



Alternative bindere til beton

Laboratorieafprøvning

20. december 2024



TEKNOLOGISK
INSTITUT



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Alternative bindere til beton

Laboratorieafprøvning

Rekvirent:

Dansk Beton
H.C. Andersens Boulevard 18
1553 København V

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Gregersensvej 4
2630 Taastrup
Byggeri og Anlæg

Kvalitetssikring:

Sagsansvarlig: Jennifer Anette Canul Polanco, tlf. 7220 2414, jacp@teknologisk.dk
Godkendt af: Claus Pade, tlf. 7220 2183, cpa@teknologisk.dk

Opgavenr.: 217032

Versionsnr.: 1

20. december 2024

Resultater af Institutts opgaveløsning beskrevet i denne rapport, herunder fx vurderinger, analyser og udbedringsforslag, må kun anvendes eller gengives i sin helhed, og må alene anvendes i denne sag. Institutts navn eller logo eller medarbejderens navn må ikke bruges i markedsføringsøjemed, medmindre der foreligger en forudgående, skriftlig tilladelse hertil fra Teknologisk Institut, Direktionssekretariatet.



Indhold

1.	Indledning	4
2.	Baggrund	4
3.	Mørtelforsøg	6
	3.1 Delmaterialer	6
	3.2 Blanderecepter	7
	3.3 Blande procedurer og hærkning	8
	3.4 Frisk og mekaniske egenskaber	8
	3.7 Kalorimetri	12
	3.8 Partikelstørrelsesfordeling	13
4.	Betonforsøg	13
	4.1 Delmaterialerne	14
	4.2 Blanderecepterne	14
	4.3 Blande procedurer	15
	4.4 Friske egenskaber	15
	4.5 Mekaniske egenskaber	16
	4.6 Holdbarhedstests for A-betoner	18
5.	Bilag	20



1. Indledning

Efter aftale med Dansk Beton har Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg den 31. oktober 2024 gennemført en laboratorieafprøvning af mørtel- og betonprøveemner fremstillet med forskellige alternative bindere. Denne rapport sammenfatter aktivitet 2 "Laboratorieforsøg med udvalgte bindersystemer" af projektet "Alternative bindere til den danske betonindustri", som Teknologisk Institut gennemfører for Dansk Beton, samt giver input til kommende fuldskalaforsøg hos betonproducenter.

2. Baggrund

Dansk Beton har indledt et projekt med Teknologisk Institut som har til formål at vurdere alternative bindersystemer, som kan implementeres i den danske betonindustri for at reducere CO₂-udledningen fra betonindustrien yderligere. Projektet er opdelt i fire aktiviteter:

Aktivitet 1: Skrivebordsstudie vedr. bindersystemer

Aktivitet 2: Laboratorieforsøg med udvalgte bindersystemer

Aktivitet 3: Fuldskalaforsøg med udvalgte bindersystemer

Aktivitet 4: Samlet rapportering

Aktivitet 2: Laboratorieforsøg er opdelt i to faser; en screening i form af mørtelforsøg og efterfølgende betonforsøg med udvalgte bindersystemer. Baseret på skrivebordsstudiet udvalgte Dansk Beton og TI i fællesskab de i Tabel 1 angivne bindersammensætninger til screeningsforsøg på mørtel-niveau (konsistens, trækstyrke og isothermisk kalorimetri af delmaterialer):

Tabel 1: Bindersammensætninger undersøgt på mørtelniveau

Familie 1: Høj klinkererstatning	
HK0	100% Rapid cement
HK1	30% Rapid cement + 60% vulkansk aske + 10% kalkfiller
HK2	40% Rapid cement + 50% vulkansk aske + 10% kalkfiller
HK3	40% Rapid cement + 40% vulkansk aske + 20% kalkfiller
HK4	30% Rapid cement + 60% metakaolin + 10% kalkfiller
HK5	30% Rapid cement + 50% metakaolin + 20% kalkfiller
HK6	40% Rapid cement + 50% metakaolin + 10% kalkfiller
HK7	40% Rapid cement + 40% metakaolin + 20% kalkfiller
HK8	30% Rapid cement + 60% kalcineret moler + 10% kalkfiller
HK9	40% Rapid cement + 50% kalcineret moler + 10% kalkfiller
HK10	40% Rapid cement + 40% kalcineret moler + 20% kalkfiller
Familie 2: Alkali aktiverede materialer (geopolymerer)	
AA1	71% metakaolin + 20% vandglas + 9% kaustisk soda
AA2	80% metakaolin + 12,5% vandglas + 7,5% kaustisk soda
AA3	71% vulkansk aske + 20% vandglas + 9% kaustisk soda
AA4	80% vulkansk aske + 12,5% vandglas + 7,5% kaustisk soda



AA5	71% kalcineret moler + 20% vandglas + 9% kaustisk soda
AA6	80% kalcineret moler + 12,5% vandglas + 7,5% kaustisk soda

På møderne afholdt d. 22. marts og d. 12. april 2024 gennemgik Teknologisk Institut skriverbordstudiet og præsenterede et forslag til hvilke bindersammensætninger, som kunne være relevante at undersøge i laboratoriestudiet for Dansk Beton. Foruden de præsenterede bindersammensætninger, ønskede Dansk Beton at inkludere bindersammensætninger med højojnsslagge (GGBS) til mørtelforsøgene, hvorfor yderligere to bindersammensætninger blev tilføjet - se Tabel 2.

Tabel 2: Ekstra bindersammensætninger med højojnsslagge

Familie 1: Høj klinker erstatning	
HK11	30% Rapid cement + 70% højojnsslagge
HK12	50% Rapid cement + 50% højojnsslagge

Efter test af bindersammensætninger i Tabel 1 og 2 blev det aftalt at teste yderligere bindersammensætninger på mørtelniveau, fordi effekten af tilsætning af kalkfiller viste sig god styrkeudvikling. Se tabel 3 herunder.

Tabel 3: Ekstra bindersammensætninger med metakaolin/kalcineret moler og kalkfiller

Familie 1: Høj klinker erstatning	
HK13	40% Rapid cement + 30% metakaolin + 30% kalkfiller
HK14	40% Rapid cement + 30% kalcineret moler + 30% kalkfiller
HK15	30% Rapid cement + 50% kalcineret moler + 20% kalkfiller

På baggrund af resultaterne fra mørtelforsøgene blev tre bindersammensætninger valgt af DB og TI i fællesskab til at blive testet på betonniveau. Fire betontyper blev udviklet og betones friske egenskaber, samt udvalgte mekaniske og holdbarhedsmæssige egenskaber blev undersøgt – se Tabel 4.

Tabel 4: Forsøgsprogram for betontests

	Miljøpåvirkning	v/c	Trykstyrke	E-modul	Klorid migration	Luftpore og frost
HK14-P	Passiv	0,60	1,2,7,28, 56d	28d	-	-
HK14-A	Aggressiv	0,43	1,2,7,28, 56d	28d	28, 56, 91d	28d
HK13-P	Passiv	0,60	1,2,7,28, 56d	28d	-	-
AA1-A	Aggressiv	0,50	1,2,7,28, 56d	28d	28, 56, 91d	28d



3. Mørtelforsøg

3.1 Delmaterialer

De anvendte delmaterialer er vist i tabel 5.

Tabel 5 Anvendte delmaterierne med tilhørende leverandøroplysninger

Delmateriale	Leverandør	Produktnavn
Portland cement, CEM I, 52,5N	Aalborg Portland (Rapidcement)	Rapidcement
Kalcineret moler	Skamol A/S Tel: +45 9772 1533 sales.skamol@etexgroup.com	BioSilica
Metakaolin (kalcineret kaolin)	Imerys S.A. - 43 Quai de Grenelle, 75015 Paris (Frankrig) Tel: +33 1 49 55 63 00	Argical M1000
Kalkfiller	Dankalk A/S Aggersundvej 50, 9670 Løgstør DK Tlf.: +45 33 68 74 00 E-mail: dankalk@dankalk.dk	Betocarb F-LG
Højovnslagge	Swecem AB (Sverige), Box 1291, 262 24 Ängelholm Tlf: +46 733 84 84 88 E-mail: order@swecem.com	Swecem merit
Vulkansk aske	De Mortel Compagnie (Holland) Phone: +31(0)71-541 73 43 Email: info@kalkmortel.nl	Tras pozzolan
Vandglas (Natriumsilikat i vandigopløsning). Tørstof indhold: 35.3%; SiO ₂ = 27.1%, Na ₂ O= 8.2% Teknisk grade	VWR chemicals https://dk.vwr.com/store/	CAS-nummer: 1344-09-8
Natriumhydroxid (NaOH), beads, Reagent Grade	VWR chemicals https://dk.vwr.com/store/	CAS-nummer: 1310-73-2

Desuden blev demineraliseret vand, samt PCE superplasticizer MasterGlenium SKY 851 (33% tørstof indhold) og CEN Standard Sand (EN 196-1) brugt til mørtelforsøg.



3.2 Blanderecepter

De undersøgte mørtelsammensætninger fremgår af Tabel 6. v/b er forholdet mellem vand og pulver (tørstof). Pulver kan være cement, vulkansk aske, slagge, metakaolin, kalcineret moler, kalkfiller, NaOH, Natriumsilikat. Alle HK prøveemner havde en v/b = 0.5, fordi blanderecepten var baseret på EN-196-1. Det blev fundet i litteraturen (Tanakorn Phoo-ngernkham et al. 2018), at et v/b = 0.4 anbefales til støbning af alkaliaktiveret materialer (geopolymerer). Dog havde AA1 og AA2 et v/b = 0.5 og AA3 og AA4 havde v/b = 0.4. Et v/b på 0,4 blev forsøgt for AA1 og AA2, men kunne ikke blandes da blandingerne blev for tørre. AA5- AA6 blev blandet med forskellige v/b-forhold, hvor kun v/b = 0.6 var muligt. Dog hærdede AA5-AA6 ikke efter 14 døgn og derfor blev prøverne kasseret.

Tabel 6: Blanderecepter for HK- prøveemner

ID	Delmateriale (g)					
	Rapidcement	SCM*	Kalkfiller	Vand	SP	Sand
HK0	450	0	0	225	0	1350
HK1	135	270	45	225	0	1350
HK2	180	225	45	225	0	1350
HK3	180	180	90	225	0	1350
HK4	135	270	45	219	8	1350
HK5	135	225	90	218	9	1350
HK6	180	225	45	218	9	1350
HK7	180	180	90	218	9	1350
HK8	135	270	45	211	18	1350
HK9	180	225	45	218	9	1350
HK10	180	180	90	218	9	1350
HK11	135	315	0	225	0	1350
HK12	225	225	0	225	0	1350
HK13	180	135	135	218	9	1350
HK14	180	135	135	218	9	1350

* metakaolin, kalcineret moler, højovnslagge eller vulkansk aske.

Tabel 7: Blanderecepter for AA-prøveemner. * NaOH var 10M svarende til et tørstofindhold af 26%.

ID	Delmateriale (g)			
	SCM	Vandglas	NaOH*	Sand
AA1	585	169	253	1350
AA2	585	209	209	1350
AA3	585	135	202	1350
AA4	585	167	167	1350
AA5	585	202	304	1350
AA6	585	250	250	1350



3.3 Blandeprocedurer og hærdning

Alle HK mørtelprøver er blandet og støbt i henhold til DS/EN 196-1.

Blandeproceduren for AA-prøver var også baseret på DS/EN 196-1, med den afvigelse at vandglas blev tilsat ved tiden 0 sek og NaOH-opløsningen blev tilsat ved tiden 10 sek. Resten af blandeproceduren er udført iht. DS/EN 196-1.

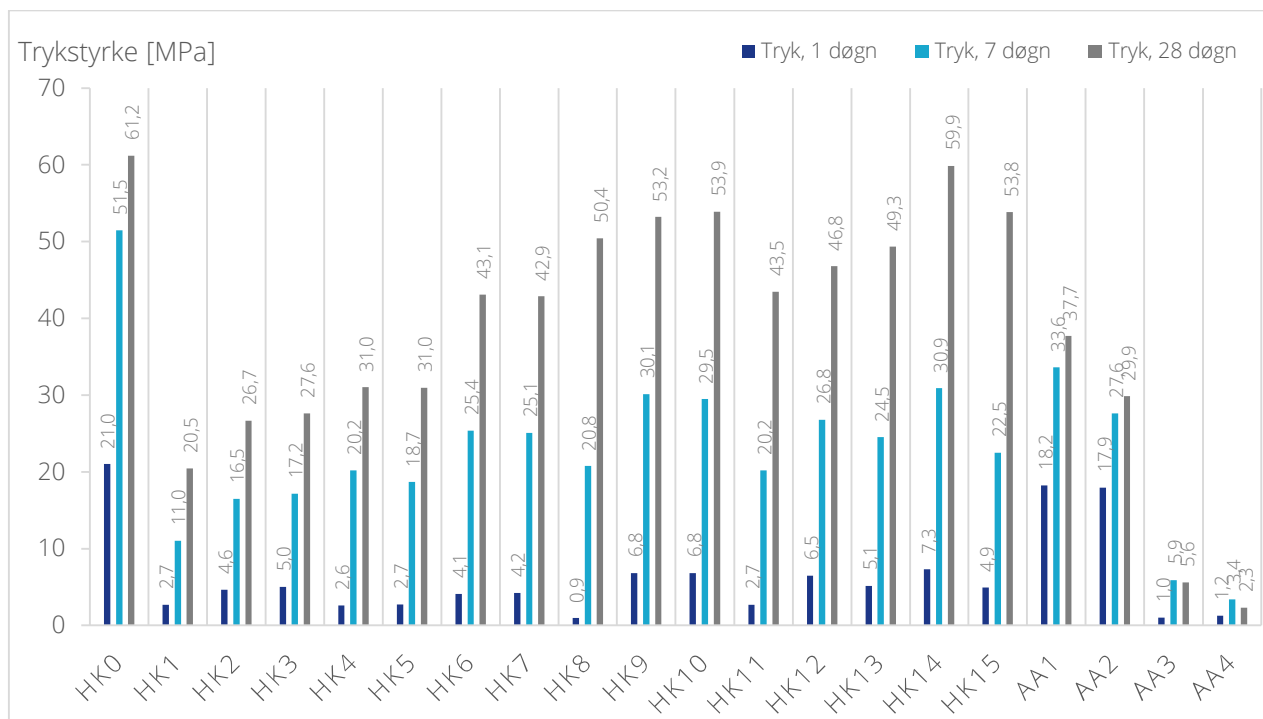
Efter 24 timer blev alle HK-prøver afformet og lagt i vandkar ved 20 °C. AA-prøver blev lagt i et klimarum ved 20 °C og 65% RH.

3.4 Frisk og mekaniske egenskaber

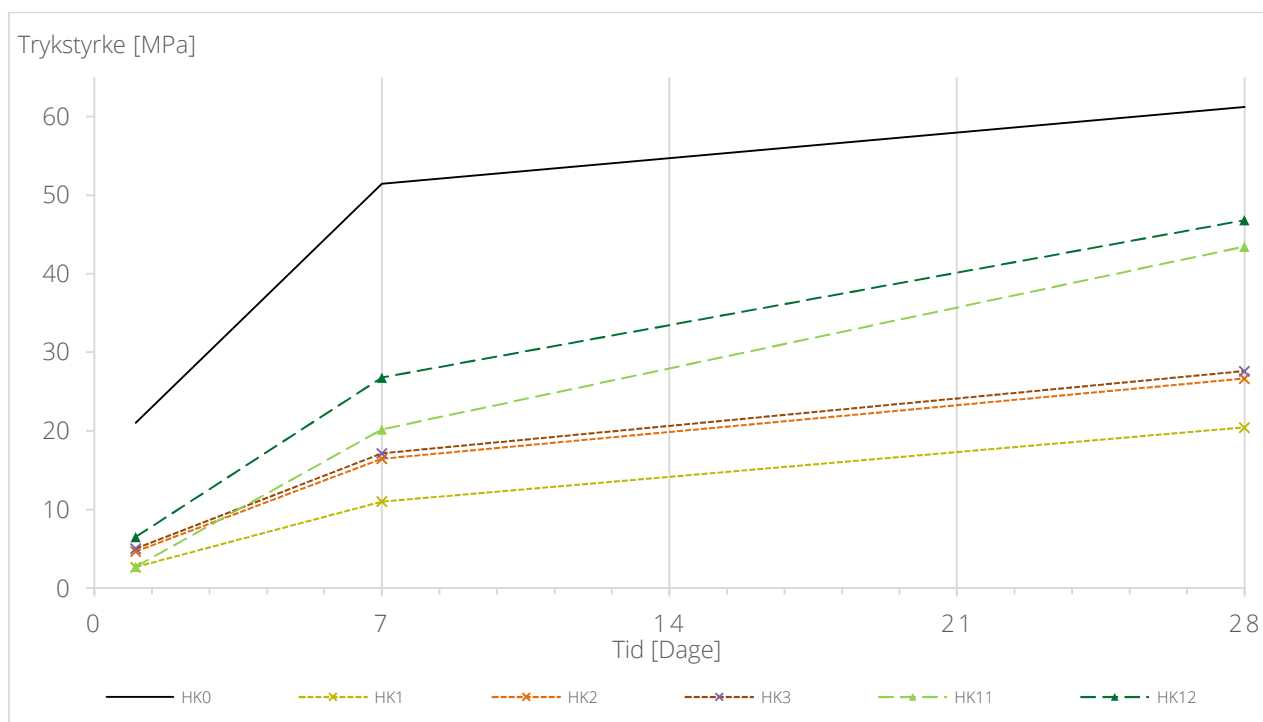
Alle mørtelprøver blev testet for konsistens og trykstyrke (3 terminer). Se tabel 8, samt figurer 1, 2, 3 og 4.

Tabel 8: Oversigt af resultater

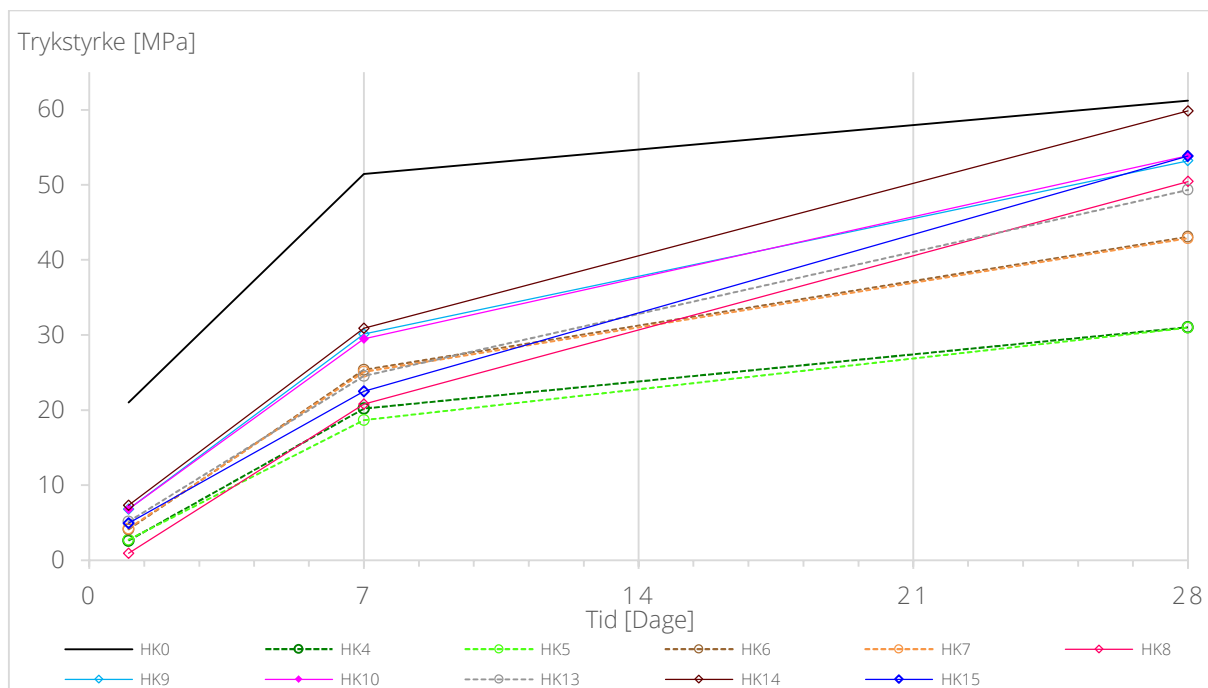
Blanding	Konsistens [mm]	Trykstyrke 1 d [MPa]	Trykstyrke 7 d [MPa]	Trykstyrke 28 d [MPa]
HK0	187	21.0	51.5	61.2
HK1	142	2.7	11.0	20.5
HK2	152	4.6	16.5	26.7
HK3	153	5.0	17.2	27.6
HK4	100	2.6	20.2	31.0
HK5	128	2.7	18.7	31.0
HK6	142	4.1	25.4	43.1
HK7	168	4.2	25.1	42.9
HK8	133	0.9	20.8	50.4
HK9	128	6.8	30.1	53.2
HK10	197	6.8	29.5	53.9
HK11	191	2.7	20.2	43.5
HK12	192	6.5	26.8	46.8
HK13	200	5.1	24.5	49.3
HK14	250	7.3	30.9	59.9
HK15	180	4.9	22.5	53.8
AA1	123	18.2	33.6	37.7
AA2	130	17.9	27.6	29.9
AA3	128	1.0	5.9	5.6
AA4	120	1.2	3.4	2.3
AA5	170	-	-	-
AA6	172	-	-	-



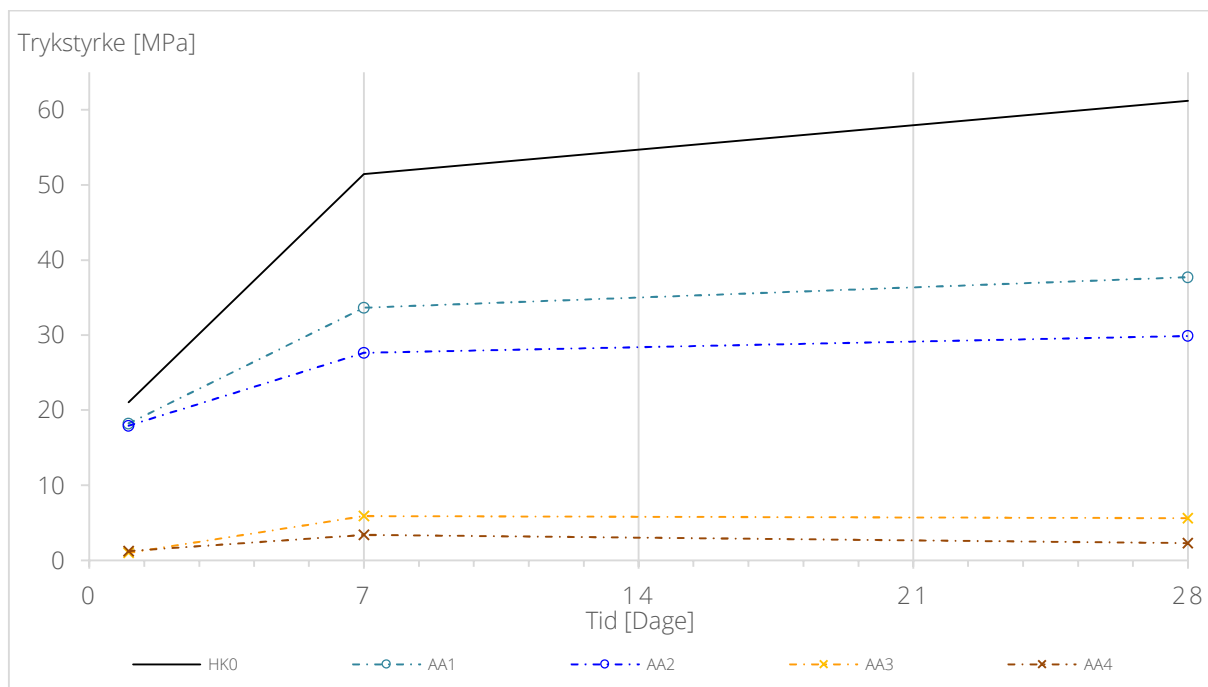
Figur 1: Trykstyrke efter 1, 7 og 28 dage



Figur 2: Trykstyrkeudvikling for mørtel med vulkanskaske (x) og højvovsslagge (Δ)



Figur 3 Trykstyrkeudvikling af mørtel med metakaolin (O) og kalcineret moler (◊)



Figur 4 Trykstyrkeudvikling af mørtel med alkaliaktiveret binder.



3.5 Konsistens og trykstyrker af HK-mørtler

Konsistensen af HK-blandingerne blev reduceret pga. indeholdt af SCM undtagen for højovnsslagge, som gav en konsistens tilsvarende referencen. Effekten på konsistens var betydelig for mørtler med metakaolin og endnu mere udtalt i mørtler med kalcineret moler. Mørtler med metakaolin eller kalcineret moler kunne ikke udstøbes uden anvendelse af superplasificerende tilsætningsstof. Der skulle bruges en højere SP-dosering end den af leverandøren anbefalede maksimale dosering til at støbe HK8. Se Tabel 8.

Trykstyrkeudvikling af HK-mørtler var afhængig af typen af SCM og kombinationen af SCM og kalkfiller for de ternære systemer. Mørtel med vulkansk aske (HK1-3) viste en ret beskeden trykstyrkeudvikling og nåede maksimalt 28 MPa efter 28 dage, svarende til ca. 50% af referencen. De højeste styrker blev generelt opnået af for mørtler med kalcineret moler og kalkfiller (HK8-10, 14, 15). Den højest målte trykstyrke efter 28 døgn var 60 MPa for HK-14 med en klinkererstatningsgrad på 60%, hvilket er meget tæt på referencen lavet med 100 % Rapid cement. HK8 med en klinkererstatningsgrad på 70% opnåede en trykstyrke på 50 MPa efter 28 dage. Mørtler lavet med metakaolin (HK4-7, 13) viste en betydeligt bedre styrkeudvikling end vulkansk aske, men dog lidt dårligere end kalcineret moler, når man sammenligner prøver med samme v/b-forhold, samme mængde af cement og samme forhold mellem SCM og kalkfiller. Den højest målte trykstyrke af prøven lavet med metakaolin var 49 MPa (HK-13). Se Figur 1, Figur 2 og Figur 3.

En interessant observation er at SCM kan erstattes med kalkfiller, samtidig med at både konsistens, styrkeudvikling og 28-døgnstyrke forbedres.

Prøverne lavet med højovnsslagge (HK11-12) viste en trykstyrke på 47 MPa, når 50% af Rapid-cementen blev erstattet af slagge og 43 MPa, når udskiftningen var 70%. Den tidlige styrke var lav ligesom for de øvrige SCM'er. Se Figur 1 og Figur 2.

3.6 Konsistens og trykstyrker af AA-mørtler

Konsistens af AA-mørtler var meget udfordrende. Disse mørtler havde en meget kort "åben tid", dvs. tabte hurtigt konsistens og skulle udstøbes inden for 10 minutter. AA-mørtlerne fremstod som seje limagtigt materialer, som dog reagerer på vibrationer, men som ikke udviser et sætmål tilsvarende konventionel mørtel/beton. AA-mørtler skulle vibreres i længere tid end HK-mørtler. Se Tabel 8.

AA-mørtler viste en anderledes styrkeudvikling end de Portland cement baserede bindersammensætninger (HK-bindere). AA-mørtler har tilsyneladende en høj tidlig styrke, men efterfølgende beskeden styrketilvækst. Se Figur 1.

Prøverne lavet med vulkansk aske (AA3-AA4) udviklede ikke mere end 6 MPa styrke efter 7 døgn, hvorefter der ingen tilvækst kunne observeres, måske nærmere en tendens til et lille fald i trykstyrke. Se Figur 1 og Figur 4.



På den anden side udviklede prøverne baseret på metakaolin (AA1-AA2) en styrke på omkring 18 MPa efter 1 døgn, hvilket er meget tæt på styrken af referencen med 100% Rapid cement. Efterfølgende styrkeudvikling er dog som nævnt betydeligt mere begrænset end for Portland cement baserede systemer, og efter 7 døgn sker der ingen yderligere tilvækst. En forklaring på dette kunne være, at de vigtigste kemiske reaktioner, som bidrager til styrkeudviklingen, muligvis kun forløber over de første 7 dage. Se Figur 4.

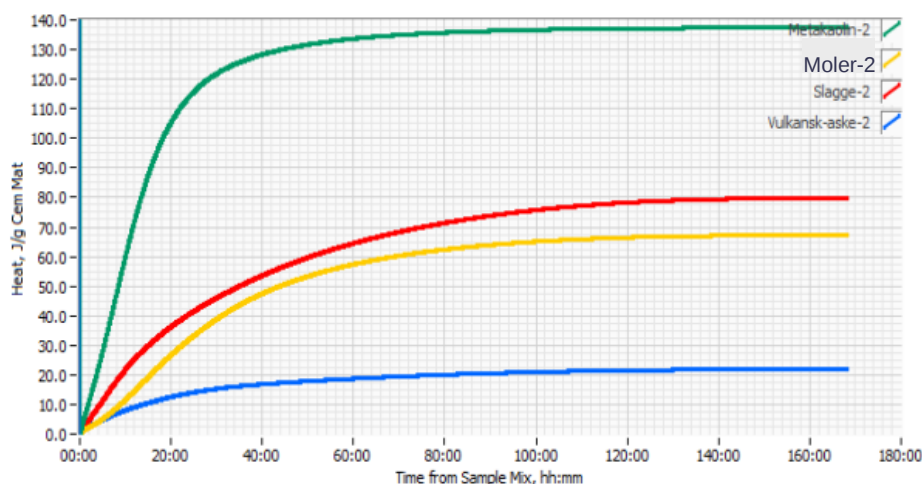
AA'er, støbt med kalcineret moler, hærdede ikke efter 14 dage i klimarum. En mulig forklaring på dette kan være det lave indhold af aluminiumoxid i kalcineret moler, da en vis mængde aluminiumoxid nævnes i litteraturen som væsentlig for styrkeudvikling af AA-materialer.

Det skal bemærkes, at der kun er undersøgt et ret beskedent antal kombinationer af vandglas eller kaustisk soda, og det er overvejende sandsynligt at bedre resultater kan opnås både for bearbejdighed (åben tid) og styrkeudvikling hvis et større område af kombinationer af SCM:NaOH:vandglas afsøges mere fintmasket end der har været mulighed for i dette projekt.

3.7 Kalorimetri

SCM'ers potentielle bidrag til styrkeudviklingen, kan jf. f.eks. ASTM C 1897 estimeres ud fra måling af SCM-reaktivitet (hydrauliske eller puzzolaniske reaktioner som forløber når SCM'et anvendes sammen med portlandcement). Ifølge ASTM C 1897 kan reaktiviteten af SCM'ernes bl.a. bestemmes ved måling af kumulativ varmeafgivelse (varmeudvikling) fra en blanding af SCM og en opløsning svarende til po-reopløsningen i portlandcement (væske lavet af calcium hydroxid, calciumcarbonat, kalium sulfat og kalium hydroxid).

Heat per Unit Weight of Cementitious Materials



Figur 5: Måling af varmeudvikling



Varmeudvikling jf. ASTM C 1897 (over 7 døgn) for de fire SCM'er anvendt i dette projekt er vist i Figur 5. Ud fra målingerne af reaktiviteten (Figur 5), ses det at metakaolin er den mest reaktive, efterfulgt af slagge, kalcineret moler og til sidst vulkansk aske. Dette stemmer imidlertid ikke overens med trykstyrkeresultaterne, hvor mørtelprøver med kalcineret moler opnåede en højere styrke end mørtelprøverne med metakaolin, slagge og vulkansk aske.

Resultaterne tyder på at ASTM C 1897 ikke altid er tilstrækkelig til at vurdere reaktiviteten af "ukendte" SCM'er.

3.8 Partikelstørrelsesfordeling

Finheden af SCM'er har indflydelse på hydratiseringshastigheden og dermed på hastigheden af styrkeudvikling og også på hastigheden af varmeudvikling. Finere SCM'er giver et større overfladeareal til hydratisering og dermed hurtigere udvikling af styrke og varme. Derfor er partikelstørrelsesfordelinger bestemt for pulverne ved laserdiffraktion, se Tabel 9.

Tabel 9: Partikelstørrelse (Dx10=10% af partiklerne er mindre end, Dx50 er middel partikelstørrelse, Dx90=90% af partiklerne er mindre end)

Prøve	Dx10 [μm]	Dx50 [μm]	Dx90 [μm]
Rapid	3.75 $\pm$ 0.05	17.9 $\pm$ 0.3	46.1 $\pm$ 0.7
Vulkansk aske	2.87 $\pm$ 0.008	14.7 $\pm$ 0.09	49.9 $\pm$ 0.8
Højovnslagge	3.70 $\pm$ 0.02	15.8 $\pm$ 0.02	41.3 $\pm$ 0.1
Metakaolin	3.03 $\pm$ 0.005	10.4 $\pm$ 0.05	44.7 $\pm$ 0.7
Kalcineret moler	3.73 $\pm$ 0.07	18.2 $\pm$ 1	241 $\pm$ 62
Kalkfiller	1.33 $\pm$ 0.01	3.45 $\pm$ 0.04	9.88 $\pm$ 0.09

*D= repræsenterer diameteren af pulverpartikler

Resultaterne viser, at kalkfiller er det fineste anvendte materiale. Metakaolin er det næst fineste materiale med en D50 på 10 μm , hvilket kan forklare den højere reaktivitet målt med kalorimeteret. Moler har samme partikelstørrelse som cement ift. Dx10 og Dx50, og det kan derfor tyde på at molers bidrag til trykstryken ikke skyldes materialets finhed men derimod en øget reaktivitet. Dette er dog kun baseret på spekulationer ud fra de opnåede resultater.

4. Betonforsøg

På baggrund af resultaterne fra mørtelforsøgene, samt diskussion med Dansk Beton og med Bæredygtig Beton initiativet styregruppe, blev det besluttet, at der testes tre bindersammensætninger på betonniveau: HK13 (metakaolin), HK14 (kalcineret moler) og AA1 (metakaolin). For alle betontyper testes trykstryke (5 terminer), E-modul (1 termin), og for A- betoner testes også kloridmigration (3 terminer) og frostbestandighed. Det aftalte forsøgsprogram kan ses i Tabel 4.



4.1 Delmaterialerne

Til betonprøverne er brugt samme type SCM'er, kalkfiller, samt kemiske aktivatorer, som der blev brugt i mørtelforsøgene. Se Tabel 5. Derudover blev der brugt MasterEase 4010 som superplasticizer og MasterAir 22SB som luftindblandingsmiddel.

Søsand, Thyborøn E 0/4 blev brugt til A- betoner og bakkesand, Bradsted E 0/1 blev brugt til P-beton. Som groft tilslag anvendtes Ansit 4/8 og 8/16 mm.

4.2 Blanderecepterne

Betonrecepterne for de tre Portland cement baserede betoner blev designet for at opnå et sætmål på 180 ± 30 mm og et luftindhold på $6 \pm 1\%$ for A-beton og 2% for P-beton. De endelige betonsammensætninger, der blev brugt til at støbe de testede prøveemner, er vist i tabel 10.

AA1-A betonen blev ikke justeret til at opnå et bestemt sætmål eller luftindhold, da der ikke findes en EN-standard med specifikke krav/anbefalinger til sætmål eller luftindhold for geopolymere, samt fordi der ikke findes et kommercielle superplastificeringsmiddel egnet til alkaliaktiverede bindersystemer. Betonblanderecepten af AA1-A beton er vist i tabel 11.

Alle typer af beton har den samme bindervolumen: $31 \pm 1\%$ til A-beton og 30% til P-beton.

Tabel 10: Betoner blanderecepter

Konstituent	HK13-P	HK14-P	HK14-A
	VOT [kg/m ³]	VOT [kg/m ³]	VOT [kg/m ³]
Rapid cement	124,8	124,9	155,7
Kalcineret moler	-	93,7	116,8
Metakaolin	93,6	-	-
Kalkfiller	93,6	93,7	116,8
Sand 0/4	835,5	834,3	721,5
Ansit 4/8	223,4	223,1	207,6
Ansit 8/16	761,7	760,6	778,5
SP	4,2	2,8	4,3
Luftindblanding	-		3,5
Vand	183,5	185,3	160,7
Total	2320	2318	2265
Pasta [v/v.%]	29,7	29,8	30,9
SP-dosering [%]	1,35	0,90	1,10



Tabel 11: Betonrecepterne til AA1-A beton

Konstituent	AA1-A
	VOT [kg/m ³]
Metakaolin	369,9
Sand 0/4	745,4
Ansit 4/8	214,5
Ansit 8/16	804,3
Vandglas	159,9
NaOH	106,6
Vand	0,0
Total	2400
Pasta (v/v.%)	31,9

4.3 Blandeprocedurer

Betoner blev blandet i en Eirich blandemaskine model 16912 A med 60 L kapacitet. Hastighed af blandingstjerne var på 200 RPM og blandingstøbeholder på 30 RPM. Blandeproceduren var, som følges:

1. Tørblanding af tilslag og tørre pulvere delmaterialer (varighed tid: 15 sek).
2. A: (Portland cement systemer) Tilsætning af vand begyndte ved t=15 sek (varighed tid: ca. 12 sek). B: (For AA-beton) Tilsætning af vand, vandglas og Na(OH) ved t=15 sek (varighed tid: ca. 24 sek).
3. Tilsætning af luftindblandingsmidler begyndte ved t= 45 sek (varighed tid: ca. 5 sek).
4. Derefter tilsætning af superplasticizer begyndte ved t= 55 sek (varighed tid: ca. 5 sek).
5. Blanding fortsætter indtil sek: 120.

Efter blanding blev sætmål, densitet og luftindhold målt. Prøveemner blev støbt i stålcyindere og plastikuber (til test af frostbestandighed). Prøveemner blev afformet efter 24 timer og lagt i vandkar ved 20 °C. AA1-A betonprøverne blev lagt i klimarum ved 20 °C og 65% RH efter afformning.

4.4 Friske egenskaber

Resultaterne af de friske egenskaber for de støbte betoner er vist i Tabel 12. Billeder af blandede betoner kan ses i Bilag, Figur 9 og Figur 10.

Tabel 12: Målt friske egenskaber

	v/b	Sætmål [mm]	Densitet [kg/m ³]	Luft [%]
HK13-P	0,60	170	2370	2,3
HK14-P	0,60	200	2350	2,4
HK14-A	0,43	190	2280	6,2
AA1 -A	0,50	0	2360	3,1



For AA1-A betonen var det svært at gennemføre prøvning af frisk beton pga. et meget sej kohæsiv konsistens. Sætmålet blev målt til 0 mm. Det målte luftindhold på 3% er i overensstemmelse med de fundne værdier i litteraturen.

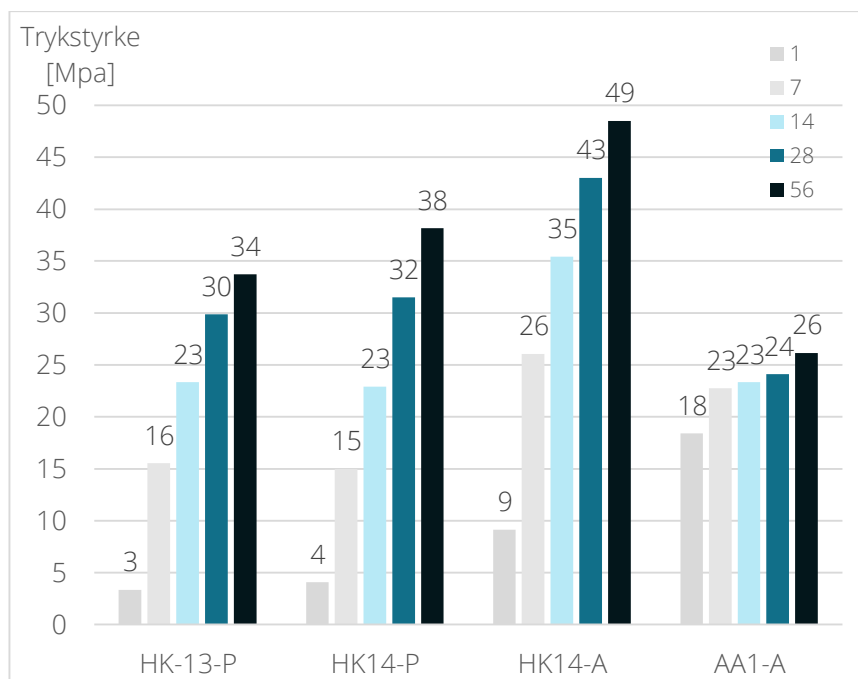
4.5 Mekaniske egenskaber

Trykstyrke blev bestemt efter 5 terminer: 1, 7, 14, 28 og 56 modenhedsdøgn. Resultater kan ses i figur 6 og 7. E-modul blev bestemt efter 28 dage, se figur 8.

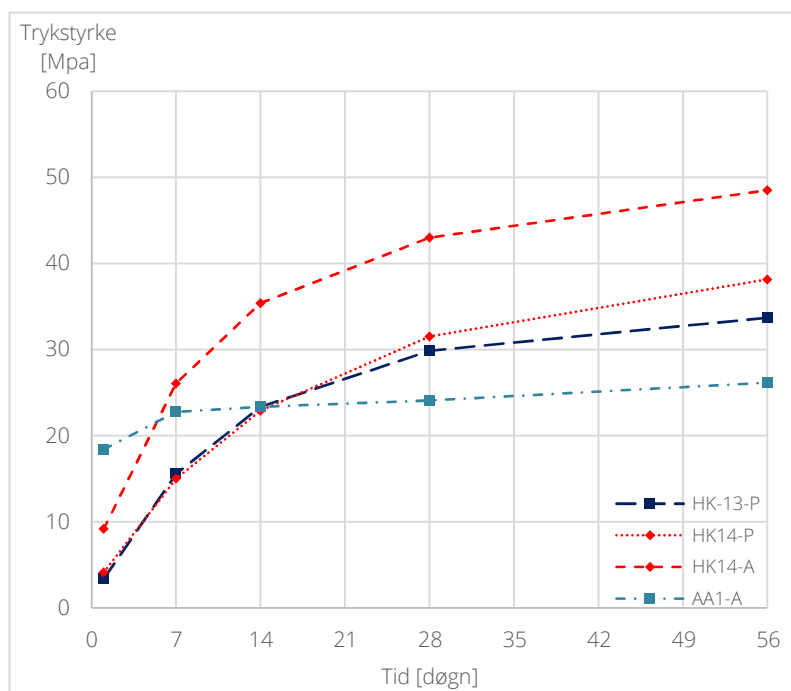
HK13-P (metakaolin) og HK14-P (kalcineret moler) har samme trykstyrkeudvikling, dog opnår HK14-P en lidt højere trykstyrke ved 56 dage. Styrke udvikler sig relativt langsomt til en start, 3 MPa efter 1 døgn og 15 MPa efter 7 døgn, men forsætter med god hastighed og når 30 MPa efter 28 døgn og endnu højere værdier efter 56 døgn - se Figur 6 og 7. Det ser ud til, at kalcineret moler og metakaolin har sammen indflydelse på betonens trykstyrke, når $v/b = 0,6$ og forholdet mellem kalcineret ler og kalkfiller er 1.

For både HK13-P og HK14-P følger de målte E-moduler Eurocode-modellen (DS 423.25 or EN 12390-13), se Figur 8. Det vurderes, at HK13-P og HK14-P begge viser et godt potentiale til anvendelse i fabriksbeton og muligvis også visse betonelementer som f.eks. P25/30-beton.

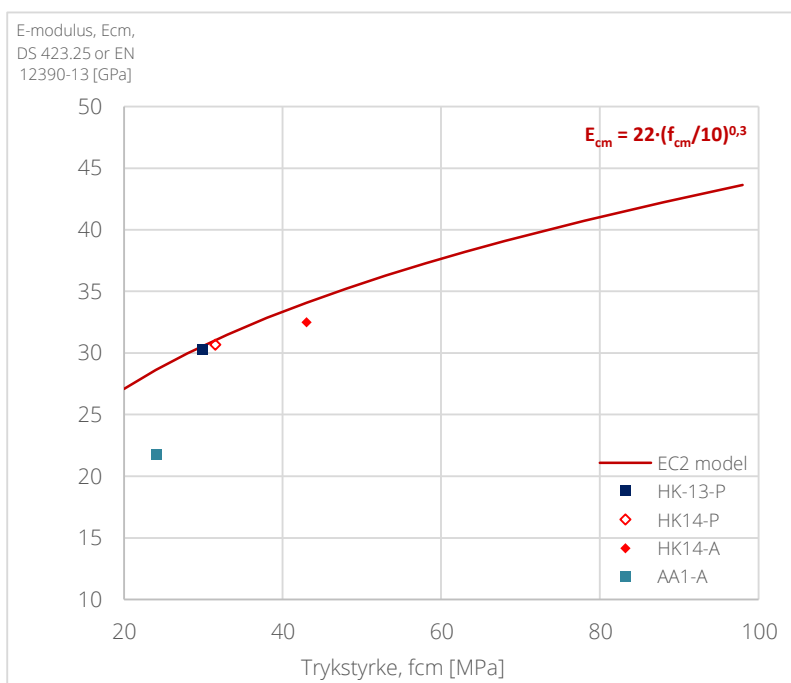
HK14-A (kalcineret moler) betonen opnår en trykstyrke på 43 MPa efter 28 døgn (48 MPa efter 56 døgn), og kan dermed opfylde dermed krav til styrkeklasse C35/45. Det målte E-modul ser ud til at følge Eurocode-modellen, se Figur 8.



Figur 6 Trykstyrke af betoner



Figur 7 Udvikling i trykstyrke over tid



Figur 8 E-modul efter 28 dage



Styrkeudviklingen for AA1-A (metakaolin) viser en god 1-døgnstyrke (18MPa), men herefter ses en begrænset styrkeudvikling, i forhold til hvad der observeres i traditionel Portland cement baseret beton. Ved 7 døgn opnår AA1-A en styrke på 23MPa og der ses kun en meget begrænset udvikling frem mod 56 døgn (26 MPa ved 56 døgn). Det målte E-modul er ret lavt og følger umiddelbart ikke Eurocode-modellen, se Figur 8.

P. Nath og P.K. Sarker (2016) har i en undersøgelse konkluderet, at for lignende trykstyrke, er elasticitetsmodul for geopolymerbeton fundet at være omkring 25-30 % mindre end det for OPC-betonen efter 28 dage. De samme forfattere har også fundet, at efter 90 dage, mens OPC opnåede en trykstyrke på 50 MPa og en elasticitetsmodul på 33,4 GPa, opnåede geopolymérbetoner med lignende styrke en elasticitetsmodul i intervallet 23,0–26,2 GPa, hvilket er 21,6–31,1 % mindre end værdien for OPC-beton. En enkelt måling er naturligvis for lidt at konkludere på, men E-modul af beton med alkaliaktiveret binder bør umiddelbart undersøges nærmere.

AA1-A skal testes yderligere for fuldt ud at forstå dens mekaniske egenskaber, muligheder og begrænsninger. Det er desuden muligt, at en anden kombination af aktivatorer (vandglas og kaustisk soda) kan føre til en bedre mekanisk ydeevne.

4.6 Holdbarhedstests for A-betoner

Kloridmigration (NT Build 492) og frostbestandighed blev bestemt for HK14-A og AA1-A, se Tabel 13 og Tabel 14. Derudover er der også udført luftporeanalyse (EN 480-11) af prøverne i forbindelse med test af frostbestandighed (SS 137244).

Kloridmigration blev målt efter tre terminer: 28, 56 og 91 dage, se Tabel 13. Kloridmigrationskoefficienten er en indikator for betons holdbarhed i forhold til modstand mod kloridindtrængning. HK14-A viser en fremragende ydeevne i henhold til kloridmigration med en koefficient af $3.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ efter 28 døgn og $0.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ efter 91 døgn. Dette er meget lave værdier særligt når v/b tages i betragtning. Kloridmigreringskoefficient for CEM I er omkring 11 og $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ efter henholdsvis 28 dage og 91 dage og for FutureCEM-beton også omkring 9 og $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ efter henholdsvis 28 og 91 dage. Værdier er også lavere end hvad der opnås for Solidcement og for den sags skyld slaggecement.

Kloridmigration for AA1-A kunne desværre ikke måles. Processen ved test af beton for kloridmigration er at et elektriske potentiale påføres uniaksialt hen over prøven, og kloridionerne herved bliver drevet ind i prøven. Prøven spaltes efter et stykke tid aksialt og en sølvnitratopløsning påsprøjtes den friske brudflade. For AA-beton kunne kloridgennemtrængningsdybden ikke måles ud fra det synlige farveskift mellem beton med klorid (hvidt sølvklorid dannes) og beton uden klorid, og derfor kunne en kloridmigrationskoefficient ikke beregnes ud fra indtrængningsdybden. Ingen front kunne identificeres.

Årsagen bag kendes ikke med sikkerhed, men det kan være, at kloriderne passerede gennem prøven uden kloridbinding, eller at effekten i farveændring med sølvnitrat ikke kan skelnes i geopolymerbetonen. Men da der skulle påføres meget beskeden spænding (10V) for at drive migrationen og betonen også har ret lav styrke (høj porøsitet) er det nærliggende at tro at klorider nemt passere igennem prø-



ven uden binding/ophobning, det siger at de har fuldt penetreret prøven.

Tabel 13 Kloridmigration resultater (NT Build 492)

Navn	D_{nssm} 28 døgn	D_{nssm} 56 døgn	D_{nssm} 91 døgn
	$[x 10^{-12} m^2/s]$	$[x 10^{-12} m^2/s]$	$[x 10^{-12} m^2/s]$
HK14-A	3.8	0.8	0.3
AA1-A	NaN	NaN	NaN

Resultater fra luftporeanalysen og afskalningstest kan findes i Tabel 14 og luftporeanalyser billeder kan ses i Figur 11 og Figur 12 i bilaget. Hverken HK14-A og AA1-A er frostbestandige. Kravet til frostbestandig beton i Danmark er normalt en afskalning på mindre end 0,20 kg/m². For HK14-A blev afskalningen målt til 1,74 kg/m² efter 56 cyklusser og for AA1-A blev testen stoppet allerede efter 14 cyklusser på grund af den høje afskalning. Det er velkendt, at beton med en høj erstatning af cement har en udfordring med at bestå afskalningstesten. Det vides ikke om der kan blandes luft i AA-beton og om det vil have nogen effekt på frostbestandigheden.

Tabel 14 Luftporeanalyse og frostaftskalling (EN 480-11 og SS 137244)

HK14	HK14-A	AA1-A
Luft [%]	6.9	4.1
Afstandsfaktor [mm]	0.14	0.21
Specifik overflade [mm ⁻¹]	32	28
Afskalling 7 cyklusser [kg/m ²]	0.59	4.27
Afskalling 14 cyklusser [kg/m ²]	0.99	8.84
Afskalling 28 cyklusser [kg/m ²]	1.33	-
Afskalling 42 cyklusser [kg/m ²]	1.51	-
Afskalling 56 cyklusser [kg/m ²]	1.74	-
M ₅₆ /M ₂₈	1.30	-



5. Bilag

Frisk egenskaber af betonerne



Figur 9 HK 13-P og HK14-P

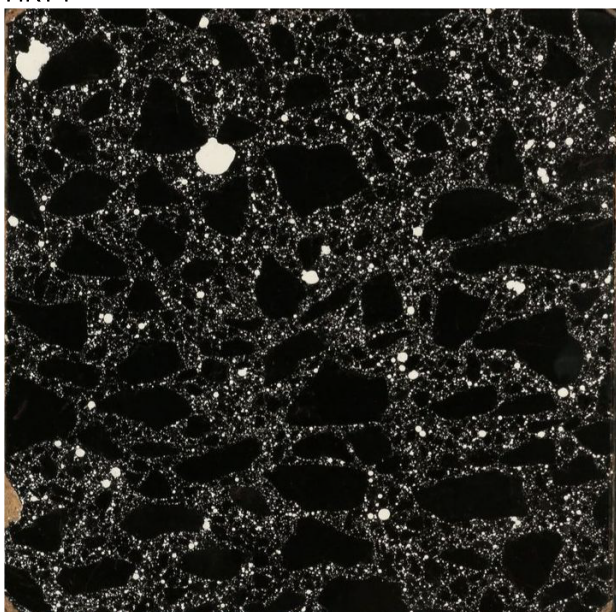


Figur 10 HK 14-A og AA1-A. Bemærk, at AA1-A blev taget ud af keglen med kraft, og det er derfor, det ser ud til, at det har noget sætmål.



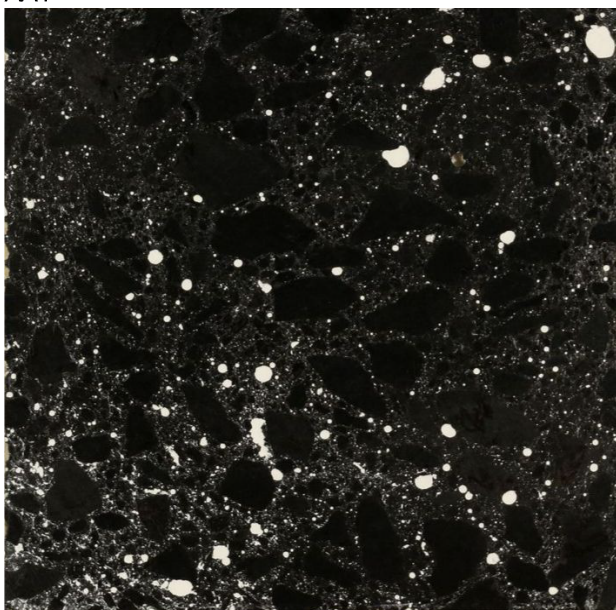
Billeder af Luftporeanalyse test

HK14

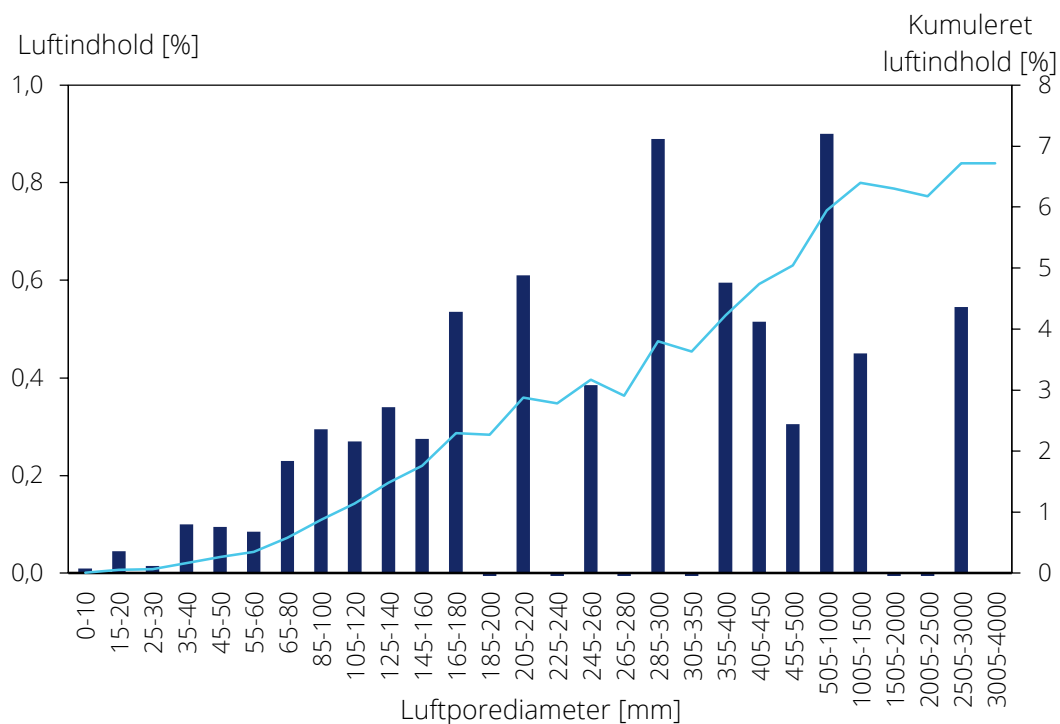


Figur 11 Luftporeanalyse billede af HK14

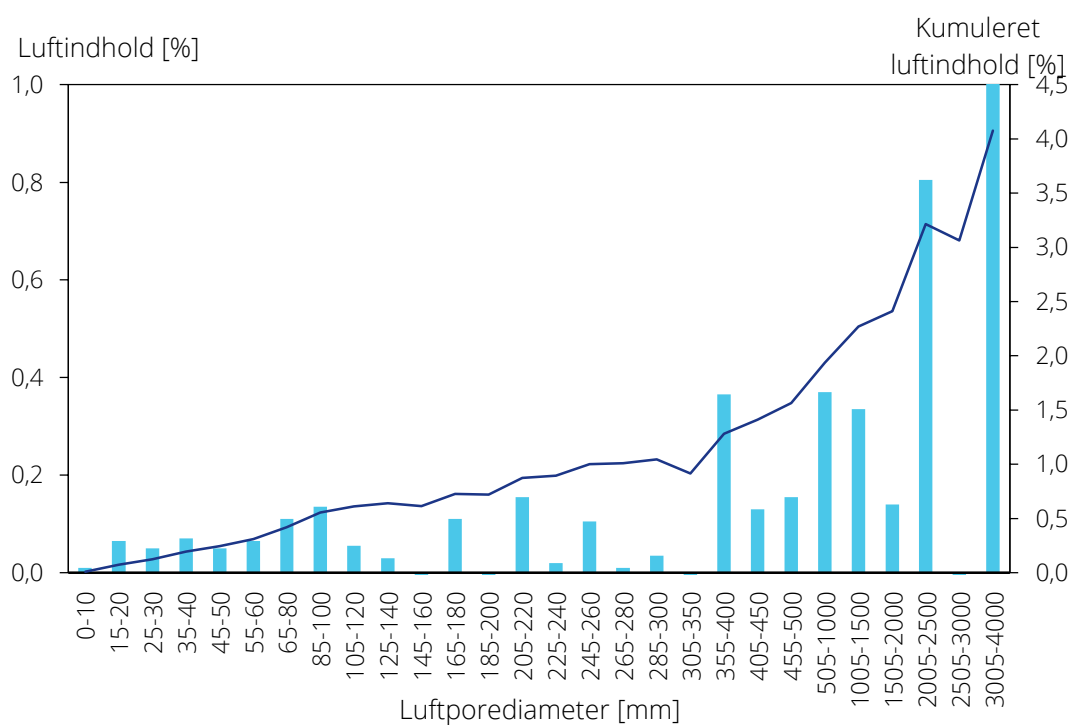
AA1



Figur 12 Luftporeanalyse billede af AA1



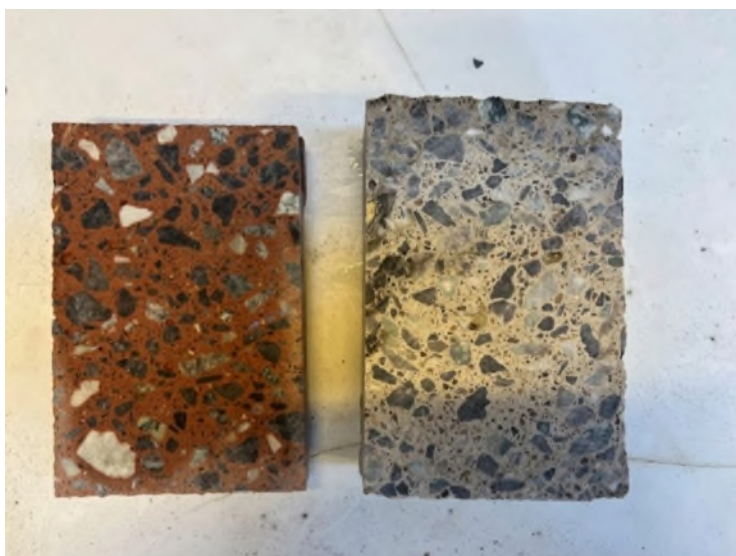
Figur 13 Luftporeanalyse af HK14-A



Figur 14 Luftporeanalyse af AA1-A



Plansliber af HK14-A og AA1-A betoner



Billede af AA1-A beton efter frostbestandighed

