



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Levetidsberegninger

Søren L. Poulsen

Projekt: Ny teknologi til anlægskonstruktioner
Referencegruppemøde d. 28. okt. 2013, Teknologisk Institut

Det arbejder vi med...

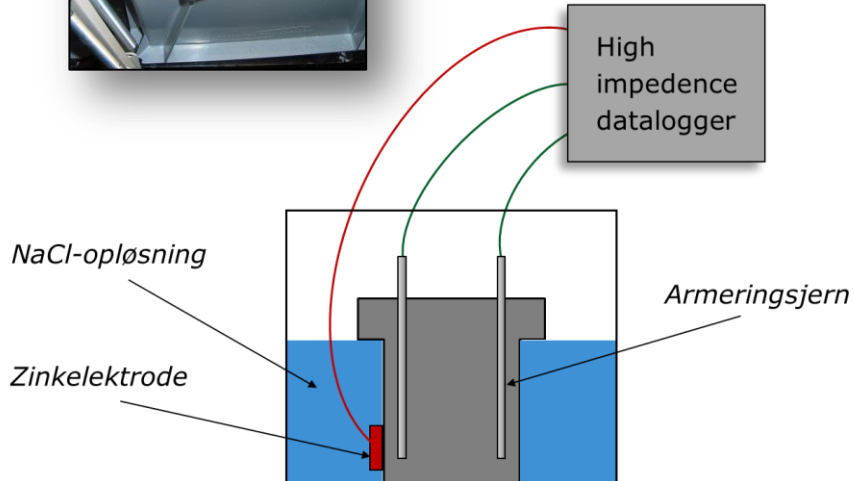
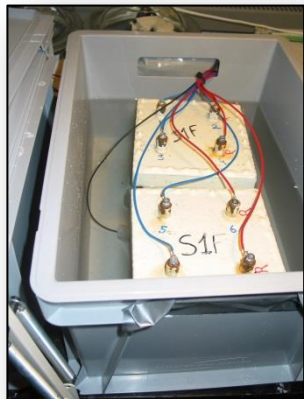
- Etablering af et bedre datagrundlag for inputparametre til levetidsmodeller, f.eks. udvikling af ny metode til måling af tærskelværdier for chlorid-initieret armeringskorrosion.
- Effekten af eksponeringstemperaturen for indtrængningen af chlorider i beton
- Beregningsværktøj til kvantificering af chloridbinding i beton
- Vurdering og sammenligning af levetidsmodeller
 - DuraCrete
 - **fib** Bulletin 34 (Model Code for Service Life Design)
 - HETEK (Mejlbro-Poulsen) modellen
 - STADIUM®

Måling af chloridtærskelværdier ved laboratorieforsøg

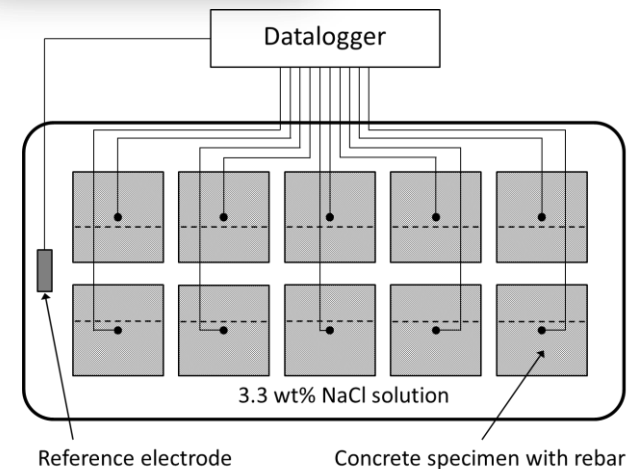
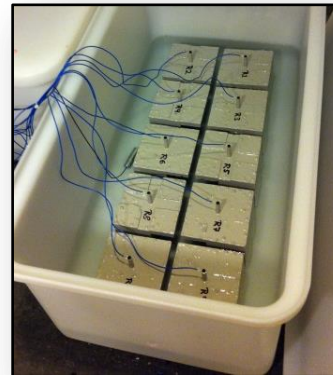
- RILEM TC 235 CTC: Udvikling af en alment accepteret metode til bestemmelse af tærskelværdier for chlorid-initieret armeringskorrosion gennem laboratorieforsøg.
- Indledende forsøg
 - Eksperimentel opsætning ved frit potentiale (*open circuit*)
 - Eksperimentel opsætning ved fasthold potentiale (potentiostatisk)
- RILEM Round Robin Test
 - Eksperimentel opsætning ved frit potentiale (*open circuit*)

Måling af chloridtærskelværdier: Frit potentiale

Indledende forsøg

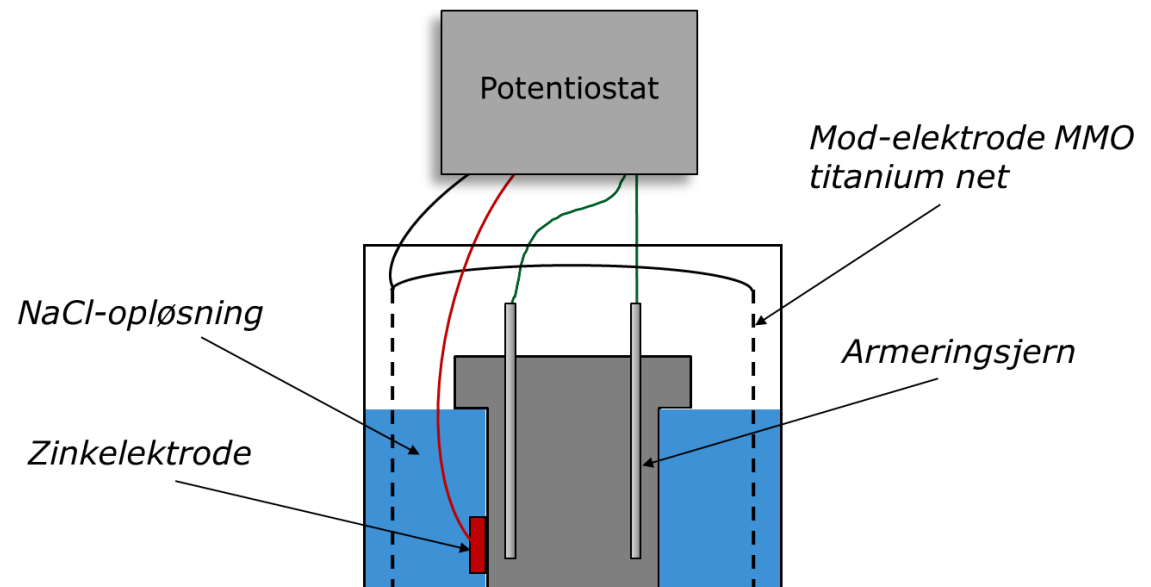
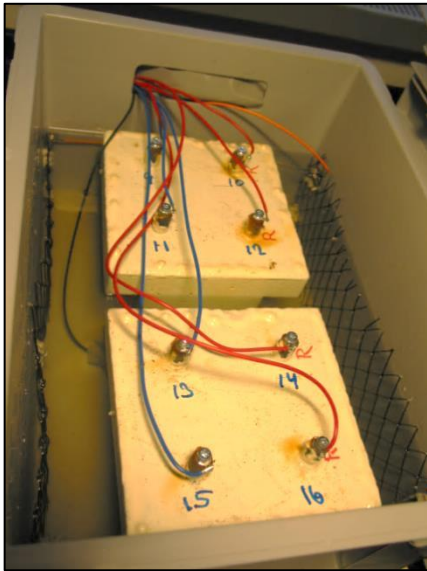


RILEM: Round Robin Test

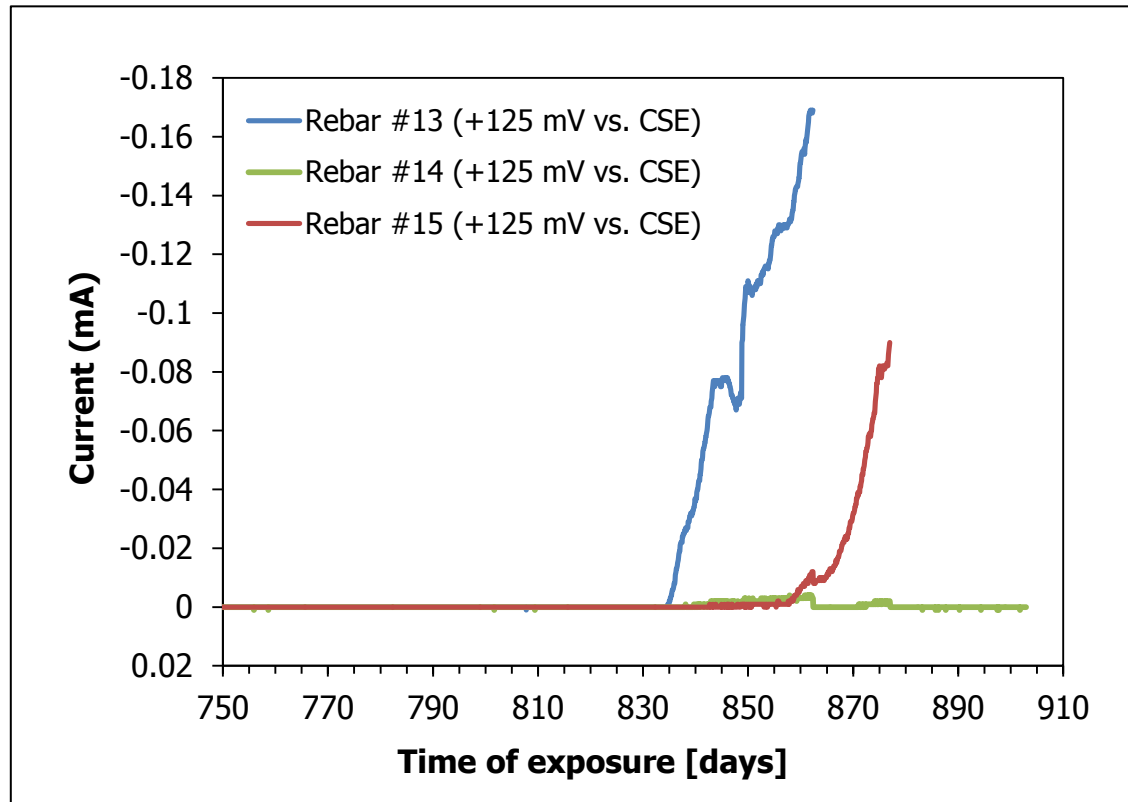


Måling af chloridtærskelværdier: Fastholdt potentiale

- Registrering af korrosion ved markant ændring i strømstyrke

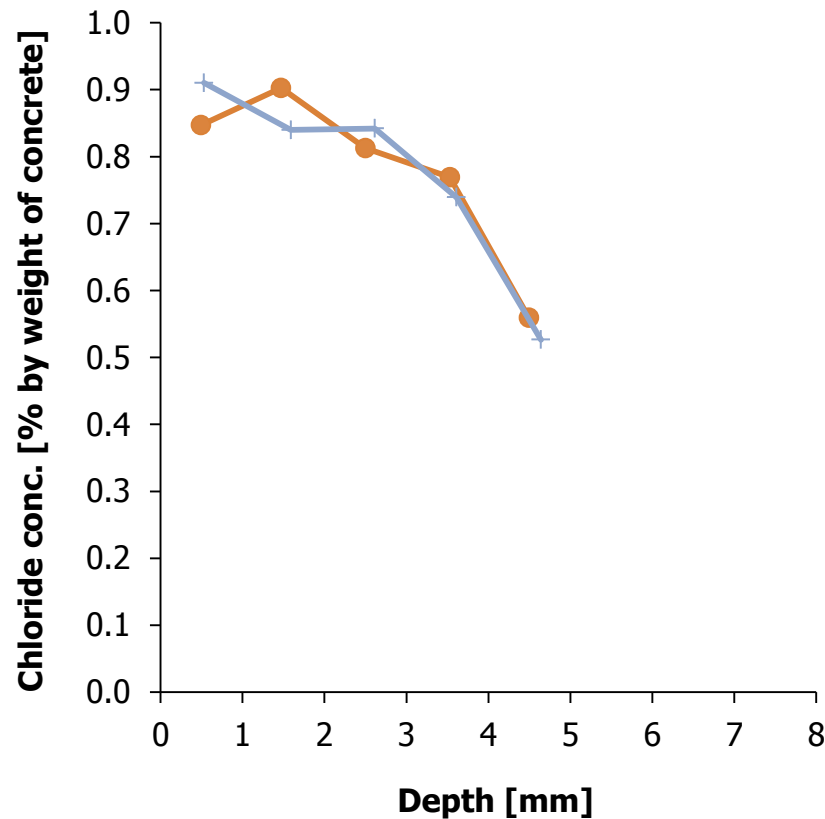


Måling af chloridtærskelværdier: Fastholdt potentiale



- Tid fra første registrering af korrosion til profilfræsning: 27 og 20 dage for armeringsjern #13 and #15.

Måling af chloridtærskelværdier: Fastholdt potentiale



- 862 days (rebar 13, +125 mV vs. CSE)
- 871 days (rebar 15, +125 mV vs. CSE)
- 904 days (rebar 14, +125 mV vs. CSE)

- Binder: 75% Portland cement + 25% flyveaske
- Vand/binder forhold: 0.4

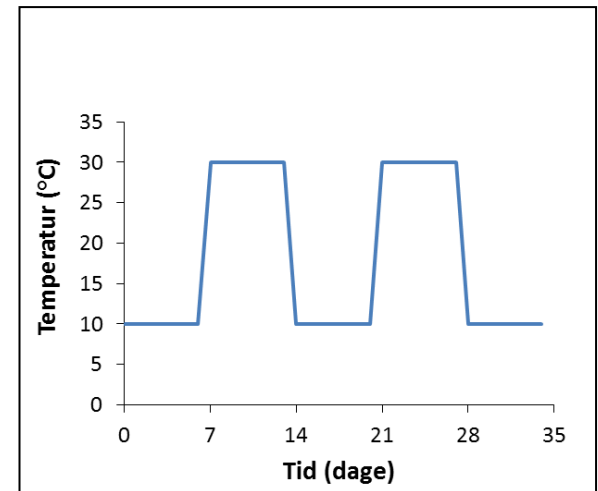
Måling af chloridtærskelværdier: Fastholdt potentiale

Sample ID	Treatment of rebar	Chloride content at depth of 5 mm [wt% of concrete]	Chloride content at depth of 5 mm [wt% of binder]
S1P (at rebar no. 13)	Cleaned in citric acid	0.6	2.6
S1P (at rebar no. 15)	Cleaned in citric acid	0.5	2.4

- Dæklagstykkelse:
 - 5 mm ved armeringsjern #13 and #15
 - ~6.5 ved armeringsjern #14

Forsøg med chloridindtrængning ved temperaturcyklusser

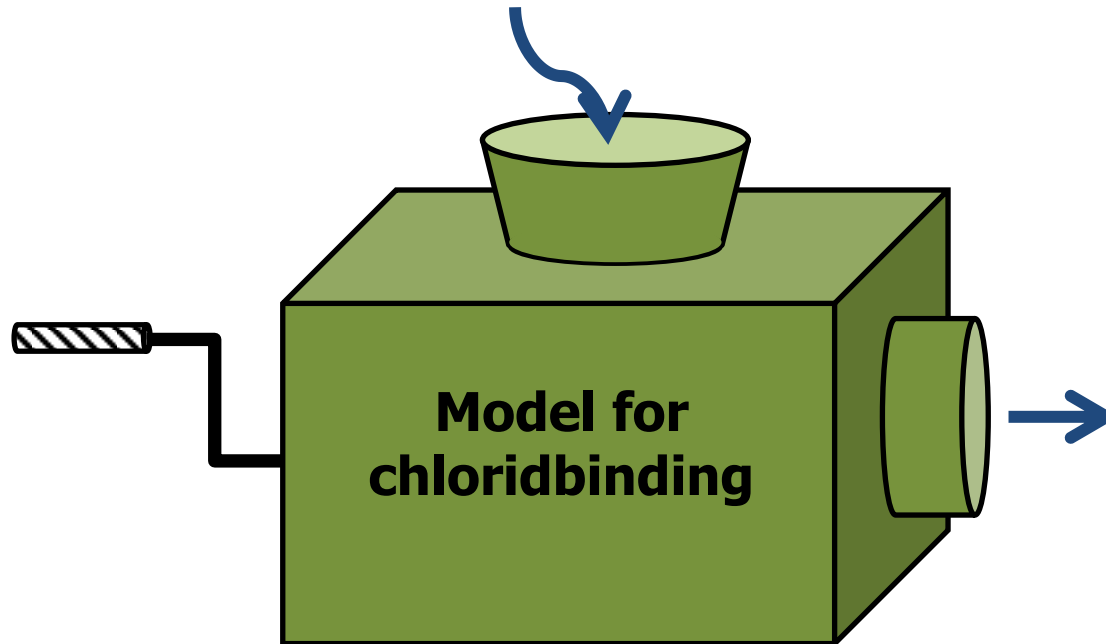
- Test af temperaturcyklers betydning for indtrængningen af chlorider
- Forsøgsprincipper fra NT Build 443 (*Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration*)



Chloridbindingsmodel

Input

- Kemisk sammensætning af cement
 - Vand/cement-forhold



Output

- Mængden af bundet chlorid.
- Kemisk sammensætning af porevæske: $[\text{Cl}^-]$, $[\text{Na}^+]$, $[\text{OH}^-]$, $[\text{Ca}^{2+}]$.
- Fase-selskab i hydratiseret cement

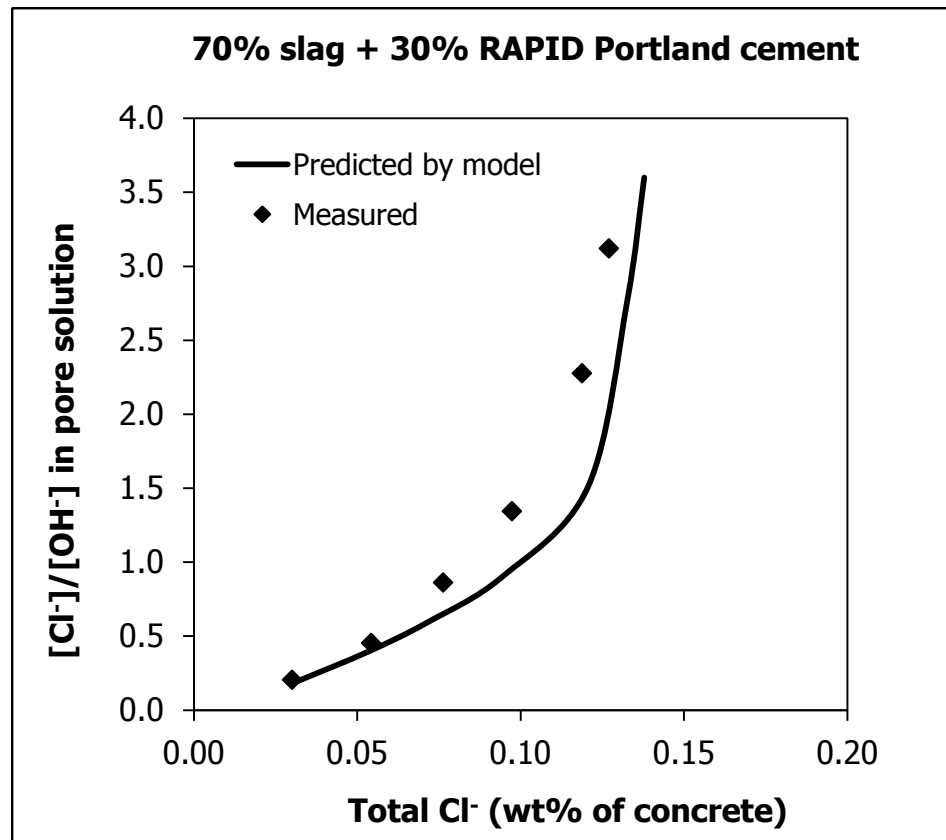
Chloridbindingsmodel: Forsøg med knust beton i kunstige porevæsker

- Formål: Test af modellens evne til at forudsige bindingen af chlorid i betonen
- Knuste betonprøver (kornstørrelse < 4 mm) blandes med kunstige porevæsker
- 5 betontyper undersøgt
- For hver betontype fremstilles der seks eksponeringsopløsninger (kunstige porevæsker) med forskellige koncentrationer af chlorid
- Efter 3 måneders eksponerings analyseres opløsningerne for $[\text{Cl}^-]$ og $[\text{OH}^-]$.



Chloridbindingsmodel

- Resultat af forsøg med knust beton i kunstige porevæsker



Chloridbindingsmodel: Forsøg med knust beton i kunstige porevæsker

- Chloridbindingsmodellen er oprindelig udviklet til forhold ved 20°C.
- Nye forsøg med knust beton eksponeret for kunstige porevæsker: Validering af chloridbindingsmodel ved lavere temperatur end 20°C, dvs. 8°C.



DuraCrete

- Europæisk forskningsprojekt 'DuraCrete' (Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures) (1996-1999)
- Resulterede i en guide til levetidsdesign for betonkonstruktioner, som inkluderer modeller for chlorid- og karbonatiserings-initieret armeringskorrosion.

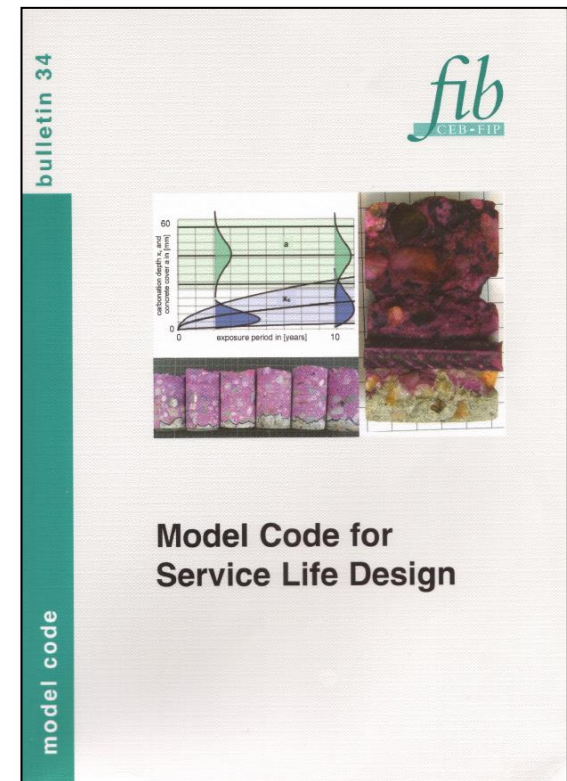


- Levetidsdesignet er baseret på ligninger, som modellerer nedbrydningsmekanismer i konstruktionen og betonens modstandsdygtighed over for eksponeringsmiljøet.
- Der opereres med fire tilgange til levetidsdesign:
 - 1) Full probabilistic
 - 2) Semi-probabilistic (partial safety factor approach)
 - 3) Deem-to-satisfy
 - 4) Avoidance of deterioration



fib Bulletin 34 (Model Code for Service Life Design)

- Tilgangen til levetidsdesign fra DuraCrete er blevet implementeret og opdateret i ***fib*** Bulletin 34 (Model Code for Service Life Design) (2006)



fib Bulletin 34 (Model Code for Service Life Design)

- *Limit state* ligning for chlorid-initieret armeringskorrosion, hvor chloridtaerskelværdien (C_{crit}) sammenlignes med den aktuelle chloridkoncentration i armeringsdybden til tiden t $C(x = a, t)$:

$$C_{\text{crit.}} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{S, \Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \text{erf} \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{app}, C} \cdot t}} \right]$$

- Tilsyneladende diffusionskoefficient for chlorid:

$$D_{\text{app}, C} = k_e \cdot D_{\text{RCM}} \cdot k_t \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

← *Ageing factor*

Betydning af variation af inputparametre

- Levetider beregnet med ***fib*** Model Code

<i>Input parameters</i>			Predicted service life [years]
C_{crit} [wt% of binder]	Ageing factor (n)	C_s [wt% of binder]	
1.30	0.4	5.0	141

DuraCrete + fib Model Code: Begrænsninger/ulemper

- Effekten af andre ioner i poresystemet end chlorid medtages ikke disse empiriske modeller, hvor Ficks 2. diffusionslov anvendes som grundlag for beregning af chloridindtrængningen.
- Pålideligheden af beregnede levetider opnået ved anvendelse af empiriske modeller er stærkt afhængige af et godt datagrundlag fra tidligere undersøgelser.



HETEK-modellen



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- Empirisk model, som er kalibreret mod data for en række forskellige betonblandinger fra den marine eksponeringsstation i Träslövsläge i Sverige.
- Kan anvendes for følgende eksponeringsmiljøer:
 - Marin atmosfære
 - Marin splash zone
 - Neddykket i havvand



HETEK-modellen

- HETEK-modellen (Mejlbro-Poulsen-modellen) for chloridindtrængning er en generel løsning til Ficks 2. diffusionslov.
- Kræver anvendelsen af komplicerede funktioner (de såkaldte Mejlbro-funktioner $\Psi_p(u)$).
- $\Psi_p(u)$ funktionerne findes i tabeller.
- Simpelt approksimeret udtryk for $\Psi_p(u)$ kan anvendes i stedet.
- Både overfladekoncentrationen (C_{sa}) og diffusionskoefficienten (D_a) regnes som værende tidafhængige.

HETEK-modellen: Begrænsninger

- Modellen er stærkt afhængig af, om der er gode målinger fra det eksponeringsmiljø og den betontype, man ønsker at undersøge.
- Kan anvendes for bindere med flyveaske og/eller mikrosilika, men *ikke* slagge

Regneark til levetidsberegninger

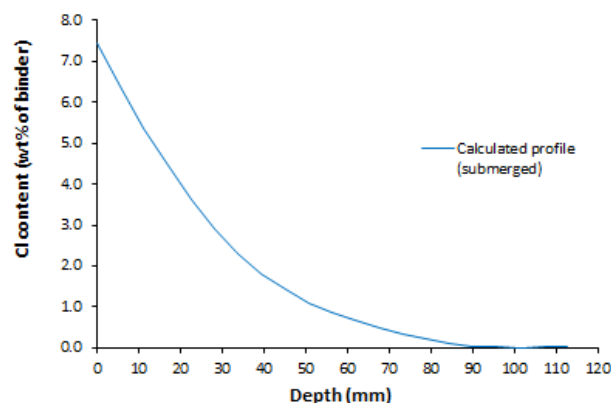


TEKNOLOGISK
INSTITUT

HETEK Model (Mejlbro-Poulsen Model)

Concrete Mix Design Code: YM-SEG-03

Binder: Portland cement + 14% fly ash + 5% microsilica



General information

Project	YMSK -Istanbul Strait Road Crossing Project
Binder	Portland cement + 14% fly ash + 5% microsilica
Exposure conditions	Submerged

Input parameters

Parameter	Value	Unit	Explanation
W	145	[kg/m ³ of conc.]	Content of water in concrete
PC	360	[kg/m ³ of conc.]	Content of Portland cement in concrete
FA	60	[kg/m ³ of conc.]	Content of fly ash in concrete
SF	20	[kg/m ³ of conc.]	Content of silica fume in concrete
C _i	0.019	[wt% of binder]	Initial chloride content i concrete
t	144	[years]	Time of exposure
t _{ex}	0.077	[years]	Age at first exposure
c	50	[mm]	Cover thickness
L	2	[%]	Air content

The calculations given below are primarily based on equations presented in: J. M. Frederiksen and M. Geiker, *Chloride Ingress Prediction - Part 2: Experimentally based design parameters*, Proceedings of Inter. RILEM Symposium on Concrete Modelling - CONMOD'08, 26-28 May 2008, Delft, The Netherlands, p. 283-290.

Calculation of service life

Equation
Time to corrosion initiation (marine atmosphere) [years]
Time to corrosion initiation (splash zone) [years]
Time to corrosion initiation (submerged) [years]
144

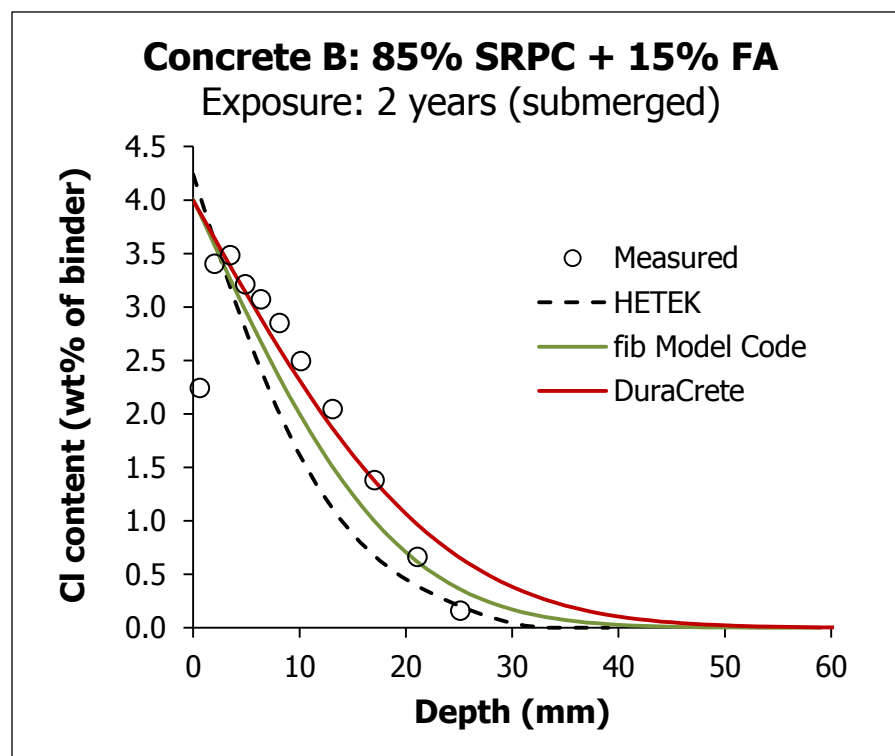
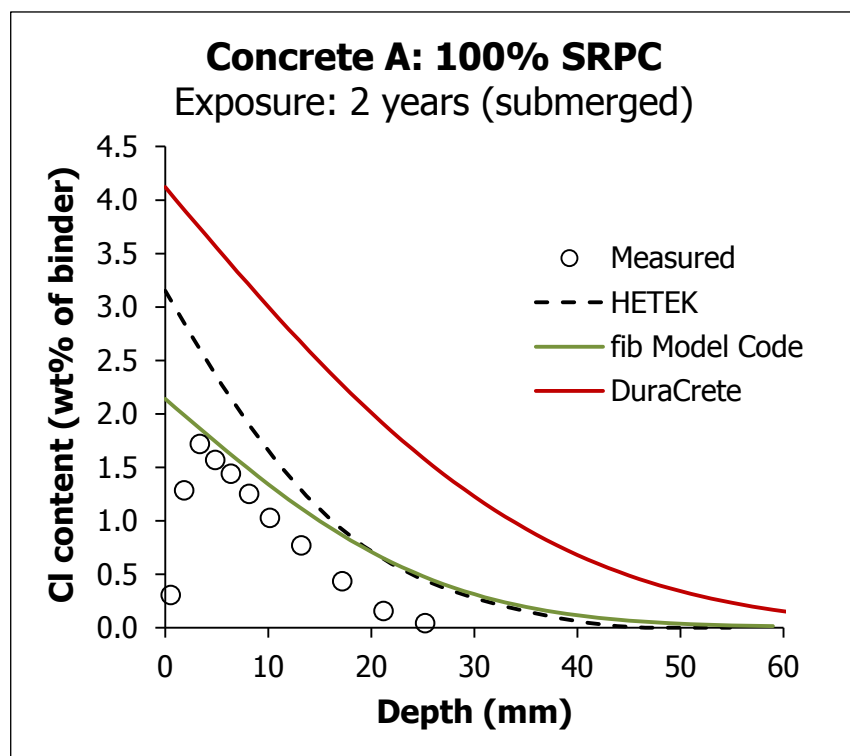
$$t_{cr} = t_{ex} \times \left\{ \frac{0.5 \cdot c}{\sqrt{t_{ex} D_{ox}} \times \ln v_p(v_{cr})} \right\}^{\frac{2}{1-\alpha}}$$

Calculation of the parameter θ

Parameter	Value	Unit	Explanation	Equation
θ	0.5576	[-]	Parameter to be used for calculation of D_{ox}	$\theta = \frac{1}{2} \times \log_{10} \left(\frac{1}{t_{ex}} \right)$

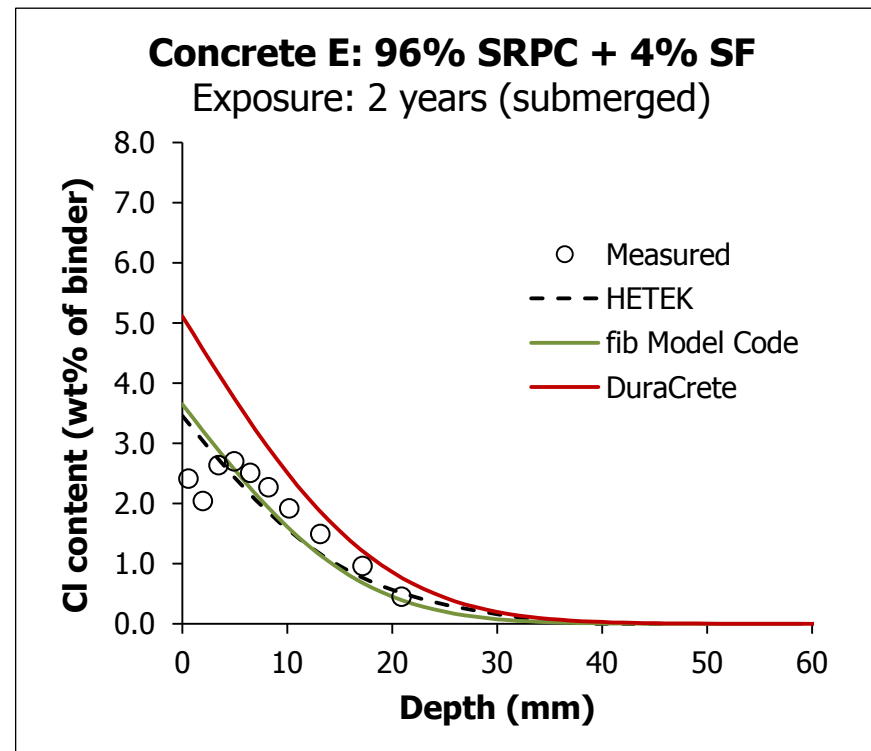
Vurdering af levetidsmodeller

Betoner fra Femern Eksponeringsplads i Rødbyhavn



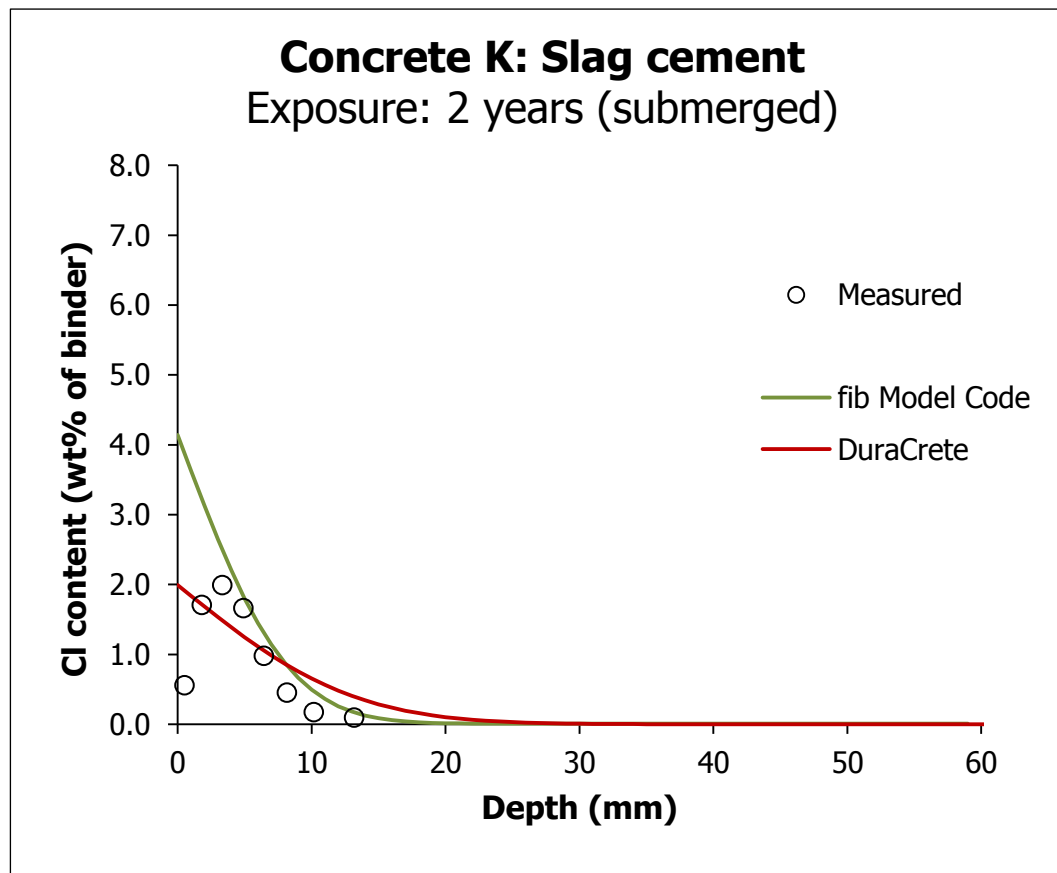
Vurdering af levetidsmodeller

Betoner fra Femern Eksponeringsplads i Rødbyhavn



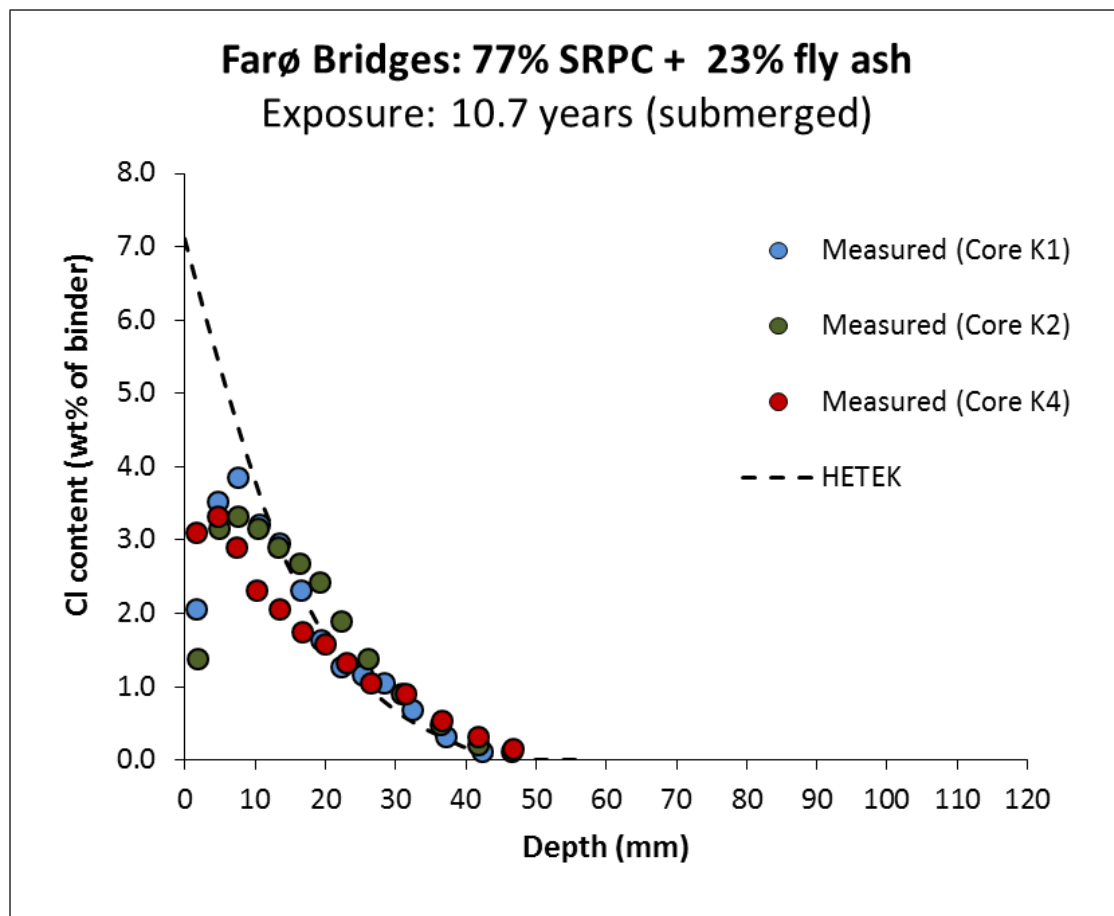
Vurdering af levetidsmodeller

Betoner fra Femern Eksponeringsplads i Rødbyhavn



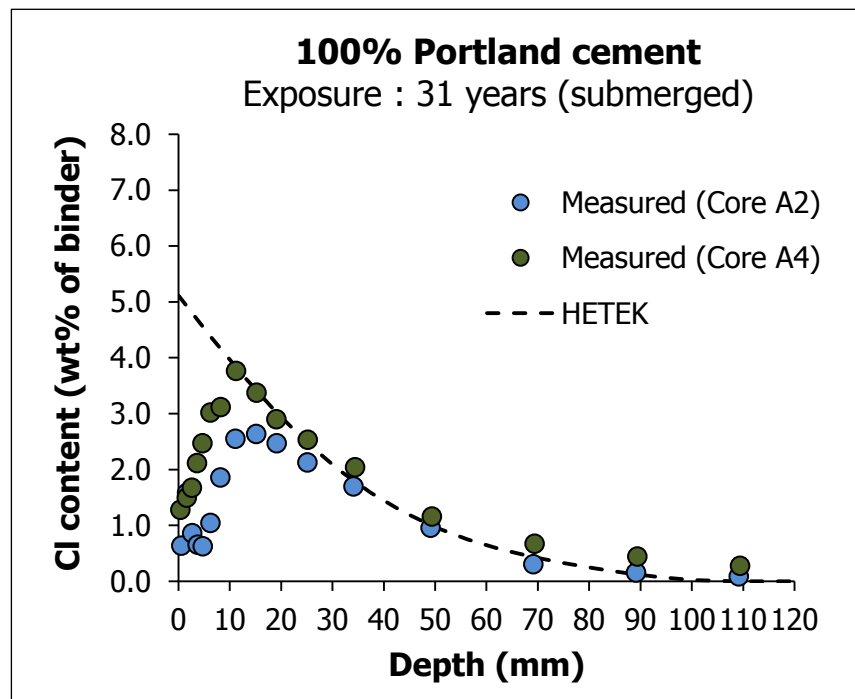
Vurdering af levetidsmodeller

Farøbroerne



Vurdering af levetidsmodeller

Alssundbroen



Besøg hos SIMCO Technologies

- SIMCO Technologies: Canadisk rådgivningsvirksomhed
- Specialer:
 - Holdbarhed af beton.
 - Levetidsberegninger for betonkonstruktioner.
- Har udviklet software til beregning af levetider: STADIUM®.
- Formål med besøg: Introduktion til anvendelsen af STADIUM®.



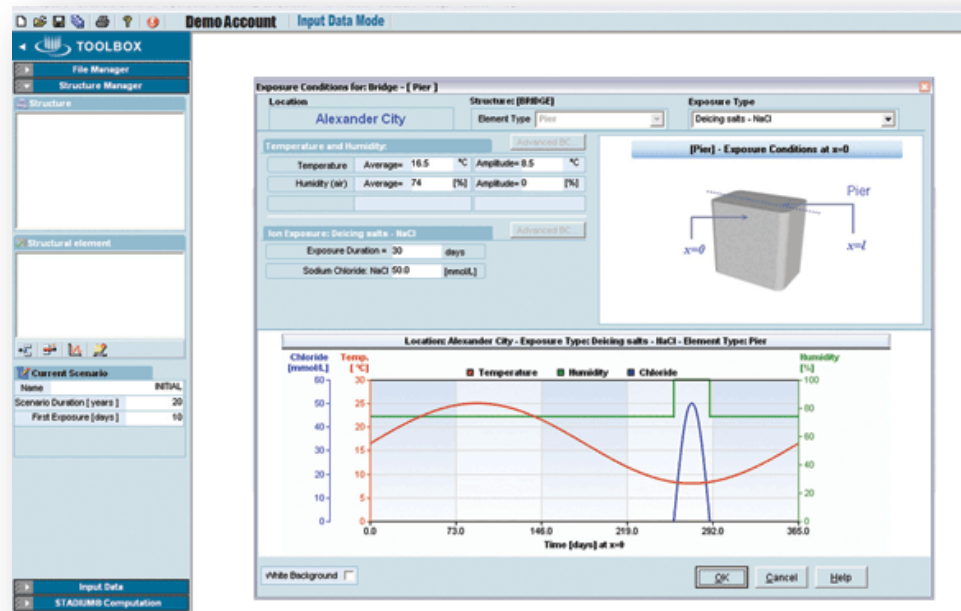
STADIUM® modellen

- Modelleringsværktøj som forudsiger indtrængningen af ioner i beton.
- Er baseret på de nyeste modeller for ion transport i porøse materialer (udvidet Nernst-Planck ligning)
- Baseret på numeriske beregninger (*Finite element* beregninger)
- Giver en fuldstændig beskrivelse af bevægelsen af ioner ind og ud af betonen under forskellige eksponeringsforhold.



STADIUM[®]-modellen: Input

- Nødvendigt input for at udføre beregningerne:
 - Materialeegenskaber: Bl.a. porøsitet, tortuositet, permeabilitet og kemisk sammensætning.
 - Eksponeringsforhold: Temperatur, relativ luftfugtighed og ion-koncentrationer i eksponeringsmiljøet.



STADIUM[®]-modellen: Outputs



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- Koncentrationsprofiler af ionerne i betonen
- Mineralfase-profiler
- Vandindhold (relativ luftfugtighed) og temperaturfordeling
- Fordeling af porøsitet som følge af opløsning/krystallisation af mineraler

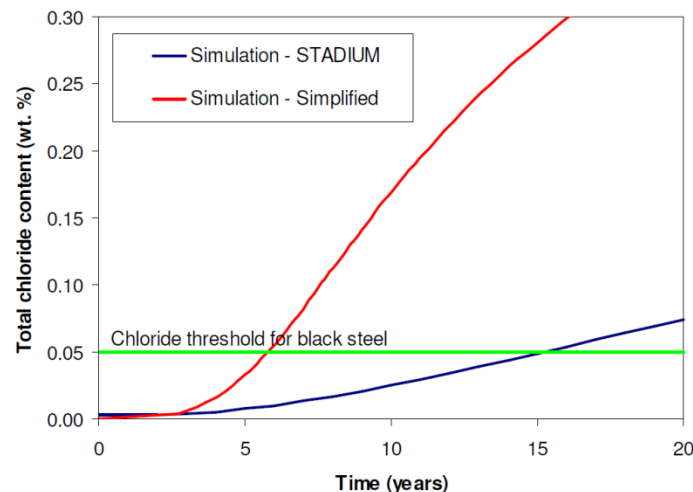
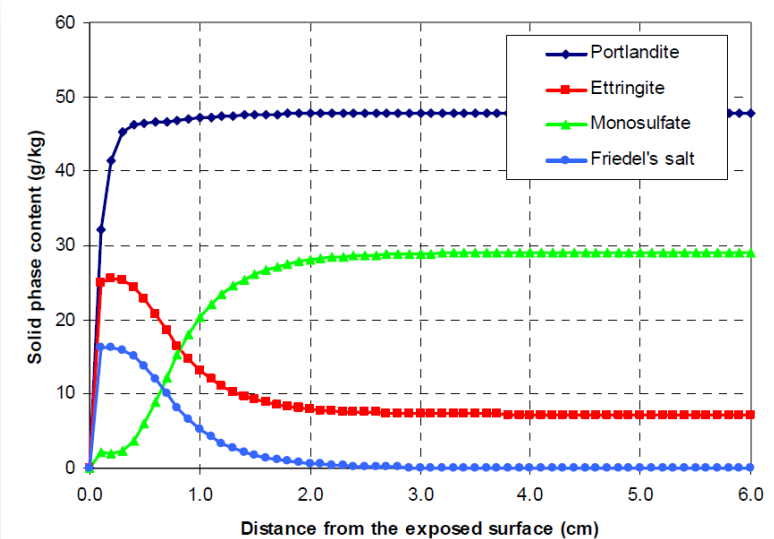


Figure 6 – Chloride content at the rebar position $x=50$ mm



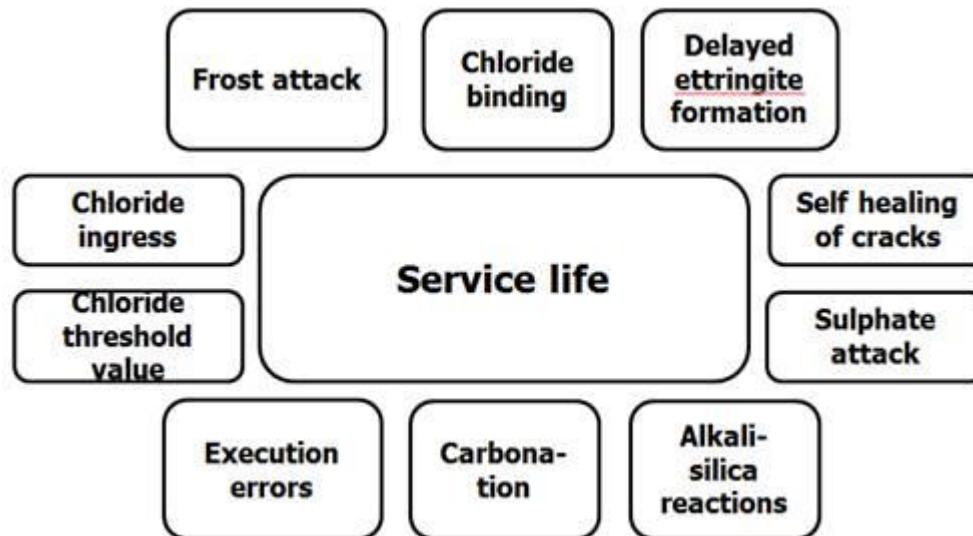
STADIUM® modellen: Begrænsninger



- Kræver mange input-parametre, f.eks. fra laboratorietests.
- Karbonatisering behandles ikke.
- Forudsiger ikke skader forårsaget, når udfældningen af faser som gips og ettringit fører til udvidelse og revnedannelse.

Plug and play-koncept for levetidsdesign

- Website planlagt med *plug and play* moduler, der har betydning for levetiden af en betonkonstruktion.



- *Work in progress...*



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Tak for
opmærksomheden