

Holdbarhed af beton med **FUTURECEM™**

- i henhold til DS/EN 206 DK NA:2020
og DS/INF 135:2015

Dato: 30/09/2020

Udarbejdet af: Camilla Hjørringgaard, Jacob Thrysøe, Sergio Ferreiro,
Lasse Frølich og Duncan Herfort

Indholdsfortegnelse

Introduktion	3
DS/EN 206 DK NA:2020 - Eksponeringsklasser	6
1.0 Karbonatisering	6
2.0 Kloridindtrængning	10
3.0 Frostbestandighed	12
4.0 Kemisk Påvirkning	15
DS/INF 135:2020 – Klassifikation og Mærkning	16
1.0 Alkaliindhold	16
Andre Egenskaber	18
1.0 Styrkeudvikling	18
2.0 E-modul	20
3.0 Varmeudvikling	21
4.0 Svind	22
5.0 Krybning	23
Appendix	25
1.0 Resultatoversigt – Analyser udført af Teknologisk Institut	25
2.0 Recepter og resultater af frost/tø analyser fra AB Sydsten	27
3.0 Yderligere bilag	28

Introduktion

Aalborg Portland lancerer ultimo 2020 en ny cement ved navn FutureCEM, som er af typen CEM II/B-M (Q-LL), hvor op til 35 % af klinkerne er erstattet af en blanding af kalkfiller og kalcineret ler. Selve teknologien bag FutureCEM er patenteret, og vil i fremtiden kunne udvides til også at omfatte cementtyperne CEM II/A-M (Q-L), CEM II/B-M (Q-L) og CEM II/A-M (Q-LL).

FutureCEM teknologien er udviklet med det formål at reducere CO₂-udledning. Ved en sammenligning med RAPID cement, CEM I, kan der opnås en reduktion på ca. 30% CO₂. Denne besparelse er opnået ved at erstatte en del af cementklinkerne med SCMer i form af kalkfiller og kalcineret ler. Erstatning af en stor andel klinker i en cement med et SCM, vil normalt resultere i en styrkereduktion. Dette er også tilfældet ved erstatning af cementklinker med kalkfiller og kalcineret ler hver for sig, men i FutureCEM teknologien drages der nytte af en synergieffekt, som muliggør 28 døgns styrker på niveau med almindeligt anvendte cementtyper i Danmark, som fx RAPID cement. Derfor er det muligt at anvende en cement med ca. 30% CO₂ reduktion og samtidigt opnå sammenlignelige 28 døgns styrker.

For at FutureCEM teknologien kan anvendes til fremstilling af beton i Danmark, så skal cementtyperne CEM II/A-M (Q-L), CEM II/B-M (Q-L), CEM II/A-M (Q-LL) og CEM II/B-M (Q-LL) godkendes til brug i DS/EN 206 DK NA:2020. En forudsætning for dette er dokumentation af holdbarhed af betoner baseret på FutureCEM.

Dokumentation af holdbarhed for betoner baseret på FutureCEM er udarbejdet iht. DS/EN 206 DK NA:2020 Annex N. Rapporten dækker således analyser af hhv. karbonatisering, kloridindtrængning, frostbestandighed, sulfatbestandighed, alkalikiselreaktioner, styrkeudvikling, E-modul, varmeudvikling, svind og krybning.

Ovenstående analyser er udført af Teknologisk Institut (TI) ved et testprogram på to CEM I reference-cementer i betoner med og uden flyveaske som sammenligningsgrundlag for analyser af beton med FutureCEM. Sammensætningen af den anvendte flyveaske fremgår af tabel 3 og sammensætningen af de benyttede cementer fremgår af tabel 1. Ud fra disse cementer er der fremstillet syv forskellige betonrecepter i miljøklasserne M, A og E, som fremgår af tabel 2. De valgte betonrecepter er sammensat til at have sammenligneligt pastavolumen og 28 døgns trykstyrker.

Resultaterne fremlagt i denne rapport er dokumentation af holdbarheden af beton fremstillet i Danmark med cementtypen CEM II/B-M (Q-LL) og i henhold til DS/EN 206 DK NA:2020. Det vurderes at dokumentationen også er dækkende for cementtyperne CEM II/A-M (Q-L), CEM II/B-M (Q-L) og CEM II/A-M (Q-LL).

Tabel 1: Sammensætningen af cementerne FutureCEM og CEM I referencecement

	Reference CEM I 52,5 N (MS) (LA) (Anvendt til M, A1, A2)	Reference CEM I 42,5 N SR5 (EA) (Anvendt til E)	FutureCEM CEM II/B-M (Q-LL) 52,5 N (HA)*
Bogue-sammensætning for klinker			
C ₃ S [%]	63	44	63
C ₂ S [%]	12	36	12
C ₃ A [%]	8	5	8
C ₄ AF [%]	12	12	12
Fysiske og kemiske egenskaber			
Kalcineret ler og kalkfiller [%]	-	-	21 - 35
Finhed [m ² /kg]	430	330	700
Begyndende afbinding [min]	110 - 170	100 - 160	130 -190
SO ₃ [%]	3,2	2,7	2,6
Cl ⁻ [%]	0,04	0,02	0,08
Na ₂ O ækv. syreopl.* <small>(*iht. DS/INF 135:2015)</small> [%]	0,6	0,4	0,9
Vandopløseligt Cr ⁶⁺ [mg/kg]	≤ 2	≤ 2	≤ 2

Tabel 2: Betonrecepter med FutureCEM og CEM I referencecement testet ved TI

	CEM I referencebeton				FutureCEM beton		
	M V/C 0,53	A1 V/C 0,43	A2 V/C 0,43	E V/C 0,38	V/C 0,46	V/C 0,41	V/C 0,38
Støbedato	03/Feb	24/Feb	02/Mar	26/Feb	11/Mar	16/Mar	18/Mar
Cement [kg/m ³]	276	327	422	351	376	427	445
Flyveaske [kg/m ³]	92	109	0	117	0	0	0
Sand 0/4 [kg/m ³]	727	717	717	717	727	717	717
Ansit 5/8 [kg/m ³]	247	237	237	237	247	237	237
Ansit 8/16 [kg/m ³]	757	737	737	737	757	737	737
Superplast [kg/m ³]	1,6	2,1	1,6	2,3	3,0	3,5	4,4
Luftindblanding [kg/m ³]	1,4	1,0	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0
Vand [kg/m ³]	168,1	161,4	179,0	152,7	171,1	171,3	164,7
Frit vand [kg/m ³]	170,7	164	181,5	155,6	174,5	175,1	169,1
Vand/Cement [-]	0,530	0,430	0,430	0,380	0,464	0,410	0,380
Vand/Pulver [-]	0,464	0,376	0,430	0,332	0,464	0,410	0,380

* For øvrige testresultater inkluderet i denne rapport vil recepten specificeres i det pågældende afsnit.

Tabel 3: Ydeevnedeklaration af flyveaske anvendt til beton med CEM I referencecementer

EmiFlyveaske anvendt i beton jf. tabel 2		
Egenskab		Ydeevne
Oprindelse		Emineral Nordjyllandsværket
Frit CaO		≤ 1,5 (1,5)
CaO		≤ 10,0 (11,0)
Reaktivt SiO ₂		≥ 25
Sum: SiO ₂ /Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃		≥ 70 (65)
MgO		≤ 4,0
SO ₃		≤ 3,0 (3,5)
Cl ⁻		< 0,02 (0,02)
Na ₂ O ækv. syreopl.		≤ 5,0 (5,5)
Opløseligt fosfat		≤ 100 (110)
Total fosfat		≤ 5
Begyndende afbinding		≤ 100% testcement x2
Finhed + 0,045 mm		< 40 (45) ± 10% (15)
Partikeldensitet		2300 ± 200 (225)
Glødetab		< 5,0 (7,0)
Volumenbestandighed		≤ 10 (10,0)
Farlige komponenter		Sikker iht. EC-No.: 931-322-8
Aktivitetsindex	28 døgn	≥ 75 (70)
	90 døgn	≥ 85 (80)

DS/EN 206 DK NA:2020 - Eksponeringsklasser

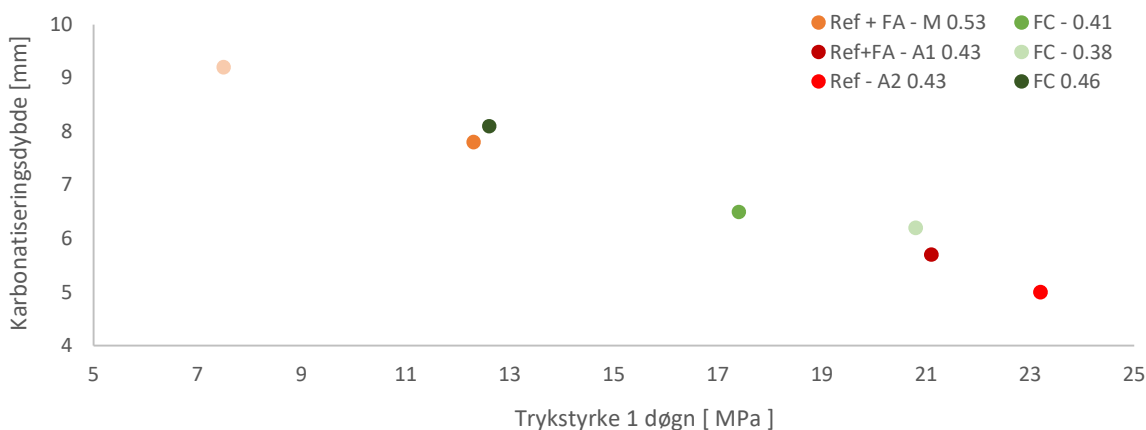
Cement af typen CEM II/A-M (Q-L), CEM II/B-M (Q-L), CEM II/A-M (Q-LL) og CEM II/B-M (Q-LL) indstilles til at blive optaget i eksponeringsklasserne X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, SX1, XS2, XF1, XF2, XF3, XF4, XA1 og XA2 i DS/EN 206 DK NA:2020 baseret på dokumentation af holdbarhed af betoner fremstillet med disse. Resultaterne omfatter derfor effekten af karbonatisering, klorider og frost/tø i henhold til DS/EN 206 DK NA:2020 Annex N. Yderligere er holdbarhed overfor sulfat og kemisk påvirkning også undersøgt.

1.0 Karbonatisering

Karbonatisering er bestemt efter DS/EN 12390-10. Her er prismer af beton med sammenlignelig trykstyrke udstøbt og lagret forsejlet i fire døgn ved 20°C inden eksponering i 3, 6 og 12 måneder som beskrevet i appendix¹, hvorefter karbonatiseringsdybden er bestemt ved anvendelse af en thymolphthalin opløsning.

Grundet den praktiske udførelse af forsøgene er alle prismer ikke blevet eksponeret under samme forhold, hvorfor de tidlige karbonatiseringsrater for de forskellige cementtyper ikke er sammenlignelige. Dette skyldes, at prøverne ikke, på dette tidlige stadie, havde opnået sammenlignelige styrker og porøsitet, som standarden foreskriver til at være 50% af referencestyrken. Dette understøttes af 2 døgn trykstyrker, som varierer mellem 22 til 33 MPa. Yderligere er prøverne for de forskellige cementtyper eksponeret forskelligt. CEM I referencebetoner er udstøbt i februar og tidligt i marts 2020 under våde og fugtige forhold, hvor FutureCEM beton er støbt midt i marts med en lavere relativ fugtighed.

Ovenstående faktorer vil alle påvirke den målte karbonatiseringsdybde af emnerne, og derved introducere en vis fejlkilde. Effekten af den tidlige styrke kan observeres på figur 1, hvor supplerende prismeprover anvendt til svindmåling, som er opbevaret i et klimaskab ved atmosfærisk CO₂ efter afformning, er testet. Her observeres en signifikant effekt af den tidlige styrke på den målte karbonatiseringsdybde. Dette illustrerer, at forskelle i målt karbonatiseringsdybde reelt blot er et udtryk for forskellige styrker på eksponeringstidspunktet.



Figur 1: Effekten af den tidlige trykstyrke på karbonatiseringsdybden for 5 måneders karbonatisering ved 20°C og 50% RH af prismer til svind.

¹ Appendix: FUTURECEM – Dokumentation af udvalgte betonegenskaber

For at tage højde for denne fejlkilde og lave en retvisende sammenligning mellem CEM I reference og FutureCEM betoner, er karbonatiseringsdybder efter 3 og 6 måneder anvendt til beregning af hastighedskoefficienter for at sikre en sammenlignelig modenhed, samt eksponeringsforhold for betonerne.

Resultaterne af denne sammenligning fremgår af figur 3 og tabel 4. Heraf fremgår, at CEM I referencen uden flyveaske har en lavere karbonatiseringshastighed end de resterende betoner. Denne tendens formodes at være forårsaget af puzzolanreaktionen i betoner med flyveaske og kalcineret ler, hvor betonens indhold af calciumhydroxid reduceres ved reaktion med SiO_2 , som leder til en lavere karbonatiseringsmodstand.

Som konsekvens af dette kan der også af figur 3 observeres en sammenlignelig tendens til karbonatisering ved ækvivalent v/c forhold mellem FutureCEM og CEM I referencebetoner indeholdende flyveaske. Den samme tendens fremgår af figur 4, hvor den estimerede karbonatiseringsdybde efter 50 år er afbilledet. Her kan den samme tendens til en sammenlignelig karbonatiseringsdybde observeres for FutureCEM og CEM I referencebeton med flyveaske. Af figur 4 fremgår det yderligere, at den estimerede karbonatiseringsdybde ved 50 år for alle de testede betoner er under dæklagskravet på 20 mm for eksponeringsklasserne XC1-4.

Trods den observerede tendens til højere karbonatiseringsmodstand for en CEM I reference uden flyveaske, så skal det dog bemærkes, at den nyeste forskning tyder på, at forskellen i karbonatisering mellem høj- og lav-calciumsystemer udlignes over tid¹. Dette bekræftes bl.a. ved en strukturanalyse udarbejdet af TI på prøver efter fem års fuldskalaeksponering af en væg ved gipslagerpladsen på Aalborg Portland, se figur 2. Væggen består i den ene ende af beton med FutureCEM og 8% flyveaske og i den anden ende af en CEM I referencebeton med 20% flyveaske. Prøver til analyse af karbonatisering er udført både på facaden vendt mod vej (sydvendt) og facaden vendt mod gips (nordvendt), som angivet i appendix². Resultaterne heraf fremgår af tabel 5, hvor det vurderes, at begge betoner udviser en lav grad af karbonatisering efter fem års naturlig eksponering på begge facader.

Det kan derfor, alt i alt, konkluderes, at beton baseret på FutureCEM har en sammenlignelig karbonatiseringsgrad som en CEM I referencebeton med flyveaske.



Figur 2: væg ved gipslagerpladsen på Aalborg Portland. Til venstre: reference. Til højre: FutureCEM

¹ Emne ved seneste Innovandi workshop 2020

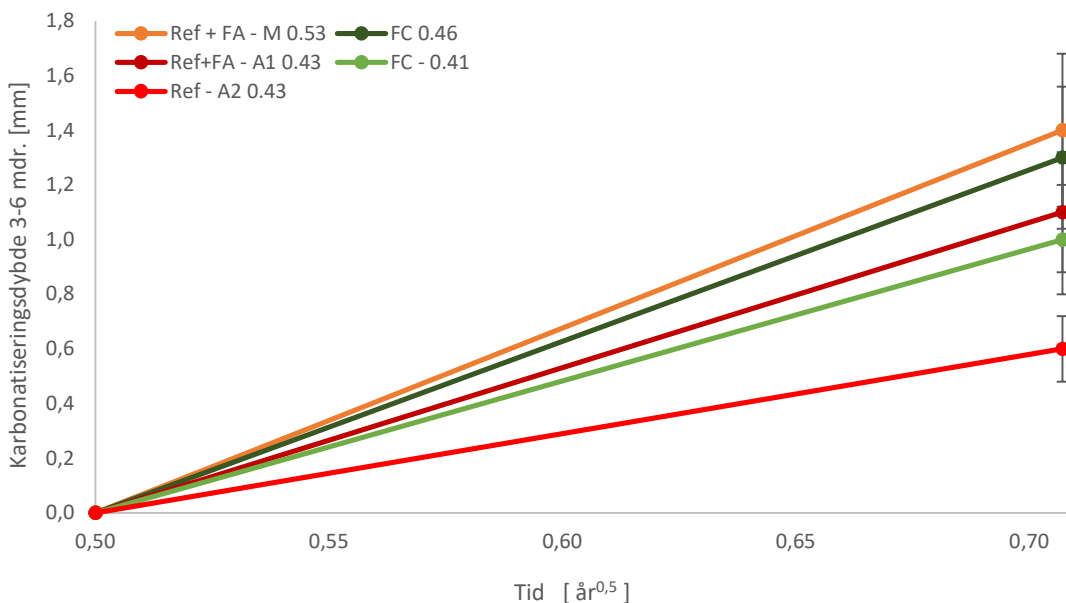
² Appendix: As built Documentation: Birth Certificate Document and 4 years follow up for SCM and Reference walls at Aalborg Portland og Appendix: FUTURECEM – Dokumentation af udvalgte betonegenskaber

Tabel 4: Karboniseringsresultater for betoner testet ved T1.

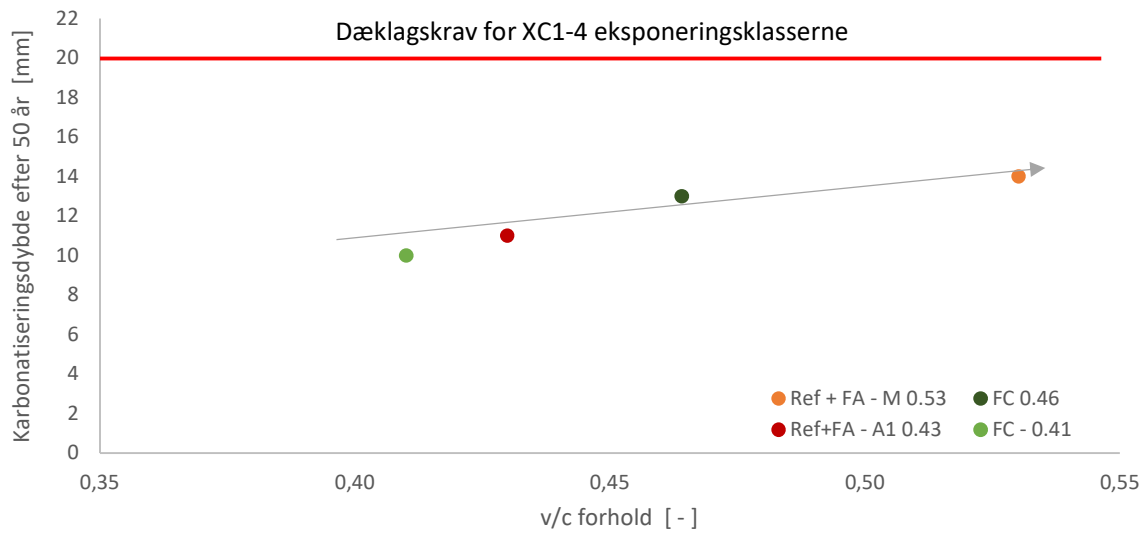
	CEM I Referencebeton			FutureCEM beton	
	M V/C 0,53	A1 V/C 0,43	A2 V/C 0,43	V/C 0,46	V/C 0,41
Karbonatisering, 3-6 mdr. [mm] EN 12390-10	1,4	1,1	0,6	1,3	1,0
Hastighedskoefficient [mm/år]	2,0	1,6	0,8	1,8	1,4
Karboniseringsdybde, 50 år [mm]	14	11	6	13	10
Dæklagskrav EN 1992 [mm]	20	30	30	20	30

Tabel 5: Karbonisering efter fem års fuldskalaeksponering af både FutureCEM og CEM I referencebeton.

Analyse		Målt ved pH omslag		Målt på tyndslib
Prøve		Mod vej	Mod gips	Mod gips
FutureCEM beton	FC 1	1-2 mm Max. 10 mm langs revner	-	0,8-1,5 mm
	FC 2	1 (2) mm Max. 7 mm langs revner	1 (2) mm	-
CEM I referencebeton		<1 mm	-	0,6-1,2 mm



Figur 3: Målte karboniseringsdybder ved sammenlignelig modenhet og eksponeringsforhold for betonerne testet ved T1. Den angivne fejlmargen repræsenterer to standardafvigelse i et 95% konfidensinterval jf. EN 12390-10.



Figur 4: Estimeret karbonatiseringsdybde efter 50 år for de testede betoner ved TI imod dæklagskravet for XC1-4 eksponeringsklasser.

2.0 Kloridindtrængning

Kloridmigrationskoefficienter er undersøgt ved TI efter NT Build 492 anvendt til test ved hhv. 28, 56, 90 og 180 døgn. I danske standarder er der ikke et krav til betonens modstand mod kloridindtrængning, men metodens ophavsmand, Tang Luping¹, har angivet følgende vejledende værdier for kloridmigrationskoefficienten D ved 28 døgn:

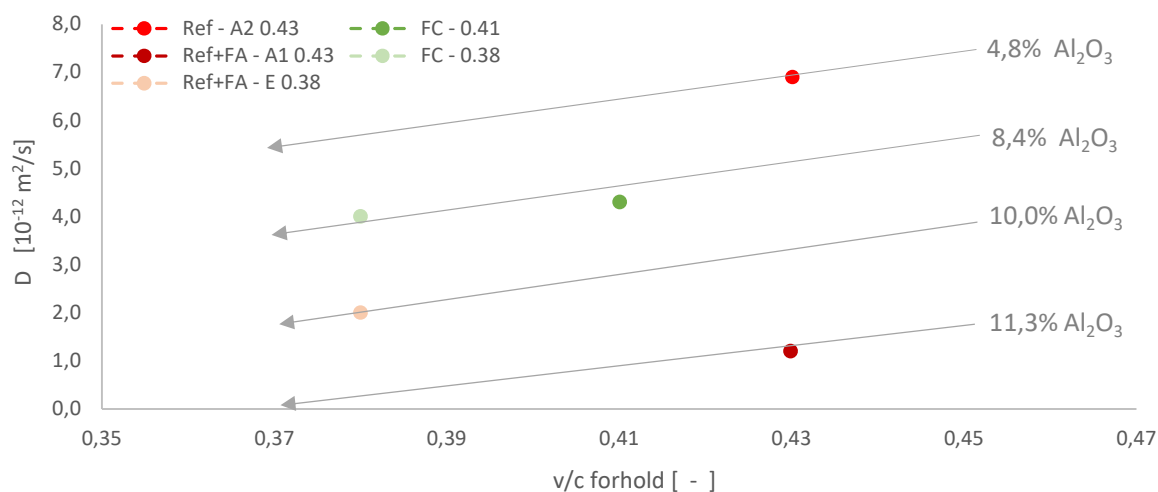
- $D < 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ meget god modstand mod kloridindtrængning
- $D < 8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ god modstand mod kloridindtrængning
- $D < 16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ moderat modstand mod kloridindtrængning
- $D < 20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ikke egent i aggressivt miljø

Da de to FutureCEM betoner har kloridmigrationskoefficienter ved 28 døgn på hhv. $8,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ og $6,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, kan disse betoner klassificeres som havende en god modstand mod kloridindtrængning. At fastlægge en betons modstand mod kloridindtrængning efter 28 døgn kan dog være behæftet med usikkerhed, idet kloridkoefficienten udvikler sig over tid, hvorfor værdien efter 180 døgn vurderes at være et mere korrekt mål for kloridmodstanden i betonens samlede levetid.

Resultater af kloridindtrængning efter 180 døgn fremgår derfor af figur 5, som også understøtter den ovenstående konklusion, da FutureCEM prøver har en lavere kloridmigrationskoefficient sammenlignet med en CEM I referenceprøve uden flyveaske. Beton med FutureCEM har derfor en større modstand mod kloridindtrængning sammenlignet med en referencebeton baseret på CEM I.

Øget modstand mod kloridindtrængning er forårsaget af de to uafhængige faktorer; porøsitet, som er afbilledet ved v/c forholdet, og bindingskapaciteten for kloridioner, som er afbilledet ved det totale aluminiumoxidindhold af cementen på figur 5. Det fremgår heraf, at betoner med et højere reaktivt aluminiumoxidindhold har en højere bindingskapacitet, og derfor resulterer i en lavere kloridmigrationskoefficient. Da FutureCEM indeholder kalcineret ler med et højt indhold af aluminiumoxid, vil beton med FutureCEM have en højere bindingskapacitet sammenlignet med en beton baseret på en CEM I cement. Samme tendens gør sig gældende for en CEM I reference med flyveaske, da flyveaske også har et højt indhold af aluminiumoxid.

¹ Resistance of concrete to chloride ingress – Testing and Modelling – Tang Luping, Lars-Olof Nilsson and P.A. Muhammed Basheer, 2012.



Figur 5: Kloridindtrængningskoefficienter efter 180 døgn for FutureCEM og CEM I referencer målt ved TI som funktion af v/c og aluminiumoxidindhold i cementen.

Ovenstående analyser er suppleret med en strukturanalyse udarbejdet af TI på prøver efter et halvt års fuldskalaeksponering af en væg ved gipslagerpladsen på Aalborg Portland. Væggen består i den ene ende af beton med FutureCEM samt 8% flyveaske og i den anden ende af en CEM I referencebeton med 20% flyveaske¹. Resultaterne heraf konkluderer, at begge betoner udviser en meget god modstand mod kloridindtrængning med kloridmigrationskoefficienter på $5,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ for CEM I referencebetonen med flyveaske og $3,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ for FutureCEM betonen.

Fuldskalaeksponering er yderligere foretaget på elementer i havvand ved Hirtshals havn, samt elementer placeret i midterrabbatten ved Hveens boulevard ved Taastrup. Her er anvendt en cement med sammenlignelig sammensætning som FutureCEM og en cement af typen CEM I 42,5 N – SR5 (EA) samt 13% flyveaske som reference². Ved disse eksponeringer er der observeret sammenlignelige niveauer af kloridindtrængning efter eksponering i to år og en generelt god modstand mod kloridindtrængning for begge typer beton.

Det kan derfor konkluderes, at beton med FutureCEM har en bedre modstand mod kloridindtrængning sammenlignet med en CEM I referencebeton. Resultaterne viser yderligere, at der vil være sammenlignelig performance med beton med flyveaskedosering midt i det tilladte interval iht. DS/EN 206 DK NA:2020.

¹ Appendix: As built Documentation: Birth Certificate Document and 4 years follow up for SCM and Reference walls at Aalborg Portland

² Appendix: FUTURECEM – Dokumentation af udvalgte betonegenskaber

3.0 Frostbestandighed

Krav til frostbestandighed undersøges efter SS 137244. Hertil dokumenteres overholdelse af krav til hhv. luftindhold i frisk og hærdnet beton, specifik overflade og afstandsfaktor, jf. DS/EN 206 DK NA:2020. Resultater er vist i Tabel 7.

Frostbestandighed kan iht. DS/EN 206 DK NA:2000 annek F for luftindblandet beton dokumenteres ved et luftindhold på min. 4,5 % i den friske beton samt en luftporeanalyse eller en frost/tø test. Luftporeanalysen foretages i den hærdnede beton iht. EN 480-11 og kravene er et luftindhold på min 3,5%, en specifik overflade på min. 25 mm⁻¹ samt en afstandsfaktor på maks. 0,20 mm. Frost/tø testen foretages iht. SS 137244 og kravet er, at karakteren ”god” opnås.

Tabel 6: Godkendte karakterer og krav jf. tabel DK NA-2 for frostprøvning iht. SS 137244

Frostbestandighed	Krav
Meget god	Afskalningernes middelværdi ved 56 (m_{56}) cykler er mindre end 0,10 kg/m ²
God	<p>Afskalningernes middelværdi ved 56 (m_{56}) cykler er mindre end 0,20 kg/m²</p> <p>Eller</p> <p>Afskalningernes middelværdi ved 56 (m_{56}) cykler er mindre end 0,50 kg/m² samtidigt med at m_{56}/m_{28} er mindre end 2</p> <p>Eller</p> <p>Afskalningernes middelværdi ved 112 (m_{112}) cykler er mindre end 1,00 kg/m²</p>

Frostbestandighed er undersøgt ved både TI og AB Sydsten, der begge er akkrediterede laboratorier i henhold til SS 137244. Cement- og betonsammensætning er listet i tabel 1 og 2 for emner testet ved TI. Emner testet hos TI er blandet og støbt af TI. For emner testet hos AB Sydsten fremgår betonrecepter af appendix¹. Disse emner er blandet og støbt ved Aalborg Portland og efterfølgende sendt til AB Sydsten efter 7 døgns vandlagring. Ved modtagelse er emnerne placeret i klimaskab ved 20°C og 65 % RF frem til 21 døgn, hvor forberedelse og sidenhen prøvning i fryse-og tø cyklus initieres.

Af de testede emner hos TI udviser FutureCEM betoner en større tendens til afskalning sammenlignet med referencebeton. Alle de testede FutureCEM betoner overholder dog kravene i DS/EN 206 DK NA:2020 annek F, herunder krav til frisk og hærdnet luftindhold, specifik overflade, afstandsfaktor og frostprøvning med karakteren God, se tabel 7. De testede FutureCEM betoner overholder derfor alle krav i relation til frostbestandighed og klassificeres som værende frostbestandige jf. DS/EN 206 DK NA, annek F.

¹ Appendix: Recepter og resultater af frost/tø analyser fra AB Sydsten

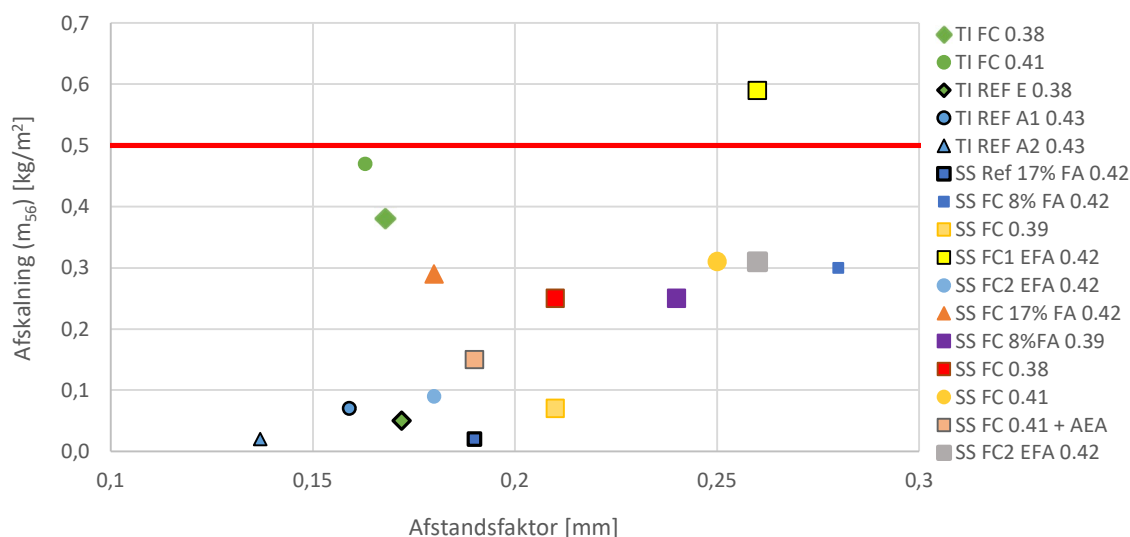
Tabel 7: Resultater af frostprøvning og luftporeanalyse på FutureCEM beton ved TI.

Prøve		v/c 0,41	v/c 0,38
Hærdnet beton, Luftindhold	[vol-%]	6,0	5,8
Hærdnet beton, Specifik overflade	[mm ⁻¹]	29	29
Hærdnet beton, Afstandsfaktor	[mm]	0,16	0,17
Frostprøvning 28 cykler (m ₂₈)	[kg/m ²]	0,28	0,21
Frostprøvning 56 cykler (m ₅₆)	[kg/m ²]	0,47	0,38
Frostprøvning m ₅₆ /m ₂₈	[-]	1,7	1,8

For emner testet ved AB Sydsten observeres en klar sammenhæng mellem graden af afskalning og emnets afstandsfaktor. Afstandsfaktoren er her målt på frisk beton. Som tommelfingerregel anvendes, at AVA måling på frisk beton giver et konservativt resultat sammenlignet med måling udført på hærdnet beton iht. EN 480-11. Afstandsfaktoren målt ved EN 480-11 på de tilgængelige prøver forventes derfor at kunne bestemmes til relativt lavere værdier end afbilledet.

Figur 6 viser en sammenhæng mellem lav afstandsfaktor og lav grad af afskalning efter 56 cykler for både reference og FutureCEM beton med og uden 8% flyveaske. Afstandsfaktoren synes at være den eneste faktor med indflydelse på frostbestandigheden af de undersøgte betoner, måleusikkerheden taget i betragtning.

Det konkluderes for de emner testet af AB Sydsten, at selvom de angivne afstandsfaktorværdier for FutureCEM beton er bestemt på frisk beton, som generelt resulterer i højere værdier, så udviser FutureCEM med og uden flyveaske en sammenlignelig opførsel under frostbestandighedstest som en referencebeton ved den samme afstandsfaktor.



Figur 6: Resultater af frostprøvning og luftporeanalyse for betoner testet af Teknologisk Insitut (TI) og AB Sydsten (SS). Betonrecepter fremgår af appendix.

Af figur 6 kan der yderligere observeres en varians af de målte afskalningsværdier afhængigt af det anvendte analyseinstitut, som alle er akkrediterede laboratorier. Denne varians er mere signifikant for FutureCEM beton sammenlignet med referencebetonerne. Denne observation stemmer overens med en artikel af Dr. Max J. Setzer og Rainer Auberg fra Essen Universitet¹ hvor reproducerbarheden af frostprøvning iht. SS 137244 for seks forskellige laboratorier undersøges. I artiklen konkluderes, at jo højere en middelværdi af afskalning, jo højere er standardafvigelsen. Dette gælder både mellem laboratorier, men også for reproducerbarheden i samme laboratorium. Der kan derfor opstå scenarier, hvor både en reference- eller en FutureCEM beton med værdier tæt på de specificerede kravværdier for karakteren God, vil bestå ved måling i ét akkrediteret laboratorium og fejle ved måling i et andet akkrediteret laboratorium, selvom standarden følges. Middelværdien af afskalning og det anvendte analyseinstitut vil derfor have en signifikant indflydelse på frostprøvningen, grundet usikkerheden forbundet med den anvendte analysemetode.

Baseret på ovenstående konkluderes, at beton med FutureCEM (både med og uden 8% flyveaske) kan produceres med tilfredsstillende frostbestandighed, så længe der tages højde for ovenfor nævnte forbehold.

¹ Setzer, M.J., Auberg, R.: Testing of Freeze Thaw and Deicing Salt Resistance, Second International Workshop on Concrete Block Paving, Oslo, 1994

4.0 Kemisk Påvirkning

Eksponeringsklasserne XA1, XA2 og XA3 omfatter brug af beton i miljøer med kemisk påvirkning fra sulfat, pH, ammonium, carbondioxid og magnesium. Høje koncentrationer for hovedparten af disse stoffer i grundvand og jord betragtes som værende særtilfælde i Danmark. Dog er specielt sulfat til stede i miljøer såsom havvand og visse jordtyper. Kendskab til sulfatbestandighed er derfor en vigtig parameter for at kunne anvende beton med FutureCEM bredt i Danmark.

I projektet Grøn Beton II blev der etableret en felteksponeringsplads i Hirtshals havn. Her er testet betoner baseret på hhv. cement af typen CEM I 42,5 N – SR5 (EA) samt 13% flyveaske som reference og en CEM II/B-M (Q-LL) cement med en sammensætning tilsvarende FutureCEM¹. Efter et år er der udført mikro- og makroanalyser på betonerne. Heraf konkluderes, at både CEM I referencebetonen og FutureCEM betonen udviser tendens til mikrorevner og dannelse af ettringit i porestrukturen, som dog er til stede i højere grad i betonen med FutureCEM. Betonen fremstår dog plan og intakt for begge prøver. Det kan derfor konkluderes, at beton med FutureCEM ikke klarer sig lige så godt som en beton med sulfatbestandig cement, men dog stadig fremstår plan og intakt efter et års eksponering af havvand.

De ovenstående analyser er suppleret med en strukturanalyse udarbejdet af TI på prøver efter fire års fuldskalaeksponering af en væg ved gipslagerpladsen på Aalborg Portland. Væggen består i den ene ende af beton med FutureCEM samt 8% flyveaske og i den anden ende af en CEM I referencebeton med 20% flyveaske². Resultaterne heraf konkluderer, at der ikke kan observeres nogen form for sulfatangreb efter fire år for både FutureCEM og CEM I referencebetonen trods eksponering for et sulfatholdigt miljø påvirket af gips med en opløselighed på 2000-2500 mg/L svarende til eksponeringsklasse XA2.

De observerede tendenser for fuldskalaeksponering understøttes i en artikel af R. Gettu et. al.³ som konkluderer, at et system med kalcineret ler, kalkfiller og Portland cement kun udviser negligerbar udvidelse efter 94 uger i et natriumsulfatholdigt miljø målt efter ASTM C1012. Samme tendens observeres i en artikel af S. Ferreira, D. Herfort et. al.⁴ hvor der konkluderes, at cementer af type CEM II/B-Q og CEM II/B-M (Q/L eller LL) med kalcineret ler og kalkfiller udviser en høj grad af sulfatbestandighed, så længe indholdet af kalcineret ler er proportionelt med indholdet af kalkfiller i cementkompositionen.

Den skadelige effekt af sulfat fremkommer, når der dannes store mængder gips eller ekspansiv ettringit. Ved den efterfølgende revnedannelse kan der frit opstå reaktion med Ca^{2+} og yderligere dannes gips i de pågældende revner. Netop denne reaktion med Ca^{2+} formodes at være reduceret i FutureCEM, da det kalcinerede ler indgår i puzzolanreaktion med portlandit og derved sænker koncentrationen af tilgængelige Ca^{2+} , som leder til en øget sulfatbestandighed sammenlignet med en CEM I reference med moderat sulfatbestandighed.

Det kan derfor konkluderes, at beton med FutureCEM ikke har samme performance som en sulfatbestandig cement, men at fuldskalaeksponering for havvand og et sulfatholdigt miljø i form af gips ikke leder til signifikant nedbrydning af betonen. Sulfatbestandighed af FutureCEM konkluderes derfor at være mindst sammenlignelig med en moderat sulfatbestandig CEM I reference.

¹ Appendix: Felteksponeringspladser, Grøn omstilling af cement- og betonproduktion, Teknisk Rapport 2019

² Appendix: As built Documentation: Birth Certificate Document and 4 years follow up for SCM and Reference walls at Aalborg Portland

³ R. Gettu et. al, 2018, "Recent research on limestone calcined clay cement (LC3) at IIT Madras"

⁴ S. Ferreira, D. Herfort et. al., 2019, Cement and Concrete Research, "Sulfate resistance of calcined clay – Limestone – Portland cements"

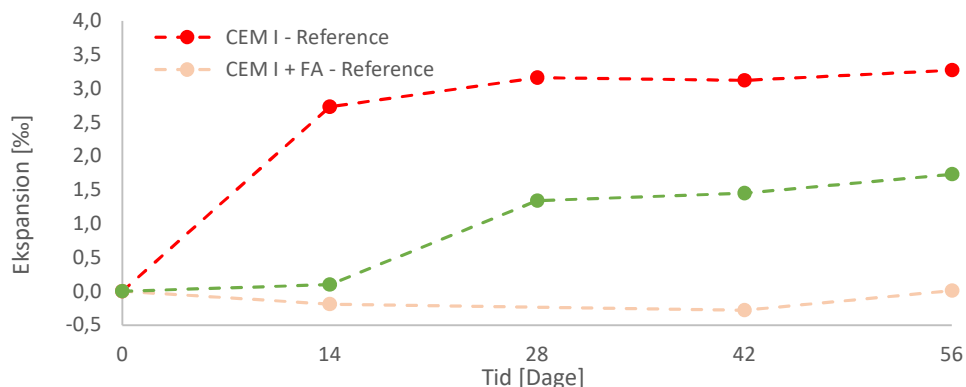
DS/INF 135:2020 – Klassifikation og Mærkning

Der ønskes en ændring i DS/INF 135 vedrørende måling af alkaliindhold for cementer af typerne CEM II/A-M (Q-L), CEM II/B-M (Q-L), CEM II/A-M (Q-LL) og CEM II/B-M (Q-LL). Baggrunden herfor beskrives i dette afsnit.

1.0 Alkaliindhold

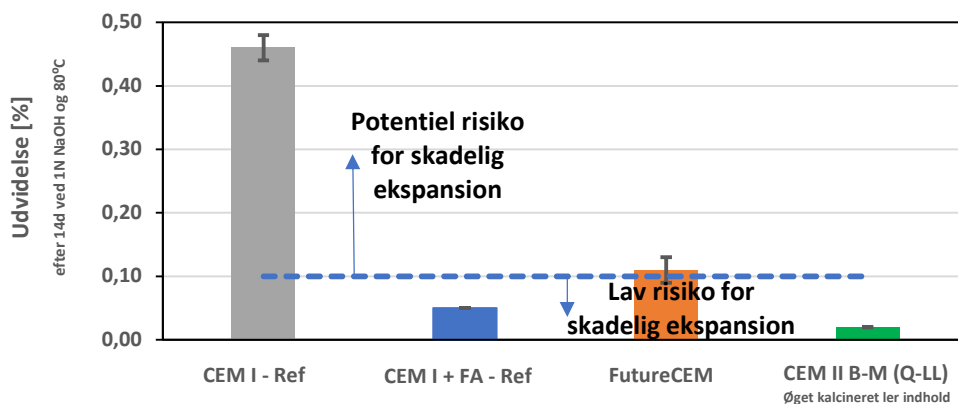
Klassifikation og mærkning af alkaliindhold i FutureCEM jf. DS/INF 135:2015 afsnit 2 og 3 dokumenteres ved TI-B 51. Denne metode er anvendt ved TI på mørtelprismer med FutureCEM af typen CEM II/B-M (Q-LL) og CEM I reference indeholdende reaktivt sand fra Nymølle grusgrav. De anvendte mørtler er fremstillet ud fra forholdet 3 sand : 1 cement og v/c 0,50. Efter støbning vandlagres prismene i en måned ved 20°C, hvorefter prøveemnerne opmåles og overføres til 50°C mættet saltvand. De målte ekspansioner fremgår af figur 7.

Her observeres en signifikant forskel mellem de to CEM I referenceprøver. Prøven med flyveaske udviser et minimalt niveau af ekspansion, som tilskrives puzzolaneffekten af flyveaske i betonen. CEM I referenceprøven uden flyveaske udviser derimod den højeste grad af ekspansion for de testede mørtler. Ved sammenligning observeres et lavere niveau af ekspansion for FutureCEM prøven i forhold til CEM I referencen uden flyveaske, hvor netop niveauet og hastigheden af ekspansionen af emnet relaterer til graden af alkalikiselreaktion. Det kan derfor konkluderes, at FutureCEM modvirker alkalikiselreaktioner bedre end referencen med CEM I cement.



Figur 7: Resultater af ekspansion for FutureCEM og reference CEM I cement testet iht. TI-B 51 ved TI.

De samme observationer er gjort hos Aalborg Portlands Research and Quality Center ved anvendelse af ASTM C1567, hvor en CEM I reference uden flyveaske har en øget risiko for skadelig ekspansion ved alkalikiselreaktion sammenlignet med en FutureCEM prøve, se figur 8. I denne analyse er der yderligere målt på en CEM II/B-M (Q-LL) med et øget indhold af kalcineret ler. Af disse prøver kan det observeres, at prøven med et øget indhold af kalcineret ler resulterer i den laveste risiko for skadelig ekspansion, selvom tilsætningen af flyveaske signifikant forbedrer tendensen for en CEM I referenceprøve. Det kan derfor konkluderes, at brug af FutureCEM signifikant sænker risikoen for skadelig alkalikiselreaktion sammenlignet med en CEM I reference.



Figur 8: Resultater af alkalikiselreaktivitet for FutureCEM og reference CEM I cement testet iht. ASTM C

De observerede tendenser står i kontrast til den anvendte beregningsmetode af alkaliindhold i cement jf. afsnit 3 i DS/INF 135:2015. Ved anvendelse af denne metode vil CEM I referencen have et alkaliindhold på 0,6% og FutureCEM have et alkaliindhold på 0,9%, og derved skulle klassificeres som hhv. LA og HA jævnfør tabel 8. Denne klassificering er baseret på at SCM, såsom kalcineret ler, har et højt indhold af alkali (Na_2O ækv. > 1.5%) sammenlignet med de cementklinker det erstatter. Dette målte alkaliindhold inkluderer dog også ikke-reaktive alkali, hvilket fremgår af ovenstående resultater som en lav risiko for ekspansion. De anvendte klassificeringer i DS/INF 135:2015 afspejler derfor ikke de reelle tendenser for alkalikiselreaktivitet observeret på figur 7 og 8.

Det foreslås derfor, at implementere en ny beregningsmetode i DS/INF 135:2020 for alkaliindhold i CEM II cementer, som derved skal anvendes for CEM II/A-M (Q-L), CEM II/B-M (Q-L), CEM II/A-M (Q-LL) og CEM II/B-M (Q-LL) cementer. I denne metode er det kun det reelle alkalibidrag til alkalikiselreaktivitet som inddrages i form af masseprocentbidrag fra cementklinker, gips og kalkfiller. Denne beregningsmetode understøtter derved de ovenfor nævnte resultater og giver en mere retvisende klassificering af alkaliindhold. Metoden svarer således til nuværende praksis, hvor alkaliindholdet i flyveaske som type II tilsætning til beton ikke tælles med i betonregnskabet.

Tabel 8: Klassifikation og mærkning for alkaliindhold i cement iht. DS/INF 135:2005 afsnit 2.

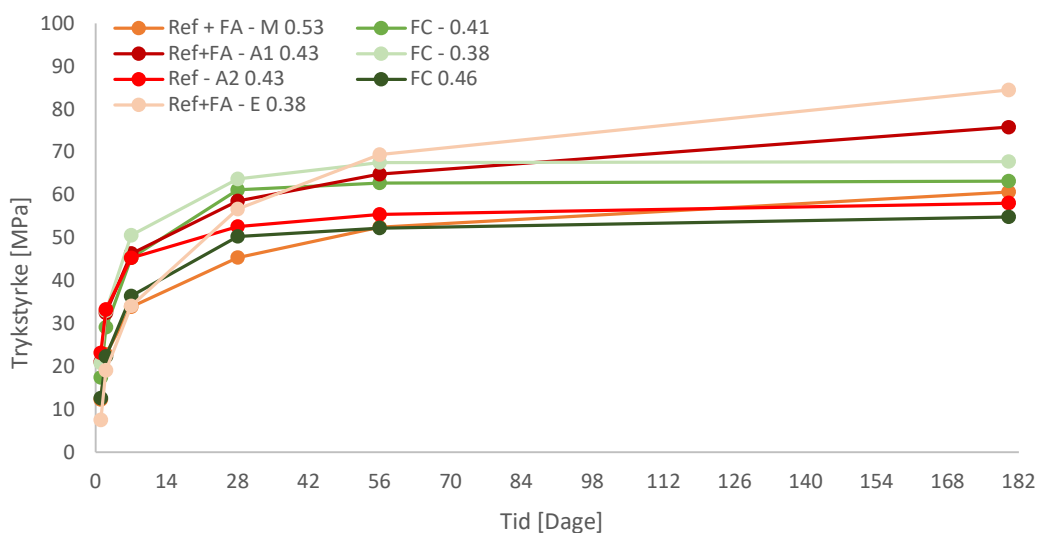
Mærkning	Krav
EA	Ekstra lavt alkaliindhold. Anvendes for cement med et syreopløseligt alkaliindhold på højst 0,4 masse-% (0,5 masse % grænse for enkeltværdier)
LA	Lavt alkaliindhold. Anvendes for cement med et syreopløseligt alkaliindhold på højst 0,6 masse-% (0,7 masse % grænse for enkeltværdier)
MA	Moderat alkaliindhold. Anvendes for cement med et syreopløseligt alkaliindhold på højst 0,8 masse-% (0,9 masse % grænse for enkeltværdier)
HA	Højt alkaliindhold. Anvendes for cement der ikke overholder nogen af de ovennævnte krav.

Andre Egenskaber

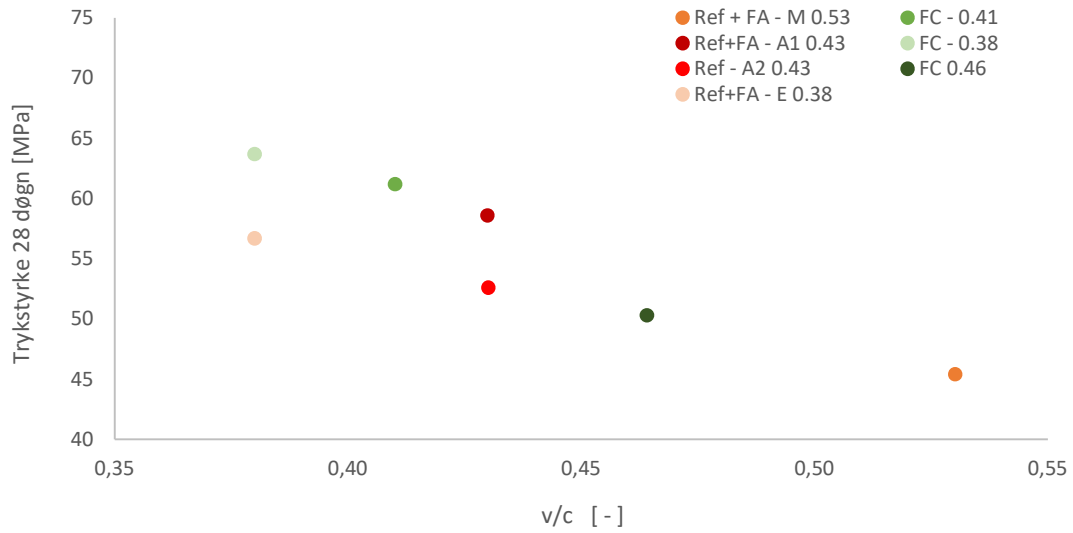
1.0 Styrkeudvikling

Der er målt trykstyrker på betoner med FutureCEM af typen CEM II/B-M (Q-LL) og CEM I referencer efter hhv. 1, 2, 7, 28, 56 og 180 døgn. Resultater er vist i figur 9, hvor der observeres en signifikant tilvækst i trykstyrke mellem 7 og 28 døgn for FutureCEM betoner. Denne tilvækst tilskrives synergieffekten mellem det calcinerede ler og kalkfilleren i cementen, og netop denne styrketilvækst sikrer, at beton med FutureCEM opnår en 28 døgns trykstyrke, der er sammenlignelig med en CEM I referencebeton ved det samme v/c forhold, se figur 10. Ligeledes fremgår det af figur 9, at beton med FutureCEM udviser en sammenlignelig styrkeudvikling efter 28 døgn mod 180 døgn, som en CEM I referencebeton.

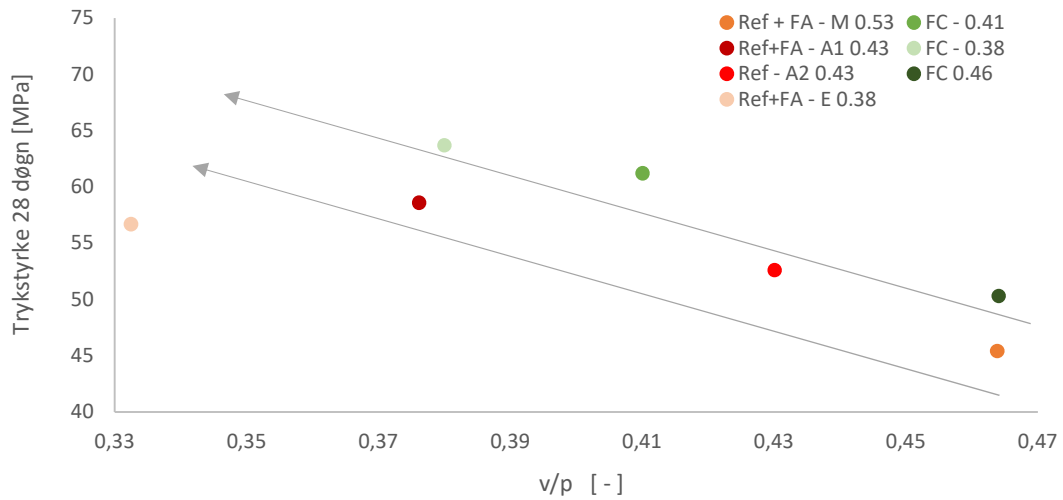
Grundet denne sammenlignelige styrkeudvikling kan der opnås en signifikant CO₂ reduktion uden at gå på kompromis med trykstyrken ved brug af FutureCEM til beton. Dette fremgår ligeledes af figur 11, hvor et reduceret klinkerindholdet i form af v/p forholdet i FutureCEM betoner resulterer i en højere 28 døgns trykstyrke.



Figur 9: Trykstyrkeudvikling over en periode af 180 døgn for CEM I reference og FutureCEM betoner testet ved T1.



Figur 10: Sammenlignelige 28 døgns trykstyrker som funktion af v/c for CEM I reference og FutureCEM betoner testet ved TI.

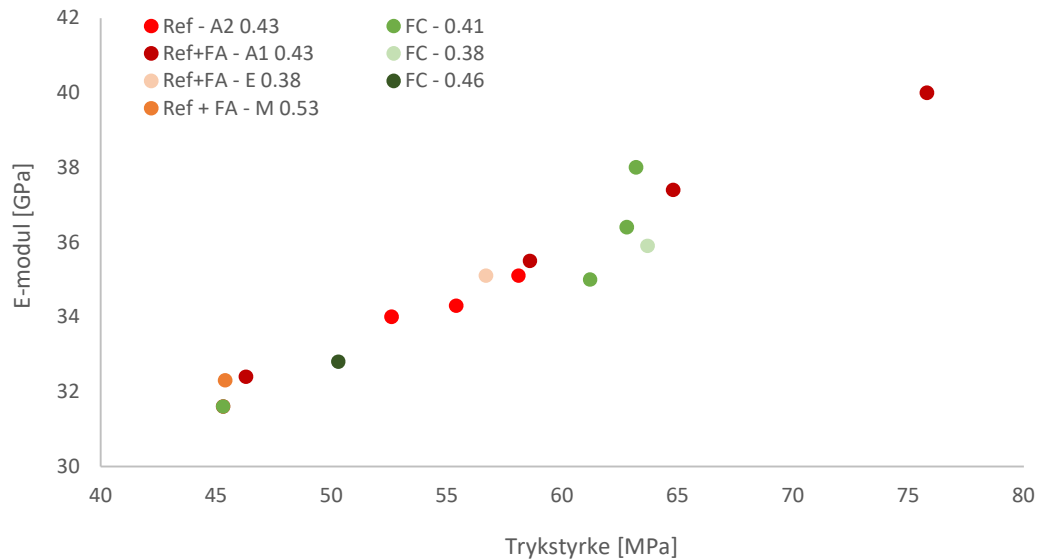


Figur 11: Et reduceret klinkerindhold i form af v/p forholdet resulterer i en højere 28 døgns trykstyrke i FutureCEM betoner.

2.0 E-modul

Der er bestemt E-modul for alle betoner efter 28 døgn, samt efter 7, 56 og 180 døgn for Ref A1, Ref A2 og FC 0,41. Cylinderprøverne er udsat for axiale tryk i en trykprøvningsmaskine, hvorefter hældningen af den resulterende stress-strain kurve er bestemt til prøvens E-modul.

Da E-modul afhænger af betonens trykstyrke, så er resultaterne angivet som funktion af styrkeudviklingen i figur 12. Her kan det observeres, at E-modul for FutureCEM beton er sammenlignelig med referencebetonerne ved samme trykstyrke.



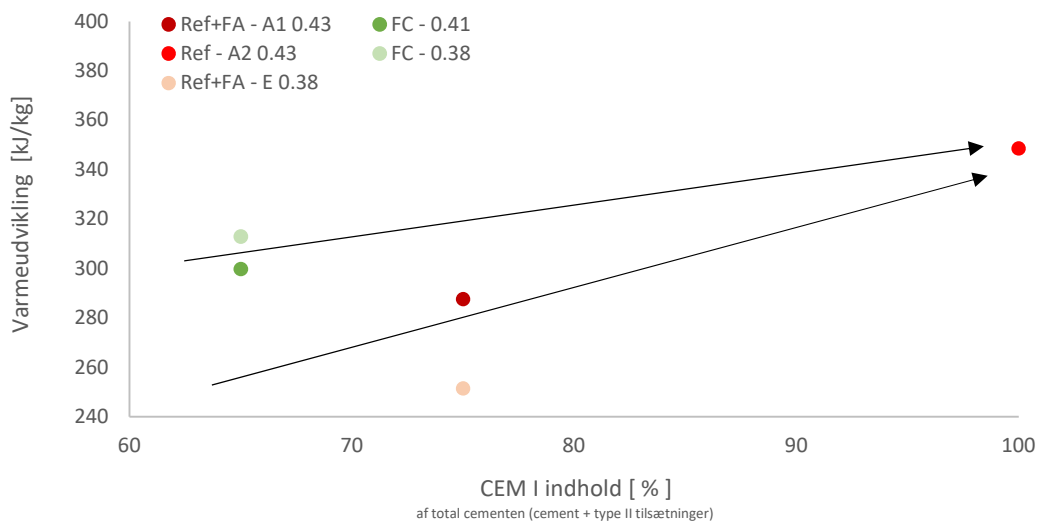
Figur 12: Sammenlignelig tendens mellem E-modul og trykstyrke for CEM I reference og FutureCEM betoner.

3.0 Varmeudvikling

Varmeudvikling er bestemt efter DS 423.37 (Semi-adiabatisk kalorimetri). Resultaterne heraf er angivet på figur 13, hvor det fremgår, at CEM I referencen uden flyveaske resulterer i den højeste varmeudvikling. En høj varmeudvikling i beton fremkommer ved et højt indhold af klinkerminerale C_3S og C_3A i cementen, da varmeudvikling er en direkte måling af reaktionsentalpi. Af samme årsag resulterer CEM I referencen A1 med flyveaske i en lavere varmeudvikling grundet den lavere andel af C_3S og C_3A totalt. Ligeledes har CEM I referencen E, med samme flyveaskedosering, en endnu lavere varmeudvikling, da denne CEM I cement har en anden klinkermineralsammensætning (Bogue) med en mindre andel af C_3S og C_3A i cementen, se tabel 1.

Varmeudviklingen fra FutureCEM betonerne er højere end CEM I referencebetonen A1 med flyveaske, da flyveasken ikke formodes at have reageret fuldt ud. FutureCEM betonen har dog lavere varmeudvikling end CEM I referencen uden flyveaske pga. den lavere andel af C_3S og C_3A totalt i cementen.

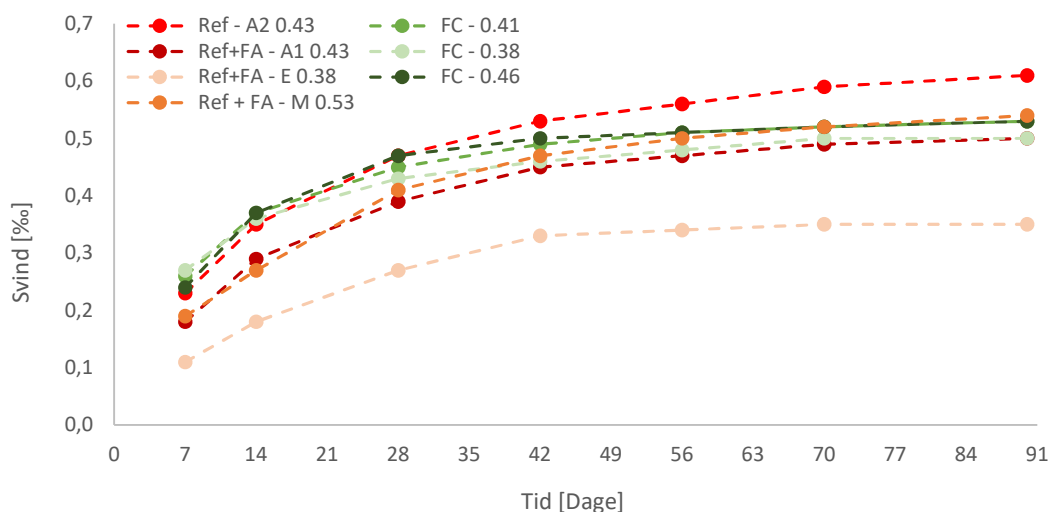
Det kan derfor konkluderes, at beton med FutureCEM har en lavere varmeudvikling end en CEM I referencebeton og udviser sammenlignelige tendenser for en reduktion i varmeudviklingen som ved tilsætning af flyveaske til en CEM I referencebeton.



Figur 13: Varmeudviklingen som funktion af CEM I indhold for reference og FutureCEM beton testet ved T1.

4.0 Svind

Der er målt svind ved TI efter EN 12390-16 på betonprismer afformet efter 24 timer og lagret ved 20°C. Svind er målt ved terminerne 7, 14, 28, 42, 56, 70 og 90 døgn. Resultaterne er vist i figur 14. CEM I reference (A2) uden flyveaske har det højeste svind over en periode af 90 døgn, og CEM I reference (E) har signifikant mindre svind sammenlignet med de resterende betoner. Betoner baseret på FutureCEM har mindre tendens til svind over en periode af 90 døgn sammenlignet med CEM I reference beton uden flyveaske (A2), og udviser et mere sammenligneligt niveau af svind som CEM I reference beton med flyveaske (M og A1). Generelt er svind målt på FutureCEM betonerne sammenligneligt med referencebetonerne. Det konkluderes derfor, at svind af FutureCEM beton er sammenligneligt med CEM I referencebeton.

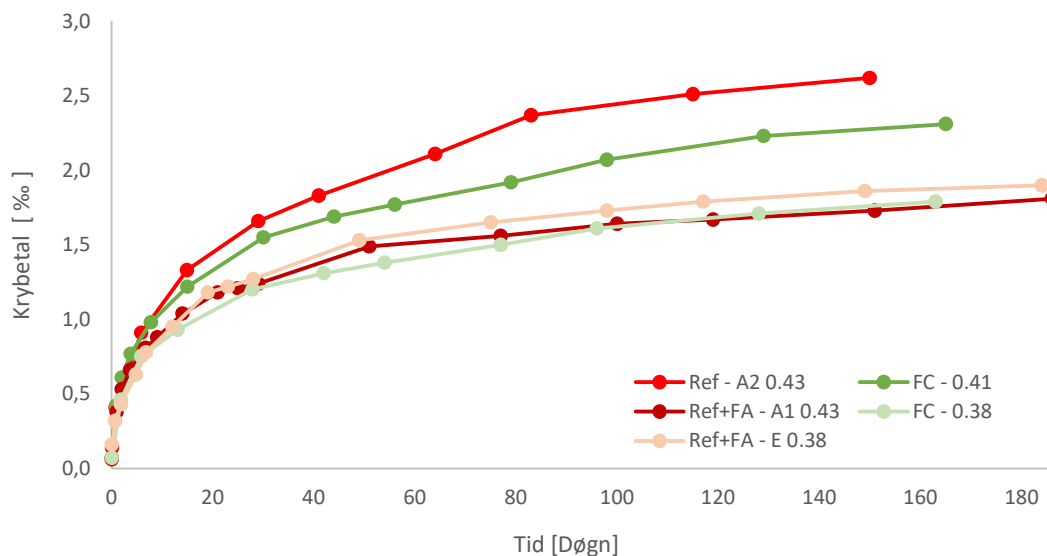


Figur 14: Svind målt ved TI over en periode af 90 døgn for CEM I reference og FutureCEM beton.

5.0 Krybning

Krybning er målt på betoner efter ASTM C512, hvor prøveemnerne er lagret ved 20°C og 65% RH og testet ved 14 til 180 døgn. Ved testen er cylindrene udsat for et permanent longitudinalt tryk over prøvningsperioden, hvor krybning måles som en længdeændring.

Resultaterne heraf fremgår på figur 15, hvor det observeres, at CEM I referencebetonen uden flyveaske udviser den største tendens til krybning af de testede betoner. Det kan derfor konkluderes, at beton med FutureCEM udviser en mindre grad af krybning end en CEM I referencebeton, og der yderligere ikke er nogen signifikant forskel i krybning for CEM I reference med flyveaske og FutureCEM betoner.



Figur 15: Resultater af krybning for FutureCEM og reference CEM I cement testet iht. ASTM C512 ved T1.

Konklusion

Baseret på resultaterne fremlagt i denne rapport udgør holdbarhedsegenskaberne af CEM II/A-M (Q-L), CEM II/B-M (Q-L), CEM II/A-M (Q-LL) og CEM II/B-M (Q-LL) dokumenteret ved cementen FutureCEM ingen hindring for fremstilling af beton i Danmark. Disse cementer indstilles derfor til at blive optaget i DS/EN 206 DK NA:2020 under eksponeringsklasserne *X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, SX1, XS2, XF1, XF2, XF3, XF4, XA1 og XA2*.

Ligeledes indstilles alkaliindholdet for CEM II/A-M (Q-L), CEM II/B-M (Q-L), CEM II/A-M (Q-LL) og CEM II/B-M (Q-LL) cementer at blive beregnet i form af masseprocentbidrag fra cementklinker, gips og kalkfiller.

Disse anbefalinger er baseret på nedenstående konklusioner:

- **Karbonatisering:**
Sammenlignelig karbonatiseringsdybde som en CEM I reference med flyveaske.
- **Kloridindtrængning:**
Mindre tendens til kloridindtrængning sammenlignet med en CEM I reference, og sammenlignelig tendens til øget modstand mod kloridindtrængning som ved moderat tilsætning af flyveaske.
- **Frostbestandighed:**
Beton kan fremstilles med FutureCEM og bestå med karakteren God iht. SS 137244, hvor de fleste resultater viser sammenlignelig afskalning som referencebeton med flyveaske og samme afstandsfaktor.
- **Sulfatbestandighed:**
Sammenlignelig med en moderat sulfatbestandig CEM I reference.
- **Alkaliindhold:**
Lavere tendens til alkaliskreaktion, trods et højere alkaliindhold totalt i cementen sammenlignet med en CEM I reference.
- **Styrkeudvikling:**
Sammenlignelige 28 døgns trykstyrker og styrkeudvikling over en periode af 180 døgn som en CEM I referencebeton.
- **E-modul:**
Sammenlignelig tendens for E-modul som CEM I referencebeton.
- **Varmeudvikling:**
Lavere varmeudvikling end en CEM I referencebeton og udviser sammenlignelige tendenser for en reduktion i varmeudviklingen som ved tilsætning af flyveaske til en CEM I referencebeton.
- **Svind:**
Lavere niveau af svind sammenlignet med en CEM I reference uden flyveaske og et sammenligneligt niveau for en CEM I reference med flyveaske.
- **Krybning:**
Lavere niveau af krybning sammenlignet med en CEM I reference uden flyveaske og et sammenligneligt niveau for en CEM I reference med flyveaske.

Appendix

1.0 Resultatoversigt – Analyser udført af Teknologisk Institut

	CEM I referencebeton				FutureCEM beton		
	M V/C 0,53	A1 V/C 0,43	A2 V/C 0,43	E V/C 0,38	V/C 0,46	V/C 0,41	V/C 0,38
Sætmål, mm	170	150	170	160	160	170	180
Luftindhold, %	6,0	6,3	5,8	6,6	6,6	5,6	5,8
Styrke, 1 døgn	12,3	21,1	23,2	7,5	12,6	17,4	20,8
Styrke, 2 døgn	22,8	32,5	33,3	19,1	22,3	29,1	32,9
Styrke, 7 døgn	33,9	46,3	45,3	34,1	36,4	45,3	50,6
Styrke, 28 døgn	45,4	58,6	52,6	56,7	50,3	61,2	63,7
Styrke, 56 døgn	52,5	64,8	55,4	69,4	52,3	62,8	67,6
Styrke, 180 døgn	60,7	75,8	58,1	84,5	54,9	63,20	67,80
Batch 2, 28 døgn styrke	43,2	60,2	56,2	57,3	50,8	59,8	63,2
E-modul, 7 døgn		32,4	31,6			31,6	
E-modul, 28 døgn	32,3	35,5	34,0	35,1	32,8	35,0	35,9
E-modul, 56 døgn		37,4	34,3			36,4	
E-modul, 180 døgn		40,0	35,1			38,00	
Svind, 7 døgn	0,19	0,18	0,23	0,11	0,24	0,26	0,27
Svind, 14 døgn	0,27	0,29	0,35	0,18	0,37	0,37	0,36
Svind, 28 døgn	0,41	0,39	0,47	0,27	0,47	0,45	0,43
Svind, 42 døgn	0,47	0,45	0,53	0,33	0,50	0,49	0,46
Svind, 56 døgn	0,50	0,47	0,56	0,34	0,51	0,51	0,48
Svind, 70 døgn	0,52	0,49	0,59	0,35	0,52	0,52	0,50
Svind, 90 døgn	0,54	0,50	0,61	0,35	0,53	0,53	0,50
CMC, 28 døgn		8,1	10,1	16,5		8,1	6,7
CMC, 56 døgn		3,0	9,7	6,9		5,8	5,2
CMC, 90 døgn		2,2	8,2	4,0		5,0	4,4
CMC, 180 døgn		1,2	6,9	2,0		4,30	4,00
AVA, luftindhold		5,4	5,6	5,5		6,0	5,8
AVA, specifik overflade		31,79	36,08	28,79		29,14	28,72
AVA, afstandsfaktor		0,159	0,137	0,172		0,163	0,168
Frost, 7 cykler		0,02	0,01	0,01		0,08	0,04
Frost, 14 cykler		0,02	0,02	0,02		0,13	0,09
Frost, 28 cykler		0,05	0,02	0,03		0,28	0,21
Frost, 42 cykler		0,05	0,02	0,04		0,38	0,31
Frost, 56 cykler		0,07	0,02	0,05		0,47	0,38
Frost, m56/m28		1,5	1,1	1,8		1,7	1,8
Karbonatisering EN 12390-10, 3 mdr	1,7	0,8	1,3		2,7	2,0	
Karbonatisering EN 12390-10, 6 mdr	3,1	1,9	1,9		4,0	3,00	
Karbonatisering EN 12390-10, 12 mdr	feb 2021	feb 2021	mar 2021		mar 2021	mar 2021	
Karbonatisering EN 13295	6,8	3,3	3,9		7,0	5,8	
Karbonatisering svindemner, 5 mdr	7,8	5,7	5	9,2	8,1	6,5	6,2

CEM I referencebeton						FutureCEM beton			
A1 V/C 0,43		A2 V/C 0,43		E V/C 0,38		V/C 0,41		V/C 0,38	
Døgn	Krybetal	Døgn	Krybetal	Døgn	Krybetal	Døgn	Krybetal	Døgn	Krybetal
0,05	0,07	0,02	0,06	0,07	0,16	0,03	0,07	0,02	0,07
1	0,38	0,1	0,14	0,7	0,32	0,9	0,42	1,8	0,46
2	0,53	0,8	0,41	1,8	0,43	2	0,61	5,9	0,75
3,7	0,66	5,9	0,91	4,8	0,63	3,8	0,77	13,1	0,93
6,7	0,81	14,9	1,33	6,8	0,78	7,8	0,98	27,9	1,2
9	0,88	29	1,66	12	0,95	15	1,22	42	1,31
14	1,04	41	1,83	19	1,18	30	1,55	54	1,38
21	1,18	64	2,11	23	1,22	44	1,69	77	1,5
25	1,21	83	2,37	28	1,27	56	1,77	96	1,61
29	1,24	115	2,51	49	1,53	79	1,92	128	1,71
51	1,49	150	2,62	75	1,65	98	2,07	163	1,79
77	1,56			98	1,73	129	2,23		
100	1,64			117	1,79	165	2,31		
119	1,67			149	1,86				
151	1,73			184	1,9				
186	1,81								

	CEM I + FA	CEM I	FutureCEM
Blanderecept			
Cement	337,5	450	450
Flyveaske	112,5	0	0
Sand (Nymølle)	1350	1350	1350
Vand	225	225	225
Superplast	3,4	3	6
Testresultater			
TI-B 51, 14 døgn	-0,19	2,73	0,1
TI-B 51, 28 døgn		3,16	1,34
TI-B 51, 42 døgn	-0,28	3,12	1,45
TI-B 51, 56 døgn	0,01	3,27	1,73

2.0 Recepter og resultater af frost/tø analyser fra AB Sydsten

Beton ID	SS ref 17% FA 0.42	SS FC 8% FA 0.42	SS FC 0.39	SS FC1 EFA 0.42	SS FC2 EFA 0.42
Cement	346 (CEM I)	381	416	381	381
Flyveaske	69	35	-	-	-
Emifiller	-	-	-	35	35
Frit vand	158	162	163	161	161
Superplast	1,5	1,5	2,0	1,4	1,4
Plastificering	-	2,9	2,9	2,9	2,9
Luftindblanding	1,3	1,3	1,3	0,8	1,3
Sand	653	653	653	653	653
Sten 4-8	163	163	163 (5-8 Ansit)	163	163
Sten 8-16	903	903	903 (8-16 Ansit)	903	903
Afskalning, m ₂₈	0,02	0,18	0,05	0,20	0,07
Afskalning, m ₅₆	0,02	0,3	0,07	0,59	0,09
m ₂₈ /m ₅₆	1,0	1,7	1,4	3,0	1,3
Afstandsfaktor, frisk beton	0,19	0,28	0,21	0,26	0,18
Specifik overflade, frisk beton	28	19	26	23	27

Beton ID	SS FC 17% FA 0.42	SS FC 8% FA 0.39	SS FC 0.38	SS FC 0.41	SS FC 0.41 +AEA	SS FC2 EFA 0.42
Cement	346	381	445	427	427	381
Flyveaske	69	35	-	-	-	-
Emifiller	-	-	-	-	-	35
Frit vand	154	151	169	175	175	161
Superplast	1,8	2,0	4,1	3,0	2,5	1,4
Plastificering	2,9	2,9	-	-	-	2,9
Luftindblanding	1,5	1,3	0,8	0,7	1,1	1,3
Sand	653	653	717	717	717	653
Sten 4-8	163	163 (5-8 Ansit)	237 (5-8 Ansit)	237 (5-8 Ansit)	237 (5-8 Ansit)	163
Sten 8-16	903	903 (8-16 Ansit)	737 (8-16 Ansit)	737 (8-16 Ansit)	737 (8-16 Ansit)	903
Afskalning, m ₂₈	0,07	0,07	0,07	0,25	0,12	0,24
Afskalning, m ₅₆	0,29	0,25	0,25	0,31	0,15	0,31
m ₂₈ /m ₅₆	4,1	3,6	3,6	1,2	1,3	1,3
Afstandsfaktor, frisk beton	0,18	0,24	0,21	0,25	0,19	0,26
Specifik overflade, frisk beton	32	30	21	20	27	22

3.0 Yderligere bilag:

- FUTURECEM – Dokumentation af udvalgte betonegenskaber, Teknologisk Institut, 2020
- Felteksponeringspladser, Grøn omstilling af cement- og betonproduktion, Teknologisk Institut, 2019
- As built Documentation: Birth Certificate Document and 4 years follow up for SCM and Reference walls at Aalborg Portland, Teknologisk Institut, 2019
- Gipslager – Mikroskopisk undersøgelse af SCM og Reference beton fra Aalborg Portlands gipslager, Teknologisk Institut, 2020

