselereres ved hjelp av høyere temperatur eller en aktivator, uten å gå på bekostning av bearbeideligheten, kan betonger med denne andelen flygeaske ha et stort potensiale.

Også i reseptene med 50 og 60 % FA er styrkebidraget fra flygeasken betydelig, men her er klinkerandelen stor nok til å gi en akseptabel tidligstyrke ved hjelp av enkle tiltak, som oppvarming og kontroll av herdetemperaturen. Den høye sluttstyrken er likevell svært interessant, og vil etter tid gi konstruksjonen en mye høyere styrke enn tiltenkt.

### 7.2.3 GEOPOLYMEREFFEKT

Som resultatene fra fasthetsmålingene viser er det tydelig en økt fasthetsutvikling fra flygeasken og økt herdetemperatur i tillegg til det som kan forklares med modenhetsprinsippet. Denne økte styrken er trolig en geopolymereffekt som kommer av flygeasken som brytes ned av det alkaliske gelvannet fra sementhydratiseringen og danner reaksjonsprodukter av lignende karakter som C-S-H gel.

Reseptene har lignende sammensetning som det som omtales som «Hybrid alkaline FA cements» av Garcia-Lodeiro et al. (2016), og vil som beskrevet kreve både lavere herdetemperatur og mildere aktivering. Disse faktorene stemmer godt overens med forholdene under laboratorieforsøkene i dette arbeidet.

Dette støttes også av forsøk utført av Berry et al. (1990) på en mørtel av 42 % OPC og 58 % FA med et v/b-tall på 0,30, uten noe form for aktivering. Det foreslås her en mulighet for at det er lignende mekanismer som ved alkali-aktivering som finner sted. Det tenkes at det er porevannet som transporterer alkaliske ioner fra sementen til flygeasken og bryter ned glassfasen som kjent fra geopolymere.

Rene geopolymere krever som kjent høy herdetemperatur for å oppnå fasthet. Det er derfor ikke usannsynlig at den observerte geopolymereffekten akselereres av økt temperatur. Ettersom prøvene viser økende styrke selv etter 56 døgn er det uvisst hva den endelige sluttfastheten til betongen vil være, og hva som vil være det endelige styrkebidraget ved de ulike herdetemperaturene. Om det hadde blitt utført tester på flere ulike herdetemperaturer med fasthetsmålinger etter ett år, ville det kommet tydeligere frem om hvor stor geopolymereffekten er og i hvilken grad den forsterkes av økende temperatur.

En av årsakene til at reaksjonen med flygeasken går så sakte kan være som Fernández-Jiménez et al. (2005) beskriver om geopolymere at reaksjonsproduktet legger seg som en skorpe på overflaten av partiklene og hindrer kontakt med alkaliene. Videre reaksjon er derfor helt eller delvis avhengig av en slags diffusjonsmekanisme og kan være en saktegående prosess.

Om det er en geopolymereffekt som finner sted kan betongen regnes som en hybridbetong.

#### 7.2.4 UTNYTTELSE AV ØKT SLUTTFASTHET

Hovedfokuset for fasthetsutviklingen har vært 3 døgn fastheten til betongen, men den høye slutfastheten kan også utnyttes ved prosjektering av konstruksjonen. Minimumskravet for betongen er å nå 25 MPa etter 3 døgn grunnet spennarmering, deretter kan senere lastpåføringer kreve en høyere styrke i betongen. Med en betong som dette vil man ha muligheten til å spesifisere ulike krav til fasthetsklasse ulike steder i dekket.

I forprosjekteringen til Gullhaug Torg ble denne muligheten vurdert. Et ønske om høyere fasthet for dimensjonering mot gjennomlorking rundt søyler ble lagt frem. Dette krever en fasthet på 65 MPa og kan eksempelvis løses ved hjelp av ekstra varmekabler rundt dette området og/eller tilstrekkelig herdetid før lastpåføring. Ved 35 °C vil Aal 50 oppnå denne styrken etter 1 uke, mens Aal 60 vil oppnå den i underkant av 3 uker. I andre tilfeller kan for eksempel også dragere som støpes sammen med dekket trenge høyere fasthet, noe som enkelt kan oppnås med varmekabler langs drageren.

Om det ønskes å oppnå en høyere fasthetsklasse ved å øke temperaturen er det viktig å påpeke at modenhetsprinsippet ikke gjelder for disse høyandels flygeaskebetongene. Ettersom betongens slutfasthet ser ut til å påvirkes av herdetemperaturen vil det ikke være tilstrekkelig å logge temperaturforløpet og beregne modenheten på samme måte som tradisjonell betong. På bakgrunn av funnene i denne oppgaven kan ikke den oppnådde fastheten dokumenteres, med mindre samme temperatur opprettholdes under hele herdeforløpet. For å dokumentere samme fasthet som i laboratoriet må derfor betongen herdes med en minimumstemperatur på 35 °C i et gitt antall dager for å oppnå den ønskede styrken.

Det er også mulig å bore ut kjerner fra betongen for å teste trykkfastheten. Dette er en upraktisk metode som ikke vil være å anbefale foruten for spesielle unntak hvor det sees nødvendig. En annen metode som kan benyttes er å logge temperaturen i konstruksjonen og la utstøpte prøveterninger gjennomgå samme temperaturforløp. Dette er i praksis en svært upraktisk metode, som ikke anbefales. Videre forskning på området vil forhåpentligvis føre frem til sikrere metoder for å modellere den oppnådde styrken basert på temperaturforløpet.

#### 7.2.5 DEL 2 - CEMEX LAVVARMESEMENT

De tre slaggreseptene presterer relativt likt, både ved 20 og 35 °C, og viser en kraftig respons til den økte temperaturen. Ingen av reseptene når målet om 25 MPa ved 3 døgn uten ekstra varme, men ved 35 °C er samtlige av reseptene derimot godt over målet etter allerede 2 døgn. Dette tyder på at reseptene har et stort potensiale til å benyttes i det tiltenkte prosjektet, men at det kreves ekstra tiltak for å øke temperaturen i betongen.

Resept Slagg 0,55 presterer best med tanke på GWP verdi og selv med den laveste fastheten blant slaggreseptene har den en lik 3 døgn fasthet som Aal 50 ved 35 °C. Dersom tiltak for oppvarming skal benyttes vil denne resepten gi en betraktelig større reduksjon i miljøregnskapet enn Aalborgreseptene. Slaggreseptene vil ikke oppnå den samme høye slutfastheten som Aal 50 og Aal 60, men har en god slutfasthet som tilfredsstillende fasthetsklasse B45 for Slagg 0,55 og B55 for Slagg 0,55A og Slagg 0,45.

Selv om ingen av slaggreseptene nådde 25 MPa etter 3 døgn kan det tenkes at en slik betong allikevel kan benyttes i bunnplaten til Gullhaug Torg. Her er ikke kravet om 25 MPa etter 3 døgn like viktig siden ytterligere arbeid mest sannsynlig ikke har startet på



tidspunktet som bunnplaten skal støpes og en kan tillate noe lenger herdetid. Totalt sett vil det være svært gunstig å benytte en slik betong i bunnplaten, ettersom den utgjør et stort volum, og vil gi et stort utslag i regnskapet med den lave GWP-verdien. På den måten har man litt mer å gå på med tanke på GWP-verdier, for de andre konstruksjonsdelene, og en større frihet i valg av betong for å tilfredstille kravet på 170 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup>.

### 7.3 GYLDIGHET AV ARRHENIUSLIGNINGEN

Målingene fra Std FA 60 gir det beste grunnlaget for å bestemme aktiveringsenergien, med 4 fasthetsverdier fra 1 til 7 døgn ved både 5, 20 og 35 °C. Det viste seg likevell å være problematisk å bestemme verdier for A og B, ettersom regnearket for beregning av aktiveringsenergi ikke ville gi noen tydelige resultater. For samtlige av reseptene med flygeaske oversteg de målte fasthetene ved 35 °C det som var forventet på bakgrunn av modenhetsprinsippet. Det er tydelig at temperaturen ikke kun har en akselererende effekt som regnearket tar utgangspunkt i, men at den økte temperaturen i seg selv bidrar til en økt sluttfasthet.

Det er mye som tyder på at det er en slags aktivering av flygeasken som tar sted, og kan dermed regnes som en geopolymereffekt og vil gjøre betongen til en type hybridbetong. Dette bidraget vil trolig variere både med økende temperatur og økende flygeaskeandel, og det er derfor vanskelig å avgjøre hvor stort det faktiske styrkebidraget er og hvor stor den akselererende effekten forklart med modenhetsprinsippet er.

Arrheniusligningen ser med andre ord ikke ut til å gjelde for disse reseptene. For å teste gyldigheten av arrheniusligningen kan det sammenlignes hvordan målt fasthet ved 20 og 35 °C stemmer overrens med utregnet fasthet fra Arrheniusligningen og modenhetsprinsippet ved 35 °C.

I sammenligningen er det antatt en standard aktiveringsenergi. Her er A-verdien satt til 37 000 j/mol for alle Aalborgreseptene, og B-leddet neglisjeres siden betongen er over 20 °C. Med denne A-verdien gir Arrheniusligningen en hastighetsfunksjon,  $H(\Theta) = 2,10$  ved 35 °C. Det betyr at betongen i teorien vil herde litt over dobbelt så fort ved 35 °C som ved 20 °C.

Etter modenhetsprinsippet med denne hastighetsfunksjonen vil betongene etter 27 døgn ved 35 °C ha samme fasthet som etter 56 døgn ved 20 °C. For alle flygesakebetongene er den oppnådde fastheten etter 27 døgn ved 35 °C vesentlig høyere enn det modenhetsprinsippet tilsier, og forskjellen ser ut til å øke ved økt flygeaskeandel.

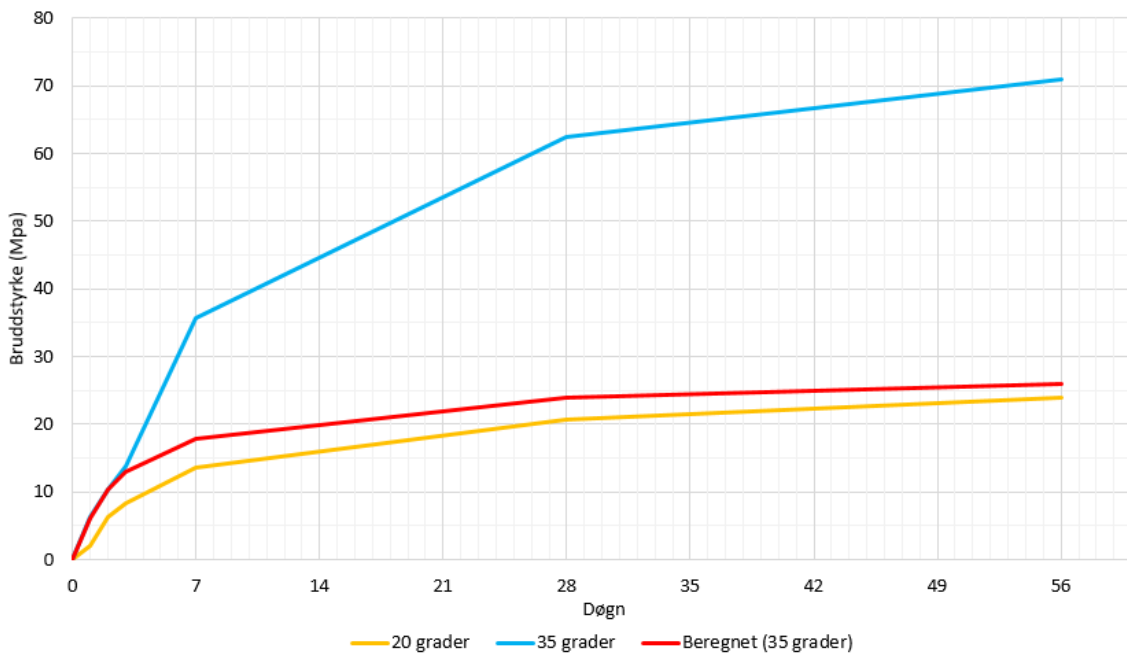
Forskjellen fra oppnådd og utregnet fasthet er i dette tilfellet som følger for de tre flygeaskereseptene:

- Aal 50 –  $\Delta 16$  MPa
- Aal 60 –  $\Delta 29$  MPa
- Aal 70 –  $\Delta 37$  MPa

Den forventede trykkfastheten til Aal 70 er etter modenhetsprinsippet på 24 MPa etter 27 døgn ved 35 °C. Dette bidraget fra geopolymereffekten utgjør dermed en økning på godt over det dobbelte og gir betongen en trykkfasthet på hele 254 % mer enn modenhetsprinsippet tilsier. Det er viktig å bemerke at den aktiveringsenergien som antas påvirker dette

i stor grad, men gir allikevel en pekepinn på hva som kan tenkes å være fasthetsutvikling fra sementhydratiseringen og hva som er fasthetsutvikling fra geopolymereffekten.

På bakgrunn av målingene ser det ut som bidraget fra geopolymereffekten kommer først etter tre døgn. Frem til tre døgn sammenfaller den beregnede fastheten ganske godt, som illustrert i Figur 7.1. Dette styrker gyldigheten av det simulerte herdeforløpet til Aal 50A, ettersom det kun er de tre første døgnene som er simulert. Utover 3 døgn ville trolig resultatene blitt mer og mer underestimert desto lenger simuleringene hadde vart.



Figur 7.1: Oppnådd og beregnet fasthetsutvikling for Aal 70

Etter tre døgn fortsetter styrken å «skyte i været», mens styrken beregnet etter formel 6.2 viser at slutfastheten blir omtrent lik som for referanseprøven. Prøven herdet i 35 °C viser også en raskere fasthetsutvikling etter 3 døgn enn før, noe som tyder på at det er en annen reaksjonsprosess som slår inn på dette tidspunktet og akselererer fasthetsutviklingen. Om den tidlige fastheten ved 35 °C skal sammenfalle med den målte 56 døgns fastheten ved 20 °C trenger betongen en aktiveringsenergi på omtrent  $A = 120\,000$  j/mol, som er usannsynlig høyt.

## 7.4 AKSEPTKRITERIER ETTER NS-EN 206

Som vi ser ut ifra resultatene fra akseptkriteriene vil flere av reseptene ha en lavere effektivt bindemiddelmengde enn kravet i NS-EN 206. For å vurdere om disse overskridelsene er akseptable må bagrunnen for kravene forstås. Standarden har ingen støttedokumenter som beskriver hva som ligger til grunn for kravene, noe som gjør det vanskeligere å forstå hva som er grunnlaget for de gitte verdiene.

På bakgrunn av Sverre Smeplass (2018) sin kjennskap til utarbeidelsen av standarden, er det kjent at kravet om minste effektive bindemiddelmengde er satt på bakgrunn av å sikre tilstrekkelig støplighet og komprimerbarhet. Dette er to kriterier som lett lar seg testes og dokumenteres. Både silikastøv og flygeaske bidrar positivt til betongens støplighet og vil dermed tilfredstille hensikten med kravet på en god måte. Ettersom det er satt krav til høyeste andel flygeaske og silikastøv blir ikke hele den tilsatte mengden tatt med i beregningen av minste effektive bindemiddelmengde. Begge bidrar likevell til støpligheten, noe som ble bekreftet i laboratoriearbeidet.

Kravene om høyeste andel flygeaske og silikastøv av effektiv bindemiddelmengde er satt for å sikre tilstrekkelig mengde klinker til pozzolanreaksjonen. Det forventes ikke noe styrkebidrag fra silikastøv utover pozzolanreaksjonen. På bakgrunn av dette er det valgt å ikke benytte større andeler SF.

Ettersom det i hovedsak ikke er pozzolanreaksjonen med flygeaske som observeres i denne oppgaven, men styrkebidraget fra flygeasken alene, blir det tilsatt større mengder enn det som standarden sier kan medberegnes i reaksjonen. Ved å dokumentere fasthetsutviklingen til betongen kan det argumenteres for at ikke kravet om tilstrekkelig klinker for pozzolanreaksjonen er relevant og at betongens egenskaper er tilfredsstillende.

Standardens krav om minste andel klinker på 65 % av bindemiddelet er trolig satt på samme grunnlag som kravet for flygeaske og silikastøv for å sikre tilstrekkelig mengde klinker til pozzolanreaksjonen. Hvorfor kravet kun er satt for CEM II og ikke for CEM I er usikkert, med kan trolig skyldes at kravene er satt på bakgrunn av de tilgjengelige produktene i markedet da standarden ble utarbeidet. Kravet bør isåfall også gjelde for CEM I sement, men det kan ha uteblitt ettersom dette ikke var en aktuell problemstilling på det tidspunktet.

Kravet om største masseforhold er satt for å sikre bestandighet og er ikke veldig strengt for bestandighetsklasse M90. Kravet blir likevell oversteget av Aal 70. Dette er en mer kritisk overskridelse enn effektiv bindemiddelmengde. For at denne resepten skal kunne tas i bruk, bør flere undersøkelser utføres for å dokumentere bestandighetsegenskapene og se hvordan den store andelen FA påvirker betongens bestandighet.

Om byggherre, selv på bakgrunn av dette, ønsker å holde seg innenfor standardens grenser, så vil en resept med Aalborg Rapid, 10 % silikastøv og 50 % flygeaske være en resept som gir en lav GWP og tilfredsstillende NS-EN 206+NA. Alle slaggreseptene tilfredstiller kravene gitt i standarden.

## 7.5 KARBONAVTRYKK

Av de utarbeidede miljødeklarasjonene sees et stort bidrag fra herdeakselerator på GWP verdien, med en økning på 26,4 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup> for slagg resepten og 9,1 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup> for reseptene med Aalborg Rapid. Slagg-resepten har noe større dosering av X-seed, men ikke så mye at forskjellen skal bli så stor. Dette skyldes ulike forutsetninger gjort ved utarbeidelsen av EPDene.

Verdier for tilsetningsstoffer har vært gjennomgående høy i EPD-kalkulatoren som benyttes, og kjemikalier har ofte mye høyere GWP enn den reelle verdien ettersom bare en liten del av løsningen er virkestoffet, mens resten er vann (Smeplass 2018). I EPDen for Slagg 0,55A, som er utarbeidet av Ølen Betong AS, er det benyttet en EPD for herdeakselerator fra 2015. Unicon AS har derimot benyttet en EPD for X-seed fra 2017 som har en betydelig lavere GWP verdi og er trolig mer korrekt.

Ved å benytte herdeakselerator vil avbindingstiden reduseres. Dette er meget gunstig ettersom det tillater tidligere tildekking med isolerende matter eller plast. På denne måten reduseres varmetapet til omgivelsene og betongen vil få et mindre behov for oppvarming for å opprettholde tilstrekkelig herdetemperatur. Avhenging av forholdene kan dette være avgjørende for om ekstern oppvarming trengs eller kan elimineres helt. Den økte GWP verdien fra akseleratoren kan dermed rettferdiggjøres i en viss grad ved å gi ett redusert klimagassutslipp fra ekstern oppvarming. Om ekstern oppvarming ikke er nødvendig vil dette også gi en redusert arbeidsmengde.

Reseptene med lavest GWP-verdi er også reseptene som er mest temperaturfølsomme. For å oppnå størst mulig gevinst i det totale klimagassregnskapet bør disse benyttes i størst mulig grad så lenge forholdene tillater det. For Gullhaug Torg vil dette i praksis bety at de mest temperatursensitive reseptene bør benyttes tidlig i prosjektet, ettersom oppstart er på sommeren. Etterhvert som været blir kaldere kan flygeaskeandelen reduseres slik at betongen ikke lenger vil kreve like høy temperatur for å oppnå samme styrke.

Oppstart på sommeren er spesielt gunstig med tanke på fundamenteringen av bygget. Den eneste av reseptene som er undersøkt her som kan benyttes i fundament er Slagg 0,45 som tilfredsstillende bestandighetsklasse M45. Denne resepten er svært temperaturfølsom, og vil ha stor nytte av den økte temperaturen i omgivelsene. Resepten er blant de med lavest GWP samtidig som bunnplaten er tykkere og krever større mengder betong enn dekkene. Dette vil gi en kraftig reduksjon i klimagassregnskapet med tanke på prosjektets mål på 170 kg CO<sub>2</sub>-eqv/m<sup>3</sup>.

Dersom det oppnås en stor reduksjon i klimagassregnskapet i starten av prosjektet vil dette gi større frihet til valg av betongresepter for senere støp, eller det benyttes som en buffer i andre deler av prosjektet som av ulike grunner ikke kommer innenfor de satte målene.

## KAPITTEL 8 KONKLUSJON

Samtlige av reseptene med Aalborg Rapid-sement og høy andel flygeaske viser en usedvanlig god fasthetsutvikling ved herding i 35 °C. Resepten med 50 % FA tilfredsstiller kravet på 25 MPa etter 3 døgn ved 20 °C, mens resepten med 60 % når kravet ved hjelp av oppvarming.

Basert på simuleringene av dekkestøp med resepten med 50 % FA, oppnås nesten den ønskede fastheten etter 3 døgn uten andre tiltak enn tildekking. Med høyere utetemperatur eller med oppvarming ved hjelp av varmekabler vil denne betongen enkelt tilfredsstille kravene til prosjektet.

Resepten med 70 % flygeaske klarer ikke kravet, men den høye sluttfastheten ved herding i 35 °C er et tydelig tegn på at flygeasken bidrar til fasthetsutvikling utover den velkjente pozzolanreaksjonen. Samme høye fasthet observeres for alle flygeaskereseptene ved 35 °C. Dette regnes som en geopolymer-effekt som gjør at betongen kan omtales som en hybridbetong bestående av en kombinasjon mellom tradisjonell betong og geopolymer.

Hybridbetong eller geopolymer omtales ikke av NS-EN 206+NA, og gir betongen egenskaper som gjør at modenhetsprinsippet ikke ser ut til å være gjeldene. Beregning av oppnådd fasthet etter modenhetsprinsippet vil dermed gi underestimerte verdier med en betydelig lavere fasthet enn den oppnådde. Gjeldene teori stemmer med dette dårlig overens med denne type betong.

De tre slaggreseptene presterer utrolig godt med tanke på GWP-verdi, men vil kreve litt høyere temperatur enn 20 °C for å tilfredstille kravet på 25 MPa etter tre døgn. Simulering av herdeforløpet i bunnplaten viser derimot at det er svært oppnåelig å oppnå tilstrekkelig herdetemperatur uten ekstra oppvarming. Dette skyldes at bunnplaten er såppas massiv. Om slaggementen benyttes i varmt vær i starten av prosjektet, vil dette gi en stor innsparing i klimagassregnskapet – spesielt ved bruk i bunnplaten.

Aalborgresepten med 50 % FA og samtlige av reseptene med slaggementen holder seg innenfor grensene satt i NS-EN 206+NA. Resepten med 60 % og begge reseptene med Standard FA tilfredsstiller derimot ikke standardens minste krav til effektiv bindemiddelmengde. På bakgrunn av observasjoner i laboratoriet konkluderes det med at reseptene kan benyttes til tross for dette som følge av god støpelighet. Resepten med 70 % FA tilfredsstiller ikke krav til høyeste masseforhold eller minste effektive bindemiddelmengde, og anbefales ikke før mer testing på bestandighet foreligger.

Alle de undersøkte reseptene har en betydelig lavere GWP enn både prosjektets mål og minstekravet for oppfylle Lavkarbonklasse A etter NB 37. Oppvarming under herding vil gi et bidrag i klimagassregnskapet, men basert på erfaringer vil ikke dette bidraget utgjøre en stor andel sammenlignet med reduksjonen fra resepten (Smeplass 2018). Dette gir frihet til å velge mellom de ulike reseptene etter forholdene på byggeplassen i løpet av byggeperioden og fortsatt nå prosjektets mål.

# KAPITTEL 9 VIDERE ARBEID

Videre arbeid vil for det meste dreie seg om hybridbetongene da disse er veldig lite dokumentert. Slaggreseptene er godt dokumentert slik at brukspotensialet er kjent.

## 9.1 FASTHETSUTVIKLING VED VARIERENDE TEMPERATUR

Fasthetsutviklingen som følge av geopolymereffekten har vist seg å gi en særdeles god fasthetsutvikling ved 35 °C. For videre forsøk kunne det vært interessant å teste denne effekten ytterligere. Forsøkene i denne oppgaven tar for seg konstant temperatur for hele herdeforløpet. For videre forsøk kunne det vært interessant å se hvordan fasthetsutviklingen påvirkes av varierende temperatur for å se hvor temperaturavhengig denne effekten er. Blant annet kan det være interessant å se hvordan fastheten påvirkes av økt temperatur de første dagene og deretter romtemperatur, eller motsatt. Økning av temperatur etter en periode kan være interessant å se på for å se om man kan oppnå en fasthetsøkning ved å øke temperaturen sent i herdeforløpet.

Den økte temperaturen i seg selv ser ut til å gi et bidrag til fasthetsutviklingen. Dette bidraget vil trolig variere ved ulike temperaturer. Kartlegging av herdeforløpet ved flere ulike temperaturer bør derfor utføres for å se hvordan temperaturavhengigheten er. Ettersom det er observert fasthetsutvikling selv ved 56 døgn, bør forsøkene utføres med enda lenger herdetid for å få sikrere mål på hva den endelige slutfastheten er.

## 9.2 NY HERDETEKNOLOGI

Gjeldene teori rundt herdeteknologi stemmer dårlig overens med hybridbetongene med tanke på modenhetsprinsippet. Videre arbeid med å koble hybridbetong opp mot herdeteknologien bør derfor utføres. Dette kan for eksempel gjøres ved å koble sammen fasthetmodenhet og modenhet-tid for hybridbetong der avviket beskrives. Aktiveringsenergi for hybridbetong må også modifiseres for å stemme. Videre kartlegging av egenskapene til hybridbetongen vil danne grunnlag for å utarbeide nye modeller for beregning av betongens modenhet, som tar hensyn til styrkebidraget fra den økte temperaturen.

## 9.3 YTTERLIGERE TESTING AV HYBRIDBETONGER

Når det gjelder hybridbetongene i denne avhandlingen fokuseres det kun på at betongen skal oppnå tilstrekkelig fasthet – bestandighet er ikke tatt hensyn til. Hvordan slike betonger presterer på lang sikt er uvisst med tanke på langtids- og sideeffekter. Derfor er det hensiktsmessig å ytterligere teste denne betongen for å vurdere brukspotensialet. Dette gjelder ikke slaggbetongene da disse allerede er nøye dokumentert.

## 9.4 STANDARDISERTE LØSNINGER

Slik det er nå dekker standarden kun vann/semment- og pozzolanreaksjonen. Denne bør videreutvikles for hybridbetonger slik at standardiserte løsninger for denne type betonger kan benyttes i kommende prosjekter. Gjennom standardiserte løsninger vil det bli lettere å benytte denne type betong

## 9.5 ELEMENTPRODUKSJON

Med tanke på den økte fasthetsutviklingen ved høy temperatur kan det tenkes at hybridbetongene er egnet for elementproduksjon. Her kan betongen herde i trygge omgivelser, og fastheten kan korrigeres i varmerom. På den måten kan man oppnå ønsket fasthet ved å lagre elementene i varmerommet før øvrig lagring eller transport. Muligheten rundt bruken hybridbetongene, med svært lave GWP-verdier, i betongelementer bør derfor kartlegges og videreutvikles.

## 9.6 MILD AKTIVIERING AV FLYGEASKE

Av det som foreligger av litteratur knyttet til aktivering av flygeaske, er det mye som tyder på at milde aktivatorer har et potensiale til å øke fasthetsutviklingen til betongen uten å redusere bearbeidbarheten i for stor grad. Spesielt reseptene Aal 60 og Aal 70 kunne nytt godt av en slik aktivering og bør testes ut nærmere.

# BIBLIOGRAFI

- Avantor AS (2017). *Gullhaug Torg 2A*. URL: <http://avantor.no/2017/03/15/gullhaug-torg-2a/> (sjekket 06.12.2017).
- BASF AS (2010). *Teknisk datablad - Master X-seed 100*.
- Berry, E.E., R.T. Hemmings og B.J. Cornelius (1990). “Mechanisms of hydration reactions in high volume fly ash pastes and mortars”. I: *Cement and Concrete Composites*.
- Dalland, Olav (2012). *Metode og oppgaveskriving for studenter*. Gyldendal akademisk.
- De Weerd, Klaartje (2011). *Blended cement with reduced CO emission : utilizing the fly ash-limestone synergy*. Trondheim.
- Donatello, Shane, Ana Fernández-Jimenez og Angel Palomo (2013). “Very High Volume Fly Ash Cements. Early Age Hydration Study Using Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as an Activator”. I: *Journal of the American Ceramic Society* 96.3, s. 900–906.
- EPD-Norge (2017). *Hva er en EPD?* URL: <http://epd-norge.no/hva-er-en-epd/> (sjekket 13.12.2017).
- Fernández-Jiménez, A., A. Palomo og M. Criado (2005). “Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model”. I: *Cement and Concrete Research* 35.6, s. 1204–1209.
- García-Lodeiro, I., A. Fernández-Jimenez og A. Palomo (2013). “Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction stages”. I: *Cement and Concrete Composites* 39. Supplement C, s. 82–92.
- García-Lodeiro, Inés et al. (2016). “Hydration of Hybrid Alkaline Cement Containing a Very Large Proportion of Fly Ash: A Descriptive Model”. I: *Materials* 9.7.
- Gjerp, Pål, Morten Opsahl og Sverre Smeplass (2004). *Grunnleggende betongteknologi*. Byggenæringens forlag.
- Hamdy, Mohamed, Ala Hasan og Kai Siren (2013). “A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010”. I: *Energy and Buildings* 56. Supplement C, s. 189–203.
- Haucon (2007). “Teknisk datablad”. I: *Cellu-Cushion E 10mm Vintermatte*.
- Hermansen, Frederic Aarnæs (2018). “Betong med høy flyveaskedosering”. Masteroppg. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Kjellsen, Knut O. (2015). *TKT4215 Concrete Technology 1, Chapter 5 - Cement*. NTNU.
- Malhotra, V.M. og A.A. Ramezani-pour (1992). *Fly ash in concrete*. second edition. Canada Centre for Mineral og Energy Technology.
- Myklebust, Sveinar (2018). *Personlig meddelelse. Effekten av X-seed i klinkerfattige betonger*. Key Account Manager Admixture, Ready-mix - BASF.
- Myrdal, Roar (2015). *TKT4215 Concrete Technology 1, Chapter 10 - Admixtures*. NTNU.
- Nematollahi, Behzad og Jay Sanjayan (2014). “Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer”. I: *Materials Design* 57. Supplement C, s. 667–672.
- Norsk betongforening (2015). *Lavkarbonbetong publikasjon nr. 37*. Tekna.
- NTNU Universitetsbibliotek (u.å). *Finne kilder*. URL: <https://innsida.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/Finne+kilder#section-Finne+kilder-Hvordan+velger+jeg+ut+kilder?> (sjekket 13.10.2017).
- Provis, John L. og Susan A. Bernal (2014). “Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials”. I: *Annual Review of Materials Research* 44.1, s. 299–327.
- Sellebold, Erik J. (1990). *TKT4215 Concrete Technology 1, Chapter 6 - Hydration*. NTNU.
- (2008). *TKT4215 Concrete Technology 1, Chapter 7 - Pozzolana*. NTNU.



- Sharp, J.H., E.M. Gartner og D.E. Macphee (2010). “Novel cement systems (sustainability). Session 2 of the Fred Glasser Cement Science Symposium”. I: *Advances in Cement Research* 22.4, s. 195–202.
- Smeplass, Sverre (2003). *TKT4215 Concrete Technology 1, Chapter 11 - Curing technology*. NTNU.
- (2013). *Prof. II, sjefsrådgiver, betongteknologi, Skanska Teknikk*. Aktiveringsenergi.xlsm.
- (2018). *Prof. II, sjefsrådgiver, betongteknologi, Skanska Teknikk*. Personlig meddelelse.
- Spenneteknikk (2011). “BBR VT CONA Single spenntausystem”. I: *Plasstøpte etterspente betongkonstruksjoner*.
- Standard Norge (2017). *NS-EN 206:2013+A1:2016+NA:2017 Betong - Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar*. Standard Norge.
- Sælen, Håkon (2018). *Konstruktør, avdeling Konstruksjon, Skanska Teknikk*. Personlig meddelelse.
- United States Environmental Protection Agency (u.å). *Understanding Global Warming Potentials*. URL: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials> (sjekket 19.05.2017).
- Yang, Xiaohong, Weiling Zhu og Qiao Yang (2008). “The Viscosity Properties of Sodium Silicate Solutions”. I: *Journal of Solution Chemistry* 37.1, s. 73–83.

# Vedlegg

# INNHold

<b>A</b>	<b>Kjemisk sammensetning, FA</b>	<b>86</b>
<b>B</b>	<b>EPD for Aal 50A</b>	<b>87</b>
<b>C</b>	<b>Utdrag fra EPDer fra Unicon</b>	<b>95</b>
C.1	Resultat for Aal 50 . . . . .	95
C.2	Resultat for Aal 60 . . . . .	96
C.3	Resultat for Aal 60A . . . . .	97
C.4	Resultat for Aal 70 . . . . .	98
C.5	Resultat for Std FA 50 . . . . .	99
C.6	Resultat for Std FA 60 . . . . .	100
<b>D</b>	<b>EPD for Slagg 0,55A</b>	<b>101</b>
<b>E</b>	<b>Utdrag fra EPDer fra Ølen Betong</b>	<b>109</b>
E.1	Resultat for Slagg 0,55 . . . . .	109
E.2	Resultat for Slagg 0,45 . . . . .	110
<b>F</b>	<b>Tilslagssammensetning og siktekurver</b>	<b>111</b>
<b>G</b>	<b>Resept - Std FA 50</b>	<b>114</b>
<b>H</b>	<b>Resept - Std FA 60</b>	<b>116</b>
<b>I</b>	<b>Resept - Aal 50</b>	<b>118</b>
<b>J</b>	<b>Resept - Aal 60</b>	<b>120</b>
<b>K</b>	<b>Resept - Aal 70</b>	<b>122</b>
<b>L</b>	<b>Resept - Aal 50A</b>	<b>124</b>
<b>M</b>	<b>Resept - Aal 60A</b>	<b>126</b>
<b>N</b>	<b>Resept - Slagg 0,55</b>	<b>128</b>
<b>O</b>	<b>Resept - Slagg 0,55A</b>	<b>130</b>
<b>P</b>	<b>Resept - Slagg 0,45</b>	<b>132</b>
<b>Q</b>	<b>Aktiveringsenergi.xlms</b>	<b>134</b>
<b>R</b>	<b>Herdekasse.xlms</b>	<b>135</b>
<b>S</b>	<b>Fasthet-temperatur, FIB1.xlms</b>	<b>138</b>
<b>T</b>	<b>CrackTeSt COIN dekkegeometri</b>	<b>141</b>
<b>U</b>	<b>CrackTeSt COIN bunnplategeometri</b>	<b>142</b>

# VEDLEGG A KJEMISK SAMMENSETNING, FA



## REPORT ON QUALITY TEST

Customer:	Tor Magnus Zakkariassen	Your ref.:	84-17
Date received:	18.08.2017	Our ref.:	<b>LN-2017-0009</b>
Sample Marked:	Uttak av FA i BigBag Big Bag nr.4 tatt ut 21.08.17		

Parameter:		Results:		Method:
<b>CHEMICAL COMPOSITION</b>				
<b>Chemical Parameters</b>				
Sulfur Trioxide-IR	SO3	0.81	%	PD1752
Loss On Ignition	LOI	2.36	%	EN196-2
<b>XRF Analysis</b>				
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
<b>TECHNICAL PARAMETERS</b>				
<b>Fineness</b>				
Specific Weight		2.30	g/cm3	PD1777
Specific surface, Blaine		336	m2/kg	EN196-6
<b>Particle Size Distribution</b>				
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

# VEDLEGG B EPD FOR AAL 50A

Ver1 2015

## 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-1487-500-NO
Publiseringsnummer:	Ikke tildelt
ECO Platform registreringsnummer:	Ikke tildelt
Godkjent dato:	
Gyldig til:	

## Masterprosjekt - Aal50% - Xseed - B35M90 - 230418

Unicon AS



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



## Generell informasjon

### Produkt:

Masterprosjekt - Aal50% - Xseed - B35M90 - 230418

### Programoperatør:

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

### Deklarasjonsnummer:

Viser til NEPD-1487-500-NO

### 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 Masterprosjekt - Aal50% - Xseed - B35M90 - 230418

### Deklarert enhet med opsjon:

A1,A2,A3

### 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: Berit Gudding Petersen  
Telefon: 97171734  
e-post: [bgpe@unicon.no](mailto:bgpe@unicon.no)

### Produsent:

Unicon AS

### Produksjonssted:

Unicon Sjursøya

### Kvalitet/Miljøsystem:

NS-EN 14001 No. S-024

### Org. no.:

No 942822979

### Godkjent dato:

### Gyldig til:

### Årstall for studien:

2018

### 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 300418

Kontrollert av:

### Godkjent:

Sign

(Daglig leder av EPD-Norge)



## Produkt

### Produktbeskrivelse:

B35M90 D-Max 16 mm  
Konsistens 200 mm

### Produktspesifikasjon:

1m3 ferdigbetong styrkeklasse B35 og bestandighetsklasse M90

Materials	Percent
Cement	5,77
Aggregate	79,88
Water	5,05
Chemicals	0,65
SCM	8,65

### Tekniske data:

Prosjektspesifik EPD utarbeidet etter retningslinjer gitt av EPD Norge.  
Godkjent dato og Gyldig til dato fylles ikke ut for Prosjektspesifikke EPD'er.

### Markedsområde:

### Levetid, produkt:

### Levetid, bygg:

## LCA: Beregningsregler

### Deklart enhet:

1 m3 Masterprosjekt - Aal50% - Xseed - B35M90 - 230418

### 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 produksystemet. 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 deklarte produktet og ble samlet inn for EPD- utvikling i det oppgitte året for studien. Bakgrunnsdata er basert på registrerte EPD'er i henhold til EN 15804, Østfoldforskning sine databaser, ecoinvent og andre LCA databaser. Datakvaliteten for råmaterialene i A1 er presentert i tabellen nedenfor.

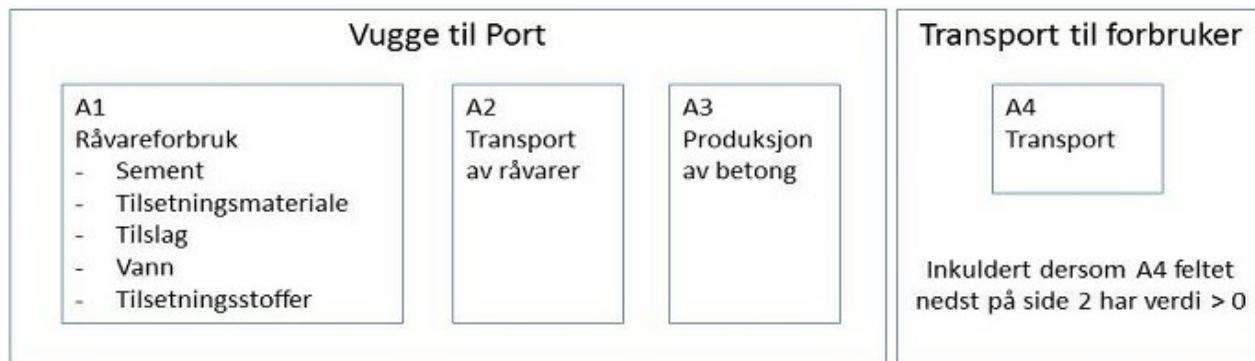
Energiforbruk på fabrikk er gjennomsnitt 2016.

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-1426-468	EPD	2015
Chemicals	EPD-BAS-20170089-IBC1-EN	EPD	2017

**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: NEPD-1487-500-NO

Prosjektspesifik EPD utarbeidet etter retningslinjer gitt av EPD Norge. Godkjent dato og Gyldig til dato fylles ikke ut for Prosjektspesifikke EPD'er.



## 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					l/tkm	
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

### Byggefase A5

.	Enhet	Verdi
Hjelpematerialer	kg	
Vannforbruk	m <sup>3</sup>	
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 <sup>3</sup>	
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 <sup>3</sup>	
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	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR

**Miljøpåvirkning (Environmental impact)**

Parameter	Unit	A1	A2	A3
GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq	1,50E+02	6,94E+00	4,81E+00
ODP	kg CFC11 -eq	4,75E-06	4,35E-07	8,45E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,56E-02	4,43E-03	9,91E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	3,25E-01	1,90E-02	3,58E-02
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	1,06E-01	4,17E-02	8,50E-03
ADPM	kg Sb -eq	1,24E-04	4,24E-06	7,00E-06
ADPE	MJ	9,94E+02	9,57E+01	6,65E+01

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

## Ressursbruk (Resource use)

Parameter	Unit	A1	A2	A3
RPEE	MJ	6,68E+01	5,36E-01	3,51E+01
RPEM	MJ	2,31E+00	1,65E-01	3,05E-01
TPE	MJ	6,91E+01	7,02E-01	3,54E+01
NRPE	MJ	1,01E+03	9,63E+01	6,90E+01
NRPM	MJ	2,83E+01	0,00E+00	0,00E+00
TRPE	MJ	1,03E+03	9,63E+01	6,90E+01
SM	MJ	2,21E+02	0,00E+00	0,00E+00
RSF	MJ	9,19E+01	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	MJ	1,03E+02	0,00E+00	0,00E+00
W	m <sup>3</sup>	3,45E+00	4,91E-01	4,79E-01

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3
HW	kg	3,68E-03	2,19E-05	3,42E-05
NHW	kg	1,63E+01	2,91E+00	6,60E-01
RW	kg	INA*	INA*	INA*

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3
CR	kg	0,00E+00	0,00E+00	1,45E+01
MR	kg	1,88E-01	0,00E+00	0,00E+00
MER	kg	8,69E-02	0,00E+00	0,00E+00
EEE	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ETE	MJ	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 E-03 =  $9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

\*INA Indicator Not Assessed

## Norske tilleggskrav

### Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

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

Elektrisitetmiks	Datakilde	Mengde	Enhet
El-mix, Norway (kWh)	Ecoinvent 3	25,30	g CO <sub>2</sub> -ekv/kWh

### Farlige stoffer

Produktet er ikke tilført stoffer fra REACH Kandidatliste eller 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](http://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.

	<b>Programoperatør og utgiver</b> Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner Pb. 5250 Majorstuen 0303 Oslo Norway	Telefon: +47 23 08 82 92  e-post: <a href="mailto:post@epd-norge.no">post@epd-norge.no</a> web: <a href="http://www.epd-norge.no">www.epd-norge.no</a>
	<b>Eier av deklarasjon</b> Unicon AS Prof. Birkelandsvei 27B 1081 Oslo	Telefon: 97171734 Fax: e-post: <a href="mailto:bgpe@unicon.no">bgpe@unicon.no</a> web:
	 <b>Forfatter av livsløpsrapporten</b> Østfoldforskning AS Stadion 4 1671 Kråkerøy	Telefon: +47 69 35 11 00 Fax: +47 69 34 24 94 e-post: <a href="mailto:post@ostfoldforskning.no">post@ostfoldforskning.no</a> web: <a href="http://www.ostfoldforskning.no">www.ostfoldforskning.no</a>

# VEDLEGG C UTDRAG FRA EPDER FRA UNICON

## C.1 RESULTAT FOR AAL 50



### 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/ installasjonsstase	Bruk	Vedlikehold	Reparasjon	Utskiftinger	Renovering	Operasjonell energibruk	Operasjonell varmbruk	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	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR

#### Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3
GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq	1,41E+02	6,86E+00	4,81E+00
ODP	kg CFC11 -eq	4,52E-06	4,19E-07	8,45E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,46E-02	4,41E-03	9,91E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	3,12E-01	1,87E-02	3,58E-02
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	9,34E-02	4,17E-02	8,50E-03
ADPM	kg Sb -eq	1,02E-04	4,05E-06	7,00E-06
ADPE	MJ	9,17E+02	9,44E+01	6,65E+01

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

C.2 RESULTAT FOR AAL 60



LCA: Resultater

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

Product stage			Construction installation stage		User stage								End of life stage			Beyond the system boundaries
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjons/ installasjonsstase	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	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3
GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq	1,10E+02	6,86E+00	4,81E+00
ODP	kg CFC11 -eq	4,05E-06	4,19E-07	8,45E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,29E-02	4,41E-03	9,91E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	2,69E-01	1,87E-02	3,58E-02
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	7,82E-02	4,17E-02	8,50E-03
ADPM	kg Sb -eq	9,80E-05	4,05E-06	7,00E-06
ADPE	MJ	7,88E+02	9,44E+01	6,65E+01

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

### C.3 RESULTAT FOR AAL 60A



#### 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/ installasjonsstase	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	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR

#### Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3
GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq	1,19E+02	6,94E+00	4,81E+00
ODP	kg CFC11 -eq	4,30E-06	4,35E-07	8,45E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,40E-02	4,43E-03	9,91E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	2,83E-01	1,90E-02	3,58E-02
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	9,15E-02	4,17E-02	8,50E-03
ADPM	kg Sb -eq	1,22E-04	4,24E-06	7,00E-06
ADPE	MJ	8,73E+02	9,57E+01	6,65E+01

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

Leseeksempel 9,0 E-03 = 9,0\*10<sup>-3</sup> = 0,009  
 \*INA Indicator Not Assessed

C.4 RESULTAT FOR AAL 70



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/ installasjonsstase	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	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3
GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq	7,64E+01	6,86E+00	4,81E+00
ODP	kg CFC11 -eq	3,54E-06	4,19E-07	8,45E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,11E-02	4,41E-03	9,91E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	2,23E-01	1,87E-02	3,58E-02
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	6,21E-02	4,17E-02	8,50E-03
ADPM	kg Sb -eq	9,31E-05	4,05E-06	7,00E-06
ADPE	MJ	6,48E+02	9,44E+01	6,65E+01

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

Leseeksempel 9,0 E-03 = 9,0\*10<sup>-3</sup> = 0,009  
 \*INA Indicator Not Assessed



## C.5 RESULTAT FOR STD FA 50



### LCA: Resultater

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

Product stage			Construction installation stage		User stage								End of life stage			Beyond the system boundaries
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjons/ installasjonsstase	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	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR

#### Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3
GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq	1,24E+02	8,70E+00	4,81E+00
ODP	kg CFC11 -eq	3,15E-06	7,67E-07	8,45E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	2,05E-02	4,74E-03	9,91E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	1,91E-01	2,52E-02	3,58E-02
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	2,12E-01	4,30E-02	8,50E-03
ADPM	kg Sb -eq	1,74E-04	8,12E-06	7,00E-06
ADPE	MJ	8,41E+02	1,23E+02	6,65E+01

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

C.6 RESULTAT FOR STD FA 60



LCA: Resultater

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

Product stage			Construction installation stage		User stage								End of life stage			Beyond the system boundaries
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjons/ installasjonsstase	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	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3
GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq	9,59E+01	8,70E+00	4,81E+00
ODP	kg CFC11 -eq	3,09E-06	7,67E-07	8,45E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,74E-02	4,74E-03	9,91E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	1,80E-01	2,52E-02	3,58E-02
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	1,67E-01	4,30E-02	8,50E-03
ADPM	kg Sb -eq	1,52E-04	8,12E-06	7,00E-06
ADPE	MJ	7,32E+02	1,23E+02	6,65E+01

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

# VEDLEGG D EPD FOR SLAGG 0,55A

Ver1 2015

## ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

in accordance with ISO 14025, ISO 21930 and EN 15804

Eier av deklarasjonen:	Ølen Betong AS
Programoperatør:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Utgiver:	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner
Deklarasjonsnummer:	Referer til: NEPD-1191-358-NO
Publiseringsnummer:	Ikke tildelt
ECO Platform registreringsnummer:	Ikke tildelt
Godkjent dato:	
Gyldig til:	

## Cemex M90, konsistens 200 mm

Ølen Betong AS



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



## Generell informasjon

### Produkt:

Cemex M90, konsistens 200 mm

### Programoperatør:

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

### Deklarasjonsnummer:

Referer til: NEPD-1191-358-NO

### ECO Platform registreringsnummer:

### Deklarasjonen er basert på PCR:

EN 15804:2012+A1:2013 tjener som kjerne-PCR

### 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 m<sup>3</sup> Cemex M90, konsistens 200 mm

### 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:

Ølen Betong AS  
Kontaktperson: Geir Arild Søndena  
Telefon: +47 5377 5200  
e-post: [mail@olenbetong.no](mailto:mail@olenbetong.no)

### Produsent:

Ølen Betong AS

### Produksjonssted:

Oslo

### Kvalitet/Miljøsystem:

Ølen Betong AS har et oppdatert system for kvalitetsstyring som bygger på NS-EN ISO 9001. Bedriften er ISO sertifisert innen miljø iht. NS-EN ISO 14001.

### Org. no.:

953 685 124

### Godkjent dato:

### Gyldig til:

### Årstall for studien:

2018

### 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: Solfrid Vevatne

Kontrollert av: Steinar Skartland

### Godkjent:

Sign

(Daglig leder av EPD-Norge)

## Produkt

### Produktbeskrivelse:

Betong B35 M90 lavvarme er ferdigbetong som brukes til prosjekt hvor det er spesielt strenge krav til lav varmeutvikling og miljø.

### Produktspesifikasjon:

Betongen består av lavvarmesement, silika, vann, sand, singel og tilsetningsstoff.

Materials	Percent
Cement	11,06
Aggregat	81,27
Water	6,41
Chemicals	0,68
SCM	0,58

### Tekniske data:

Betongen er produsert iht. NS-EN 206:2013+A1:2016+NA:2017.

### Markedsområde:

Oslo og omeng

### Levetid, produkt:

### Levetid, bygg:

## LCA: Beregningsregler

### Deklart enhet:

1 m<sup>3</sup> Cemex M90, konsistens 200 mm

### 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 energiforbruk 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 er brukt. Resirkuleringsprosessen og transport av materialet er allokert til denne analysen.

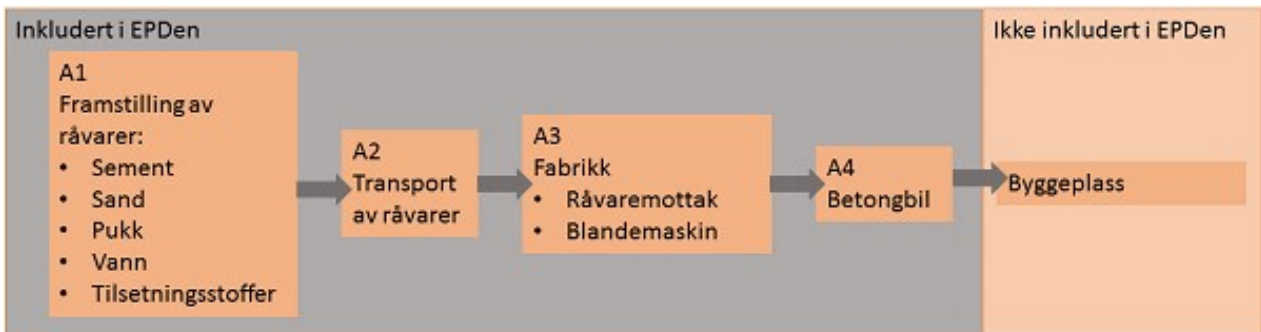
### Datakvalitet:

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.

Materials	Source	Data quality	Year
Water	0	0	0
SCM	0	Waste	0
Aggregat	Modified Ecoinvent	Database	2012
Aggregat	Østfoldforskning	Database	2012
Cement	NEPD 297E	EPD	2014
Chemicals	EPD-EFC-20150089-IAG1-EN	EPD	2015
Chemicals	EPD-EFC-20150091-IAG1-EN	EPD	2015

**Systemgrenser:**

Flytskjemaet nedenfor illustrerer systemgrensene for analysen:



**Teknisk tilleggsinformasjon**

## LCA: Scenarier og annen teknisk informasjon

Følgende informasjonen beskriver scenariene for modulene i EPDen.

### Transport fra produksjonssted til bruker (A4)

Type	Kapasitetsutnyttelse inkl retur %	Kjøretøytype	Distanse km	Brennstoff/Energi forbruk	Enhet	Verdi (l/t)
Bil	53,0 %	Concrete truck, EURO 6	10	0,020216	l/tkm	0,20
Jernbane					l/tkm	
Båt					l/tkm	
Annet					l/tkm	

### Byggefase A5

.	Enhet	Verdi
Hjelpematerialer	kg	
Vannforbruk	m <sup>3</sup>	
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 <sup>3</sup>	
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 <sup>3</sup>	
Elektrisitetsforbruk	kWh	
Andre energikilder	MJ	
Utstyrets varmeeffekt	kW	

### Slutfase (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 <sub>2</sub> -eq	1,18E+02	3,48E+00	2,15E+00	2,03E+00
ODP	kg CFC11 -eq	4,90E-06	6,41E-07	3,72E-07	3,84E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,92E-02	1,19E-03	4,55E-04	3,60E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	3,78E-01	3,17E-02	1,58E-02	7,15E-03
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	1,86E-01	4,06E-03	3,91E-03	1,49E-03
ADPM	kg Sb -eq	1,81E-04	5,52E-06	5,19E-06	4,49E-06
ADPE	MJ	1,15E+03	5,13E+01	2,92E+01	3,10E+01

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

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

\*INA Indicator Not Assessed





**Ressursbruk (Resource use)**

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
RPEE	MJ	1,31E+02	8,83E-01	2,84E+01	4,77E-01
RPEM	MJ	4,89E+00	2,08E-01	2,27E-01	1,46E-01
TPE	MJ	1,36E+02	1,09E+00	2,86E+01	6,23E-01
NRPE	MJ	1,22E+03	5,28E+01	3,12E+01	3,16E+01
NRPM	MJ	3,39E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TRPE	MJ	1,25E+03	5,28E+01	3,12E+01	3,16E+01
SM	MJ	1,99E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
RSF	MJ	8,01E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	MJ	9,54E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
W	m <sup>3</sup>	5,70E+01	3,64E-02	4,67E-01	2,82E-02

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
HW	kg	1,87E-03	2,80E-05	1,79E-05	2,40E-05
NHW	kg	2,85E+01	3,84E+00	5,76E+01	3,14E+00
RW	kg	INA*	INA*	INA*	INA*

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

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

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
CR	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
MR	kg	2,63E-01	0,00E+00	1,10E+01	0,00E+00
MER	kg	0,00E+00	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 E-03 =  $9,0 \cdot 10^{-3} = 0,009$

\*INA Indicator Not Assessed

## Norske tilleggskrav

### Klimagassutslipp fra bruk av elektrisitet i produksjonsfasen

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

Elektrisitetsmiks	Datakilde	Mengde	Enhet
El-mix, Norway [kWh]	Ecoinvent 3	25,30	g CO <sub>2</sub> -ekv/kWh

### Farlige stoffer

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

### Inneklima

Produktet har ingen påvirkning av 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.

	<b>Programoperatør og utgiver</b> 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
 	<b>Eier av deklarasjon</b> Ølen Betong AS Bjoavegen 191 5582 ØLENSVÅG	Telefon: +47 5377 5200 Fax: e-post: mail@olenbetong.no web: www.olenbetong.no
	<b>Forfatter av livsløpsrapporten</b> 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

# VEDLEGG E UTDRAG FRA EPDER FRA ØLEN BETONG

## E.1 RESULTAT FOR SLAGG 0,55



### LCA: Resultater

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

Product stage				Construction installation stage	User stage								End of life stage				Beyond the system boundaries
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjons/ installasjonsstase	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 <sub>2</sub> -eq	9,17E+01	3,39E+00	2,15E+00	2,03E+00
ODP	kg CFC11 -eq	4,91E-06	6,24E-07	3,72E-07	3,84E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,34E-02	1,18E-03	4,55E-04	3,60E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	3,00E-01	3,14E-02	1,58E-02	7,15E-03
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	1,68E-01	3,99E-03	3,91E-03	1,49E-03
ADPM	kg Sb -eq	9,59E-05	5,32E-06	5,19E-06	4,49E-06
ADPE	MJ	7,84E+02	4,99E+01	2,92E+01	3,10E+01

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

E.2 RESULTAT FOR SLAGG 0,45



LCA: Resultater

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

Product stage				Construction installation stage	User stage								End of life stage				Beyond the system boundaries
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjons/ installasjonsstase	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 <sub>2</sub> -eq	9,99E+01	3,39E+00	2,15E+00	2,03E+00
ODP	kg CFC11 -eq	5,14E-06	6,24E-07	3,72E-07	3,84E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,41E-02	1,18E-03	4,55E-04	3,60E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq	3,17E-01	3,14E-02	1,58E-02	7,15E-03
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	1,82E-01	3,99E-03	3,91E-03	1,49E-03
ADPM	kg Sb -eq	9,78E-05	5,32E-06	5,19E-06	4,49E-06
ADPE	MJ	8,37E+02	4,99E+01	2,92E+01	3,10E+01

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

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

\*INA Indicator Not Assessed

# VEDLEGG F TILSLAGSSAMMENSETNING OG SIKTEKURVER

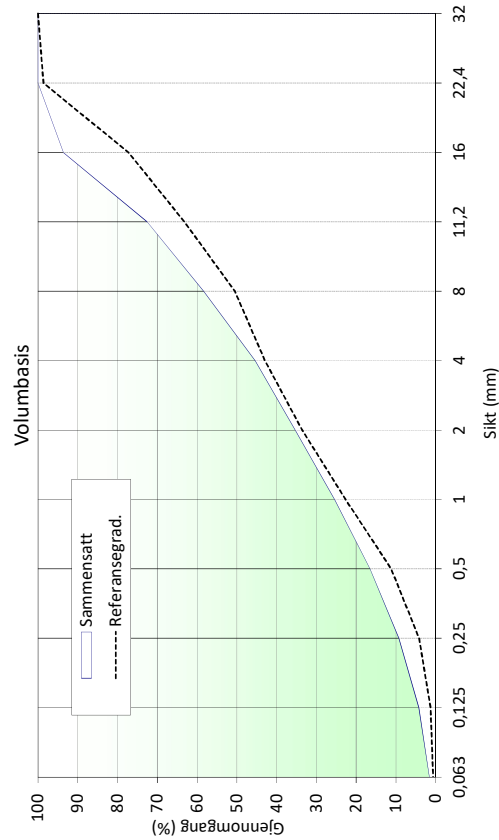
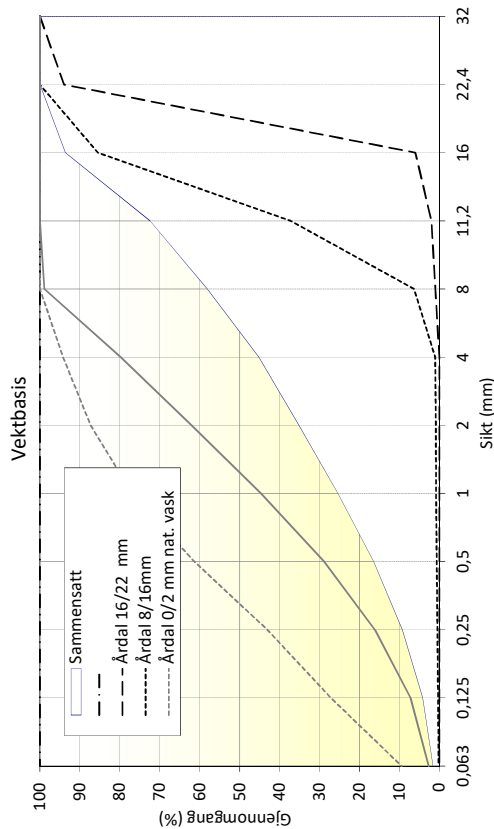
## Sammensatt tilslag

Fraksjon	Navn	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Abs. fukt [%]	Alk. reakt. Sv[%]	Klorider [%]	Andel volum	Andel vekt	Bruk
I	Årdal 0/8 mm nat. vask.	2630	1,0	0,0	0,00	0,562	0,560	ok
II	Årdal 0/2 mm nat. vask	2650	0,5	0,0	0,00	0,000	0,000	
III	Årdal 8/16mm	2670	0,5	0,0	0,00	0,438	0,440	ok
IV	Årdal 16/22 mm	2700	0,5	0,0	0,00	0,000	0,000	
V		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VI		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VIII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
IX		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
X		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
Sammensatt		2647		0,0	0,00	1,000	1,000	

Finhetsmoduler	
FM <sub>akt</sub> =	4,65
FM <sub>vol</sub> =	4,64
FM <sub>ref</sub> =	5,07
FMG =	5,55

Tilpass til ref. gradering, Ctrl T  
 Sett ref. gradering, Ctrl R  
 Tilpass til FMg, Ctrl F

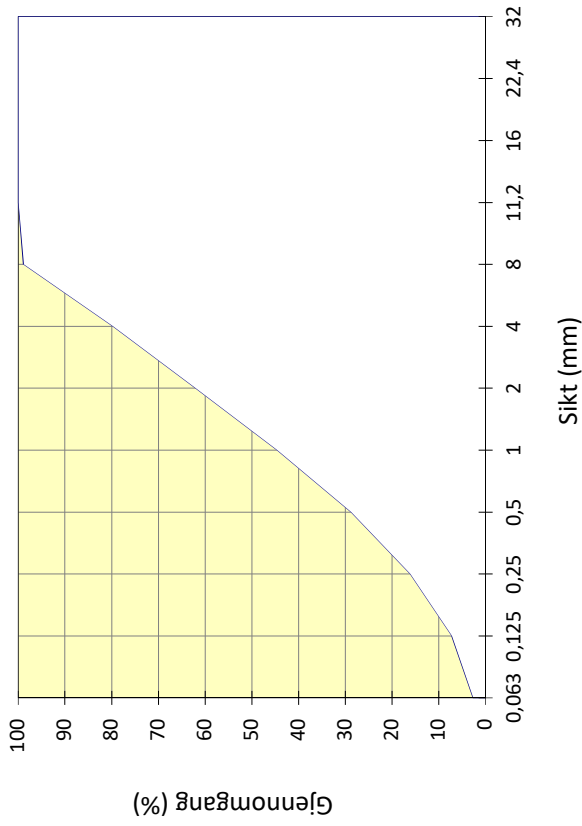
Åpning	Gjennomgang		Ref. grad. [vol. %]	Vekt ved tilpassing
	vol. [%]	vekt [%]		
32	100,0	100,0	100,0	1
22,4	100,0	100,0	98,6	1
16	93,6	93,6	77,3	1
11,2	72,5	72,4	63,2	1
8	58,4	58,2	50,5	1
4	45,3	45,1	42,9	1
2	35,3	35,2	33,6	1
1	25,4	25,3	22,7	2
0,5	16,5	16,4	11,2	2
0,25	9,3	9,2	4,2	2
0,125	4,2	4,2	1,3	2
0,063	1,6	1,6	0,7	2



Fraksjon I

Type:	Årdal 0/8 mm nat. vask.
Dato:	12.08.2016
FM =	3,16

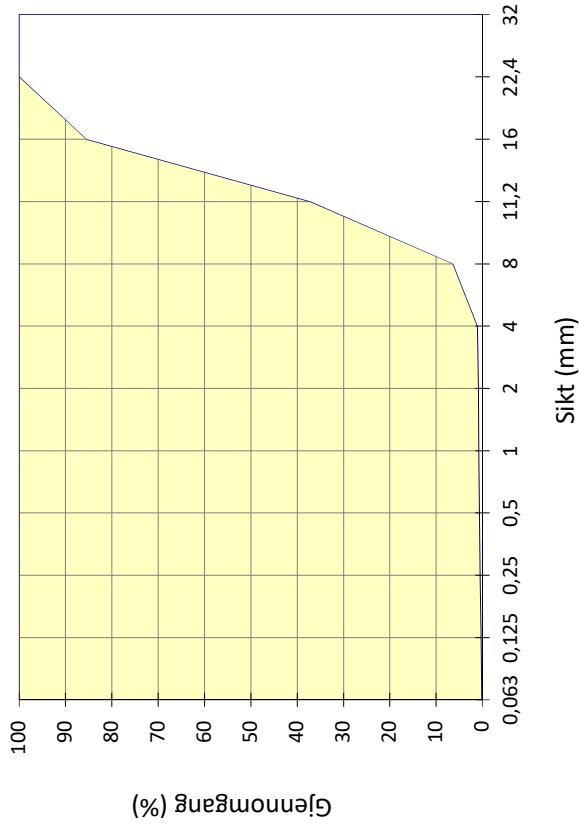
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	9,8	9,8	1,1	98,9
4	175,4	175,4	20,2	79,8
2	328,7	328,7	37,9	62,1
1	480,2	480,2	55,4	44,6
0,5	617,4	617,4	71,2	28,8
0,25	727,4	727,4	83,9	16,1
0,125	804,5	804,5	92,8	7,2
0,063	844,0	844,0	97,3	2,7
Bunn	867	867		



Fraksjon III

Type:	Årdal 8/16mm
Dato:	09.02.2018
FM =	6,54

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	278,5	278,5	14,5	85,5
11,2	1204,2	1204,2	62,8	37,2
8	1795,7	1795,7	93,7	6,3
4	1897	1897	98,9	1,1
2	1900	1900	99,1	0,9
1	1902	1902	99,2	0,8
0,5	1904	1904	99,3	0,7
0,25	1908	1908	99,5	0,5
0,125	1911	1911	99,7	0,3
0,063	1914	1914	99,8	0,2
Bunn	1917	1917		



# VEDLEGG G RESEPT - STD FA 50

**SKANSKA**

**Proporsjonering av betong**

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Std FA 50
Tilsikret kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	08.09.2017

Initialparametre	Verdi
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,35
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Norcem Std. FA	100,0 %	78,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	0,8 %	0,1 %
	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	3160	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	2980	0,0 %	0,0 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	10,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	41,2 %	1,0	2300	1,0 %	0,3 %
	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff	[kg/m <sup>3</sup> ] TS	Alkalier	Klorider
SP Dynamon sx23	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Klinkerandel i bindemiddel	38,1 %
Total FA- andel av bindemiddel	50,0 %
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	272,7
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	129,0
v/p	0,29
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	369
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	369

Beregn

**Kommentarer:**

Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Rødt bakgrunn i cellen for oppnådd matriksvolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matriksvolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.



**Proporsjonering av betong****SKANSKA**

Kommentarer:

0.2015-09-21.13

<b>Prosjekt</b>	Masterprosjekt
<b>Reseptnummer</b>	Resept Std FA 50
<b>Tilslaget kvalitet</b>	B35 M90
<b>Utført av</b>	Anders R E
<b>Dato</b>	08.09.2017

<b>Masseforhold</b>	0,35
<b>Matriksvolum (l/m<sup>3</sup>)</b>	300
<b>Volum sementlim (l/m<sup>3</sup>)</b>	273
<b>Tilslaget luftinnhold (%)</b>	2,0
<b>Effektivt bindemiddel (kg/m<sup>3</sup>)</b>	369

"Oppnådd" lik "Ønsket"; Ctrl+N

Nullstill volumkorleksjon; Ctrl+K

**Proporsjonert betong**

Materialer	kg/m <sup>3</sup>
Norcem Std. FA	179,8
0	0,0
0	0,0
Elkem Microsilica	36,9
Normineral flyveaske	151,8
	0,0
Fritt vann	129,0
Absorbent vann	15,6
Årdal 0/8 mm	1116,4
	0,0
Årdal 8/16mm	881,5
Merestad 16/22 mm	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
SP Dynamon sX23	5,53
0,0	0,00
	0,00
	0,00
	0,0
	0,0
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2512

volum ok

Ønsket	Oppnådd
kg	kg
9,0	9,0
0,0	0,0
0,0	0,0
1,8	1,8
7,6	7,6
0,0	0,0
6,4	6,4
0,8	0,8
55,8	55,8
0,0	0,0
44,1	44,1
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0
0,28	0,28
0,00	0,00
0,00	0,00
0,00	0,00
0,0	0,0
0,0	0,0
0,0	0,0

**Fersk betong**

Egenskap	Ønsket volum (l)
Ønsket volum (l)	50,0
Innveid volum (l)	50,0
Målt luftinnhold (%)	1,7
Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	2404
Effektivt v/(c+Σkp)	0,350

**Aggressiver**

Kloridinnhold [% av b]	0,17 %
Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ]	3,10
Andel reakt. bergarter [%]	0,0

**Volumkorleksjon**

korr.luft	korr.dens	Korrigert
0,5	-8,3	172,1
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,1	-1,7	35,3
0,5	-7,0	145,3
0,0	0,0	0,0
0,4	-5,9	123,4
0,0	-0,7	14,9
3,3	-51,4	1068,3
0,0	0,0	0,0
2,6	-40,6	843,5
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	-0,3	5,29
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
7,5	-116,0	2404

**Kommentarer:**

Gule felt fylles ut, grønne beregnes.

Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.

Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovenstående tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørr tilslag. Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0. I så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.

Alle delmaterier bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.

Merk at for pozzolaner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våt basis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

# VEDLEGG H RESEPT - STD FA 60

## Proporsjonering av betong SKANSKA

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Std FA 60
Tilsluttet kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	08.09.2017

Initialparametre	Verdi
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,34
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Norcem Std. FA	100,0 %	78,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	0,8 %	0,1 %
Aalborg rapid	0,0 %	95,0 %	0,0 %	0,0 %	3160	0,6 %	0,0 %
Cemeex CEM III/B	0,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2980	1,4 %	0,1 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	10,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	53,4 %	1,0	2300	1,0 %	0,3 %
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrstoff	[kg/m <sup>3</sup> TS]	Alkalier	Klorider
SSP	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %
L-stoff	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Oppnådd matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Klinkerandel i bindemiddel	28,5 %
Total FA- andel av binde middel	60,0 %
Total slaggandel av binde middel	0,0 %
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	269,0
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	122,4
v/p	0,27
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	364
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	364

Beregn

**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Rødt bakgrunn i cellen for oppnådd matrivolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matrivolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.

Kommentarer:

**SKANSKA**

**Proporsjonering av betong**

02015-09-21.55

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Std FA 60
Tilslaget kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	08.09.2017

Masserforhold	0,34
Matriksvolum (l/m <sup>3</sup> )	300
Volum sementlim (l/m <sup>3</sup> )	269
Tilslaget luftinnhold (%)	2,0
Effektivt bindemiddel (kg/m <sup>3</sup> )	364

"Oppnådd" lik "Ønsket"; Ctrl+N

Nulstill volumkorreksjon; Ctrl+K

**Proporsjonert betong**

Materialer	kg/m <sup>3</sup>	Ønsket	Oppnådd
		kg	kg
Norcem Std. FA	133,4	6,7	185,3
Aalborg rapid	0,0	0,0	0,0
Cemex CEM III / B	0,0	0,0	0,0
Elkem Microsilica	36,4	1,8	37,8
Normineral flyveaske	194,6	9,7	155,1
Fritt vann	122,4	6,1	132,7
Absorbent vann	15,8	0,8	14,3
Årdal 0/8 mm	1161,7	58,1	973,6
Årdal 8/16mm	845,4	42,3	414,0
Merestad 16/22 mm	0,0	0,0	489,2
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
SSP	5,47	0,27	2,84
L-stoff	0,00	0,00	1,51
	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2511		

volum ok

**Fersk betong**

Egenskap	Ønsket volum (l)	Oppnådd volum (l)
Ønsket volum (l)	50,0	966,1
Innveid volum (l)		2,0
Målt luftinnhold (%)		2,0
Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )		2402
Effektivt v/(c+Σkp)		0,356

**Aggressiver**

Kloridinnhold [% av b]	0,20 %
Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ]	3,16
Andel reakt. bergarter [%]	0,0



**Volumkorreksjon**

korr.luft	korr.dens	Korrigert
0,0	-6,8	185,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	-1,4	37,8
0,0	-5,7	154,8
0,0	0,0	0,0
0,0	-4,9	134,4
0,0	-0,5	14,2
0,0	-35,9	972,0
0,0	0,0	0,0
0,0	-15,3	413,3
0,0	-18,0	488,4
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	-0,1	2,83
0,0	-0,1	1,51
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	-88,6	2402

**Kommentarer:**

Gule felt fylles ut, grønne beregnes.

Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.

Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovnstørt tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørr tilslag. Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0. I så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.

Alle delmaterialer bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.

Merk at for pozzolaner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våtbasis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

# VEDLEGG I RESEPT - AAL 50

## Proporsjonering av betong SKANSKA

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Aal 50
Tilskrevet kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	06.03.2018

Initialparametre	Verdi
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,35
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Norcem Std. FA	0,0 %	78,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	0,8 %	0,1 %
Aalborg rapid	100,0 %	95,0 %	0,0 %	0,0 %	3160	0,6 %	0,0 %
Cemexx CEM III/B	0,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2980	1,4 %	0,1 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	10,0 %	1,0	2200	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	50,0 %	1,0	2300	1,0 %
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff	[kg/m <sup>3</sup> ] TS	Alkalier	Klorider
SP Dynamon sx23	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %
L-stoff	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Oppnådd matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Klinkerandel i bindemiddel	38,0 %
Total FA- andel av bindemiddel	50,0 %
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	270,0
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	127,3
v/p	0,28
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	364
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	364

Beregn

**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Rødt bakgrunn i cellen for oppnådd matrivolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matrivolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.

Kommentarer:

Proportjoner av betong		SKANSKA	
Prosjekt	Masterprosjekt		
Reseptnummer	Resept Aal 50		
Tilslaget kvalitet	B35 M90		
Utført av	Anders R E		
Dato	06.03.2018		
Masseforhold	0,35		
Matriksvolum (l/m <sup>3</sup> )	300		
Volum sementlim (l/m <sup>3</sup> )	270		
Tilslaget luftinnhold (%)	2,0		
Effektivt bindemiddel (kg/m <sup>3</sup> )	364		

Nulstillt volumkorleksjon: Citrl+K

"Oppnådd" lik "Ønsket": Citl+H

Materialer	Proporsjonert betong		Ønsket		Oppnådd		Egenskap	Fersk betong		Volumkorleksjon		
	kg	kg/m <sup>3</sup>	kg	kg	kg	kg		Ønsket volum (l)	Korr. volum (l)	Korr. luft	Korr. dens	Korrigert
Norcem Std. FA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		35,0	0,0	0,0	0,0	
Aalborg rapid	145,5	0,0	5,1	5,1	5,1	5,1	Innveid volum (l)	35,0	2,0	-7,1	140,4	
Cemexx CEM III / B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Målt luftinnhold (%)	0,6	0,0	0,0	0,0	
Elkem Microsilica	36,4	0,0	1,3	1,3	1,3	1,3	Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	2425	0,5	-1,8	35,1	
Normineral flyveaske	181,9	0,0	6,4	6,4	6,4	6,4	Effektivt v/(c+Σkp)	0,350	2,5	-8,9	175,5	
Fritt vann	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			1,8	-6,2	122,8	
Absorbent vann	127,3	0,0	4,5	4,5	4,5	4,5			0,2	-0,8	15,1	
Årdal 0/8 mm	1120,7	39,2	39,2	39,2	39,2	39,2			15,5	-55,0	1081,2	
Årdal 8/16mm	885,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			12,2	-43,4	853,7	
Merestad 16/22 mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Aggressiver		0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Kloridinnhold [% av b]	0,16 %	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ]	2,84	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Andel reakt. bergarter [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	
SP Dynamon sx23	5,46	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19			0,1	-0,3	5,26	
L-stoff	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2514	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			34,8	-123,6	2425	



**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.  
 Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovenstående tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørr tilslag. Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0. I så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.  
 Alle delmaterialer bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.  
 Merk at for pozzolaner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våtbasis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

# VEDLEGG J RESEPT - AAL 60

## Proporsjonering av betong SKANSKA

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Aal 60
Tilsluttet kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	06.03.2018

Initialparametre	Verdi
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,34
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Norcem Std. FA	0,0 %	78,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	0,8 %	0,1 %
Aalborg rapid	100,0 %	95,0 %	0,0 %	0,0 %	3160	0,6 %	0,0 %
Cemex CEM III /B	0,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2980	1,4 %	0,1 %

Tilsetningsmateriale	Type	Andel (av b)	k	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	10,0 %	1,0	2200	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	60,0 %	1,0	2300	1,0 %
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff	[kg/m <sup>3</sup> ] TS	Alkalier	Klorider
SP Dynamon sx23	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Oppnådd matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Klinkerandel i bindemiddel	28,5 %
Total FA- andel av bindemiddel	60,0 %
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	270,0
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	123,4
v/p	0,28
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	363
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	363

Beregn

**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Rødt bakgrunn i cellen for oppnådd matrivolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matrivolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.

Proporsjonering av betong

SKANSKA

0.2015-09-21.53

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Aal 60
Tilslaget kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	06.03.2018

Masseforhold	0,34
Matriksvolum (l/m <sup>3</sup> )	300
Volum sementlim (l/m <sup>3</sup> )	270
Tilslaget luftinnhold (%)	2,0
Effektivt bindemiddel (kg/m <sup>3</sup> )	363

Kommentarer:

"Oppnådd" lik "Ønsket"; C1H+N

Nulstillt volumkorreksjon; C1H+K

Proporsjonert betong

Materialer	kg	kg/m <sup>3</sup>
Norcem Std. FA	0,0	0,0
Aalborg rapid	108,9	108,9
Cemex CEM III /B	0,0	0,0
Elkem Microsilica	36,3	36,3
Normineral flyveaske	217,7	217,7
Fritt vann	0,0	0,0
Absorbent vann	123,4	123,4
Årdal 0/8 mm	15,6	15,6
	1120,7	
Årdal 8/16mm	0,0	0,0
Merestad 16/22 mm	885,0	885,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
SP Dynamon sX23	5,44	5,44
0,0	0,00	0,00
	0,00	0,00
	0,00	0,00
	0,0	0,0
	0,0	0,0
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2509	2509

volum ok

Fersk betong

Egenskap	Ønsket volum (l)	Oppnådd
Ønsket volum (l)	35,0	35,0
Innveid volum (l)	35,0	35,0
Målt luftinnhold (%)	1,2	1,2
Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	2415	2415
Effektivt v/(c+Σkp)	0,340	0,340

Aggressiver	Kloridinnhold [% av b]	Ønsket
Kloridinnhold [% av b]	0,19 %	0,19 %
Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ]	2,98	2,98
Andel reakt. bergarter [%]	0,0	0,0



Volumkorreksjon

korr.luft	korr.dens	Korrigert
0,0	0,0	0,0
0,9	-4,9	104,8
0,0	0,0	0,0
0,3	-1,6	34,9
1,7	-9,9	209,6
0,0	0,0	0,0
1,0	-5,6	118,8
0,1	-0,7	15,0
8,9	-50,8	1078,8
0,0	0,0	0,0
7,0	-40,1	851,9
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	-0,2	5,24
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
19,9	-113,9	2415

Kommentarer:

Gule felt fylles ut, grønne beregnes.

Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.

Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovnstørt tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørt tilslag. Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0. I så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.

Alle delmaterialer bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.

Merk at for pozzolaner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våtbasis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

# VEDLEGG K RESEPT - AAL 70

Proporsjonering av betong		SKANSKA									
Prosjekt	Masterprosjekt										
Reseptnummer	Resept Aal 70										
Tilsluttet kvalitet	B35 M90										
Utført av	Anders R E										
Dato	19.03.2018										
Initialparametre	Verdi										
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,35										
Luftinnhold	2,0 %										
Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider				
Norcem Std. FA	0,0 %	78,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	0,8 %	0,1 %				
Aalborg rapid	100,0 %	95,0 %	0,0 %	0,0 %	3160	0,6 %	0,0 %				
Cemex CEM III /B	0,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2980	1,4 %	0,1 %				
Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider					
Elkem Microsilica	Silika	10,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %					
Normineral flyveaske	FA	70,0 %	1,0	2300	1,0 %	0,3 %					
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %					
Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff	[kg/m <sup>3</sup> ] TS	Alkalier	Klorider					
SP Dynamon sx23	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %					
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %					
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %					
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %					
Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]									
	0,0 %	7800									
	0,0 %	1050									
Matriks	Verdi										
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300										
Oppnådd matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300										
Klinkerandel i bindemiddel	19,0 %										
Total FA- andel av bindemiddel	70,0 %										
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %										
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	270,0										
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	123,4										
v/p	0,28										
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	353										
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	353										
Beregn											
<b>Kommentarer:</b> Gule felt fylles ut, grønne beregnes. Rødt bakgrunn i cellen for oppnådd matrivolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matrivolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.											



### Proporsjonering av betong

### SKANSKA

Kommentarer:

0.2015-09.2133

<b>Prosjekt</b>	Masterprosjekt
<b>Reseptnummer</b>	Resept Aal 70
<b>Tilslaget kvalitet</b>	B35 M90
<b>Utført av</b>	Anders R E
<b>Dato</b>	19.03.2018

<b>Masseforhold</b>	0,35
<b>Matriksvolum (l/m<sup>3</sup>)</b>	300
<b>Volum sementlim (l/m<sup>3</sup>)</b>	270
<b>Tilslaget luftinnhold (%)</b>	2,0
<b>Effektivt bindemiddel (kg/m<sup>3</sup>)</b>	353

"Oppnådd" lik "Ønsket": C1tt+H

Nulstillt volumkorreksjon: C1tt+K

### Proporsjonert betong

Materialer	kg	kg/m <sup>3</sup>
Norcem Std. FA	0,0	0,0
Aalborg rapid	70,5	70,5
Cemex CEM III /B	0,0	0,0
Elkem Microsilica	35,3	35,3
Normineral flyveaske	246,8	246,8
Fritt vann	0,0	0,0
Absorbent vann	123,4	123,4
Årdal 0/8 mm	15,6	15,6
	1120,7	
Årdal 8/16mm	0,0	0,0
Årdal 8/16mm	885,0	885,0
Merestad 16/22 mm	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
SP Dynamon sX23	5,29	5,29
0,0	0,00	0,00
	0,00	0,00
	0,00	0,00
	0,0	0,0
	0,0	0,0
<b>Prop. betongdens. (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2498</b>	<b>2498</b>

volum ok

### Fersk betong

Egenskap	Ønsket volum (l)	Oppnådd
Ønsket volum (l)	35,0	35,0
Innveid volum (l)	35,0	35,0
Målt luftinnhold (%)	1,4	1,4
Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	2431	2431
Effektivt v/(c+Σkp)	0,350	0,350

### Aggressiver

Kloridinnhold [% av b]	0,22 %
Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ]	3,03
Andel reakt. bergarter [%]	0,0



### Volumkorreksjon

korrr.luft	korrr.dens	Korrigert
0,0	0,0	0,0
0,4	-2,3	68,6
0,0	0,0	0,0
0,2	-1,2	34,3
1,5	-8,1	240,1
0,0	0,0	0,0
0,7	-4,1	120,0
0,1	-0,5	15,2
6,7	-36,9	1090,5
0,0	0,0	0,0
5,3	-29,2	861,1
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	-0,2	5,14
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
14,9	-82,5	2431

### Kommentarer:

Gule felt fylles ut, grønne beregnes.

Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.

Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovenstående tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørr tilslag. Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0, i så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.

Alle delmaterier bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.

Merk at for pozzolaner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våtbasis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

# VEDLEGG L RESEPT - AAL 50A

## Proporsjonering av betong

SKANSKA

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Aal 50A
Tilskrevet kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	06.03.2018

Initialparametre	Verdi
$m = \sqrt{(c+\Sigma kp)}$	0,35
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Norcem Std. FA	0,0 %	78,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	0,8 %	0,1 %
Aalborg rapid	100,0 %	95,0 %	0,0 %	0,0 %	3160	0,6 %	0,0 %
Cemex CEM III /B	0,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2980	1,4 %	0,1 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	10,0 %	1,0	2200	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	50,0 %	1,0	2300	1,0 %
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff	[kg/m <sup>3</sup> ] TS	Alkalier	Klorider
SP Dynamon sx23	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %
X-seed	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	3,0 %	1140	23,0 %	2146	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Oppnådd matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Klinkerandel i bindemiddel	38,0 %
Total FA- andel av bindemiddel	50,0 %
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	270,0
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	126,8
v/p	0,28
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	362
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	362

Beregn

**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Rødt bakgrunn i cellen for oppnådd matrivolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matrivolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.

## Proporsjonering av betong

## SKANSKA

0.2015-09-21.53

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Aal 50A
Tilsiktet kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	06.03.2018

Masseforhold	0,35
Matriksvolum (l/m <sup>3</sup> )	300
Volum sementlim (l/m <sup>3</sup> )	270
Tilsiktet luftinnhold (%)	2,0
Effektivt bindemiddel (kg/m <sup>3</sup> )	362

"Oppnådd" lik "Ønsket"; C1fr+N

Nullstill volumkorreksjon; C1fr+K

## Proporsjonert betong

Materialer	kg	kg/m <sup>3</sup>
Norcem Std. FA	0,0	0,0
Aalborg rapid	5,8	144,9
Cemex CEM III /B	0,0	0,0
Elkem Microsilica	1,4	36,2
Normineral flyveaske	7,2	181,1
Fritt vann	0,0	0,0
Absorbent vann	5,1	126,8
Årdal 0/8 mm	0,6	15,6
	44,8	1120,7
Årdal 8/16mm	0,0	0,0
Merefstad 16/22 mm	35,4	885,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,22	5,43
SP Dynamon sx23	0,00	0,00
X-seed	0,43	10,87
	0,00	0,00
	0,0	0,0
	0,0	0,0
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	0,0	2514

volum ok

## Fersk betong

Egenskap	Ønsket volum (l)	Oppnådd volum (l)
Ønsket volum (l)	40,0	40,0
Innveid volum (l)	40,0	40,0
Målt luftinnhold (%)	0,9	0,9
Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	2380	2380
Effektivt v/(c+Σkp)	0,350	0,350

## Aggressiver

Kloridinnhold [% av b]	0,16 %
Alkaler [kg/m <sup>3</sup> ]	2,82
Andel reakt. bergarter [%]	0,0



## Kommentarer:

## Kommentarer:

Gule felt fylles ut, grønne beregnes.

Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.

Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovennævnte tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørt tilslag . Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0. I så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.

Alle delmaterialer bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.

Merk at for pozzolaner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våt basis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

# VEDLEGG M RESEPT - AAL 60A

## Proporsjonering av betong

SKANSKA

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Aal 60A
Tilskrevet kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	17.04.2018

Initialparametre	Verdi
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,34
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Norcem Std. FA	0,0 %	78,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	0,8 %	0,1 %
Aalborg rapid	100,0 %	95,0 %	0,0 %	0,0 %	3160	0,6 %	0,0 %
Cemex CEM III /B	0,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2980	1,4 %	0,1 %

Tilsetningsmateriale	Type	Andel (av b)	k	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	10,0 %	1,0	2200	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	60,0 %	1,0	2300	1,0 %
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff	[kg/m <sup>3</sup> ] TS	Alkalier	Klorider
SP Dynamon sx23	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %
X-seed	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	3,3 %	1140	23,0 %	2146	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Oppnådd matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	300
Klinkerandel i bindemiddel	28,5 %
Total FA- andel av bindemiddel	60,0 %
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	270,0
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	122,8
v/p	0,28
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	361
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	361

Beregn

**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Rødt bakgrunn i cellen for oppnådd matrivolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matrivolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.

**Proporsjonering av betong**

0.2015-09-21.53

**SKANSKA**

Prosjekt	Masterprosjekt
Reseptnummer	Resept Aal 60A
Tilslaget kvalitet	B35 M90
Utført av	Anders R E
Dato	17.04.2018

Masseforhold	0,34
Matriksvolum (l/m³)	300
Volum sementlim (l/m³)	270
Tilslaget luftinnhold (%)	2,0
Effektivt bindemiddel (kg/m³)	361

"Oppnådd" lik "Ønsket"; "CitH+N"

Nulstillt volumkorleksjon; CitH+K

**Proporsjonert betong**

Materiater	kg	kg/m³
Norcem Std. FA	0,0	0,0
Aalborg rapid	108,3	108,3
Cemex CEM III /B	0,0	0,0
Elkem Microsilica	36,1	36,1
Normineral flyveaske	216,7	216,7
Fritt vann	0,0	0,0
Absorbent vann	122,8	122,8
Årdal 0/8 mm	15,6	15,6
	1120,7	1120,7
Årdal 8/16mm	0,0	0,0
Merestad 16/22 mm	885,0	885,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
	0,0	0,0
SP Dynamon sX23	5,42	5,42
0,0	0,00	0,00
X-seed	11,92	11,92
	0,00	0,00
	0,0	0,0
	0,0	0,0
Prop. betongdens. (kg/m³)	2509	2509

volum ok

Ønsket	kg	Oppnådd	kg
	0,0	0,0	0,0
	3,8	3,8	3,8
	0,0	0,0	0,0
	1,3	1,3	1,3
	7,6	7,6	7,6
	0,0	0,0	0,0
	4,3	4,3	4,3
	0,5	0,5	0,5
	39,2	39,2	39,2
	0,0	0,0	0,0
	31,0	31,0	31,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,19	0,19	0,19
	0,00	0,00	0,00
	0,42	0,42	0,42
	0,00	0,00	0,00
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0

Egenskap	Fersk betong
Ønsket volum (l)	35,0
Innveid volum (l)	35,0
Målt luftinnhold (%)	0,7
Målt betongdensitet (kg/m³)	2430
Effektivt v/(c+Σkp)	0,340

Aggressiver	Fersk betong
Kloridinnhold [% av b]	0,19 %
Alkalier [kg/m³]	2,96
Andel reakt. bergarter [%]	0,0



Volumkorleksjon		
korr.luft	korr.dens	Korrigert
0,0	0,0	0,0
1,4	-4,8	104,9
0,0	0,0	0,0
0,5	-1,6	35,0
2,8	-9,6	209,8
0,0	0,0	0,0
1,6	-5,5	118,9
0,2	-0,7	15,1
14,4	-49,8	1085,3
0,0	0,0	0,0
11,4	-39,4	857,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,1	-0,2	5,25
0,0	0,0	0,00
0,2	-0,5	11,54
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
32,4	-112,2	2430

Kommentarer:

**Kommentarer:**

Gule felt fylles ut, grønne beregnes.

Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.

Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovenstående tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørr tilslag. Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0, i så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.

Alle delmateriale bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.

Merk at for pozzolaner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våtbasis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

# VEDLEGG N RESEPT - SLAGG 0,55

## Proporsjonering av betong

SKANSKA

Prosjekt	Master Jo og Anders
Reseptnummer	CEM III M90 - Slagg 0,55
Tilskrevet kvalitet	B35
Utført av	Jo og Anders, NTNU
Dato	12.03.2018

Initialparametre	Verdi
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,55
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Cemex CEM III /B	100,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2980	1,4 %	0,1 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	5,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,7	2200	1,0 %	0,3 %
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff	[kg/m <sup>3</sup> ] TS	Alkalier	Klorider
Mapei Dynamon SX-23	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	280
Oppnådd matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	280
Klinkerandel i bindemiddel	28,5 %
Total FA- andel av bindemiddel	0,0 %
Total slaggandel av bindemiddel	66,5 %
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	249,2
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	153,3
v/p	0,43
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	279
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	279

Beregn

**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Rødt bakgrunn i cellen for oppnådd matrivolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matrivolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.

**Proporsjonering av betong** **SKANSKA**

02015-09-21.65

<b>Prosjekt</b>	Master Jo og Anders	<b>Masseforhold</b>	0.55
<b>Reseptnummer</b>	CEM III M90 - Slagg 0,55	<b>Matriksvolum (l/m<sup>3</sup>)</b>	280
<b>Tilsliktet kvalitet</b>	B35	<b>Volum sementlim (l/m<sup>3</sup>)</b>	249
<b>Utført av</b>	Jo og Anders, NTNU	<b>Tilsliktet luftinnhold (%)</b>	2.0
<b>Dato</b>	12.03.2018	<b>Effektivt bindemiddel (kg/m<sup>3</sup>)</b>	279

"Øppnådd" lik "Ønsket"; Citr+H Nullstill volumkorreksjon; Citr+H

Materialer	kg/m <sup>3</sup>	Ønsket		Oppnådd		Fersk betong		Volumkorreksjon							
		kg	kg	kg	kg	Ønsket volum (l)	Innveid volum (l)	Målt luftinnhold (%)	Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	Effektivt v/(c+Σkp)	Aggressiver	Kloridinnhold [% av b]	Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ]	Andel reakt. bergarter [%]	
Cemex CEM III /B	264,8	13,2	13,2	0,0	0,0	50,0	50,0	1,4	2414	0,550					
Eikem Microsilica	13,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Normineral flyveaske	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Fritt vann	153,3	7,7	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Absorbent vann	15,1	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1081,0	54,1	54,1	0,0	0,0	0,08 %	0,08 %	3,80	0,0	0,0					
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Årdal 8/16mm	853,6	42,7	42,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Årdal 16/22 mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Måpeli Dynamon SX-23	4,18	0,21	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2383	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
	volum ok														



**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.  
 Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovenstående tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørr tilslag. Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0. I så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.  
 Alle delmaterialer bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.  
 Merk at for pozzoloner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørstoffinnhold og fukt på våt basis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

**Kommentarer:**

# VEDLEGG O RESEPT - SLAGG 0,55A

## Proporsjonering av betong

SKANSKA

Prosjekt	Master Jo og Anders
Reseptnummer	CEM III M90 - Slagg 0,55A
Tilsluttet kvalitet	B35
Utført av	Jo og Anders, NTNU
Dato	12.03.2018

Initialparametre	Verdi
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,55
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Cemeex CEM III/B	100,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2980	1,4 %	0,1 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	5,0 %	1,0	2200	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,7	2200	1,0 %
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff	[kg/m <sup>3</sup> ] TS	Alkalier	Klorider
Mapei Dynamon SX-23	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
X-seed	4,3 %	1140	23,0 %	2146	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	280
Oppnådd matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	280
Klinkerandel i bindemiddel	28,5 %
Total FA- andel av bindemiddel	0,0 %
Total slaggandel av bindemiddel	66,5 %
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	249,2
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	152,5
v/p	0,43
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	277
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	277

Beregn

**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Rødt bakgrunn i cellen for oppnådd matrivolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matrivolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.



Kommentarer:

Proporsjonering av betong **SKANSKA**

0.2015-09-21.53

<b>Prosjekt</b>	Master Jo og Anders	<b>Masseforhold</b>	0,55
<b>Reseptnummer</b>	CEM III M90 - Slagg 0,55A	<b>Matriksvolum (l/m³)</b>	280
<b>Tilslaget kvalitet</b>	B35	<b>Volum sementlim (l/m³)</b>	249
<b>Utført av</b>	Jo og Anders, NTNU	<b>Tilslaget luftinnhold (%)</b>	2,0
<b>Dato</b>	12.03.2018	<b>Effektivt bindemiddel (kg/m³)</b>	277

"Oppnådd" lik "Ønsket"; "CltH+N" "Nullstill volumkorreksjon; CltH+K

Materialer	Proporsjonert betong		Ønsket		Oppnådd		Fersk betong			Volumkorreksjon									
	kg	kg/m³	kg	kg	kg	kg	Egenskap	Ønsket volum (l)	Innveid volum (l)	Målt luftinnhold (%)	Målt betongdensitet (kg/m³)	Effektivt v/(c+Σkp)	Aggressiver	Kloridinnhold [% av b]	Alkalier [kg/m³]	Andel reakt. bergarter [%]	korrr.luft	korrr.dens	Korrigert
Cemex CEM III / B	0,0	263,4	9,2	9,2	0,0	0,0	Ønsket volum (l)	35,0	35,0	0,0	0,0	0,0	Aggressiver	0,08 %	3,79	0,0	4,1	1,0	268,6
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Innveid volum (l)	35,0	35,0	0,0	0,0	0,0	Kloridinnhold [% av b]	0,08 %	3,79	0,0	0,0	0,0	0,0
Elkem Microsilica	0,0	13,9	0,5	0,5	0,0	0,0	Målt luftinnhold (%)	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	Alkalier [kg/m³]	3,79	3,79	0,0	0,0	0,0	0,0
Normineral flyveaske	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Målt betongdensitet (kg/m³)	2430	2430	0,0	0,0	0,0	Andel reakt. bergarter [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fritt vann	0,0	152,5	5,3	5,3	0,0	0,0	Effektivt v/(c+Σkp)	0,550	0,550	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
Absorbert vann	0,0	15,1	0,5	0,5	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
Årdal 0/2 mm nat. vask.	0,0	1081,0	37,8	37,8	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
Årdal 0/8 mm nat. vask	0,0	853,6	29,9	29,9	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
Årdal 16/22 mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
Mapel Dynamon SX-23	4,16	4,16	0,15	0,15	0,00	0,00				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
X-seed	11,92	11,92	0,42	0,42	0,00	0,00				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	0,0	0,0
Prop. betongdens. (kg/m³)		2383															37,7	9,1	2430



**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.  
 Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovenstående tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørr tilslag. Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0, i så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.  
 Alle delmaterialer bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.  
 Merk at for pozzolaner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våtbasis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

# VEDLEGG P RESEPT - SLAGG 0,45

## Proporsjonering av betong

SKANSKA

Prosjekt	Mlster Jo og Anders
Reseptnummer	CEM III M45 - Slagg 0,45
Tilskrevet kvalitet	B35
Utført av	Jo og Anders, NTNU
Dato	24.04.2018

Initialparametre	Verdi
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,45
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalier	Klorider
Cemeex CEM III/B	100,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2980	1,4 %	0,1 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	5,0 %	2,0	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,7	1,0 %	0,3 %
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	1,0 %	0,3 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tørrestoff	[kg/m <sup>3</sup> ] TS	Alkalier	Klorider
Mapei Dynamon SX-23	1,5 %	1050	23,0 %	1261	2,0 %	0,1 %
Viscostar	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
Luftinnførende TSS	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
X-seed	0,0 %	1140	23,0 %	2146	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	280
Oppnådd matrivolum [l/m <sup>3</sup> ]	280
Klinkerandel i bindemiddel	28,5 %
Total FA- andel av bindemiddel	0,0 %
Total slaggandel av bindemiddel	66,5 %
Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]	249,2
Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]	144,2
v/p	0,37
Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	320
Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]	305

Beregn

**Kommentarer:**  
 Gule felt fylles ut, grønne beregnes.  
 Rødt bakgrunn i celler for oppnådd matrivolum indikerer at beregningsmakroen ikke er kjørt, og at det derfor ikke er samsvar mellom ønsket og oppnådd matrivolum. Dette vil også gi blanke felt i reseptsjemaet.

Kommentarer:

## Proporsjonering av betong

02015-09-2133

## SKANSKA

<b>Prosjekt</b>	Master Jo og Anders
<b>Reseptnummer</b>	CEM III M45 - Slagg 0,45
<b>Tilslaget kvalitet</b>	B35
<b>Utført av</b>	Jo og Anders, NTNU
<b>Dato</b>	24.04.2018

<b>Masseforhold</b>	0,45
<b>Matriksvolum (l/m<sup>3</sup>)</b>	280
<b>Volum sementlim (l/m<sup>3</sup>)</b>	249
<b>Tilslaget luftinnhold (%)</b>	2,0
<b>Effektivt bindemiddel (kg/m<sup>3</sup>)</b>	320

"Oppnådd" lik "Ønsket", CitH+N

Nullstill volumkorreksjon, CitH+K

## Proporsjonert betong

Materialer	kg/m <sup>3</sup>	Ønsket kg	Oppnådd kg
Cemex CEM III / B	289,9	13,0	13,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
Elkem Microsilica	15,3	0,7	0,7
Normineral flyveaske	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
Fritt vann	144,2	6,5	6,5
Absorbert vann	15,1	0,7	0,7
Årdal 0/2 mm nat. vask.	1081,0	48,6	48,6
	0,0	0,0	0,0
Årdal 8/16mm	853,6	38,4	38,4
Årdal 16/22 mm	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
Mapel Dynamon SX-23	4,58	0,21	0,21
Viscostar	0,00	0,00	0,00
Luftinnførnde TSS	0,00	0,00	0,00
X-seed	0,00	0,00	0,00
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> )	2400	0,0	0,0

volum ok

## Fersk betong

Egenskap	Ønsket volum (l)	Oppnådd volum (l)
Ønsket volum (l)	45,0	45,0
Innveid volum (l)	45,0	45,0
Målt luftinnhold (%)	0,7	0,7
Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	2393	2393
Effektivt v/(c+Σkp)	0,450	0,450

## Aggressiver

Aggressiv	Andel reakt. bergarter [%]	Kloridinnhold [% av b]	Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ]
	0,0	0,08 %	4,17
	0,0	0,0	0,0



## Volumkorreksjon

korr. luft	korr. dens	Korrigert
3,7	-4,6	289,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,2	-0,2	15,2
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
1,9	-2,3	143,8
0,2	-0,2	15,0
13,9	-17,1	1077,8
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
11,0	-13,5	851,1
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
0,1	-0,1	4,56
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
0,0	0,0	0,00
30,8	-38,1	2393

## Kommentarer:

Gule felt fylles ut, grønne beregnes.

Matriksvolumet inkluderer tilslagspartikler mindre en 0,125 mm.

Når fukt i tilslaget er bestemt på basis av ovenstående tilslag skal absorbert fukt angis med målt verdi. Tilhørende densitet skal da også være basert på tørt tilslag . Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis settes absorbert fukt lik 0, i så fall skal densitetene også angis som SSD-densitet.

Alle delmaterialer bortsett fra vann og TSS angis i tørr vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i TSS med i den fri vannmengden. Dette gjelder også korrigert resept. Dersom innveid mengde TSS avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann i korrigert resept automatisk.

Merk at for pozzolaner, fillere og tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våtbasis, for tilslag på tørr basis. Fiber regnes ikke med i matriksvolumet.

Calibration of E(θ) and H(θ)

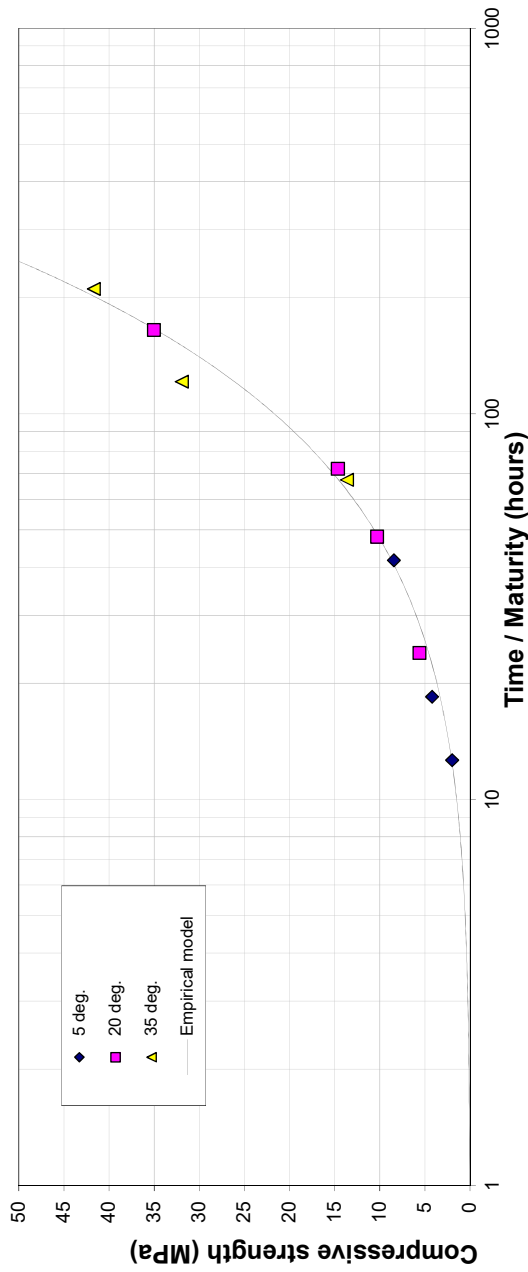
Project:	Eksempel
Forsøksid.:	Slagg 0.55
Date:	15.03.2018
Resp.:	

<b>Constants</b>	
A	46000
B	1200

Calibrate: ctrl+t

<b>Sum of squared dev.</b>	
5 deg.	0.8
20 deg.	2.1
35 deg.	1109.8

<b>Empirical function</b>	
Q	17644,1
τ	44789638,4
α	0,1



$$H(T) = e^{\frac{E(T)}{R} \left( \frac{1}{273} - \frac{1}{293-T} \right)}$$

$$E(T) = A + B(20 - T), T < 20^{\circ}\text{C}$$

$$E(T) = A, T > 20^{\circ}\text{C}$$

$$M = \sum H(T) \cdot \Delta t$$

$$f(M) = f_{\infty} \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}}$$

# Adiabatic temperature and isothermic heat

(v.2.8 av. 06-02-2012)

SKANSKA

Concrete parameters	
$T_{amb}$	0.0177
Density	2380.3
$H_{ref}$	0.99
Heat capacity (hardened)	0.99
$C_{ref}$	362
Set time	9
$C_{ref}$	37000
B - set time	1000
$C_{ref}$	37000
B - hydration	1000
Adia. start temperature	20

Temp. trans. coeff.	
$\alpha$	0
$m >$	400
$m <$	500

Heat function	
m-limit	500
$C_{ref}$	197
$\tau$	17.13
$R^2$	0.9825
$Z_{30}$	15356

Heat polygon	
Reference heat	Corresp. maturity
[kJ/kg cem]	[h]
0	0.0
15	7.6
30	30
45	122
60	133
75	164
90	219
105	260
120	414
135	574
150	748
160	894
165	98
170	110.3
175	126.4
180	153.5
184	194.6
185	200
186	353.7
187	402.3

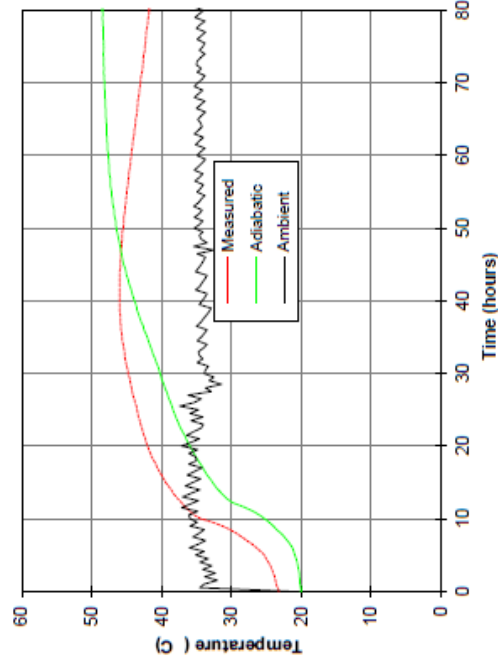
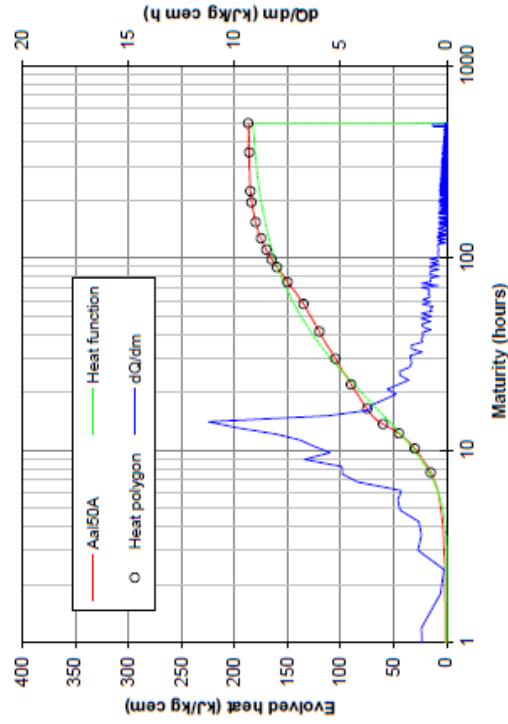


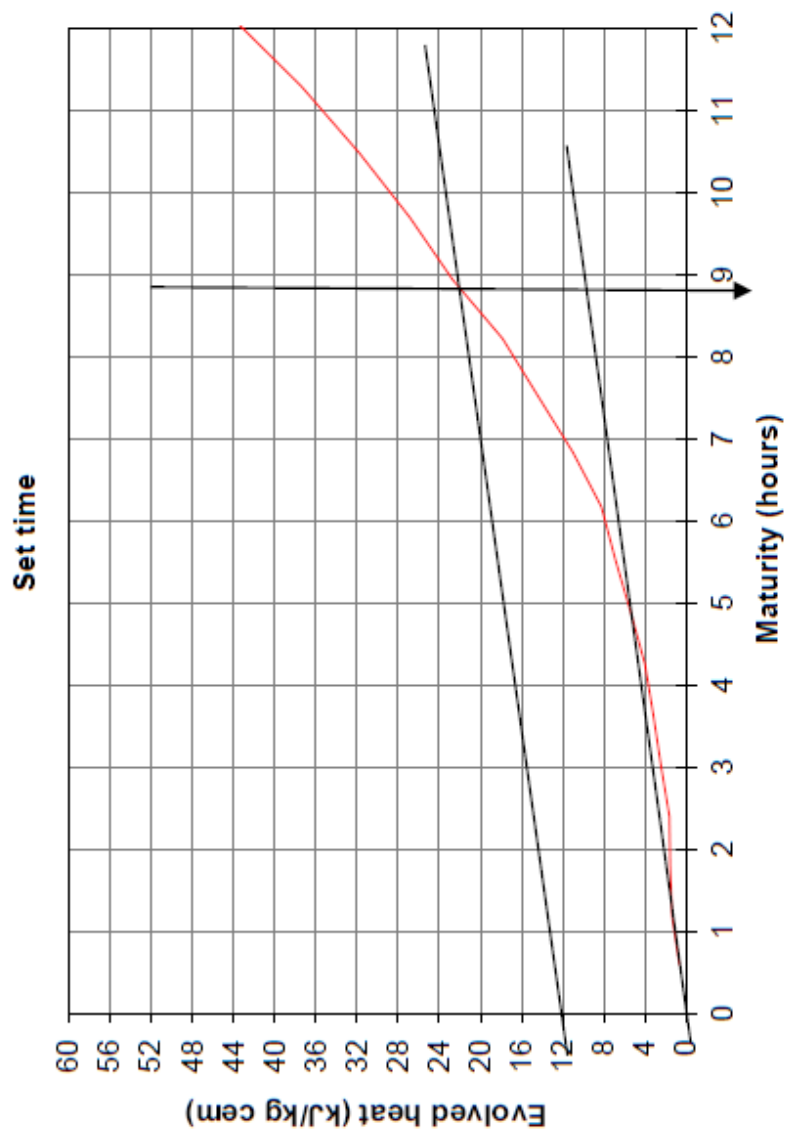
$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{\left(-\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}}$$

Project	
Name	A-50A
Lead	A-50A
Perf. by	Andreas Rasmussen Egeen
Date	05-05-2018

Time [h]	Concrete temperature [C]	Ambient temperature [C]	Maturity [h]	Acc. heat pr. cem. [kJ/kg cem]	Adiabatic temperature [C]	Adiabatic temperature [C]
0.0	23.2	21.8	0	0.0	0.0	20.0
0.5	23.4	34.5	0.6	0.7	0.6	20.1

(Flere temperaturer legges inn)





Modeller

### Konvertering av egenskapsfunksjoner

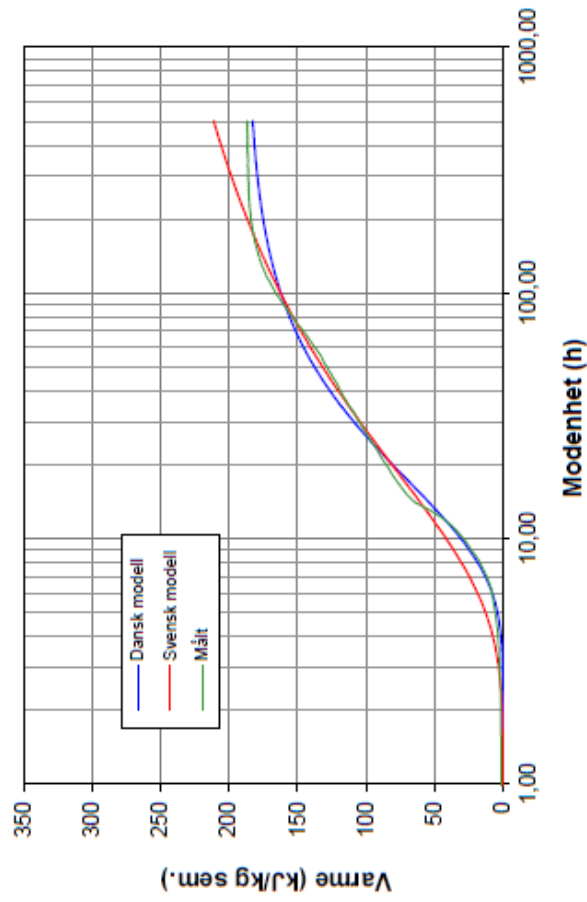
Dansk modell	
$Q_{\infty}$	187
$\tau$	17,13
$\alpha$	1,10

$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{\left(-\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}}$$

Svensk modell	
$W_c$	360
$\lambda_1$	1,725
$t_1$	8,74
$\kappa_1$	0,84

$$Q = W_c \cdot e^{-\kappa_1 \left(-\lambda_1 \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{t_1}\right)\right)}$$

Kv.sumsav.	6027
------------	------

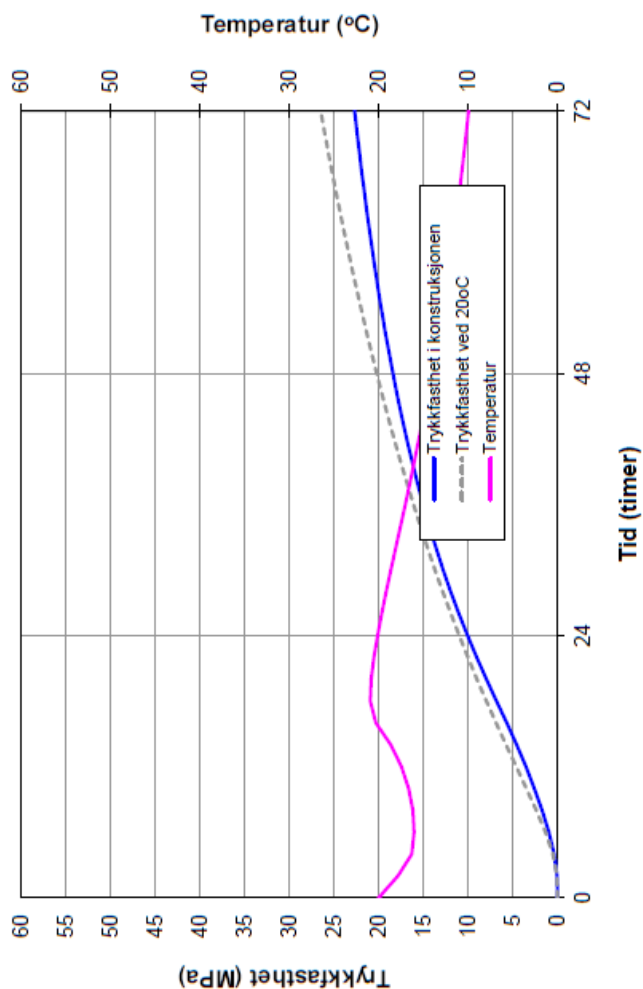


# VEDLEGG S FASTHET-TEMPERATUR, FIB1.XLMS

## Fasthet etter modenhetsprinsippet

© ss 2015-02-25

Tid [timer]	Betongtemperatur [°C]	Modenhet [timer]	Trykkfasthet i konstruksjonen [MPa]	Trykkfasthet ved 20°C [MPa]
0	20	0,0	0,0	0,1
2	17,83872	1,9	0,0	0,5
4	16,2885	3,6	0,4	1,3
6	16,03511	5,2	1,0	2,4
8	16,16835	6,8	1,7	3,5
10	16,64422	8,4	2,6	4,6
12	17,43912	10,1	3,5	5,7
14	18,6364	11,9	4,8	6,9
16	20,30957	13,8	5,7	7,9
18	20,91924	15,8	6,8	9,0
20	20,82548	18,0	7,9	10,0
22	20,50987	20,1	9,0	11,0
24	20,10101	22,1	10,1	11,9
26	19,63949	24,1	11,0	12,8
28	18,14272	26,0	11,9	13,7
30	18,62081	27,9	12,8	14,5
32	18,09064	29,7	13,6	15,3
34	17,54007	31,5	14,3	16,1
36	17,00799	33,2	15,0	16,8
38	16,48598	34,9	15,7	17,6
40	15,97515	36,5	16,3	18,3
42	15,47731	38,0	16,9	18,9
44	14,98359	39,5	17,4	19,8
46	14,52444	41,0	17,9	20,2
48	14,07013	42,4	18,4	20,8
50	13,63088	43,8	18,9	21,4
52	13,20754	45,1	19,3	21,7
53	13,00284	45,8	19,5	22,0
54	12,80283	46,4	19,7	22,3
55	12,60755	47,0	19,9	22,5
56	12,41695	47,6	20,1	22,8
57	12,23099	48,3	20,3	23,1
58	12,04981	48,9	20,5	23,3
59	11,87273	49,5	20,7	24,1
60	11,70028	50,0	20,8	24,8
61	11,53212	50,6	21,0	25,1
62	11,36822	51,2	21,2	25,6
63	11,20847	51,8	21,3	25,8
64	11,0528	52,3	21,5	26,0
65	10,90111	52,9	21,7	26,2
66	10,75333	53,4	21,8	26,5
67	10,60937	53,9	22,0	26,8
68	10,46915	54,5	22,1	27,0
69	10,33262	55,0	22,3	27,2
70	10,19977	55,5	22,4	27,5
71	10,07058	56,0	22,5	27,7
72	9,945012	56,5	22,7	28,0



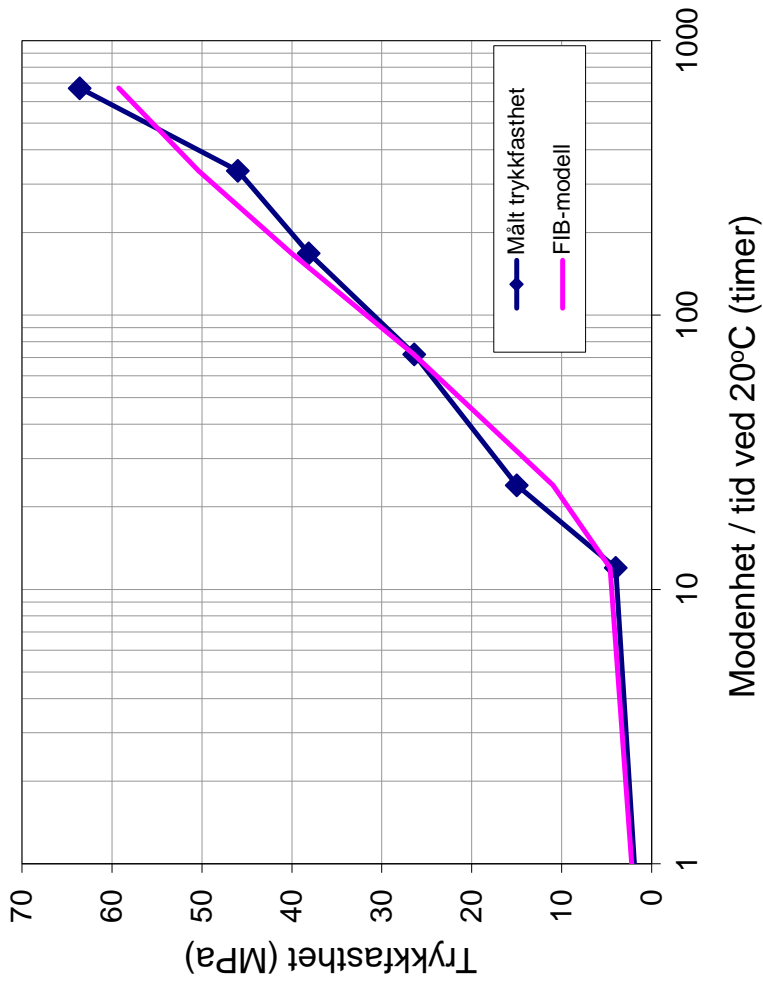


Tilpasning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	$\Delta y^{i+1}$
0,00	0	0	0,0	-	-
0,50	12	4,6	4,0	1	0,4
1,00	24	11,0	15,0	1	16,2
3,00	72	26,5	26,4	1	0,0
7,00	168	40,0	38,1	1	3,6
14,00	336	50,4	46,0	1	19,1
28,00	672	59,3	63,6	1	18,8

$f_{c28}$	59,3
s	0,39
$t_0$	0,10
$\Sigma \Delta y^2$	58
$R^2$	0,9877

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[ s \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



**Modenhhet**

$$M = \sum H(T) \cdot \Delta t$$

**Hastighetsfunksjonen**

$$H(T) = e^{\frac{E(T)}{R} \cdot \left( \frac{1}{273} - \frac{1}{293-T} \right)}$$

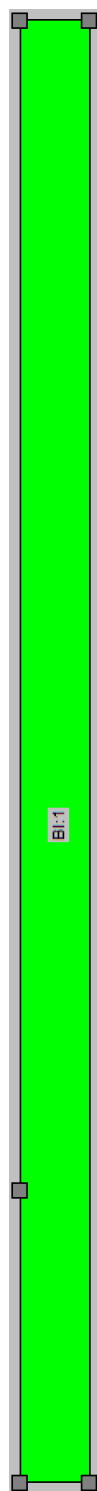
**Temperaturfølsomhet**

$$E(T) = A + B(20 - T), T < 20^{\circ}\text{C}$$

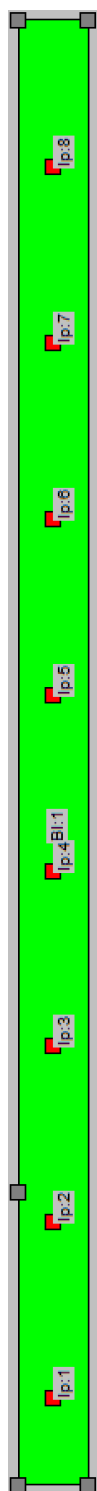
$$E(T) = A, T > 20^{\circ}\text{C}$$

A	37000
B	1000

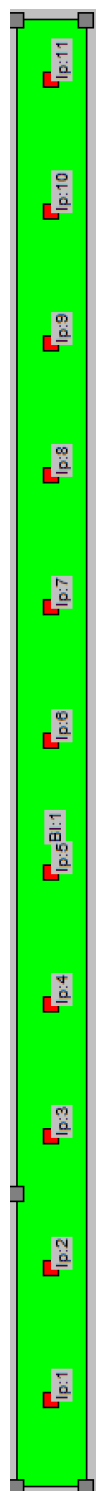
# VEDLEGG T CRACKTEST COIN DEKKEGEOMETRI



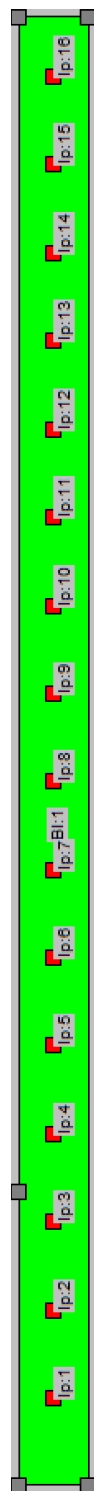
Uten varmekabler, Lengde 5000 mm, Høyde 240 mm



Varmekabler cc 60 cm á 30 w/m, Lengde 5000 mm, Høyde 240 mm



Varmekabler cc 60 cm á 30 w/m, Lengde 5000 mm, Høyde 240 mm



Varmekabler cc 30 cm á 30 w/m, Lengde 5000 mm, Høyde 240 mm

# VEDLEGG U CRACKTEST COIN

## BUNNPLATEGEOMETRI

