

ALTERNATIVE BINDERE TIL BETON

Made in More Sustainable Concrete, 28. november 2024
Dorthe Mathiesen, chef for Dansk Beton, dma@di.dk





Opgaven for betonbranchen:

Beton skal blive CO₂ neutralt

Udfordringen nu og her

Betonbranchen er godt på vej

Cement har fortsat den største betydning for betonens CO₂ aftryk

CO₁

Udfordringen nu og her

Betonbranchen er godt på vej

Cement har fortsat den største betydning for betonens CO2 aftryk

01

Omstilling til CO2 neutral cementproduktion er i gang

Men det tager nogle år

Kravene strammes hurtigt både fra reguleringer og fra bygherrer

02

Udfordringen nu og her

Betonbranchen er godt på vej

Cement har fortsat den største betydning for betonens CO2 aftryk

C1

Omstilling til CO2 neutral cementproduktion er i gang

Men det tager nogle år

Kravene strammes hurtigt både fra reguleringer og fra bygherrer

C2

Tiltag på den korte bane

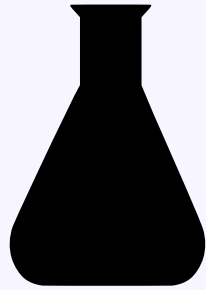
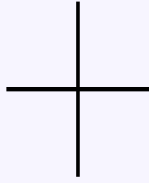
- Optimering af betonrecepter
- Nedsætte styrken hvis muligt
- Mere genanvendelse (og genbrug)
- **Anvende alternativer til cement**

C3

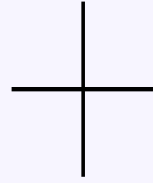
Beton, cement, cementklinker, bindere...



Reaktivt pulver



Væske



Tilslag



Bindersystem



Cementklinker



Cement



Reaktive pulvere

- Cement
- Flyveaske
- Mikrosilica
- Kalkfiller
- Granuleret højojnsslagge
- Kalcineret ler
- Bioaske
- Biokulflyveaske
- Depotflyveaske
- Biokulfiller
- X-SCM (fx CemCut XCM 50)
- Vulkansk aske
- Naturlige puzzolaner
- Osv
- Osv



Reaktive pulvere

- Cement
- Flyveaske
- Mikrosilica
- Kalkfiller
- Granuleret højovnslagg
- Kalcineret lerprodukt
- Bioaske
- Biokulflyveaske
- Depotflyveaske
- Biokulfiller
- X-SCM (fx CemCut XCM 50)
- Vulkansk aske
- Naturlige puzzolaner
- Osv
- Osv



Det kan godt lade sig gøre at få ændret en standard

Formålet med Dansk Betons projekt ”Alternative bindere til beton”

Gennem **skrivebordsstudie**, **laboratorieundersøgelser** og udvalgte fuldskalaafprøvninger at udvælge 2-3 af de mest lovende alternative bindersystemer til den danske betonindustri, der

1. Giver en markant reduktion af CO₂
2. Kan anvendes til flere forskellige betonprodukter
3. Er skalérbart og som minimum kan anvendes til 10% af al beton i DK
4. Giver tilstrækkelig gode tekniske egenskaber i betonen



Bindersystemer – 5 familier

Portland cement free

Klinker med lavt CO₂-aftryk

Bellite, Y'elimate, Ferrite (BYF) or wollastonite (CS)

Systemer med høj klinkerestatning

Portlandklinker + SCMer* + fillere (+ aktivatorer)

Alkali-aktiverede systemer
(geopolymerer)

SCMer* som fx kalcineret ler, flyveaske, slagge +
base(r)

Syre-aktiverede systemer

Fosforsyre + anortosit

Bio-baserede systemer

Na-alginat eller CaCO₃ udfældning vha. bakterier eller
enzymer

*SCM = Supplementary Cementitious Material

Bindersystemer – 3 familier udvalgt til litteraturstudium

Klinker med lavt CO₂-aftryk

Systemer med høj klinkerestatning

Alkali-aktiverede systemer
geopolymerer

Syre-aktiverede systemer

Bio-baserede systemer

Højere erstatning ($\geq 60\%$) end hvad vi allerede gør

Aktivering af andre bindere end vi har erfaring med

Spændende men også umodent område

Portland cement free

Bindersystemer – 2 udvalgte familier til mørtelforsøg

Klinker med lavt CO₂-aftryk

Systemer med høj klinkererstatning

Alkali-aktiverede systemer
geopolymerer

Syre-aktiverede systemer

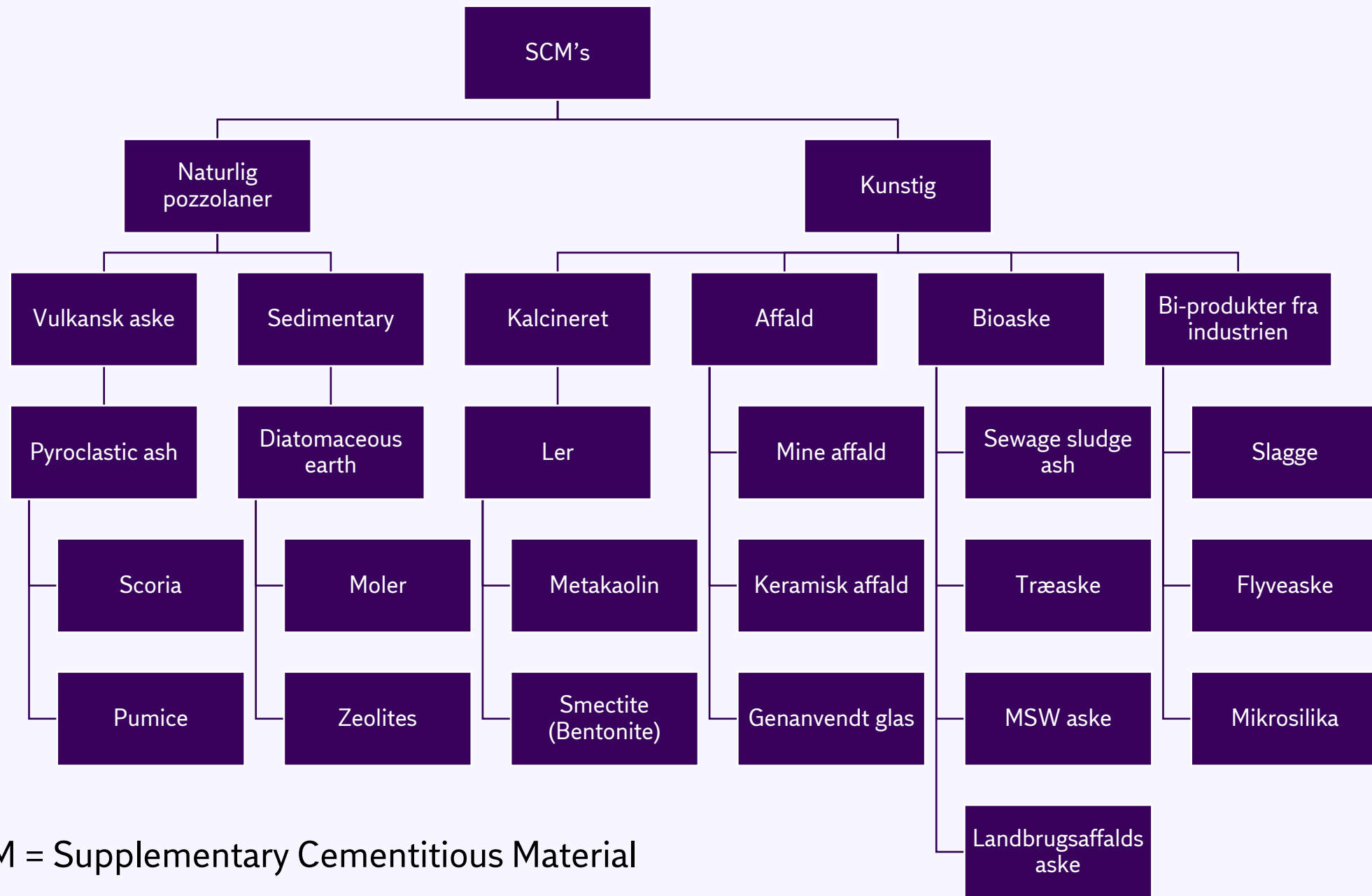
Bio-baserede systemer

Højere erstatning ($\geq 60\%$) end hvad vi allerede gør

Aktivering af andre bindere end vi har erfaring med

Portland cement free

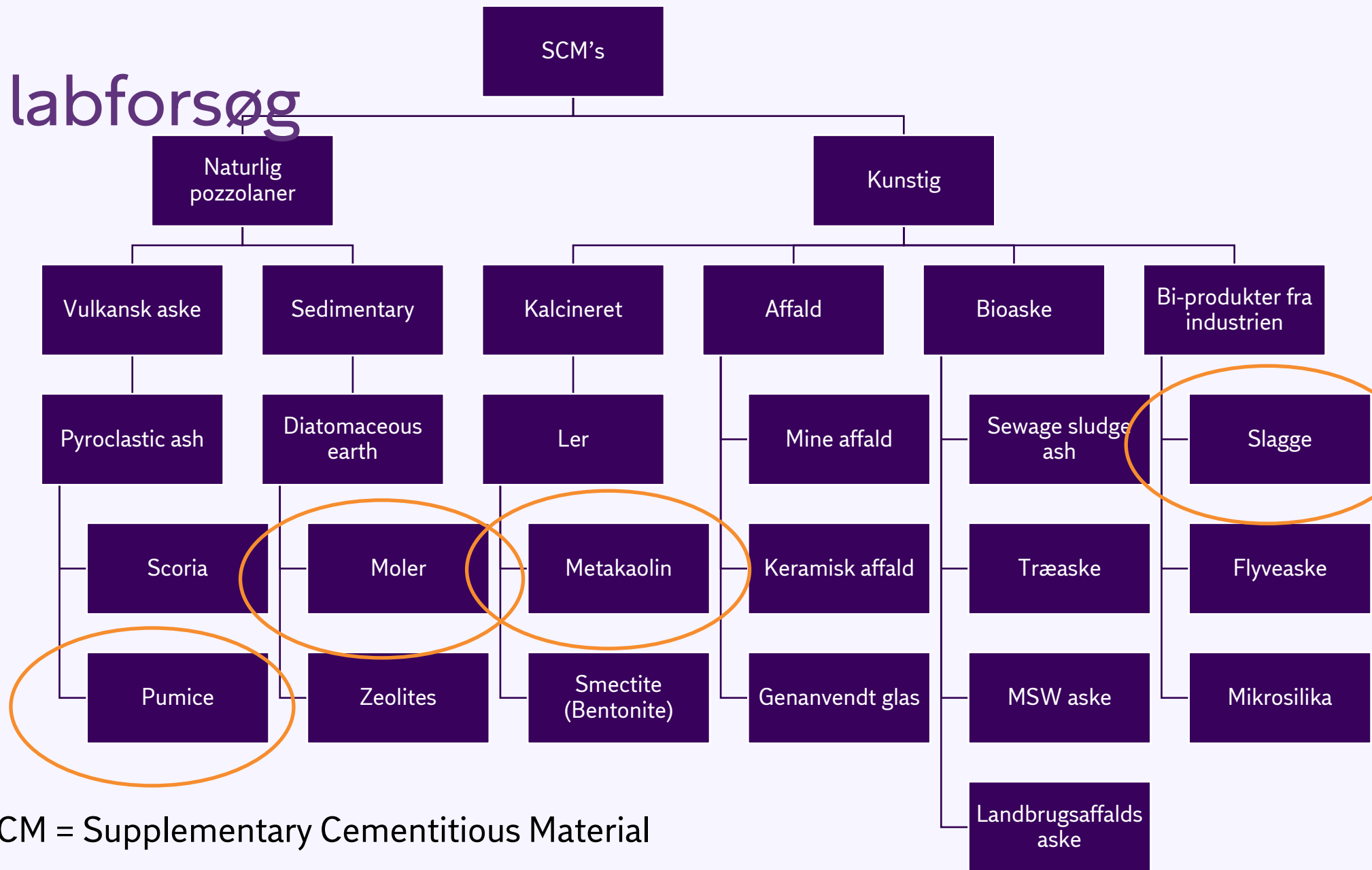
SCM'er



*SCM = Supplementary Cementitious Material

SCM'er

– valgt til labforsøg

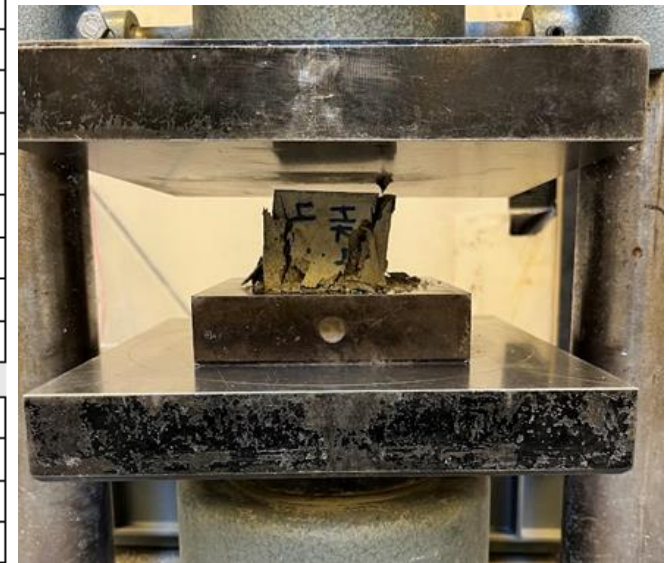


*SCM = Supplementary Cementitious Material

Mørtelforsøg

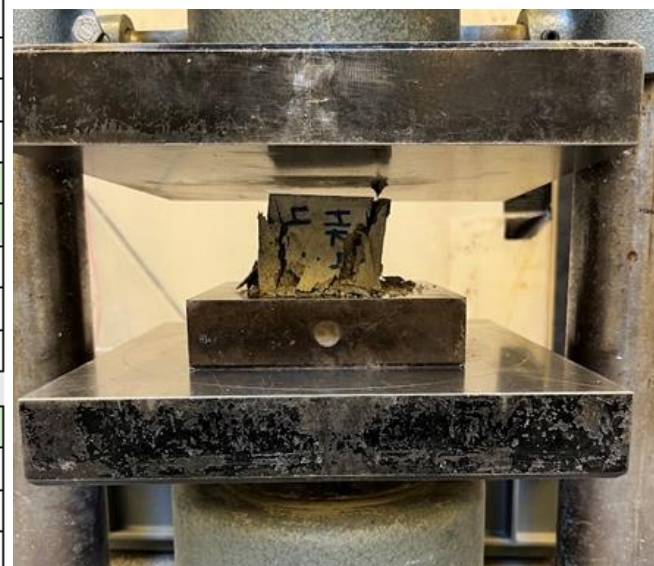
Laboratorieforsøg – Mørtel (EN 196)

ID	Bindersystem	Klinkererstatning	Konsistens		Trykstyrke [Mpa]		
			SP tilsat	[mm]	1 døgn	7 døgn	28 døgn
HK0	100% Rapid cement (reference)	0%	nej	187	21	51	61
HK1	30% Rapid cement + 60% vulkansk aske + 10% kalk filler	70%	nej	142	2,7	11,0	20,5
HK2	40% Rapid cement + 50% vulkansk aske + 10% kalk filler	60%	nej	152	4,6	16,5	26,7
HK3	40% Rapid cement + 40% vulkansk aske + 20% kalk filler	60%	nej	153	5,0	17,2	27,6
HK4	30% Rapid cement + 60% metakaolin + 10% kalk filler	70%	ja - 2%	100	2,6	20,2	31,0
HK5	30% Rapid cement + 50% metakaolin + 20% kalk filler	70%	ja - 2%	113	3,0	19,0	30,6
HK6	40% Rapid cement + 50% metakaolin + 10% kalk filler	60%	ja - 2%	142	4,1	25,4	43,1
HK7	40% Rapid cement + 40% metakaolin + 20% kalk filler	60%	ja - 2%	168	4,2	25,1	42,9
HK8	30% Rapid cement + 60% kalcineret moler + 10% kalk filler	70%	ja - 4%	133	0,9	20,8	50,4
HK9	40% Rapid cement + 50% kalcineret moler + 10% kalk filler	60%	ja - 2%	128	6,8	30,1	53,2
HK10	40% Rapid cement + 40% kalcineret moler + 20% kalk filler	60%	ja - 2%	197	6,8	29,5	53,9
HK11	30% Rapid cement + 70% højovns slagge	70%	nej	191	2,7	20,2	43,5
HK12	50% Rapid cement + 50% højovns slagge	50%	nej	192	6,5	26,8	46,8
HK13	40% Rapid cement + 30% metakaolin + 30% kalk filler	60%	ja - 2%	200	5,1	24,5	49,3
HK14	40% Rapid cement + 30% kalcineret moler + 30% kalk filler	60%	ja - 2%	250	7,3	30,9	59,9
HK15	30% Rapid cement + 50% kalcineret moler + 20% kalk filler	70%	ja - 2%	180	4,9	22,5	53,8
HK6-acc1	40% Rapid cement + 50% metakaolin + 10% kalk filler + acc1	60%	ja - 2%	123	4,3	27,6	45,1
HK6-acc2	40% Rapid cement + 50% metakaolin + 10% kalk filler + acc2	60%	ja - 2%	123	7,9	32,7	46,2
AA1	82% Kalcineret ler (MK) + 12% vandglas + 6% kaustisk soda	"100%"	nej	123	18,2	33,6	37,7
AA2	82% Kalcineret ler (MK) + 10% vandglas + 8% kaustisk soda	"100%"	nej	130	17,9	27,6	29,9
AA3	85% Vulkansk aske + 10% vandglas + 5% kaustisk soda	"100%"	nej	128	1,0	5,9	5,6
AA4	85% Vulkansk aske + 8% vandglas + 6% kaustisk soda	"100%"	nej	120	1,2	3,4	2,3
AA5	71% Moler + 20% vandglas + 9% kaustisk soda	"100%"	nej	123	Ikke udstøbelig		
AA6	80% Moler + 12,5% vandglas + 7,5% kaustisk soda	"100%"	nej	123	Hærdede ikke		



Laboratorieforsøg – Mørtel (EN 196)

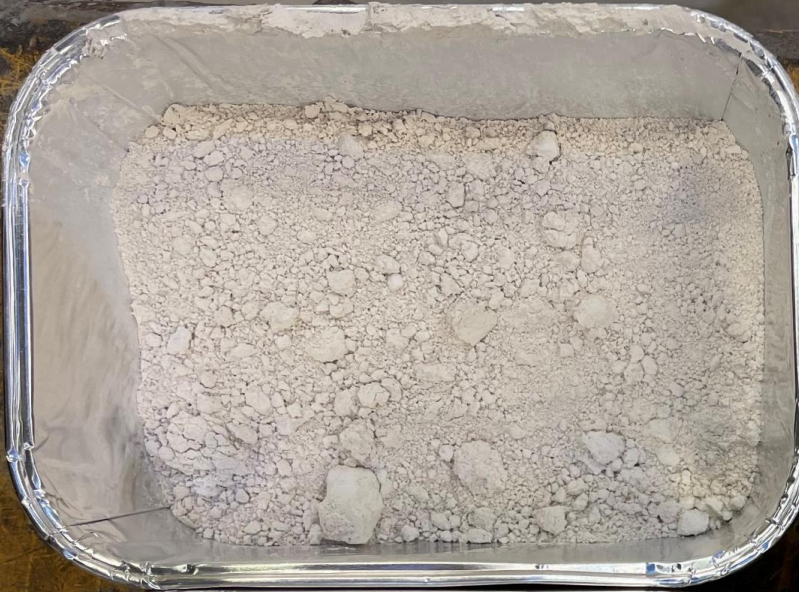
ID	Bindersystem	Klinkererstatning	Konsistens		Trykstyrke [Mpa]		
			SP tilsat	[mm]	1 døgn	7 døgn	28 døgn
HK0	100% Rapid cement (reference)	0%	nej	187	21	51	61
HK1	30% Rapid cement + 60% vulkansk aske + 10% kalk filler	70%	nej	142	2,7	11,0	20,5
HK2	40% Rapid cement + 50% vulkansk aske + 10% kalk filler	60%	nej	152	4,6	16,5	26,7
HK3	40% Rapid cement + 40% vulkansk aske + 20% kalk filler	60%	nej	153	5,0	17,2	27,6
HK4	30% Rapid cement + 60% metakaolin + 10% kalk filler	70%	ja - 2%	100	2,6	20,2	31,0
HK5	30% Rapid cement + 50% metakaolin + 20% kalk filler	70%	ja - 2%	113	3,0	19,0	30,6
HK6	40% Rapid cement + 50% metakaolin + 10% kalk filler	60%	ja - 2%	142	4,1	25,4	43,1
HK7	40% Rapid cement + 40% metakaolin + 20% kalk filler	60%	ja - 2%	168	4,2	25,1	42,9
HK8	30% Rapid cement + 60% <u>calcineret moler</u> + 10% kalk filler	70%	ja - 4%	133	0,9	20,8	50,4
HK9	40% Rapid cement + 50% <u>calcineret moler</u> + 10% kalk filler	60%	ja - 2%	128	6,8	30,1	53,2
HK10	40% Rapid cement + 40% <u>calcineret moler</u> + 20% kalk filler	60%	ja - 2%	197	6,8	29,5	53,9
HK11	30% Rapid cement + 70% højovns slagge	70%	nej	191	2,7	20,2	43,5
HK12	50% Rapid cement + 50% højovns slagge	50%	nej	192	6,5	26,8	46,8
HK13	40% Rapid cement + 30% metakaolin + 30% kalk filler	60%	ja - 2%	200	5,1	24,5	49,3
HK14	40% Rapid cement + 30% <u>calcineret moler</u> + 30% kalk filler	60%	ja - 2%	250	7,3	30,9	59,9
HK15	30% Rapid cement + 50% <u>calcineret moler</u> + 20% kalk filler	70%	ja - 2%	180	4,9	22,5	53,8
HK6-acc1	40% Rapid cement + 50% metakaolin + 10% kalk filler + acc1	60%	ja - 2%	123	4,3	27,6	45,1
HK6-acc2	40% Rapid cement + 50% metakaolin + 10% kalk filler + acc2	60%	ja - 2%	123	7,9	32,7	46,2
AA1	82% <u>Calcineret ler (MK)</u> + 12% vandglas + 6% kaustisk soda	"100%"	nej	123	18,2	33,6	37,7
AA2	82% <u>Calcineret ler (MK)</u> + 10% vandglas + 8% kaustisk soda	"100%"	nej	130	17,9	27,6	29,9
AA3	85% Vulkansk aske + 10% vandglas + 5% kaustisk soda	"100%"	nej	128	1,0	5,9	5,6
AA4	85% Vulkansk aske + 8% vandglas + 6% kaustisk soda	"100%"	nej	120	1,2	3,4	2,3
AA5	71% Moler + 20% vandglas + 9% kaustisk soda	"100%"	nej	123	Ikke <u>udstøbelig</u>		
AA6	80% Moler + 12,5% vandglas + 7,5% kaustisk soda	"100%"	nej	123	Hærdede ikke		





Betonforsøg

Metakaolin



Rapid
cement



Kalcineret
moler



Kalkfiller



Betonsammensætninger - GWP

**Alkaliaktiveret
Metakaolin
C20**

Delmateriale	Nominel v.o.t (kg/m ³)
Rapidcement	0,0
Metakaolin	370,3
Kalkfiller	0
Sand	746,1
Knust 4/8	214,7
Knust 8/16	805,1
Vandglas	160,1
NaOH	106,7
Vand	0
Luft	3%
Total	2403
"v/b"	0,50

CO₂e = 174 kg/m³

**CEM:Moler:Kalk
40:30:30
C35**

Delmateriale	Nominel v.o.t (kg/m ³)
Rapidcement	155,2
Kalcineret moler	116,4
Kalkfiller	116,4
Sand	719,2
Knust 4/8	206,9
Knust 8/16	776,0
Superplast	4,27
Luftindblanding	3,53
Vand	160,1
Luft	6,5%
Total	2258
v/b	0,43

CO₂e = 170 kg/m³

**CEM:Moler:Kalk
40:30:30
C25**

Delmateriale	Nominel v.o.t (kg/m ³)
Rapidcement	125,5
Kalcineret moler	94,1
Kalk filler	94,1
Sand	837,7
Knust 4/8	224,0
Knust 8/16	763,7
Superplast	2,82
Luftindblanding	0
Vand	186,1
Luft	2%
Total	2328
v/b	0,60

CO₂e = 139 kg/m³

**CEM:Metakaolin:Kalk
40:30:30
C25**

Delmateriale	Nominel v.o.t (kg/m ³)
Rapidcement	125,2
Metakaolin	93,9
Kalk filler	93,9
Sand	837,7
Knust 4/8	224,0
Knust 8/16	763,7
Superplast	5,01
Luftindblanding	0
Vand	184,0
Luft	2%
Total	2327
v/b	0,60

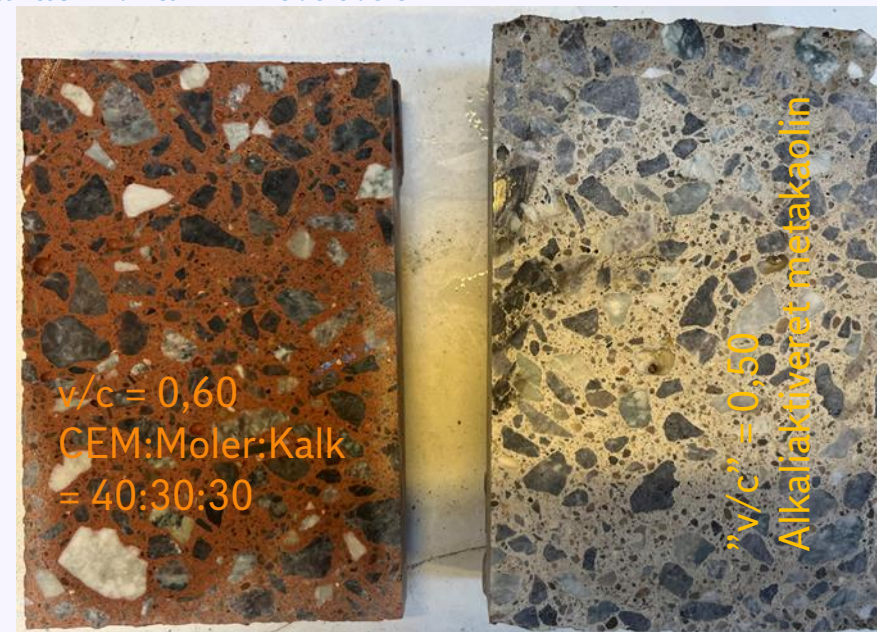
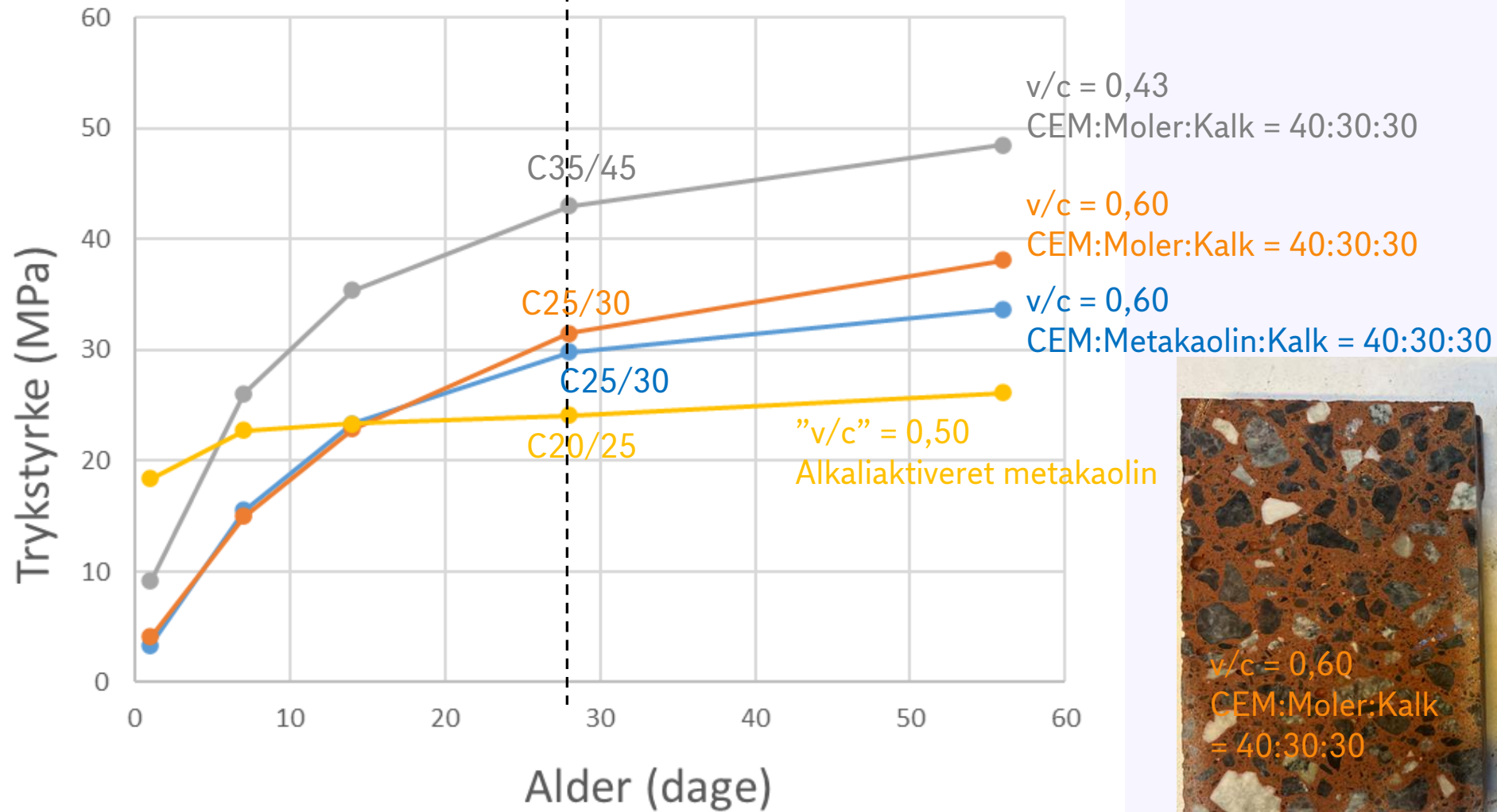
CO₂e = 140 kg/m³

Frisk beton



Betontype	Egenskab		
	Sætmål (mm)	Densitet (kg/m ³)	Luftindhold (%)
C25 - Rapid:Moler:Kalk	200	2350	2,4
C25 - Rapid:Metakaolin:Kalk	170	2370	2,3
C35 - Rapid:Moler:Kalk	190	2280	6,2
C20 - Alkaliaktiveret metakaolin	0	2360	3,1

Styrkeudvikling - beton



Holdbarhed – beton- modstand overfor kloridindtrængning

Betontype	Chloridmigrationskoefficient [x 10 ⁻¹² m ⁻² /s]		
	28d	56d	91d
C35 - Rapid:Moler:Kalk	3,8	0,8	0,3
C20 - Alkaliaktiveret metakaolin	NaN	NaN	NaN



Lav styrke - fuld gennemtrængning af klorider ved lav spænding – måske ikke rigtig prøvningsmetode



Holdbarhed – beton - frostbestandighed

Betontype	Frost, afskalling (kg/m ²)					
	m7	m14	m28	m42	m56	m56/m28
C35 - Rapid:Moler:Kalk	0,59	0,99	1,33	1,51	1,74	1,3
C20 - Alkaliaktiveret metakaolin	4,28	8,84	-	-	-	-



Hvad har vi lært ?

- Der er andre muligheder end flyveaske. Vi vil se flere alternative bindere i fremtiden – beton vil komme i endnu flere forskellige udgaver
- Standarder kan godt ændres !
- Kalcineret ler bliver et globalt vigtigt materiale for cement- og betonindustrien – men der er udfordringer med frostbestandighed, når vi kommer højt op i lerindhold
- Biobaserede bindere er under udvikling med spændende perspektiver

Nu skal vi i gang med fuldskala test



Tak for opmærksomheden