DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE

NTNU
Norwegian University of Science and Technology

Anvendelse af marine feltdata til forudsigelse af kloridindtrængning i beton

Industriel PhD - Simon Fjendbo

Finansiering: Uddannelses- og forskningsministeriet gennem kontrakt med Teknologisk institut

Vejledere: Mette Rica Geiker (NTNU), Klaartje de Weerdt (NTNU) & Henrik Erndahl Sørensen (DTI)

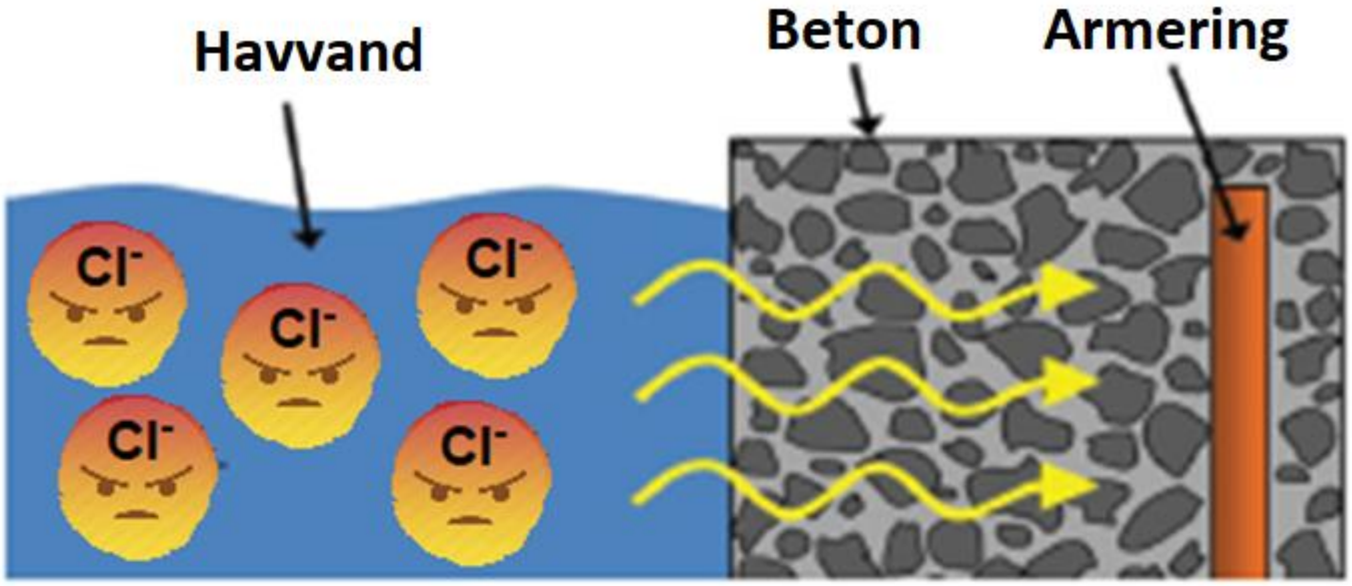
DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE

NTNU
Norwegian University of Science and Technology

abc news, 2018

New civil engineer, 2022

Det basale for levetidsestimering i marint miljø



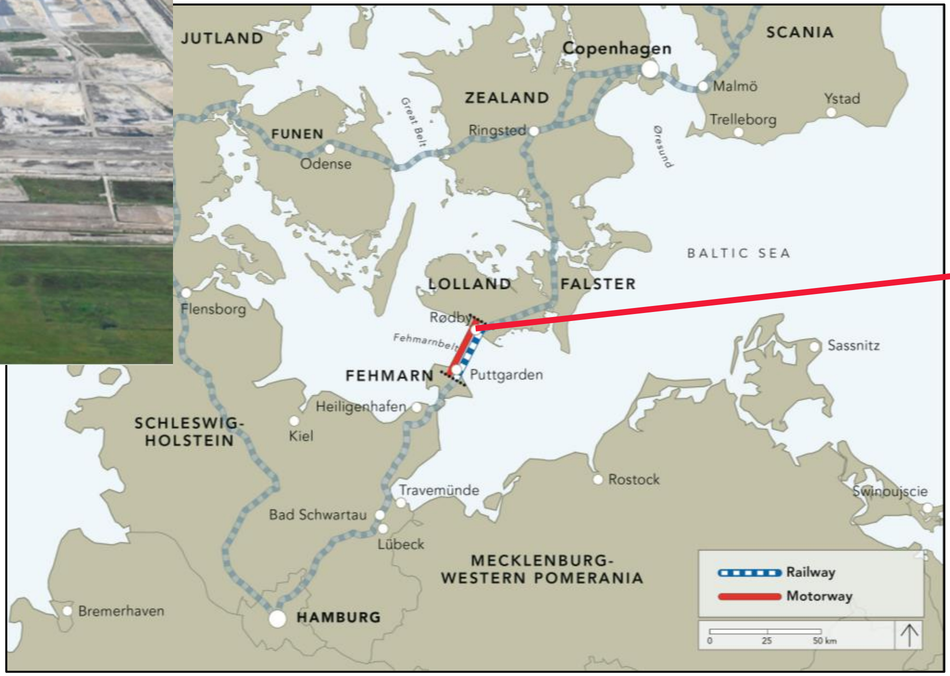
Modified from source: Kloridtærskelværdier og levetidsberegninger (SLP)

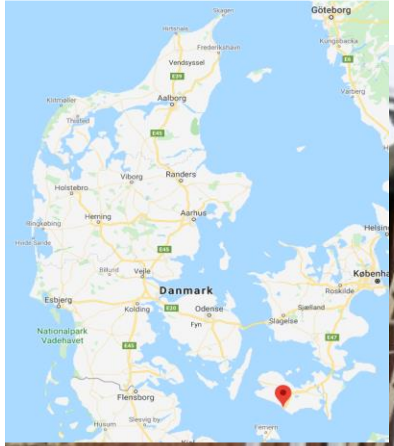
- For at bestemme levetiden er det nødvendigt at kende:
  - Hvor hurtigt trænger kloriden ind?
  - Ved hvilken kloridkoncentration (kloridtærskelværdi) initieres korrosionen?

Eksempel på stort projekt - Fehmern forbindelsen

- 120 års levetid (indtil initiering af armeringskorrosion)

Fehmern byggeplads





Fehmern Felteksponeringsstation

- 15 forskellige mix
- Prøver taget efter ½, 2, 5 og 10 år

DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE

NTNU
Norwegian University of
Science and Technology

Indsamling af kloriddata og vurdering af hvordan det bør anvendes

Paper II: Correlating the development of chloride profiles and microstructural changes in marine concrete up to ten years
& Paper IV: When and how should chloride profiles be calibrated for paste fraction?

Fokus fokus fokus

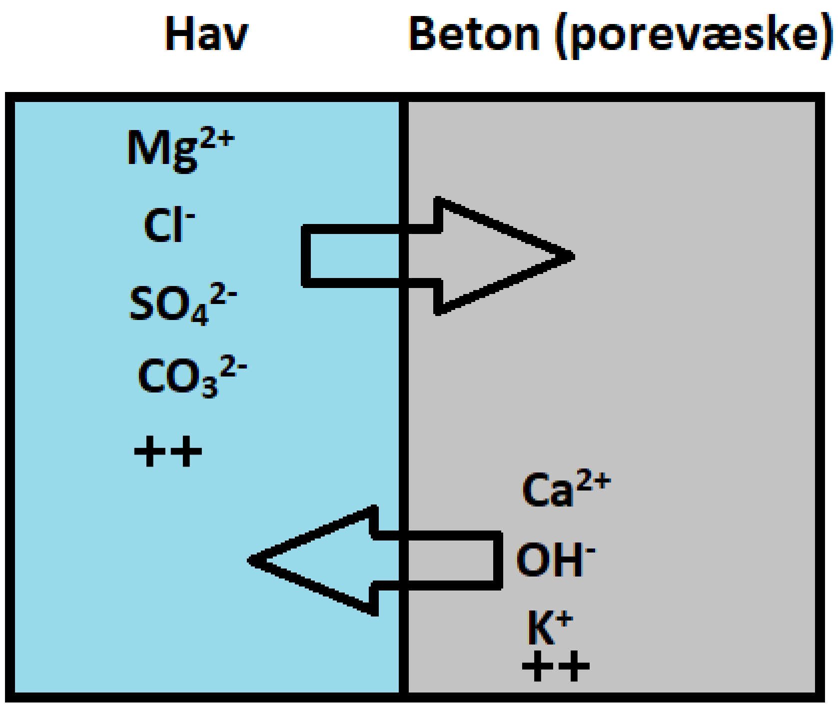
Mixture proportions of concrete exposed at the Fehmarn Belt Exposure Site [kg/m^3].

Concrete ID in thesis		PC	15FA	25FA	25FA_SCC	4SF	12FA4SF	12FA4SF_ noAEA	12FA4SF_ high_wc	12FA4SF_ low_wc	12FA4SF_ SCC	SG	SG_noAEA	SG_SCC	SG_rapid
Original concrete ID		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Group I		x	x	x		x	x					x			
Group II								x	x	x			x		x
Group III					x						x			x	
Powder composition [wt.%]	CEM I 42.5N -SR5	100	85	75	75	96	84	84	84	84	84				
	CEM I 52.5N														30
	CEM III[a)]											100	100	100	
	FA		15	25	25		12	12	12	12	12				
	SF					4	4	4	4	4	4				
	GGBS														70
w/(c+2SF+0.5FA+GGBS)		0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.45	0.35	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40

a) GGBS content: 67% by wt.

FA = Fly Ash, SF = Silica Fume, GGBS = Ground Granulated Blast-furnace Slag

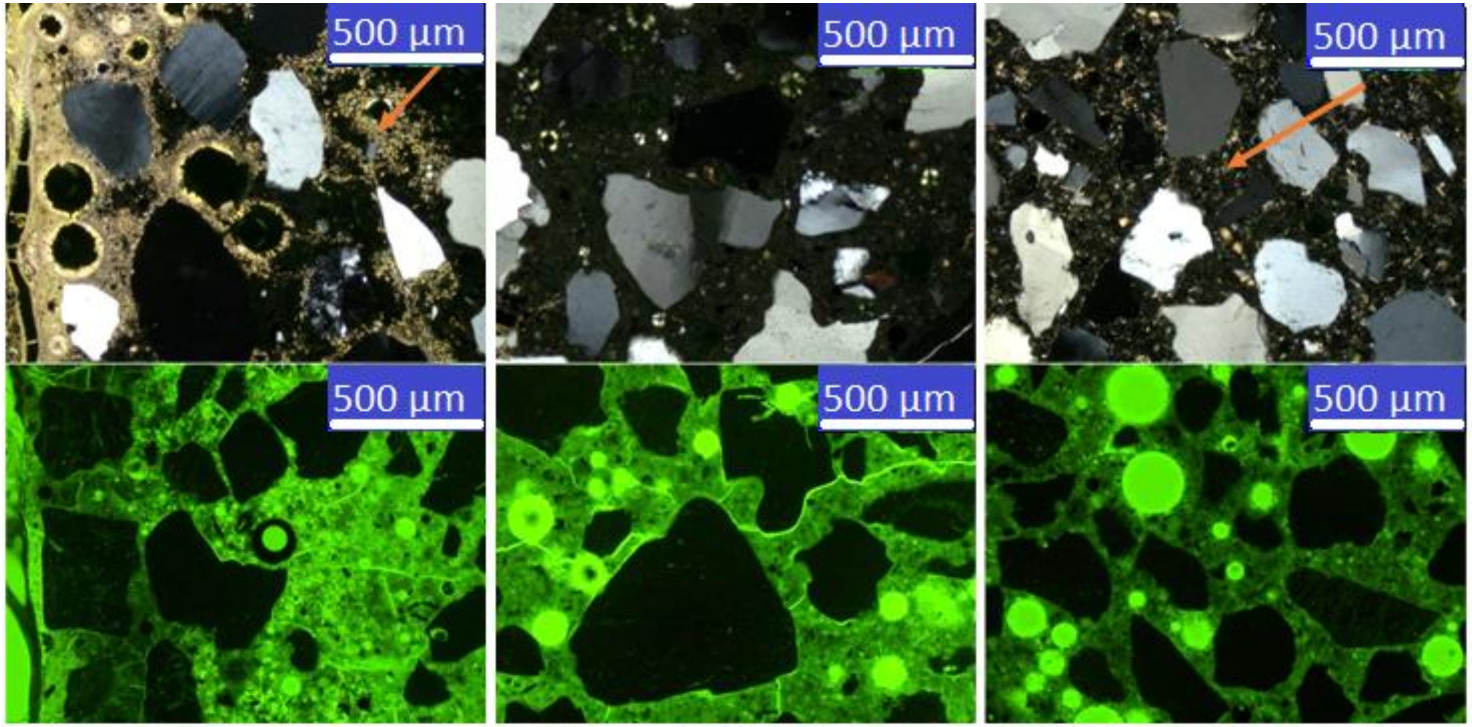
Transport af ioner til/fra beton



”Microstructurally Changed Zone”

Surface | Opaline | Bulk (”normal”)

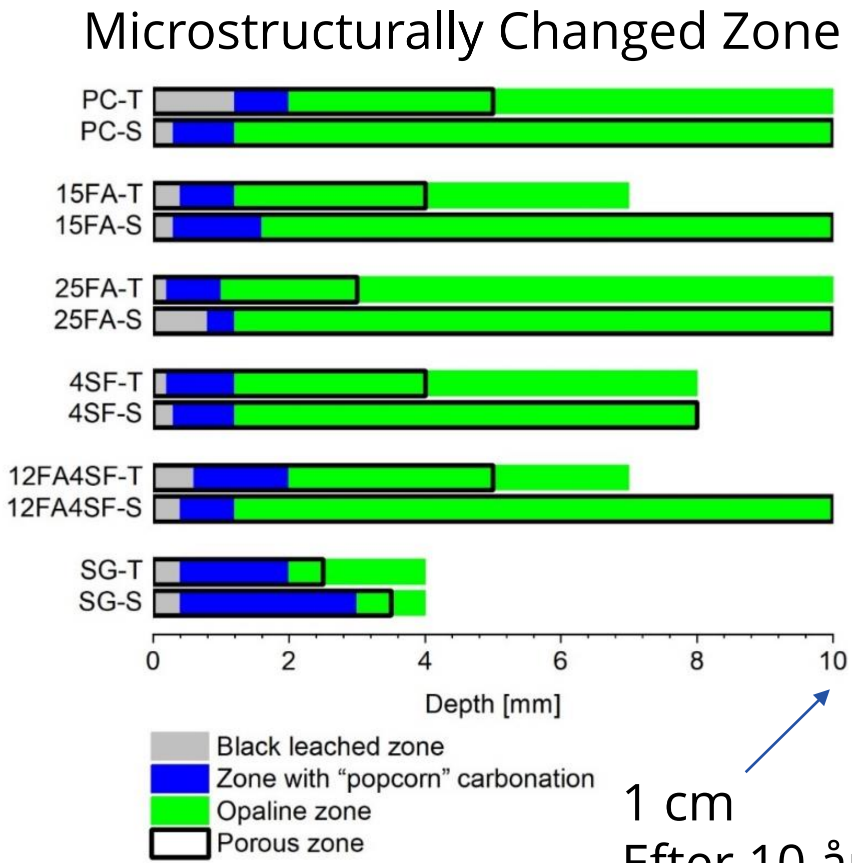
Light mode: Cross polarized / Fluorescence



Surface zone (Typical <1 mm depth): intermixed leached paste and popcorn carbonation (marked with arrow), high porosity.

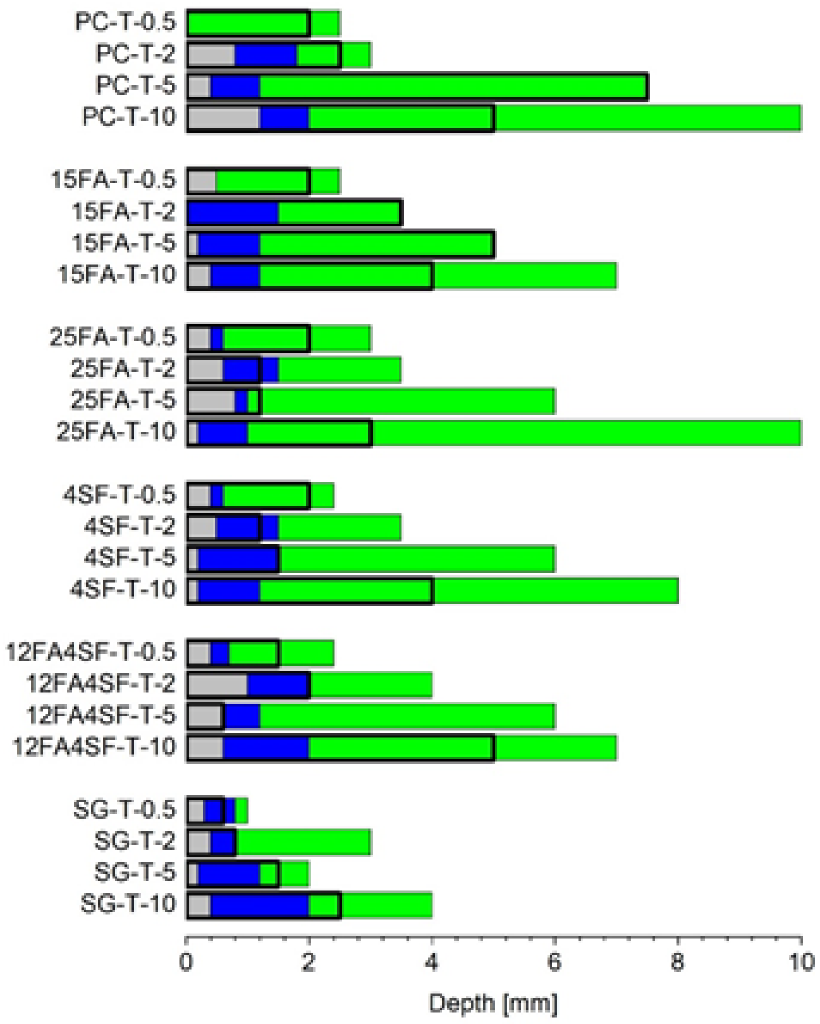
Opaline zone (Typical of 2–10 mm depth): no visible CH, with increased porosity and micro-cracking.

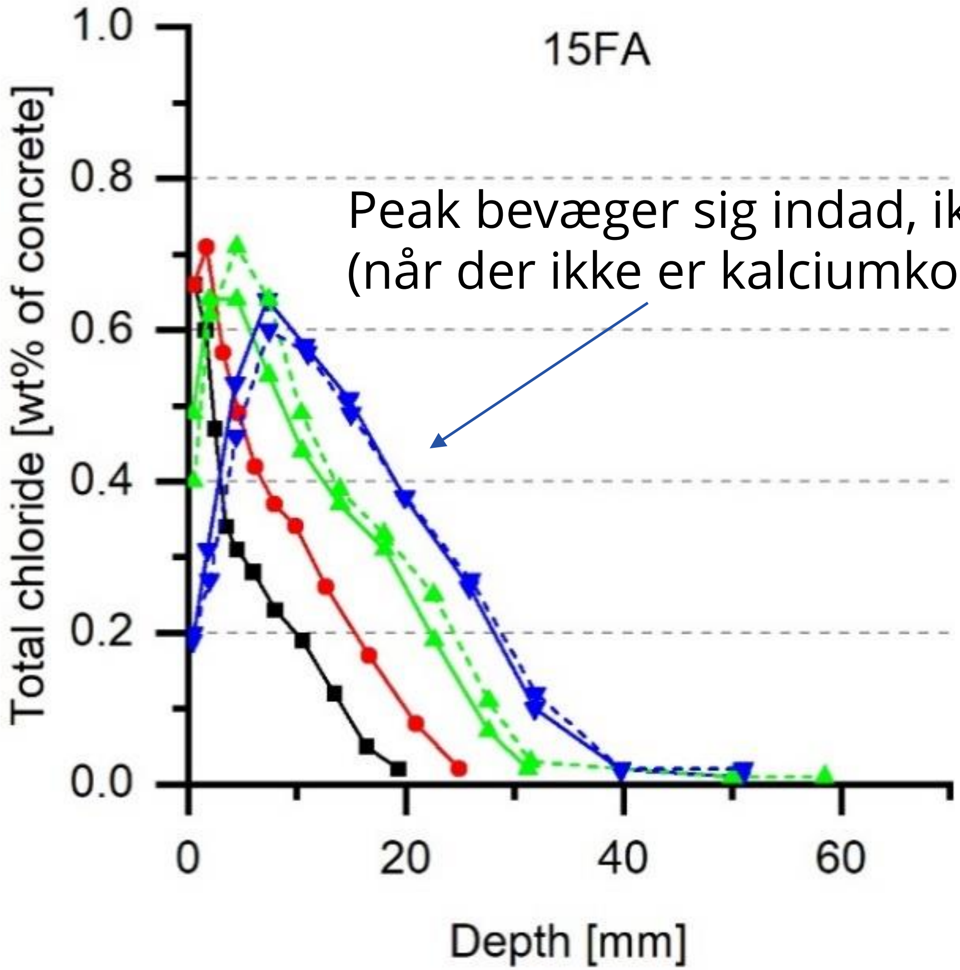
Bulk (Typical of >10 mm depth): visible CH (marked with arrow) and apparent *w/c* of 0.40.



1 cm
Efter 10 år

Både MCZ og klorider bevæger sig indad over tid

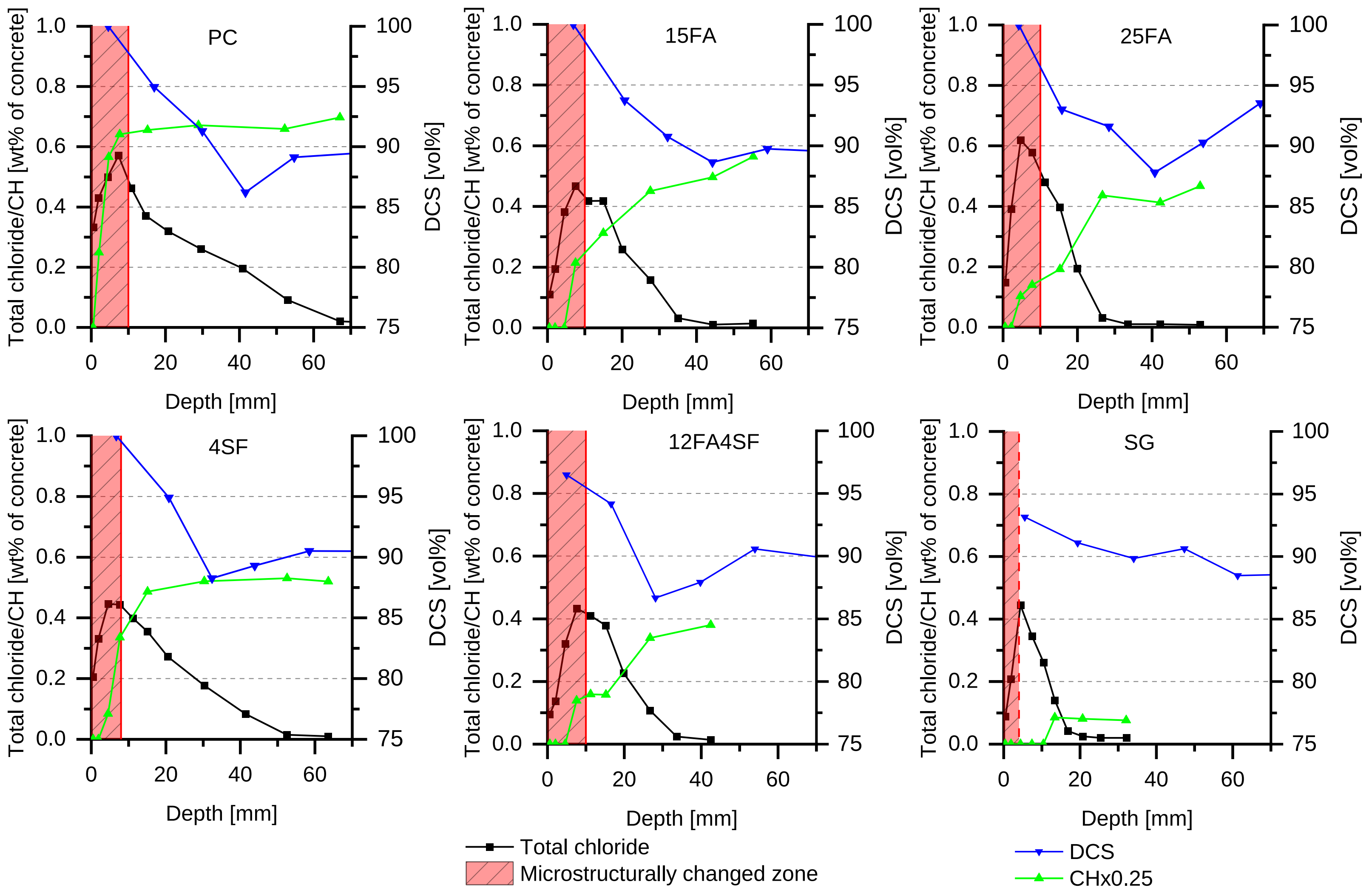




DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE

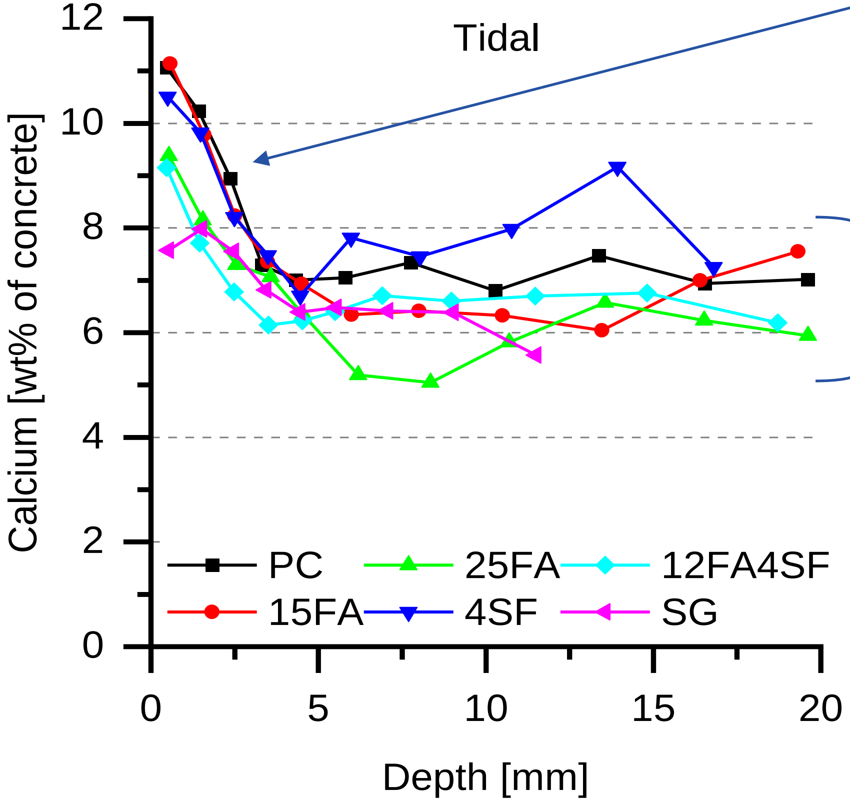
NTNU
Norwegian University of Science and Technology

Kloridprofiler vs. MCZ vs. portlandit vs. Vandmætningsgrad (10år)



Kalciumkalibrering (konvertering fra klorid/beton til klorid/binder)

Klorid trænger ind gennem pasta, ikke sten.

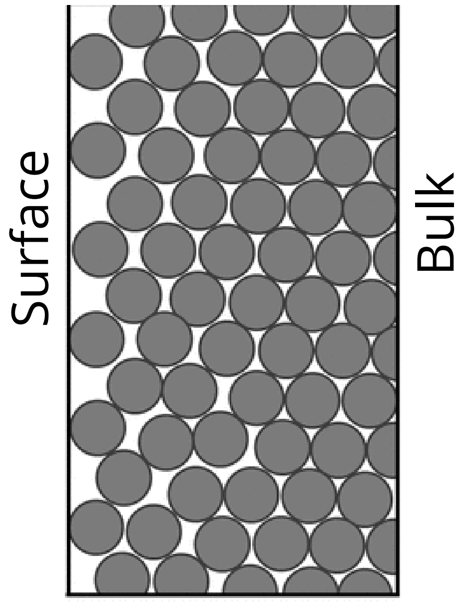


After ½ year of marine exposure

Systematisk variation (væg-effekt)

Usystematisk variation

$$Kalibreret\ klorid\ indhold = \frac{wt\%Cl_{målt}}{wt\%Ca_{målt}} \times wt\%Ca_{teoretisk}$$



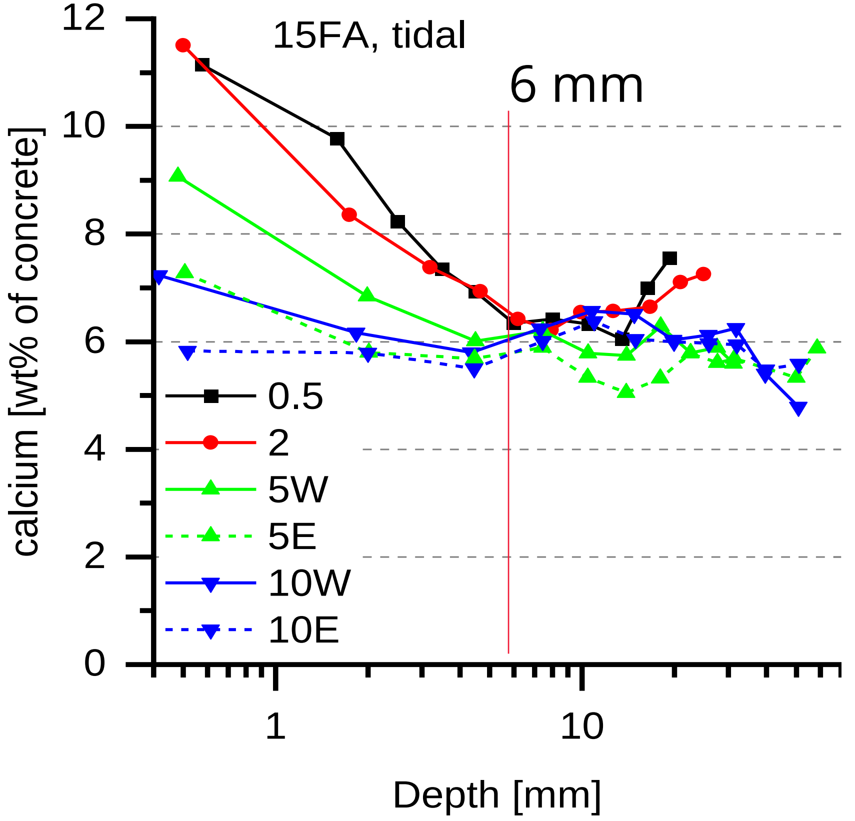
Ca er indikator for pastamængde
Antagelser:
Ingen leaching af kalcium
Ingen kalcium fra aggregat

Nie, Zhijie, et al. "Minicolumn test of remaining GAC performance for taste and odor removal: Theoretical analysis." Journal of Environmental Engineering 146.1 (2020): 04019097.

Kalcium kalibrering konsekvens

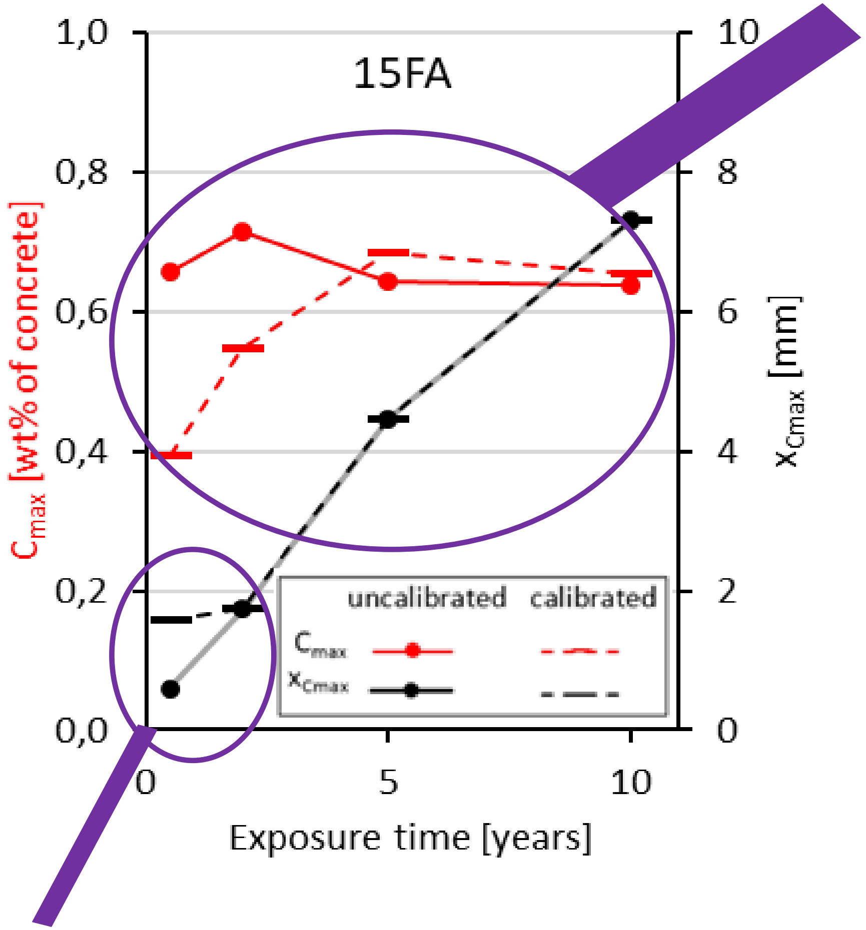
$$Kalibreret\ klorid\ indhold = \frac{wt\%Cl_{målt}}{wt\%Ca_{målt}} \times wt\%Ca_{teoretisk}$$

Leaching udgør problem



Efter ½, 2, 5 og 10 års marin eksponering

- Kalibreret maksimal kloridkoncentration(C_{max}) stiger over tid (målt kalcium falder)



- Indflydelse på peak position

For modeller, der kun tager Cl^- med i betragtning:

- Ignorer data influeret af mikrostrukturelle ændringer
(I praksis maksimum kloridkoncentration og alt tættere på overfladen)

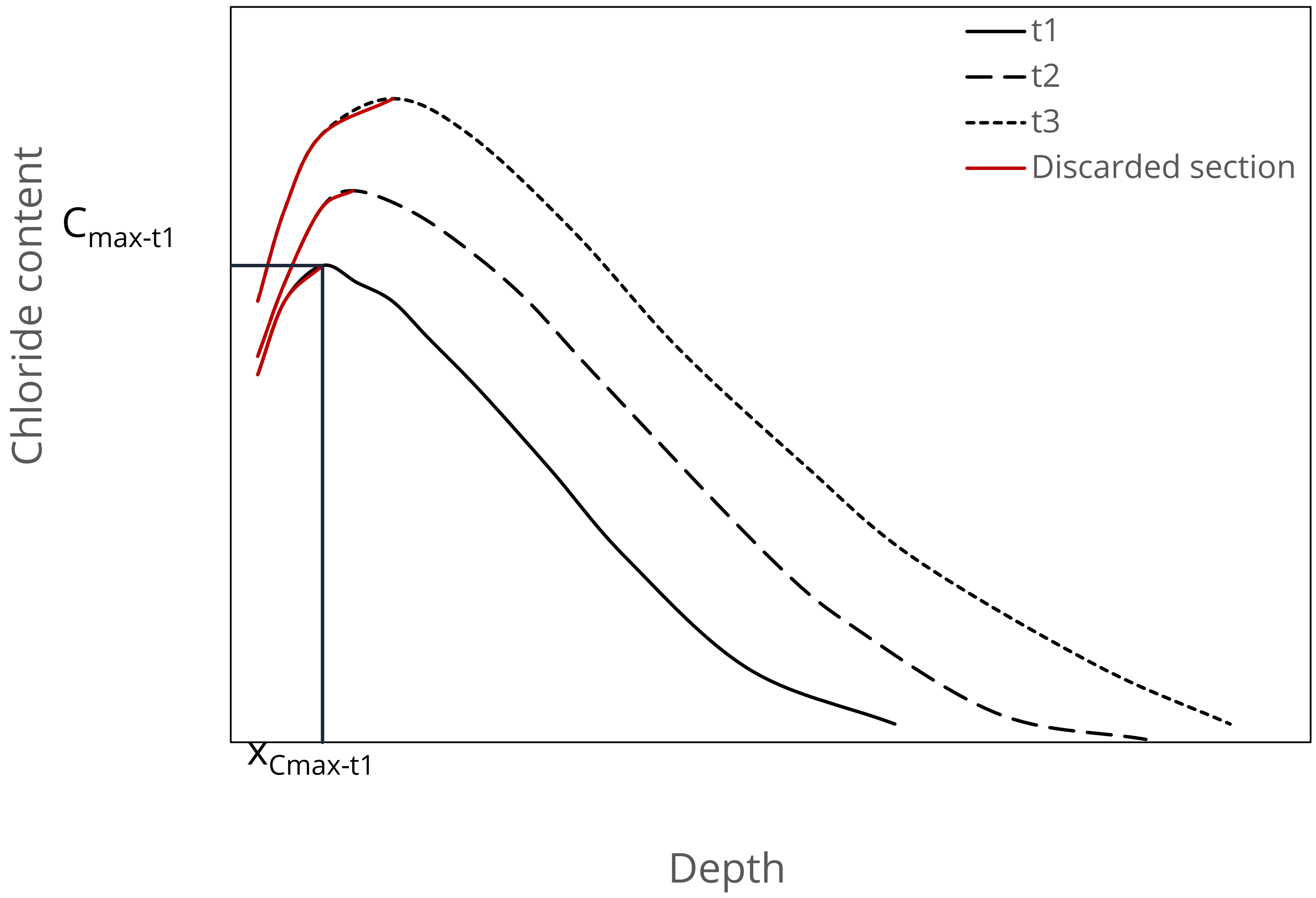
DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE

NTNU
Norwegian University of Science and Technology

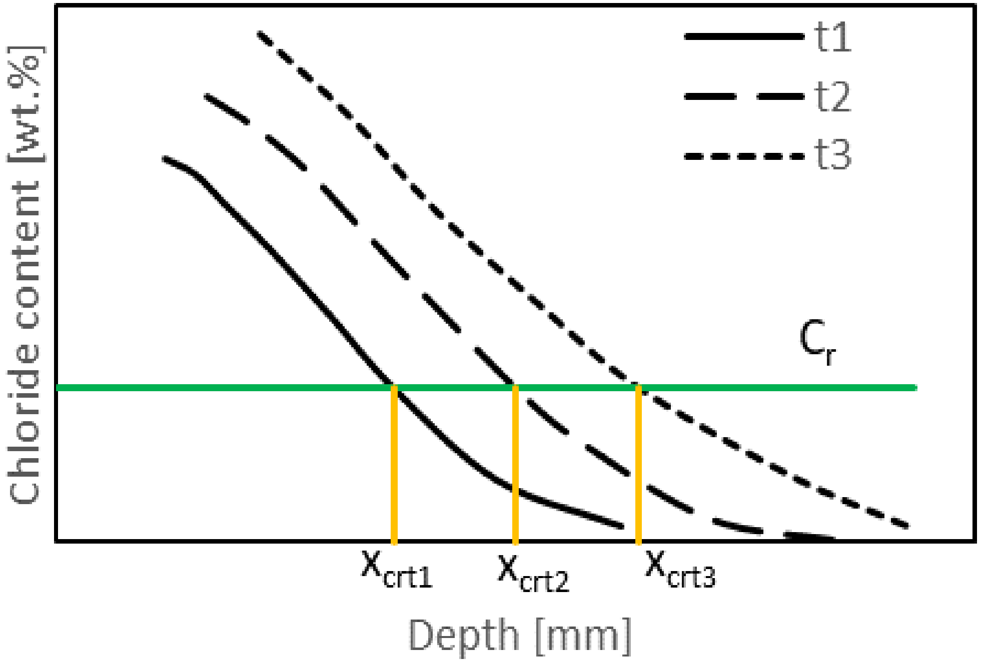
Kvadratrodsmetoden

Paper I: The square root method for chloride ingress prediction – Applicability and limitations

Metodebeskrivelse – step 1



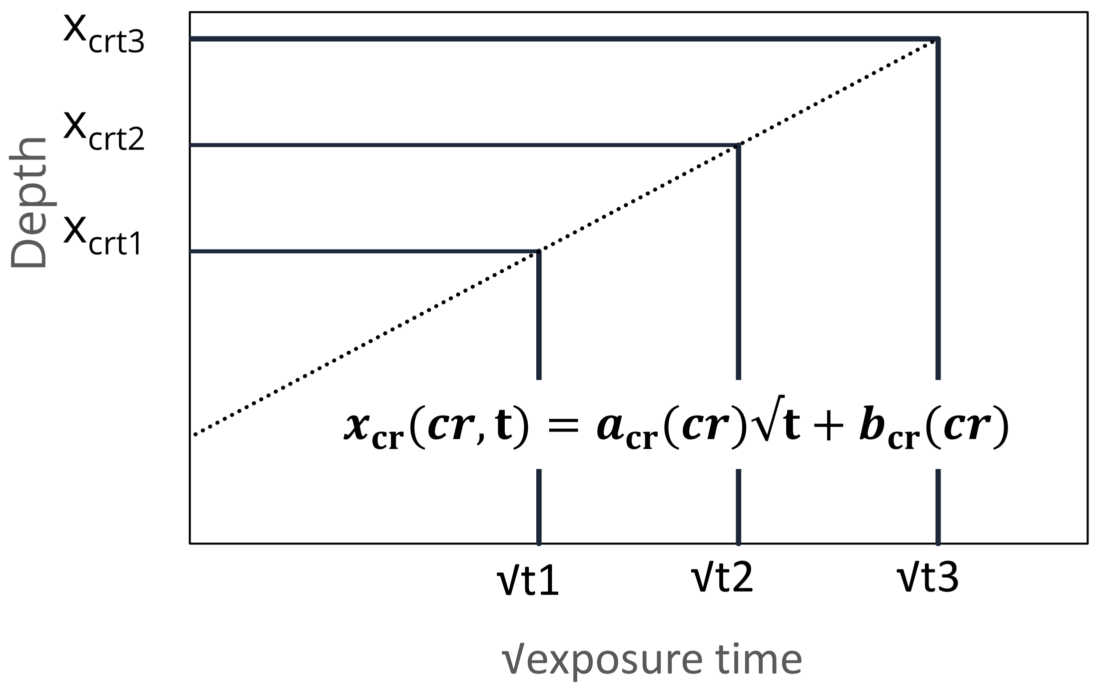
Metodebeskrivelse – step 2



Step 2

- Udvælg en referencekoncentration (C_r), $C_r < C_{max-t1}$.
- For hver kloridprofil identifiseres indtrængningsdybden(x_{Cr}) for C_r.

Metodebeskrivelse – step 3



Step 3

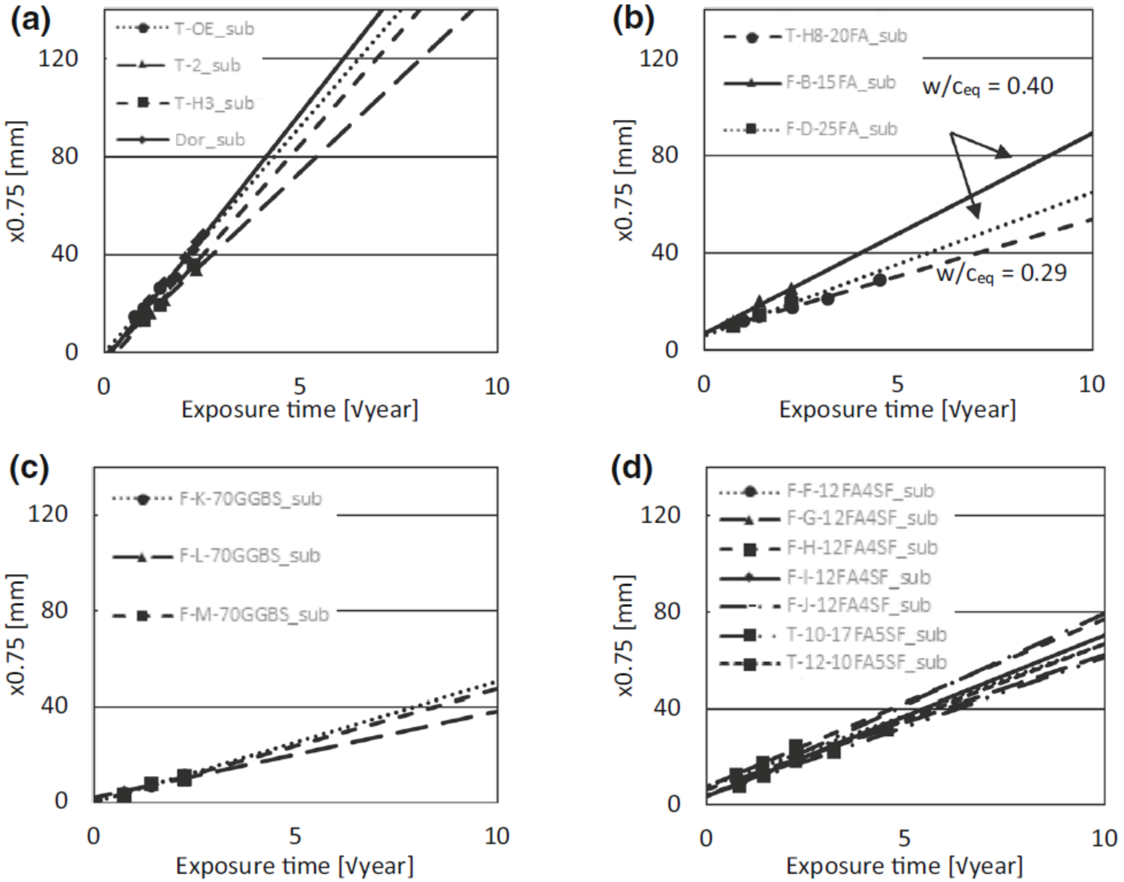
- Plot x_{Cr} mod kvadratroden af tiden og bestem hældningen (a_{Cr}) og skæringen (b_{Cr}) ved lineær regression.
- Dybden af referencekoncentrationen (x_{Cr}) som funktion af tiden kan nu beskrives:

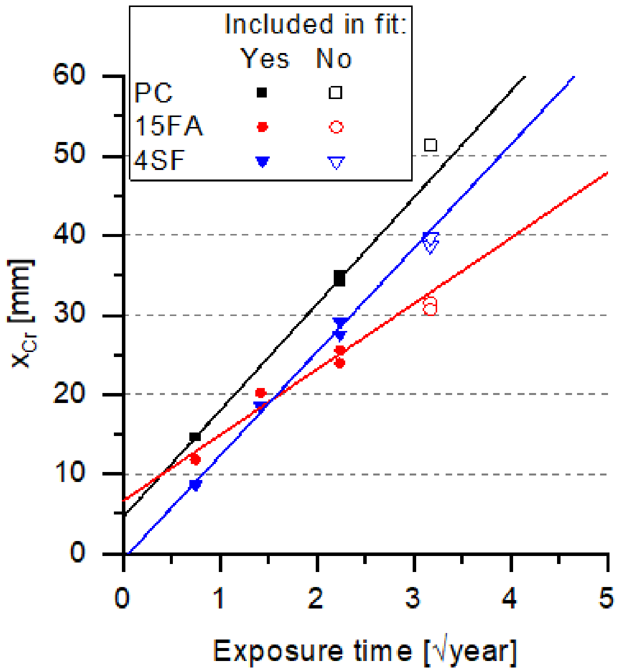
$$x_{Cr}(Cr, t) = a_{Cr}(Cr)\sqrt{t} + b_{Cr}(Cr)$$

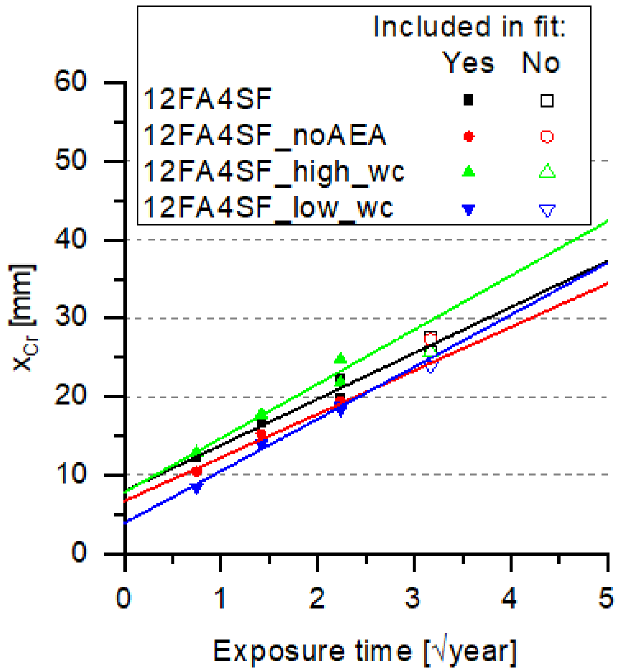
DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE

NTNU
Norwegian University of Science and Technology

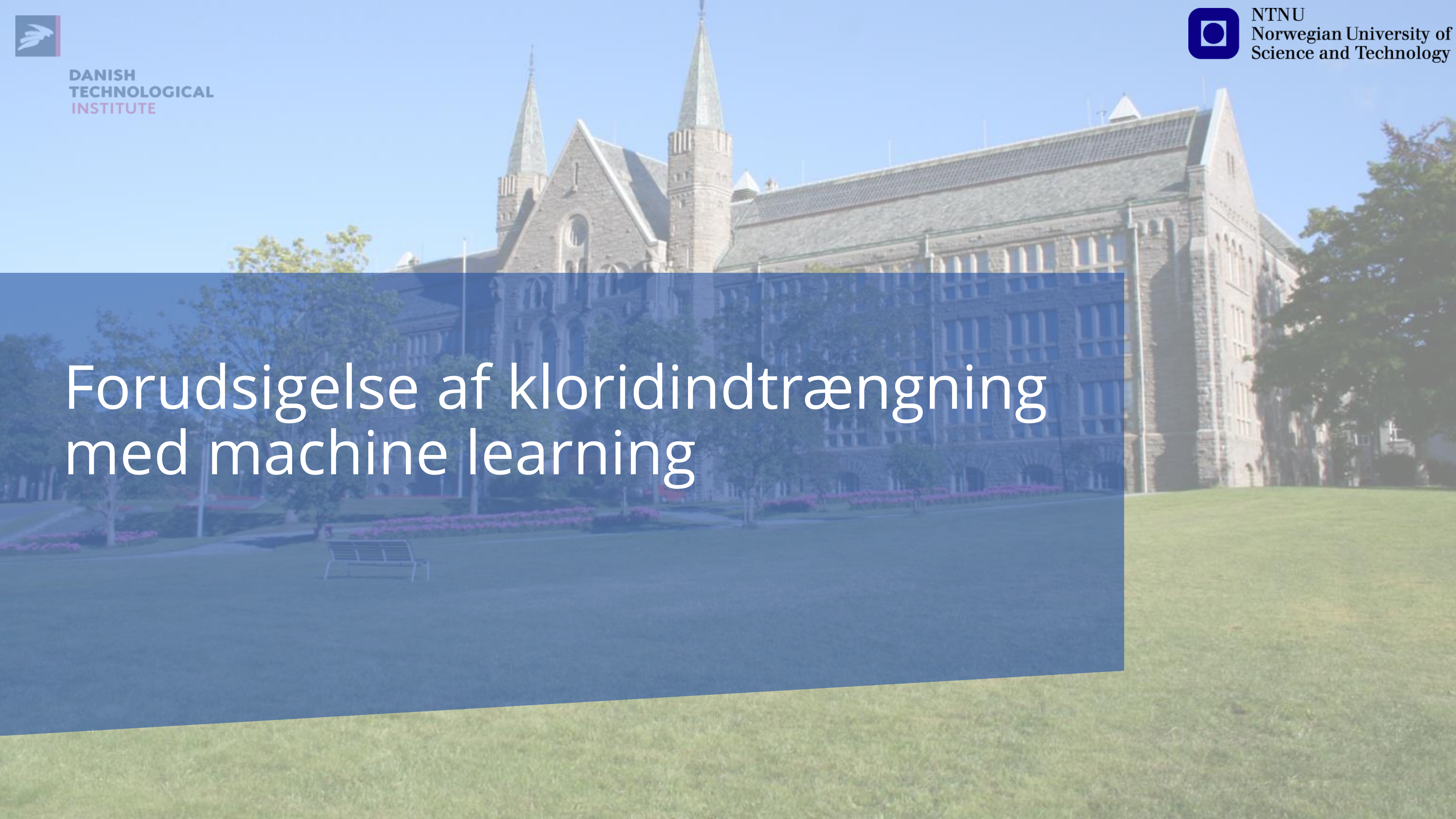
Eksempler på forudsigelse af videre kloridindtrængning
(0.75 vægt% klorid af bindemiddel)







+ God forudsigelse af videre kloridindtrængning (R^2 på 0,96 for 237 rette linier)
- Kræver måling af kloridprofiler ved flere terminer



DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE

NTNU
Norwegian University of Science and Technology

Forudsigelse af kloridindtrængning med machine learning

Forudsigelser af kloridindtrængning via ML?

Udfordring:

ML er godt til interpolering, men ikke til ekstrapolering.
Forudsigelse af kloridindtrængning til efterspurgt levetid er ekstrapolering i tid.

Min løsning:

1. Forbehandling
2. Machine learning
3. Efterbehandling

DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE

NTNU
Norwegian University of Science and Technology

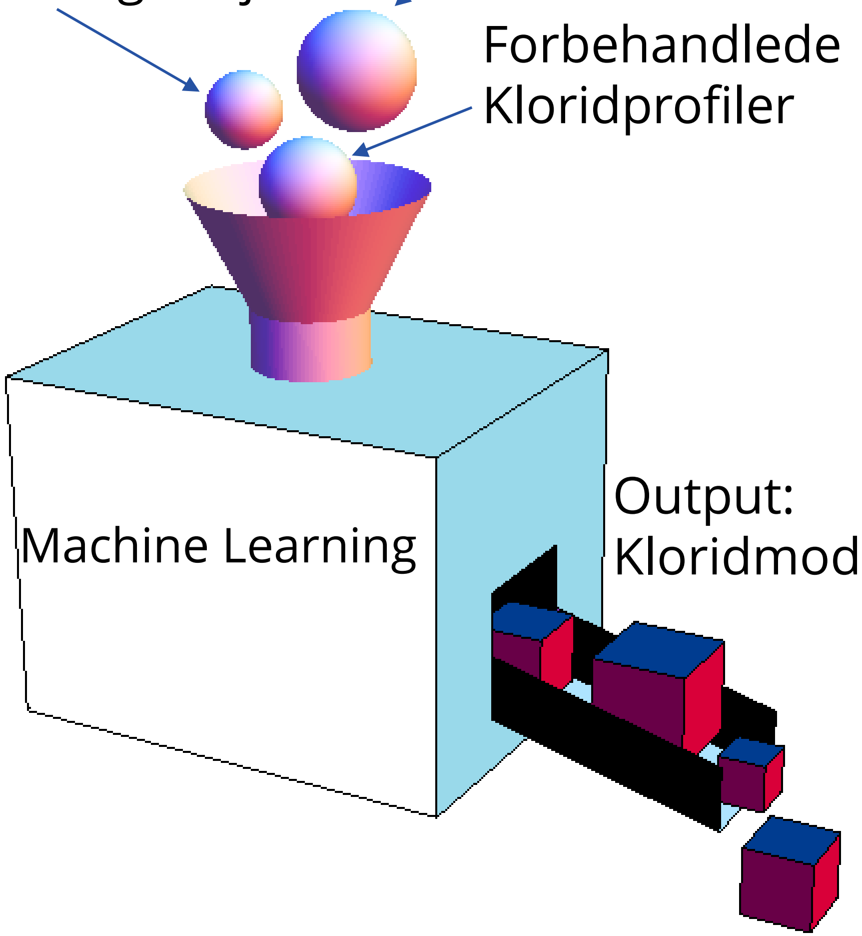
Forudsigelse af kloridindtrængning ved Machine Learning

Træning af model på felteksponeringsdata

Betonsammensætning

Eksponeringsmiljø

Forbehandlede Kloridprofiler



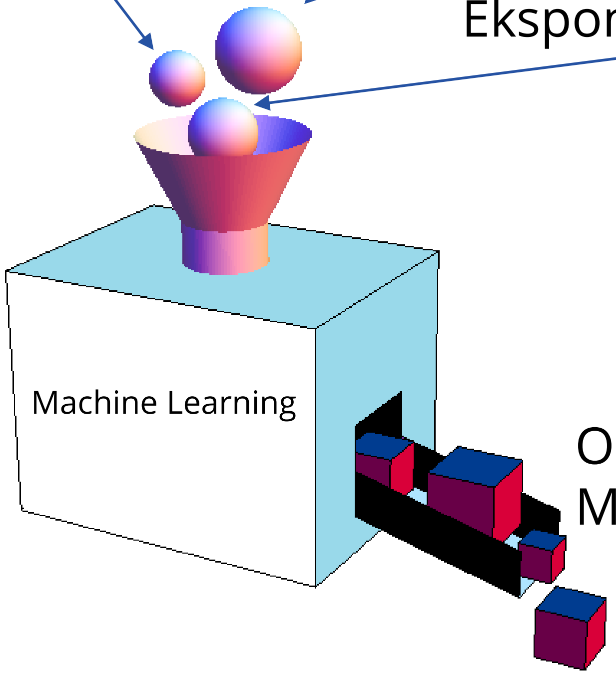
Output:
Kloridmodel

Test og brug af model (Når tidligere kloridprofiler ikke findes – f.eks. i designstadie)

Kloridmodel

Ønsket betonsammensætning

Eksponeringsmiljø

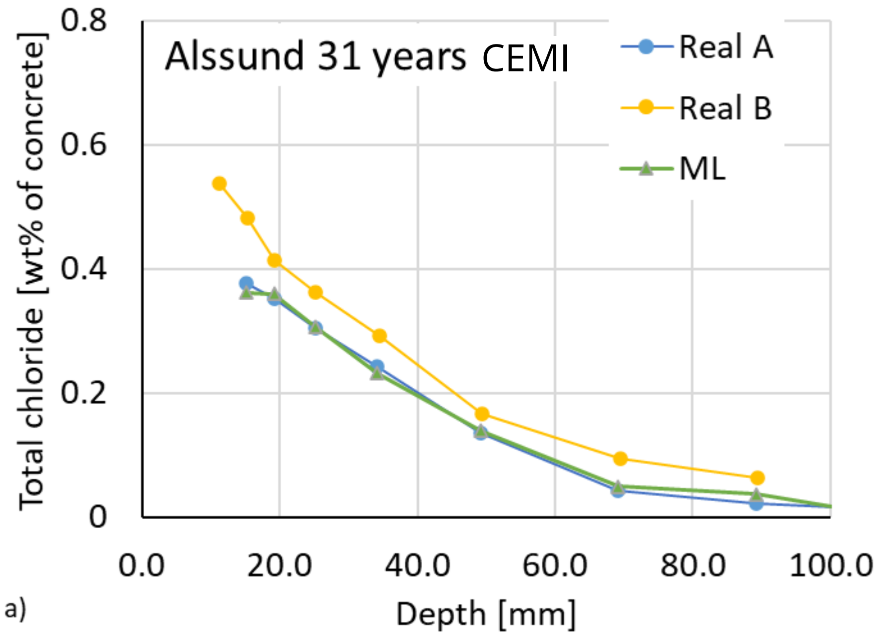


Output:
Master Kloridprofil

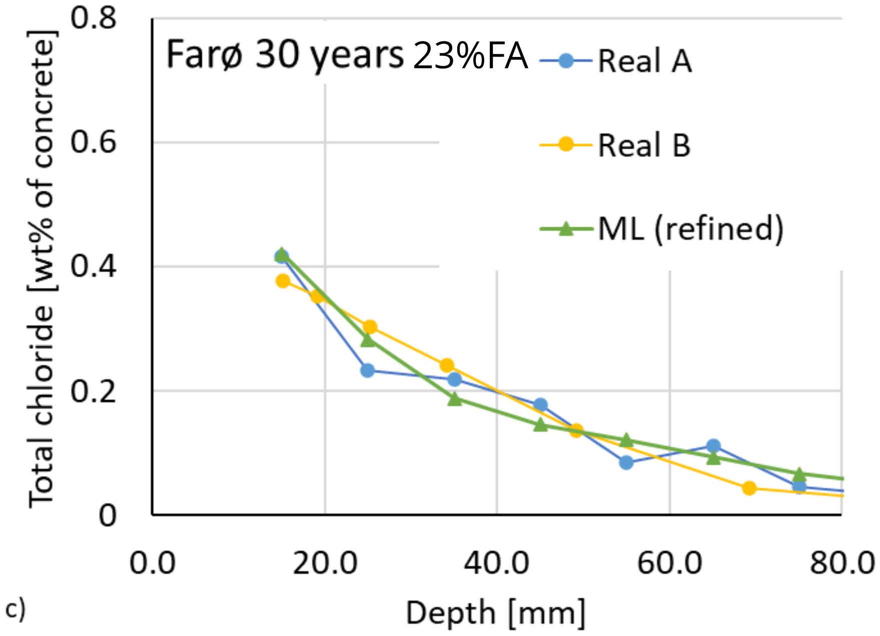
+ Efterbehandling

= Estimeret kloridprofil

Forudsigelser af kloridindtrængning i danske broer via ML model trænet på nordisk feltdata.



S. Fjendbo, subm. fib symposium 2023



S. Fjendbo, subm. fib symposium 2023

RMSE vs. mean

	Alssund	Farø
Real A/B	0.031	0.017
ML model	0.033	0.024
Factor	1.1	1.4

En faktor på 1.1, som der opnås for Alssund svarer til man for 35 år siden kunne sidde og overveje forskellige receptsammensætninger og forudsige kloridprofiler i dem med en nøjagtighed, der kun er 10% ringere, end den nøjagtighed man opnår, når man 35 år senere går ud at måler dem.

References

Poulsen, S. L. and H. E. Sørensen (2014). Chloride ingress in old Danish bridges. Proceedings 2nd International Congress on Durability of Concrete (ICDC), New Delhi, India.

Poulsen, S. L., H. E. Sørensen and U. Jönsson (2018). Chloride ingress in concrete blocks at the Rødbyhavn marine exposure site - Status after 5 years. 4th International Conference on Service Life Design for Infrastructures (SLD4). Delft, The Netherlands**:** 192-203.

Danner, T., U. Hjorth Jakobsen and M. R. Geiker (2019). Mineralogical Sequence of Self-Healing Products in Cracked Marine Concrete. Minerals **9**(5): 284:

Y. Cao, C. Gehlen, U. Angst, L. Wang, Z. Wang, Y. Yao, Critical chloride content in reinforced concrete—An updated review considering Chinese experience, Cement and Concrete Research 117 2019 58-68. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.020.

U.H. Jakobsen, K. De Weerdt, M.R. Geiker, Elemental zonation in marine concrete, Cement and Concrete Research 85 2016 12-27

Eirik Refsdal from Trondheim, NORWAY – Hovedbygget ved NTNU, CC BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12131156

Georget et al, in review

S. Fjendbo (2023), Prediction of Chloride Ingress Profiles In Concrete By Machine Learning, In review

TEKNOLOGISK INSTITUT

NTNU
Norwegian University of Science and Technology

Thanks for listening!

Simon Fjendbo, Consultant,
SIFJ@teknologisk.dk
Danish Technological Institute