

# GRØN BETON II

## Innovationskonsortium (2014-2018) Grøn Omstilling af Cement- og Betonproduktion Innovationsfonden

### Parter

#### Virksomhedsparter

- Aalborg Portland A/S
- Sweco A/S
- Rambøll Danmark A/S
- MT Højgaard A/S
- Unicon A/S
- Dansk Beton Fabriksbetonforeningen
  - A/S Ikast Betonvarefabrik
  - Betonværket Brønderslev A/S
  - DK Beton A/S
  - Frejlev Cementstøberi A/S
  - Gammelrand Beton A/S
  - IBF Beton Nordvestjylland A/S
  - K.G. Beton A/S
  - NCC Roads, Bornholms Betonværk A/S
  - Skagen Cementstøberi A/S
  - Thisted-Fjerritslev Cementvarefabrik A/S
  - Unicon A/S
  - VK Beton og Byggemarked A/S
  - Wewers Belægningssten A/S

#### Vidensspredningspartner

- Teknologisk Institut
- Københavns Erhvervsakademi
- Erhvervsakademi Sjælland
- Erhvervsakademiet Lillebælt
- Via University College – Campus Horsens
- Center for Betonuddannelse (AMU Nordjylland)

#### Forskningspart

- DTU Byg

#### Øvrige parter

- Energistyrelsen

#### Bygherrer

- Vejdirektoratet
- Banedanmark
- Femern A/S

#### Associeret netværk

- InnoBYG

## Baggrund og motivation



- Danmark har været et af forgangsløsende indenfor udvikling og anvendelse af grøn betontechnologi bl.a.
  - Grøn beton projekt (1998-2002)
  - FutureCem (2006-2009), højteknologifond
  - SCM-projektet (2011-2014), højteknologifond
  - Tescop (1997-2000), Produktområdeprojektet vedr. betonprodukter (2002-2006), Eco-serve (2003-2006), CO<sub>2</sub> optagelse gennem betons livscyklus (2003-2005)

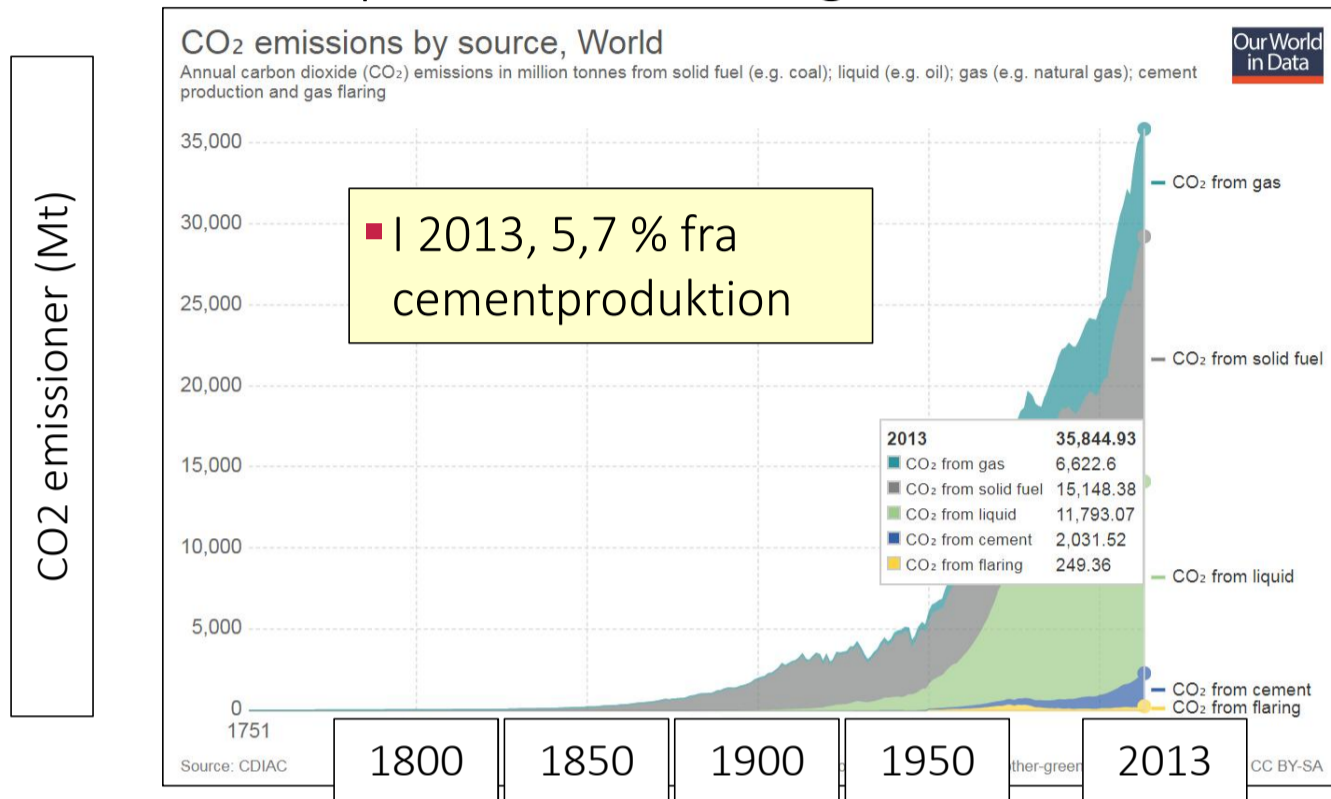
## Baggrund og motivation



- Projektet blev initieret af branchen:
  - Usikkerhed om cementer til danske anlægskonstruktioner. Vejdirektoratet præsentation på Dansk betondag 2009.
  - Aalborg Portland i gang med udvikling af nye cementtyper
  - Planer for udfasning af flyveaske i 2027

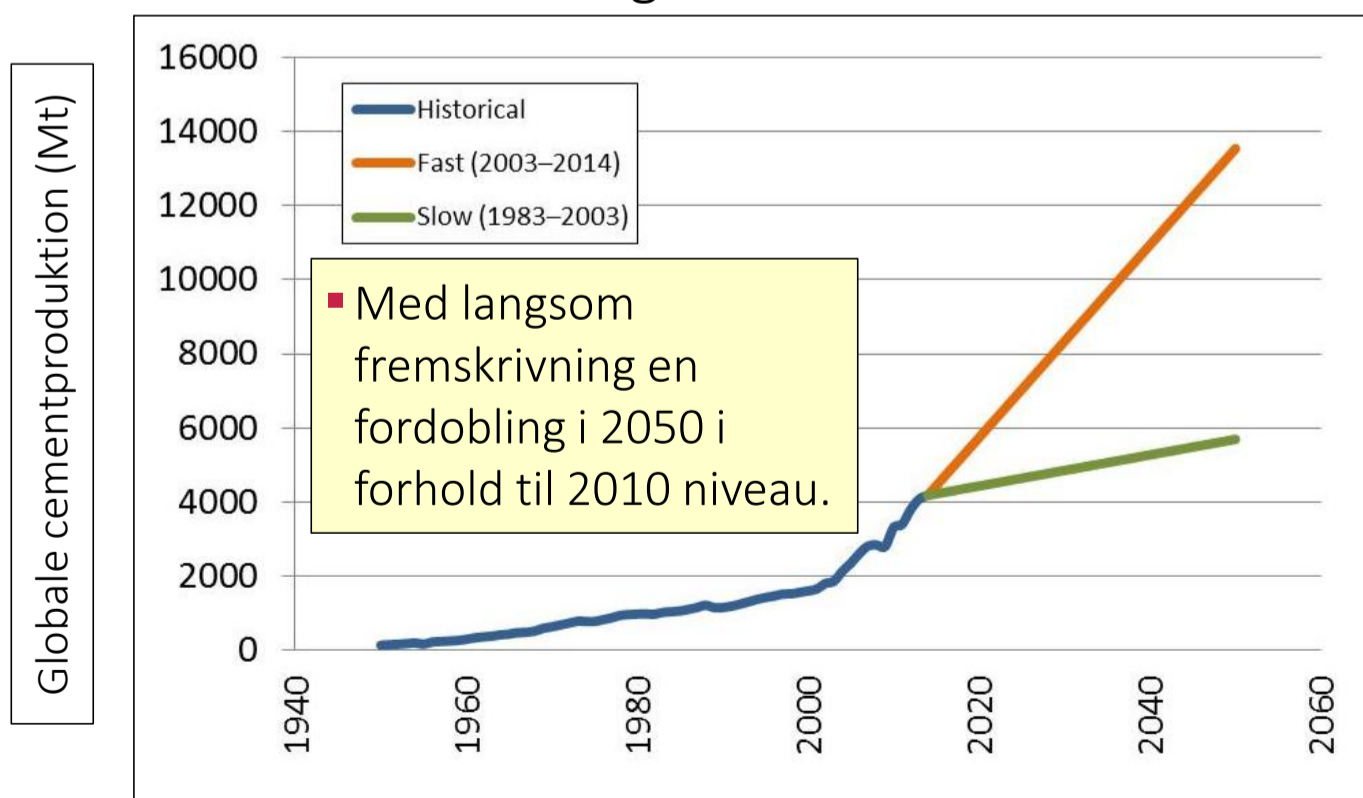
# Baggrund og motivation

## Cementproduktions bidrag



# Baggrund og motivation

## Behov for cement og beton i fremtiden



## Formål

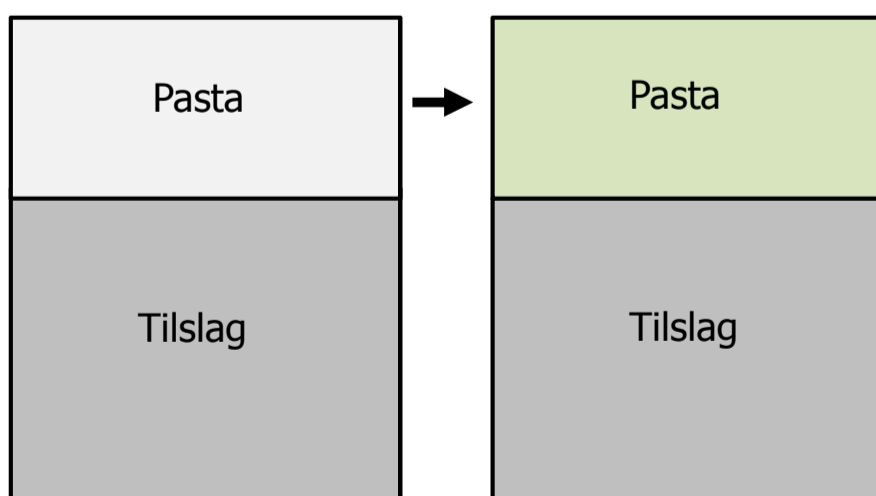


- At tage tråden op fra tidligere projekter med mål om at reducere CO<sub>2</sub>-udledningen fra cementproduktion
- At afhjælpe konsekvenserne af en potentiel mangel på flyveaske til betonproduktion
  - Danmark har haft lang tradition for brug af flyveaske til alle styrke- og miljøklasser
  - Konsekvensen kan blive at CO<sub>2</sub>-udledningen fra betonindustrien vil stige med ca. 25%
- Skabe mulighed for eksport af dansk viden og løsninger indenfor cement-, beton og produktionsteknologi

## Projektets hovedaktiviteter



- Fokus på cement- og bindersystemer



90 % af CO<sub>2</sub> udledning

### Pasta

- Optimere klinkersammensætning
- Erstatte klinker med alternative bindermaterialer

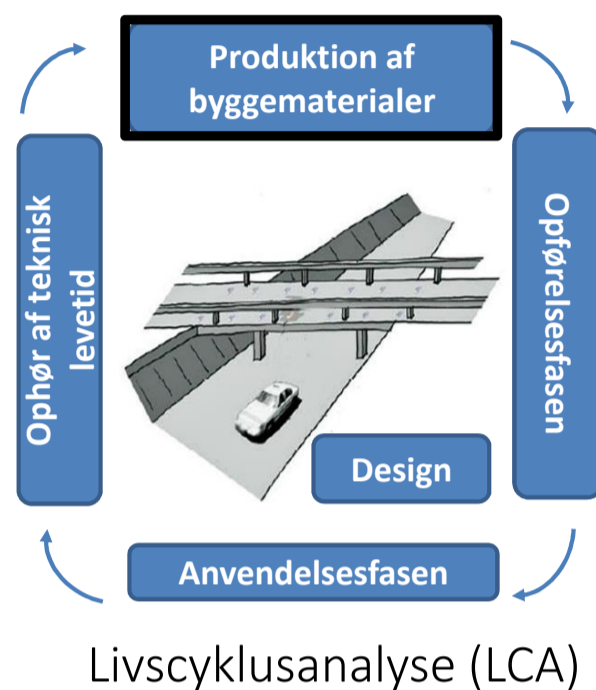
### Beton

- Pakningsoptimering
- Nedknust beton
- Andet

## Projektets hovedaktiviteter



- Fokus på cement- og bindersystemer
- Betonens aftryk skal ses som en del en samlet livscyklusanalyse.
- Sammenligne af miljøaftryk på materialeniveau (MVDer) giver kun mening, hvis egenskaber er sammenlignelige og ikke har væsentlig indflydelse på levetid, opførelse, drift og vedligehold etc.



## Projektets hovedaktiviteter



- Udvalgelse af materialer
- Kemi og transport - udvikling af modeller for langtidsholdbarhed
- Udvikling af optimeringsprocedure for pastasammensætning baseret på funktionsbaseret design
- Dokumentation af betonegenskaber
- Demonstrationsprojekter til anlæg og byggeri
- Etablering af eksponeringspladser
- Implementering af betoner med reduceret miljøaftryk
- Udvikling af betonworkshops for ingeniør- og konstruktørstuderende.



# Udvælgelse af materialer



- Klinker
  - Klinker (rapid)
  - Ny klinker (prøvebatches)
- SCM (Supplementary Cementitious Materials) materialer som erstatning for cementklinker
  - Grå mikrofiller baseret på kridt (kalkfiller)
  - Kalcineret ler
    - Synergi mellem kalkfiller og brændt ler (patent AAP)
  - Skiferaske
  - Flyveaske (inkluderet pga. usikkerhed om tilgængelighed og muligheder for forskellige fremtidige scenarier – fx et nicheprodukt til anlægskonstruktioner).

# Udvælgelse af materialer

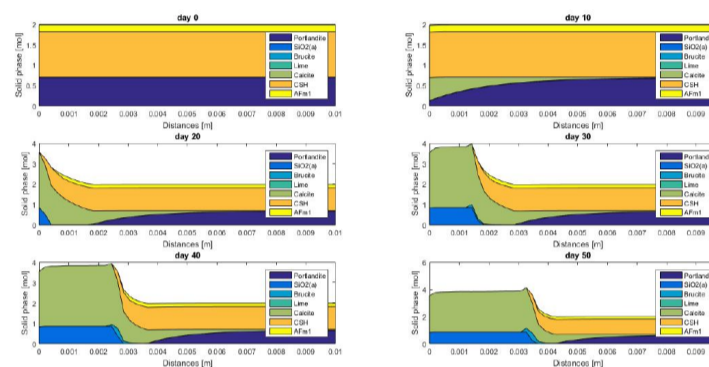
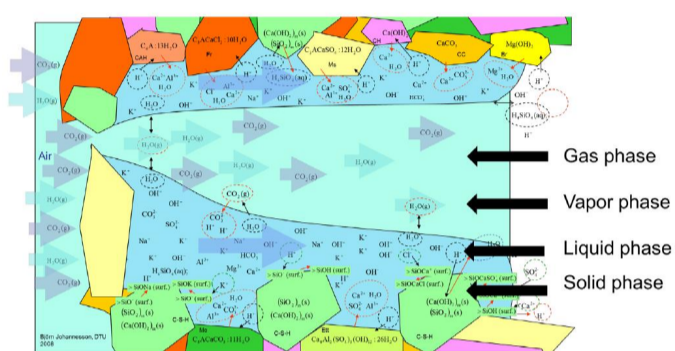


Miljøklasse	Korrosion forårsaget af karbonatisering					Korrosion forårsaget af chlorider						Påvirkning fra frost/ta				Aggressivt kemisk miljø		
	Ingen risiko for korrosion eller påvirkning					Havvand			Chlorider fra andet end havvand									
	P	P	M	M	M	A	A	E	A	E	E	M	A	A	E	M	A	E
Eksponeringsklasse	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Maksimum w/c-forhold <sup>1)</sup>	---	---	0,55	0,55	0,55	0,45	0,45	0,40	0,45	0,40	0,40	0,55	0,45	0,45	0,40	0,55	0,45	0,40
Minimum styrkeklasse for trykstyrke <sup>1)</sup>	C12/15	C12/15	C25/30	C25/30	C25/30	C35/45	C35/45	C40/50	C35/45	C40/50	C40/50	C25/30	C35/45	C35/35	C40/50	C25/30	C35/45	C40/50
Dokumenteret egnede cementtyper CEM	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL II/A-M II/B-M	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL II/A-M II/B-M	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/A-V II/A-V	I/A-V II/A-V II/A-V	I/A-V II/A-V II/A-V	I/A-V II/A-V II/A-V	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL	I/A-V II/B-V II/A-L II/A-LL
Minimum styrkeklasse for cement	32,5	32,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5
Min. luft i hærdnet beton (vol.-%) <sup>2)</sup>	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	3,5	3,5	3,5	---	---	---
Maks. afstandsfaktor (mm) <sup>1)</sup>	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0,20	0,20	0,20	---	---	---

- Kalcineret ler, skiferaske kun tilladt til
  - CEM II/A-M i passiv miljøklasse
  - CEM II/B-M i passiv miljøklasse
- Kan CEM II/A-M eller CEM II/B-M benyttes til miljøklasse M, A og E?
- Kan CEM II/C-M benyttes til miljøklasse P?

# Kemi og transport

- Udvikling af modeller for langtidsholdbarhed med CO2 reducerende cement- og bindersystemer
  - Fasesammensætning og porøsitet
  - Transport
- Forsøg som input og til verificering af modeller



1 DTU Byg, Danmarks Tekniske Universitet

17/08/2016

# Kemi og transport

- Kloridindtrængen for 10 bindersammensætninger

Binder

id	Klinker i RAPID	Ny klinker	Hemi-hydrat	Kalkfil-ler	Skifera-ske	Kalcineret-ler	Flyveaske	CO <sub>2</sub> red [%]
	K1	K2		LL	T	Q	V	
R1	76.6		2.6	4.0			16.7	0
B1		76.5	2.8	4.0			16.7	0
B2		63.7	2.3	15.8			18.2	13
B3		63.7	2.3	15.8			18.2	14
B4		63.7	1.5	7.9	7.9		19.0	17
B5		63.7	1.1	4.0	11.9		19.4	17
B6		63.7	2.3	34.0				6
B7		63.7	2.3	8.5		25.5		13
B8		63.7	2.3			34.0		7
B9		58.9	2.2	15.7		15.7	7.5	18

Geiker M, Weerdt K.D, Garzón S F, Jensen M M, Johannesson B., Michel A, Durability testing of low clinker binders, chloride ingress in similar strength mortars exposed to seawater, NCR Symposium 2017. <sup>14</sup>

## Kemi og transport

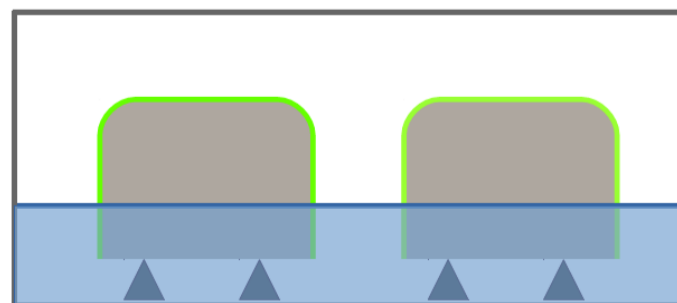
- Kloridindtrængen for 10 bindersammensætninger

id	Klinker i	Ny	Hemi-	Kalkfil-	Skifera	Kalcineret	Flyveaske	CO <sub>2</sub> red
	RAPID							
	K1	K2		LL	T	O	V	
R1	76.6	Reference, flyveaske					16.7	0
B1		76.5	2.8	4.0			16.7	0
B2		Kalkfiller, flyveaske					18.2	13
B3		63.7	2.3	15.8			18.2	14
B4		Kalkfiller, skiferaske, flyveaske					19.0	17
B5		63.7	1.1	4.0	11.9		19.4	17
B6		kalkfiller						6
B7		Kalcineret ler, kalkfiller						13
B8								7
B9		Kalcineret ler, kalkfiller, flyveaske					7.5	18

Geiker M, Weerdt K.D, Garzón S F, Jensen M M, Johannesson B., Michel A, Durability testing of low clinker binders, chloride ingress in similar strength mortars exposed to seawater, NCR Symposium 2017.<sup>15</sup>

## Kemi og transport

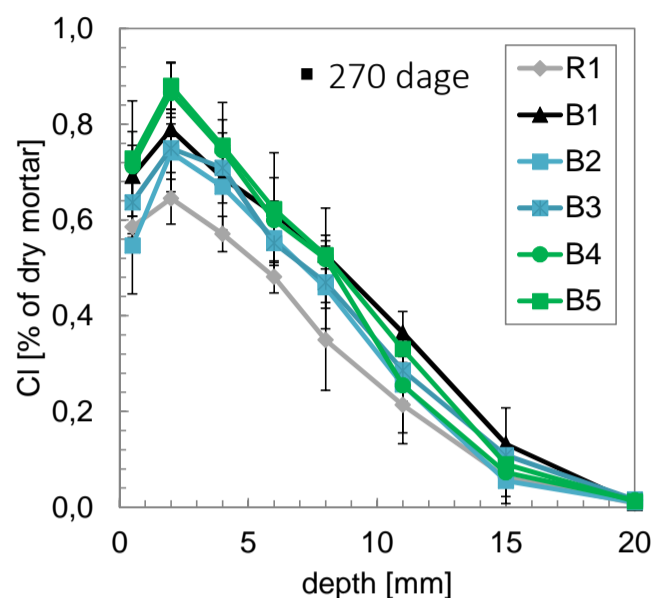
- V/b bestemt, så der opnås ækvivalent 90d trykstyrke
- Eksponeret for kunstig havvand
- 90, 180 og 270 dage
- Væske udskiftet hver 30 dag



Geiker M, Weerdt K.D, Garzón S F, Jensen M M, Johannesson B., Michel A, Durability testing of low clinker binders, chloride ingress in similar strength mortars exposed to seawater, NCR Symposium 2017.<sup>16</sup>

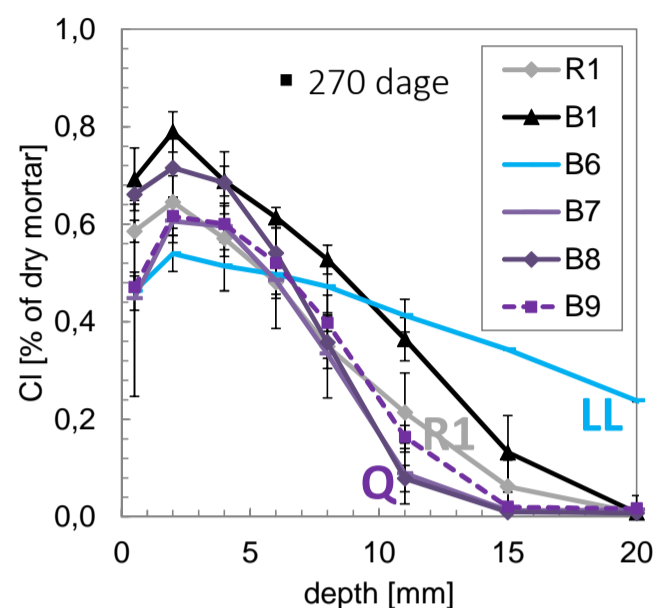


## Kemi og transport



Kalkfiller (LL)

Skiferaske (T)



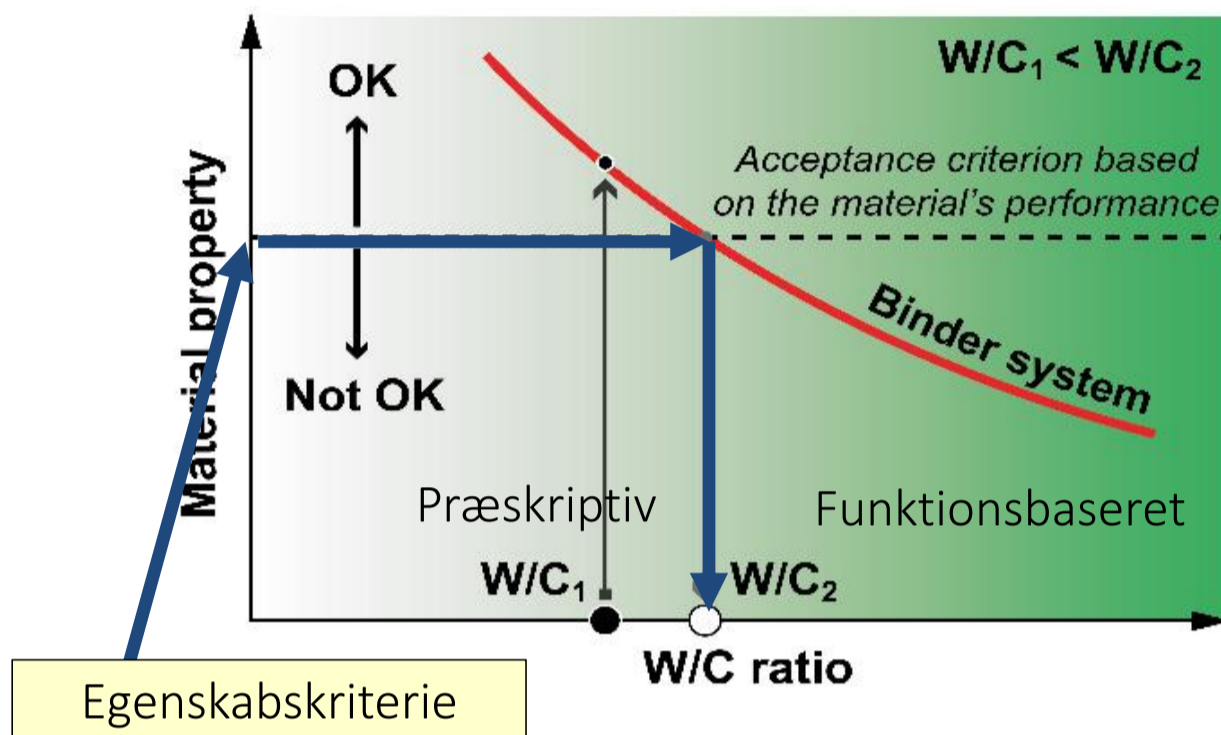
Kalcineret ler (Q)

Geiker M, Weerd K.D, Garzón S F, Jensen M M, Johannesson B., Michel A, Durability testing of low clinker binders, chloride ingress in similar strength mortars exposed to seawater, NCR Symposium 2017.<sup>17</sup>

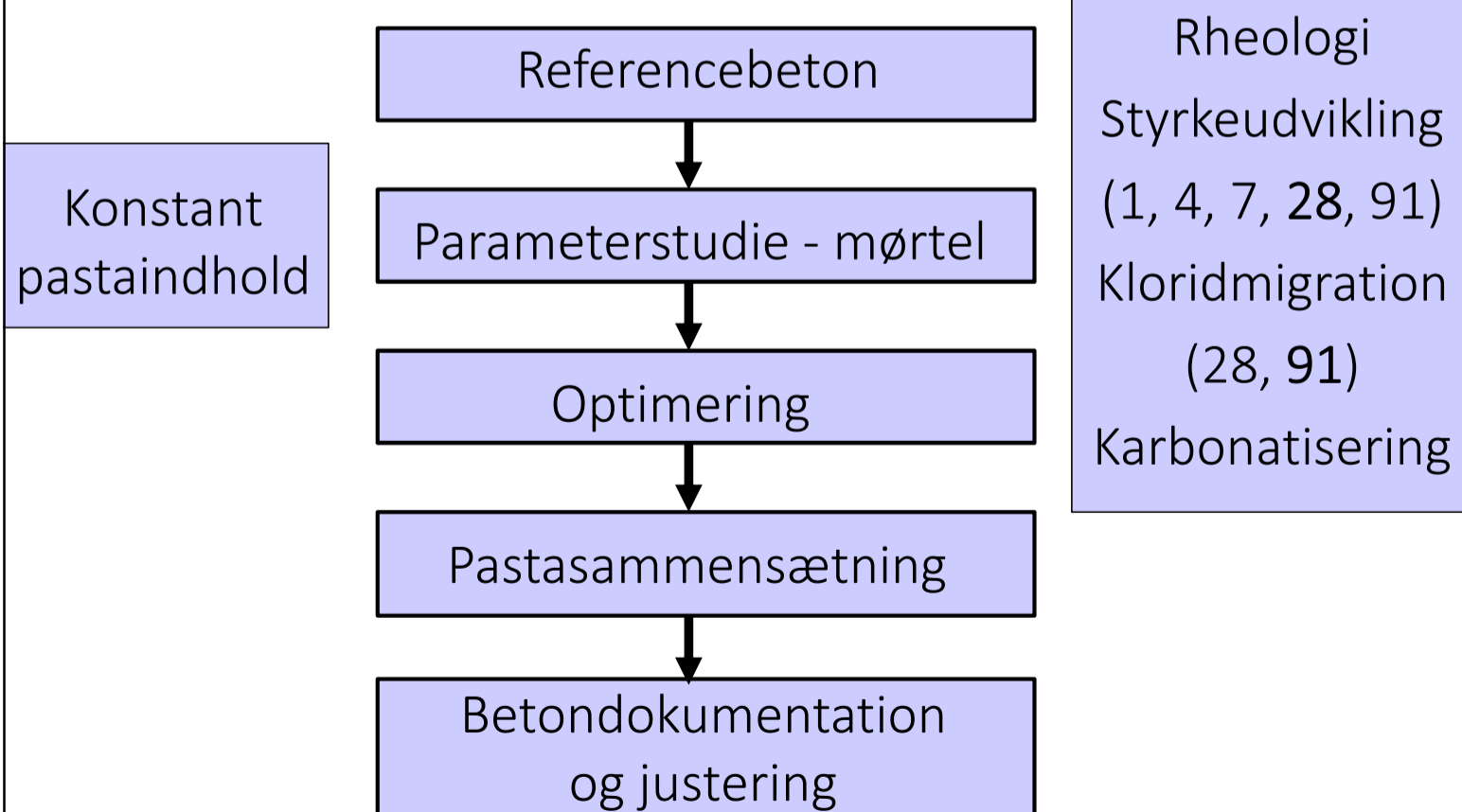
## Funktionsbaseret optimering

- Præskriptiv specifikation (DS 2426, AAB betonbroer)
  - Krav til indhold af delmaterialer og sammensætning
  - Udfordring: Brug af alternative bindermaterialer fører ofte til **høj viskositet** ⇒ dårlig bearbejdelighed
- Funktionsbaseret design
  - Større frihed til valg og sammensætning af materialer
  - Udfordring: Der er **større risiko for fejl** pga. manglende erfaring samt valide og gode modeller.
- Hvor meget er det muligt at reducere CO<sub>2</sub> aftrykket med de valgte materialer og krav til egenskaber?

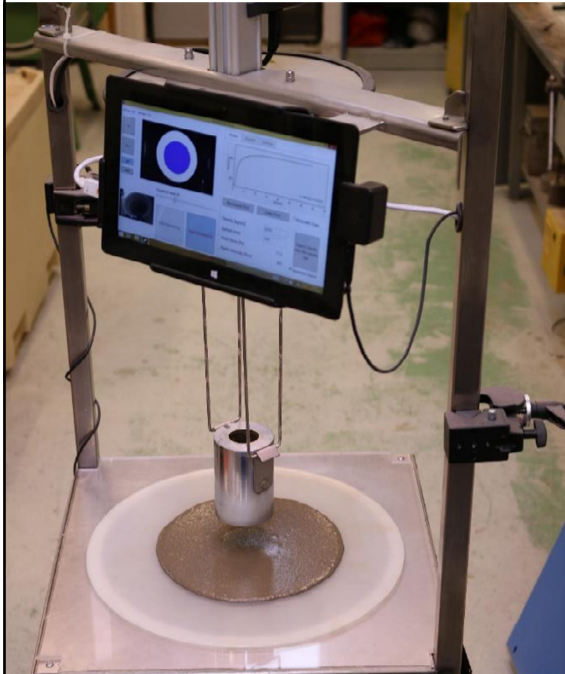
# Funktionsbaseret optimering



# Funktionsbaseret optimering



# Funktionsbaseret optimering



# Funktionsbaseret optimering



- Første del
- Konzeptudvikling og betonforslag til demonstrationsbro for Vejdirektoratet
- Herning-Holstebro strækning
- E40 reference fra Unicon
- SCM kombinationer
  - Kalkfiller (LL) + flyveaske (FA)
  - Flyveaske (FA)



# Funktionsbaseret optimering



Parameterstudie → Første receptforslag

		W/C	W/C	W/B	FA/C	LF/C	MS/C	A	B	C	D	FA	MS	LF	W	0/4	
		Ltd.						kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
1	Ref1	0,41	0,45	0,36	0,57	0,08		238				135	18		140	580	
2	Ref2	0,42	0,42	0,43	0,10	0,06		319				32	18		157	580	
3	Ref3	0,37	0,37	0,35	0,15			359				54			143	580	
4	A+FA	0,40	0,40	0,35	0,33			305				101		0	142	580	
5	A+FA	0,40	0,52	0,30	1,00			209				209		0	125	580	
6	A+FA	0,60	0,60	0,53	0,33			243				80		0	170	580	
7	A+FA	0,60	0,77	0,45	1,00			171				171		0	154	580	
8	A+FA	0,60	1,29	0,38	3,00			90				271		0	136	580	
9	A+FA+LF	0,40	0,40	0,31	0,20	0,20		307				61		61	135	580	
10	A+FA+LF	0,40	0,40	0,28	0,33	0,33		269				89		89	125	580	
11	A+FA+LF	0,40	0,43	0,25	0,50	0,50		231				116		116	116	580	
12	A+FA+LF	0,60	0,60	0,47	0,20	0,20		248				50		50	164	580	
13	A+FA+LF	0,60	0,64	0,38	0,50	0,50		192				96		96	144	580	
14	A+FA+LF	0,60	0,64	0,44	0,50	0,20		208				104		42	156	580	
15	A+FA+LF	0,60	0,60	0,39	0,20	0,50		226				45		113	149	580	
16	A+FA+LF	0,60	0,77	0,36	1,00	0,50		154				154		77	138	580	
17	A+FA+LF	0,40	0,43	0,29	0,50	0,20		255				127		51	127	580	
18	A+FA+LF	0,40	0,52	0,24	1,00	0,50		184				184		92	110	580	
19	A+FA_H1	0,40	0,40	0,35	0,33			232				77		0	108	755	
20	A+FA_H2	0,40	0,40	0,35	0,33			259				86		0	121	690	
21	C+FA	0,40	0,40	0,35	0,33				302			100		0	141	580	
22	C+FA	0,40	0,52	0,30	1,00				207			207		0	124	580	
23	C+FA	0,40	0,40	0,37	0,20				331			66		0	146	580	
24	C+FA+LF	0,40	0,40	0,31	0,20	0,20			304			61		61	134	580	
25	C+FA+LF	0,40	0,43	0,25	0,50	0,50			230			115		115	115	580	
26	C+FA+LF	0,40	0,52	0,24	1,00	0,50			182			182		91	109	580	
27	B+FA	0,40	0,40	0,35	0,33				303			100		0	141	580	
28	B+FA	0,40	0,52	0,30	1,00				208			208		0	125	580	
29	B+FA+LF	0,40	0,43	0,25	0,50	0,50			230			115		115	115	580	
30	B+FA+LF	0,40	0,52	0,26	1,00	0,33			191			191		63	114	580	
31	D+FA	0,40	0,40	0,35	0,33					302		100		0	141	580	

Dokumentation

Justering

	Ref	FA	FA+LF
FA/C	0,15	0,50	
LL/C	0	0	
V/C ækv. (ds 2426)	0,37	0,47	
CO <sub>2</sub> reduktion (%)		34	

# Funktionsbaseret optimering



# Funktionsbaseret optimering



- Anden del
- To demobroer på Lolland for hhv. Vejdirektoratet og Bannedanmark
- E40 reference fra Unicon
- SCM kombinationer
  - Kalcineret ler + kalkfiller
  - Kalcineret ler + kalkfiller + flyveaske
- Tredje del
- Demobyggeri på DTU
- P25 reference fra Unicon
- SCM kombinationer
  - Kalcineret ler + kalkfiller
  - Kalcineret ler + kalkfiller + flyveaske

# Funktionsbaseret optimering



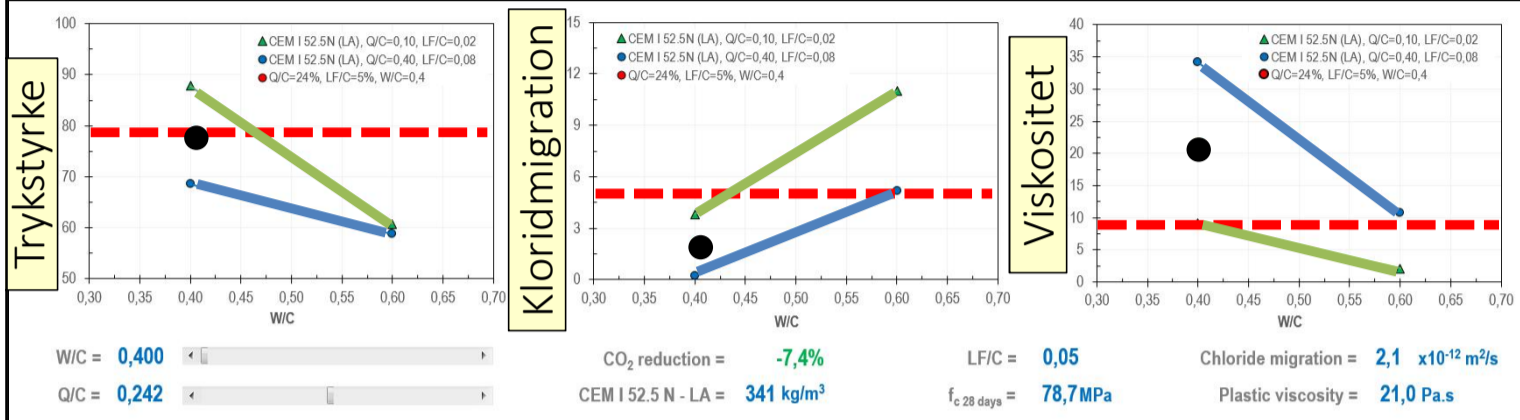
- Anden del
- To demobroer på Lolland for hhv. Vejdirektoratet og
- Tredje del
- Demobyggeri på DTU
- P25 reference fra

REV.4										Binder composition % b.w.						
	v/c u.b.	v/c ds2426	v/b	Pastavolumen (m3)	FA/C	Q/C	L/C	Q/L (b.w.)	P/(P+W) vol.	ROC	LSC	FA	Q	L	SCM b.w. of binder	
P25 Reference	0.69	0.690	0.621	0.282	0.25			5.0	0.35	80.0%	0.0%	20.0%	0.0%	0.0%	20.00%	
ROC+Q+L															0.00%	
															0.71%	
															3.08%	
															2.43%	
															0.71%	
															2.43%	
															2.43%	
ROC+Q+L+FA															2.43%	
Q/(Q+L) (b.w)															2.43%	
															0.00%	
															2.43%	
															0.00%	
															2.43%	
ROC+Q+L+FA															0.00%	
Q/(Q+L) (b.w)															2.43%	
															0.00%	
															2.43%	
															2.43%	
															0.00%	
															2.43%	
															2.43%	
															0.00%	
															2.43%	
															2.43%	
	0.6	0.612	0.356	0.282	0.3750	0.3750	0.2500	1.5	0.50	50.0%	0.0%	18.8%	18.8%	12.5%	50.00%	

- Forskellige v/c (ingen k faktorer)
- Forskellige erstatningsgrader
- Forskellige SCM kombinationer

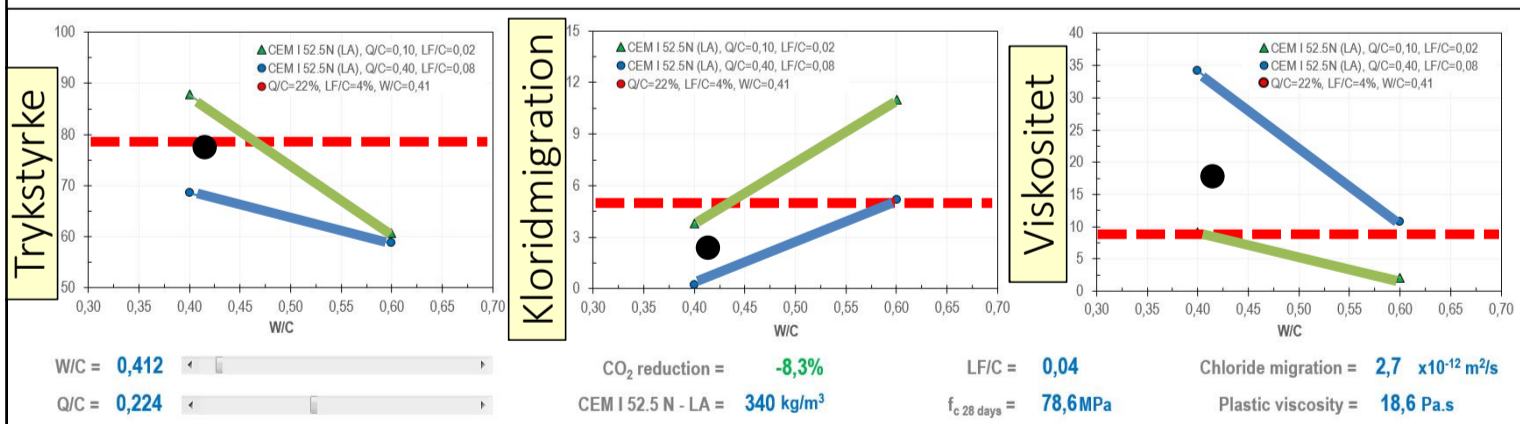


# Funktionsbaseret optimering



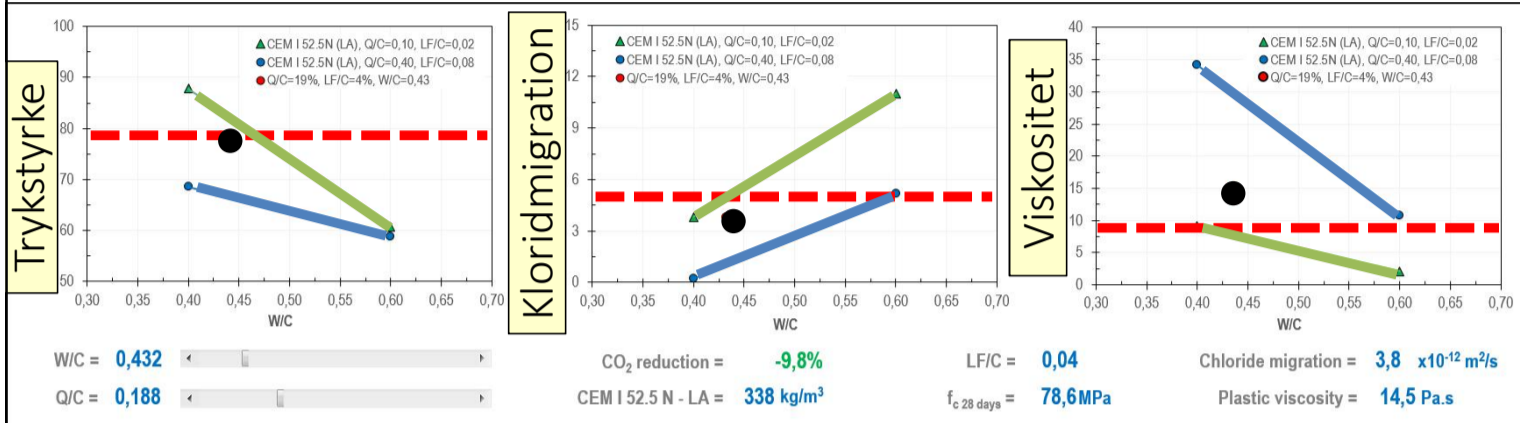
Q/C	L/C
0,10	0,02
0,40	0,08
0,25	0,05

# Funktionsbaseret optimering



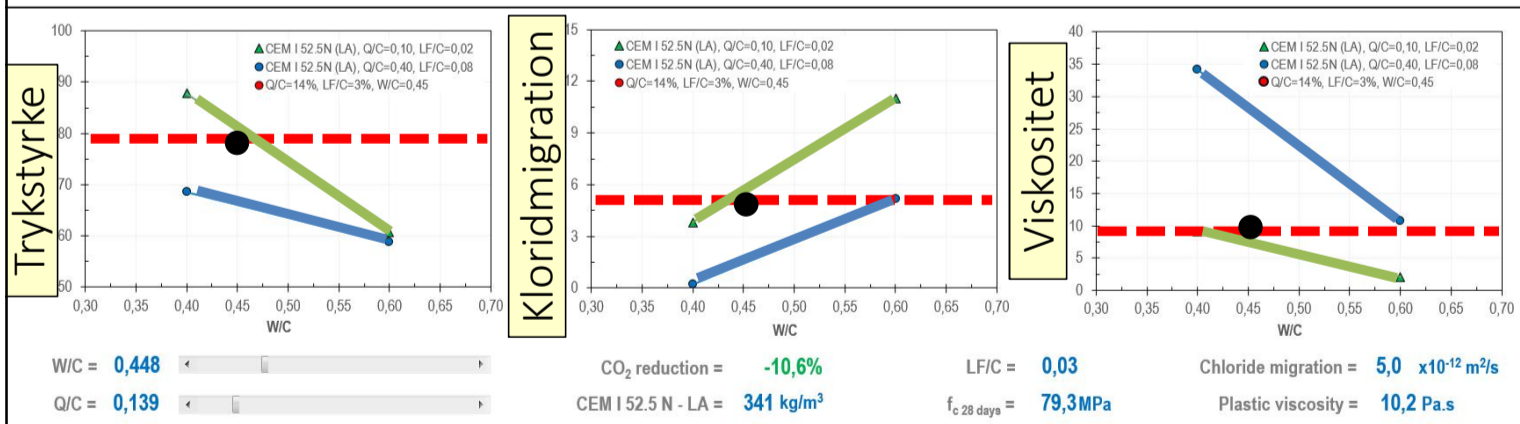
Q/C	L/C
0,10	0,02
0,40	0,08
0,22	0,04

# Funktionsbaseret optimering



Q/C	L/C
0,10	0,02
0,40	0,08
0,19	0,04

# Funktionsbaseret optimering



Q/C	L/C
0,10	0,02
0,40	0,08
0,14	0,03



Dokumentation og justering  
 Bl.a. screeningsforsøg for  
 frost med mindre  
 erstatningsgrad, anden Q/L,  
 lavere v/c tal



# Funktionsbaseret optimering

- Forslag til recept med SCM cement
- CEM II/A-M (Q-LL) (kun tilladt til P)
- CO<sub>2</sub> per tons cement reduceret med ca. 20 % ift. reference
- CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> beton reduceret med 11 % ift. reference
- CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> beton reduceret med ca. 25 % ift. fremtidig ref. uden flyveaske
- Aalborg Portland producerede 35 tons
- Unicon, Herfølge producerer betonen
- MTH udfører

	Ref	Q+LL
FA/C	0,15	
Q/C		0,102
LL/C		0,068
Q/L		1,5
V/C ækv	0,37	0,39







 **TEKNOLOGISK  
INSTITUT**

Banedanmark, Jernbanebro, sideudvidelse



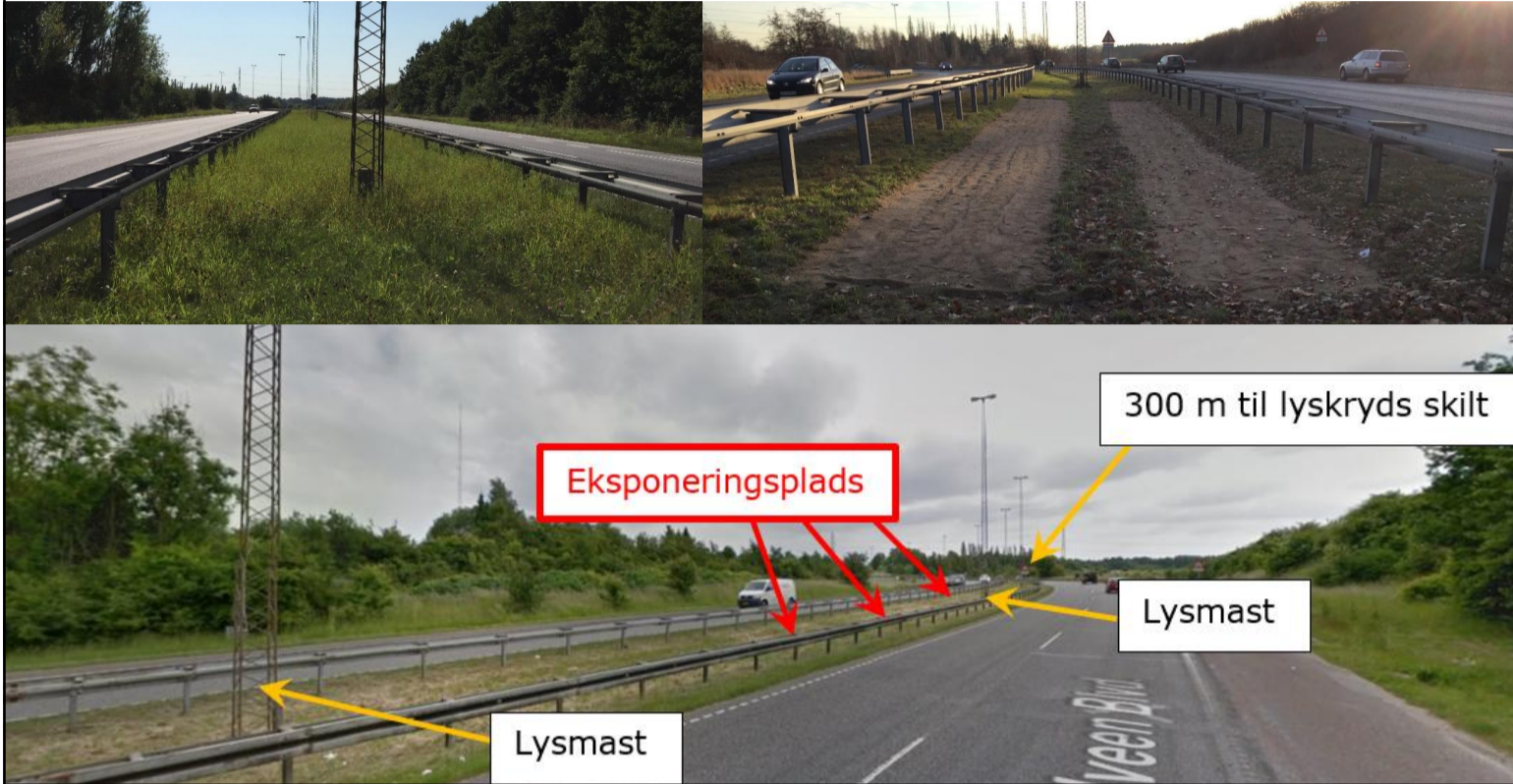
Byggeridemo, DTU



# Etablering af eksponeringspladser



- Eksponering langs trafikeret vej (Taastrup)

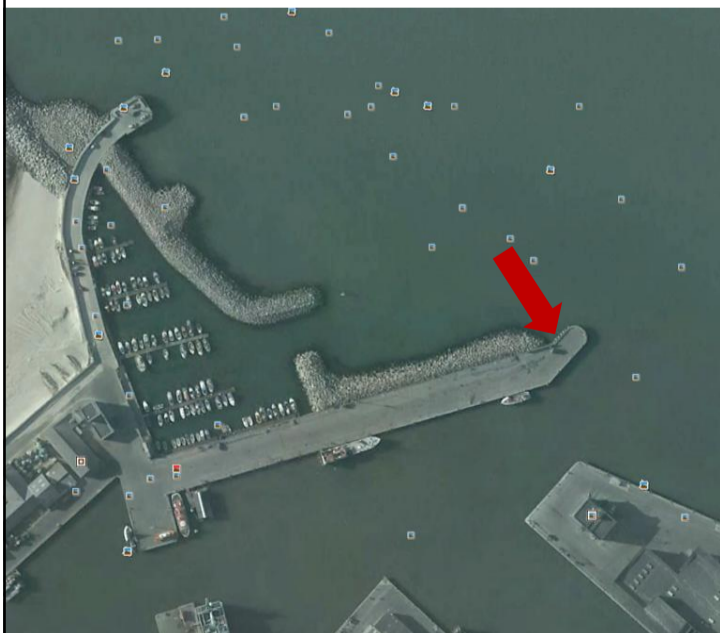


# Etablering af eksponeringspladser

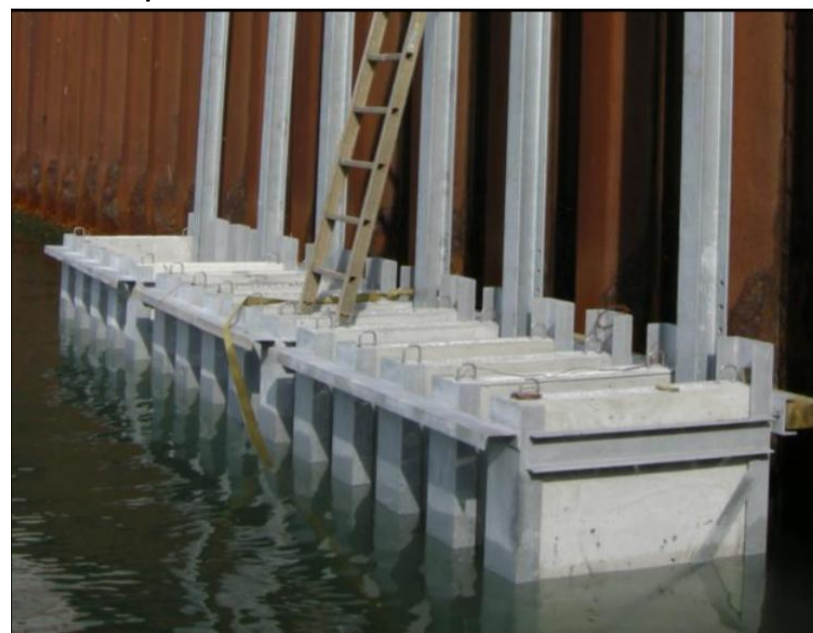


- Marine pladser

Hirtshals



Rødby





## Etablering af eksponeringspladser



- Støttemur ved Aalborg Portlands gipslager



Ca. 4 uger efter støbning

## Implementering

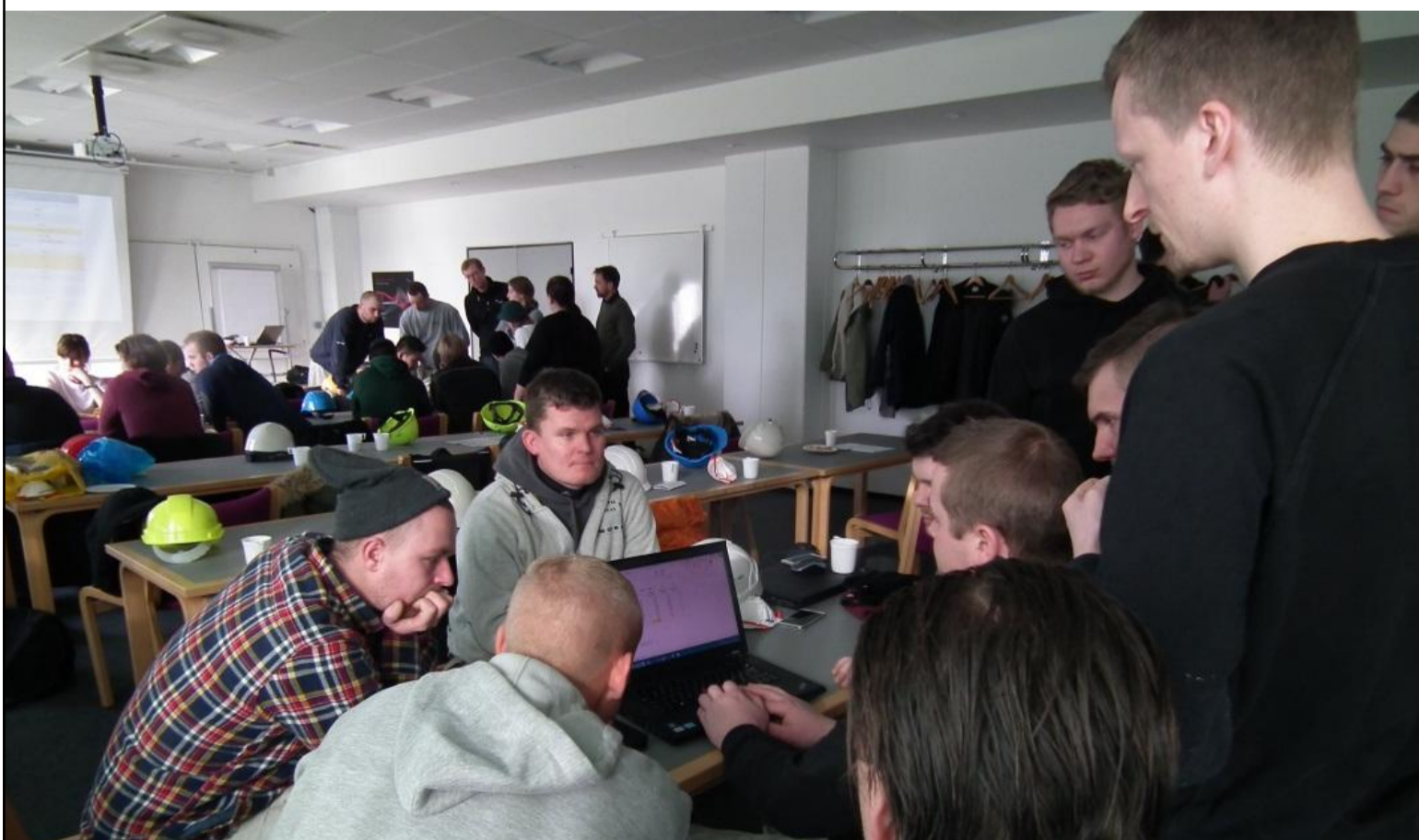


- Undersøgt metoder håndtering af miljøaspektet i udbud og krav til dokumentation
- Gennemført analyse af DGNB med henblik på at vurdere betons indflydelse på DGNB scoren
- Procedurer for introduktion af nye cementtyper på det danske marked

# Betonworkshops



# Betonworkshops





# Betonworkshops



E "Det var spændende at følge proceduren med at lave en recept til at se det færdige produkt"

"Beton er langt mere kompliceret end jeg regnede med"

"At der ikke skal så meget til at ødelægge en blanding"

"Godt at få hands on på materialerne og muligheden for at omsætte teori til praksis"

"Har været en meget dejlig oplevelse"

Lækker morgenmad og gode kager

"Jeg fik en god forståelse af hvad der sker med betonen, når man ændrer på de forskellige parametre."

"Jeg håber i fremtiden at man fra skoleside vil deltage mere i denne slags vidensdeling"

"Blev klar over, hvor svært det er at lave en "grøn" beton, hvis den også skal kunne bruges"

For lidt frokost