



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Værktøjer til beregning af chloridindtrængning i beton

Søren L. Poulsen, konsulent, Teknologisk Institut, Beton

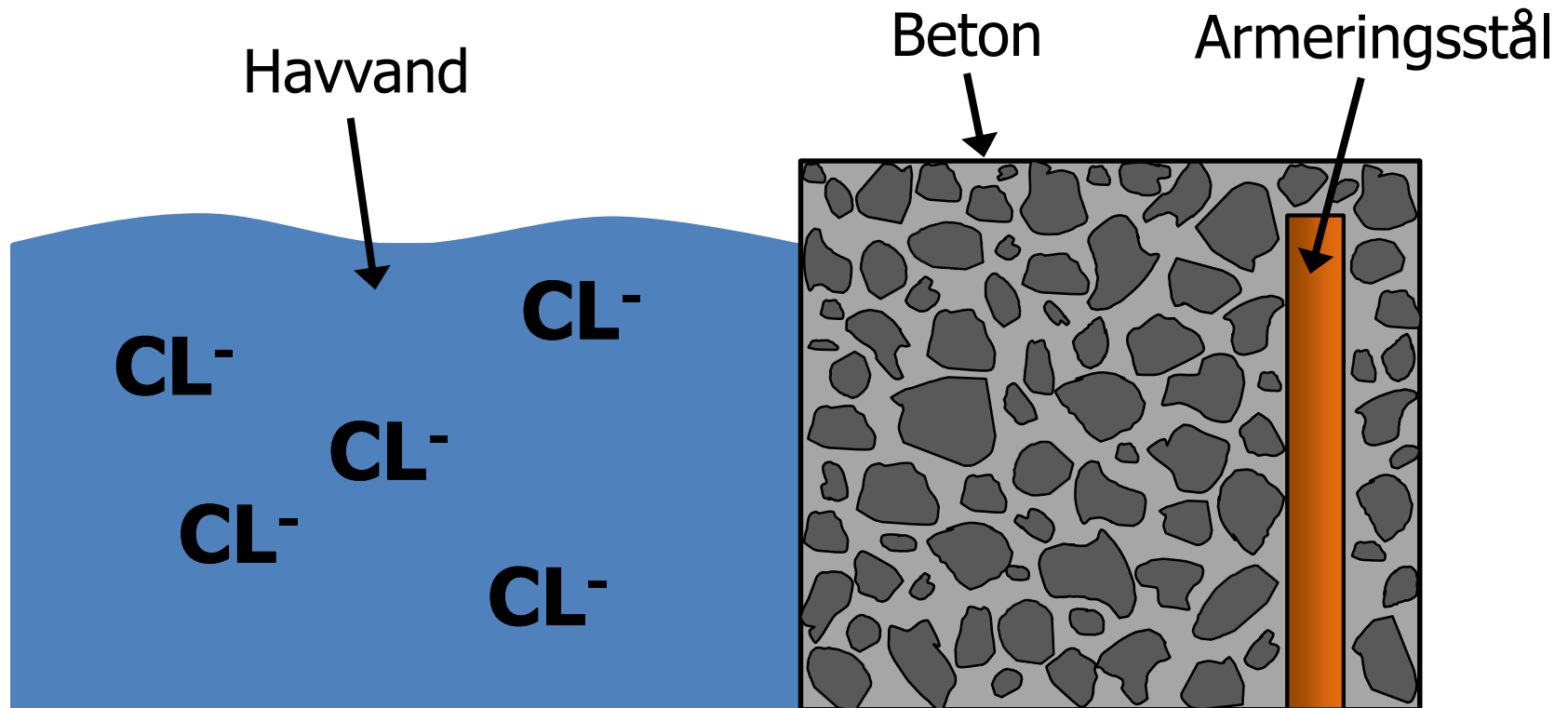
*IDA temaaften på Navitas: Tunneller, alternativ armering og
chloridindtrængning i beton, 17. november 2015*

Nedbrydningsmekanismer i betonkonstruktioner

- Nedbrydningsmekanismer:
 - Armeringskorrosion pga. chlorider
 - Armeringskorrosion pga. karbonatisering
 - Alkali-kisel-reaktioner
 - Sulfat-angreb
 - Frost/tø-påvirkninger
 - Udmattelse forårsaget af dynamisk belastning
 - Andre mekanismer...

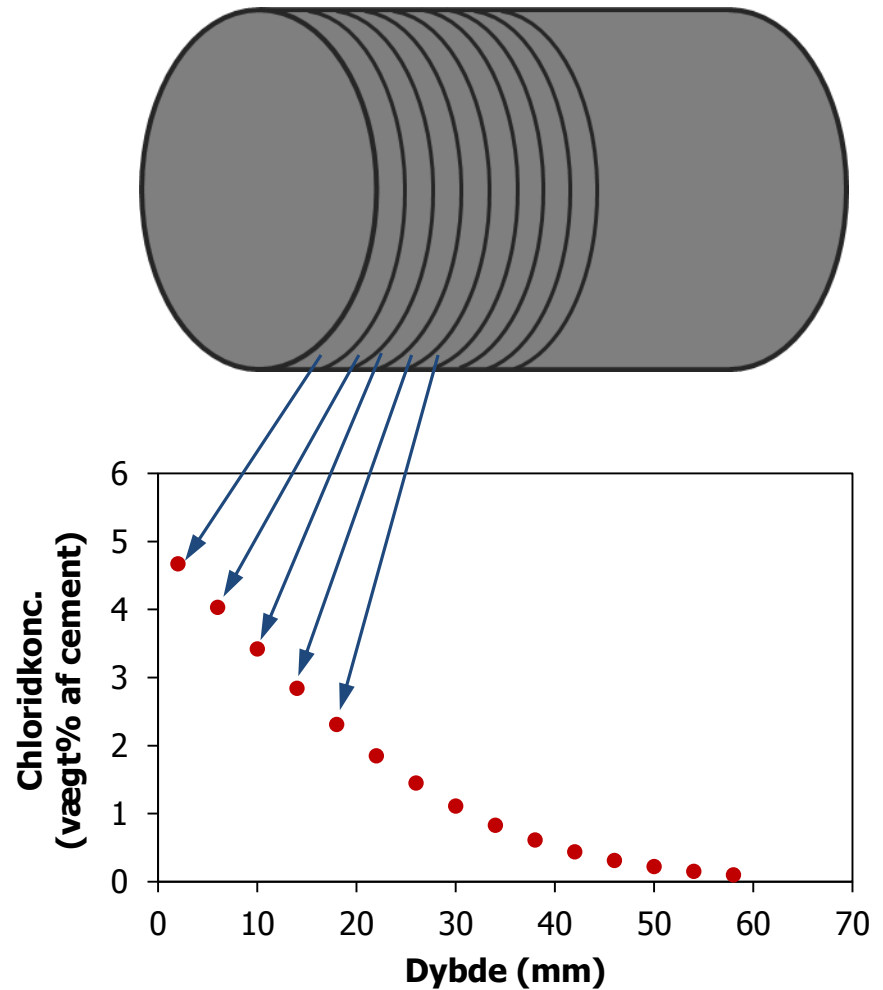


Chloridindtrængning i beton

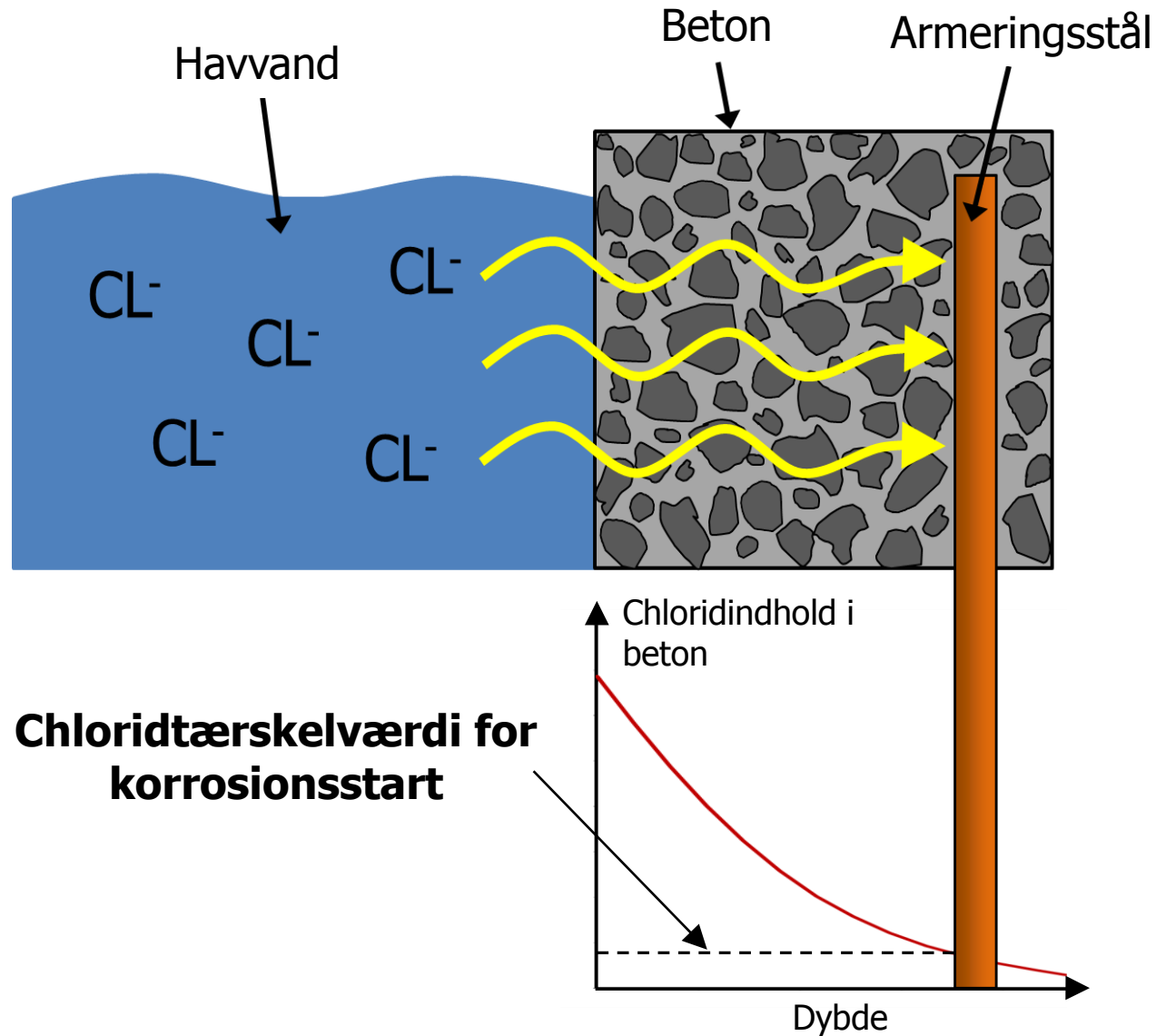


Måling af chloridprofiler

Betonprøve



Chloridindtrængning i beton



Modellering af chlorid-indtrængning: Collepardis model

- Matematisk model for chloridindtrængning i beton:

$$C(x,t) = C_i - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}} \right)$$

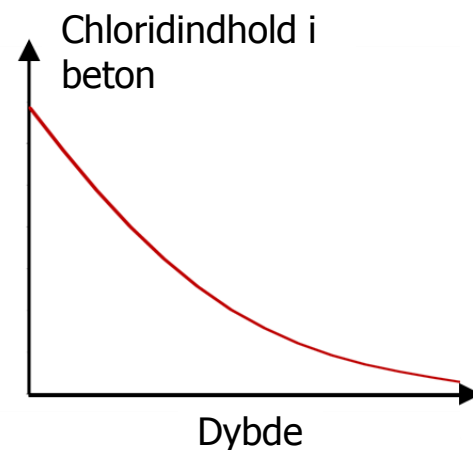
$C(x,t)$ = chloridkonc. i dybden x til tiden t

C_i = initiel chloridkoncentration i betonen

C_s = chloridkoncentration ved betonoverfladen

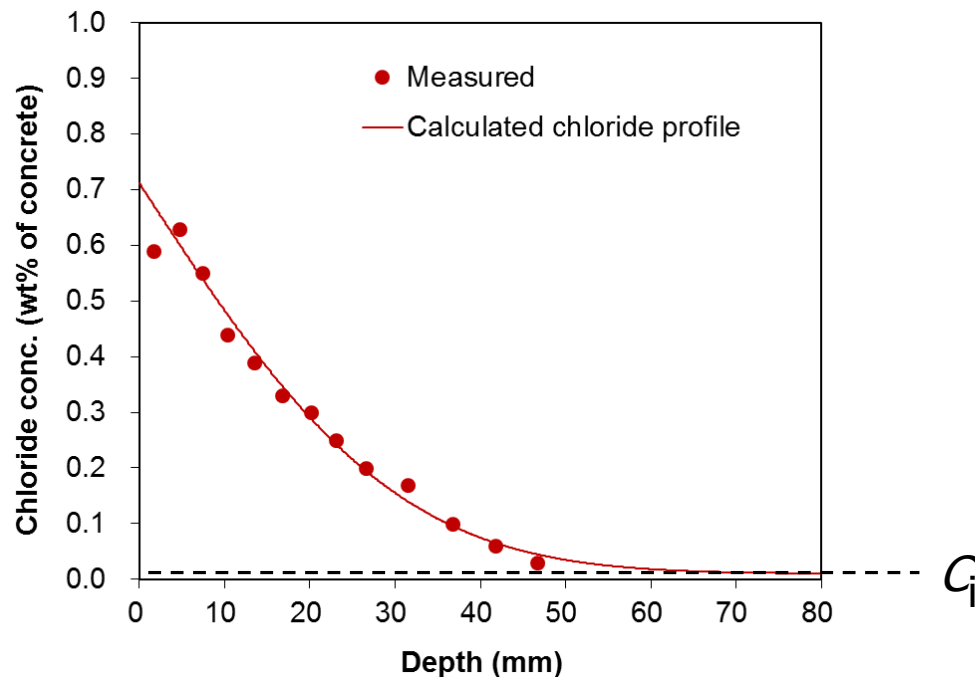
erf = fejlfunktionen

D = diffusionskoefficient for chlorid-ioner



Modellering af chlorid-indtrængning: Collepardis model

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}} \right)$$

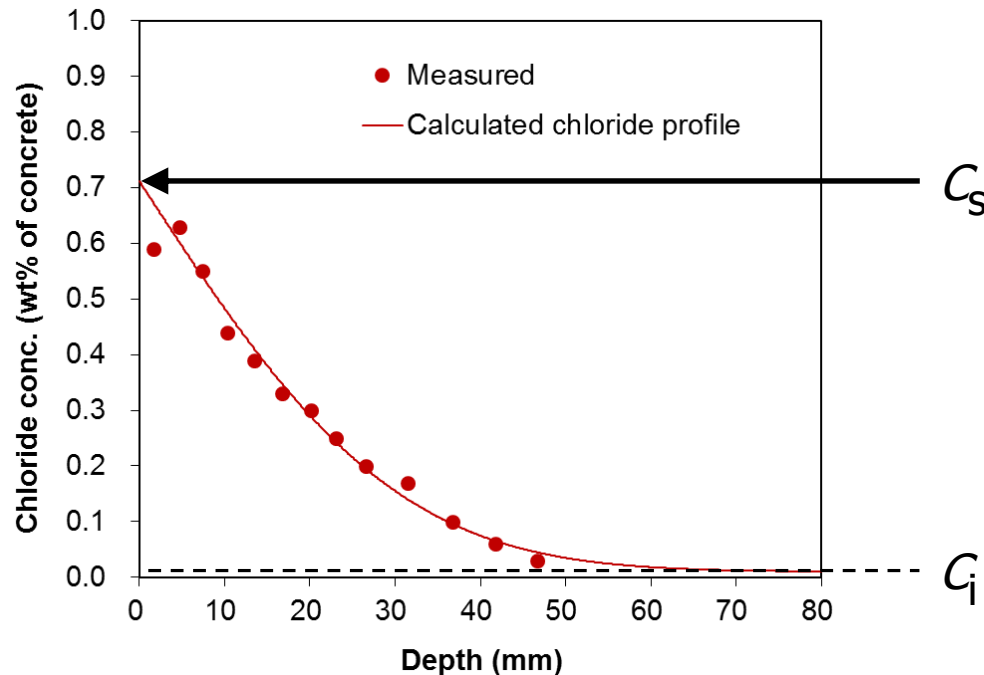


Kilde: Wikipedia.



Modellering af chlorid-indtrængning: Collepardis model

$$C(x,t) = C_i - ((C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}} \right))$$



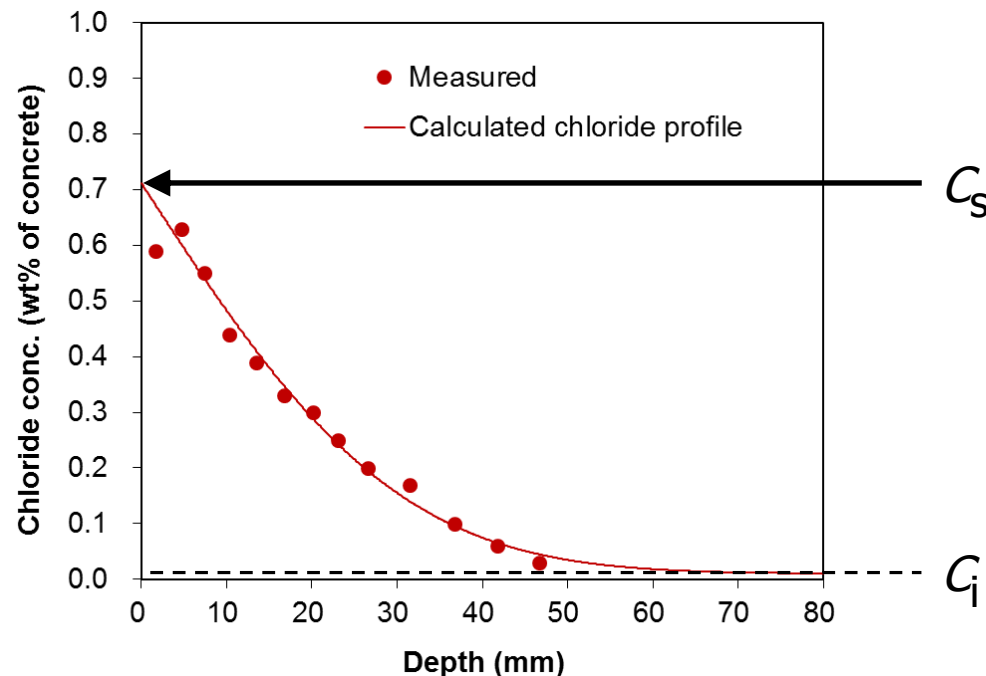
Kilde: Wikipedia.



Modellering af chlorid-indtrængning: Collepardis model

$$C(x,t) = C_i - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}} \right)$$

Diffusionskoefficienten D beskriver henfaldet af det beregnede chloridprofil

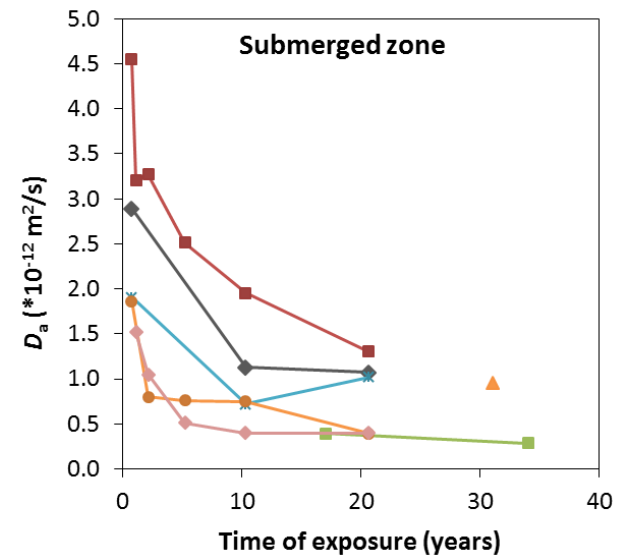
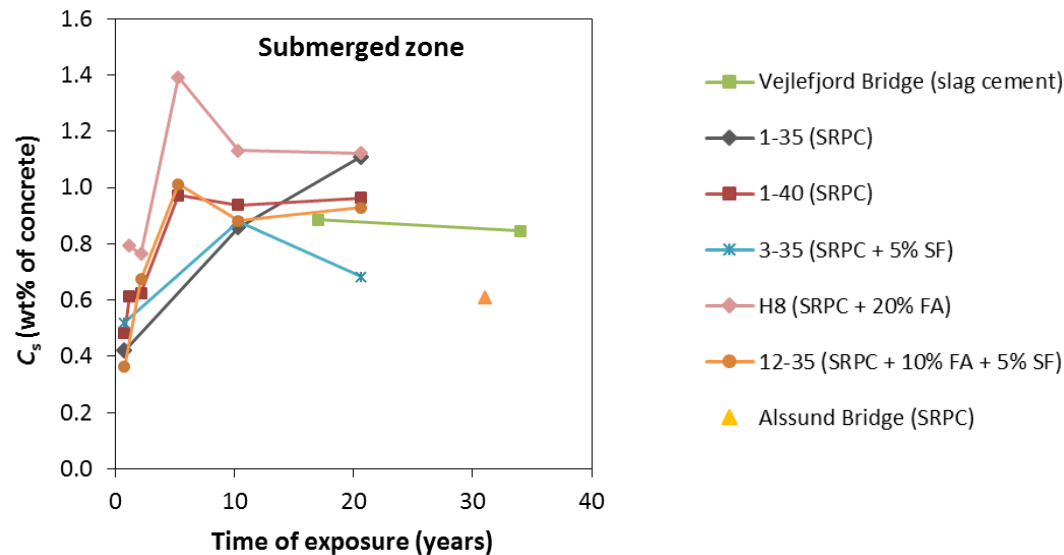


Kilde: Wikipedia.



C_s og D : Konstante eller tidsafhængige parametre?

- I Collepardis model antages C_s og D at være konstante
- C_s og D kan dog mere præcist opfattes som tidsafhængige parametre, i det mindste gennem de første 5 – 10 års chlorid-eksponering



C_s og D : Konstante eller tidsafhængige parametre?

- Tidsafhængigheden af D inkluderet i de fleste modeller til beregning af chloridindtrængning i betonkonstruktioner (dvs. levetidsmodeller).
- Tidsafhængigheden af D udtrykkes typisk gennem en potensfunktion, f.eks.:

$$D_a(t) = D_{aex} \left(\frac{t_{ex}}{t} \right)^{\alpha}$$

 *ageing factor*

HETEK-modellen



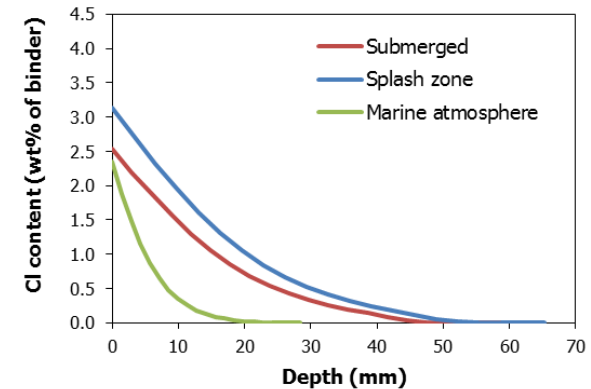
TEKNOLOGISK
INSTITUT

- Empirisk og deterministisk model for chloridindtrængning i beton.
- Kaliberet mod 39 forskellige betontyper fra den marine eksponeringsplads ved Träslövsläge i Sverige.
- Eksponeringstider på op til 20 år.
- Anvendelig for følgende eksponeringsmiljøer:
 - Marin atmosfærisk zone
 - Marin *splash zone*
 - Neddykket i havvand



HETEK-modellen

- Indtrængningsmodellen repræsenterer en analytisk løsning til Ficks 2. lov, hvor både C_s og D indgår som tidsafhængige parametre.
- Den traditionelt anvendte fejlfunktionsløsning er erstattet af nogle "generaliserede" fejlfunktioner, de såkaldte Mejlbro Ψ_p -funktioner.



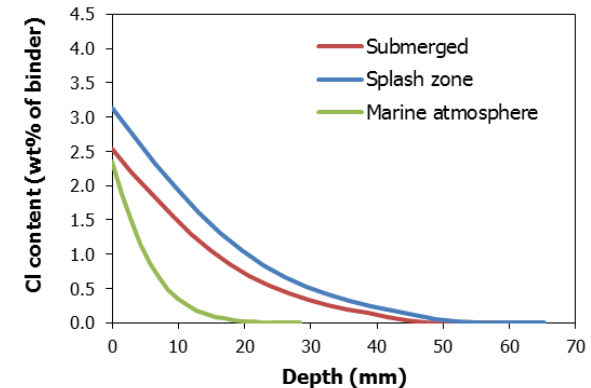
HETEK-modellen

Fordele

- Tidsafhængigheden af både C_s og D tages i regning.
- Som input har modellen kun brug for oplysninger om betonsammensætning og eksponeringsmiljø.

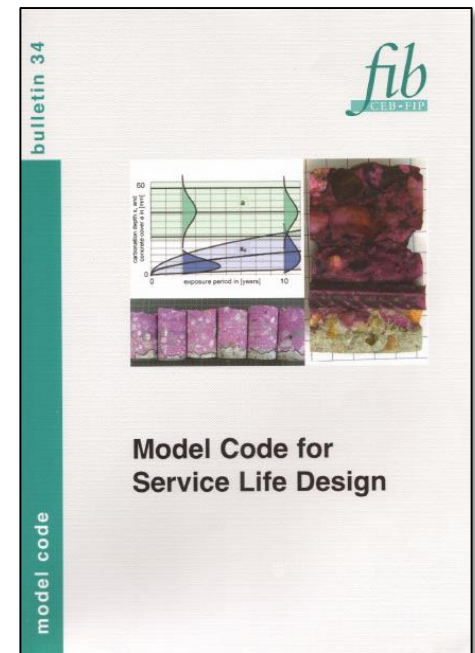
Begrænsninger

- Modellen er stærk afhængig af gode måledata for det givne eksponeringsmiljø og den givne betontype, man ønsker at modellere chloridindtrængning for.
- Ingen kommerciel software er tilgængelig.
- Baseret på kompleks matematik (kan måske anses som lidt af en "black box").
- Er kalibreret mod betoner med bindere indeholdende flyveaske og/eller mikrosilica, men *ikke* mod betoner med slagge.

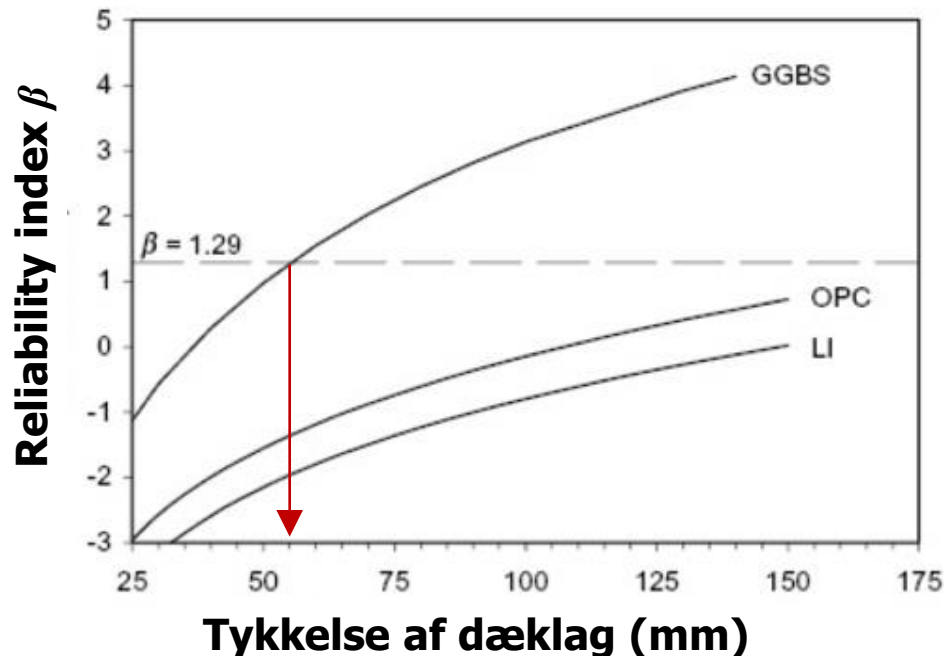


fib Mode Code for Service Life Design

- Baseret på tidligere arbejde i det europæiske projekt *DuraCrete* (1996-1999).
- Inkluderer fire forskellige tilgange til levetidsdesign:
 - Fuldt probabilistisk
 - Semi-probabilistisk (deterministisk)
 - *Deemed-to-satisfy*
 - *Avoidance of deterioration*
- Inkluderer modeller for følgende nedbrydningsmekanismer:
 - Chlorid-initieret armeringskorrosion
 - Karbonatiserings-initieret armeringskorrosion
 - Frost/tø-påvirkning



fib Mode Code for Service Life Design: Eksempel på probabilistisk levetidsdesign



Figur fra Bertolini et al. (2013)

***≥ 55 mm dæklag
kræves for at opnå en
levetid på 50 med et
'reliability index' på
1.29***

Gennemsnitlig dæklagstykkelse i armeret betonelement, der skal til for at garantere en levetid på 50 år plottet mod 'reliability index' (Eksponeringsforhold: Splash zone, årlig gennemsnitstemp. på 20°C)

Chlorid-initieret armeringskorrosion

- *Limit state*-ligning for initiering af armeringskorrosion:

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

- Modifieret version af fejlfunktionsløsningen til Ficks 2. lov.
- Konstant C_s og tidsafhængig D :

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

← Ageing factor

← Migrationskoefficient for chlorid

Fordele

- Inkluderer forskellige typer af nedbrydningsmekanismer
- Kan anvendes for en række af forskellige eksponeringsmiljøer.

Begrænsninger/ulemper

- Empiriske modeller kræver store databaser for at være pålidelige i alle tilfælde.
- Kræver gennemførelse af laboratorietest med den given betontype for at opnå gode inputdata til modellen.
- Modellen er meget følsom over for selv små ændring i vise af modelparametrene, f.eks. "ageing factoren".

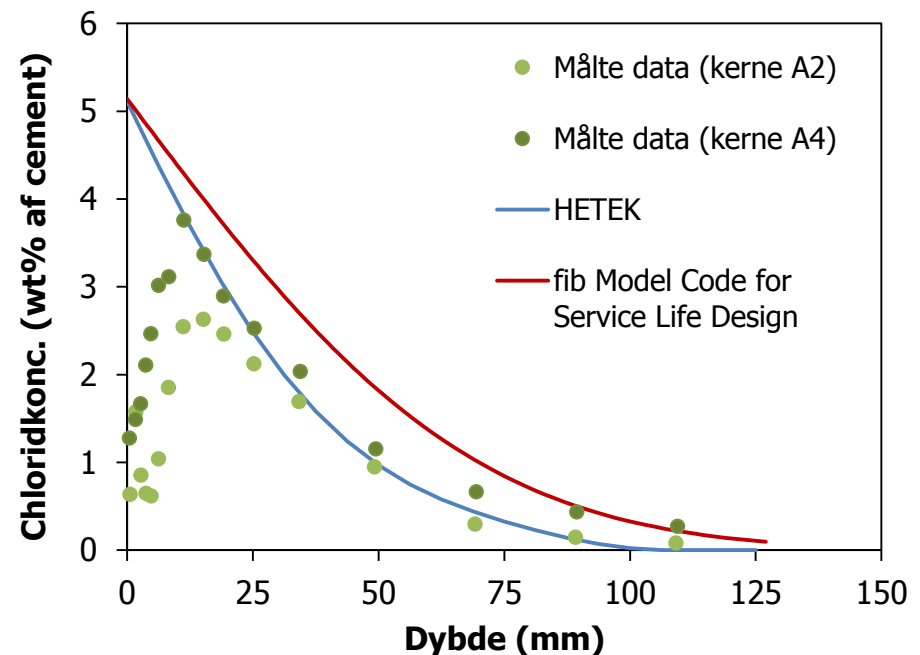
Eksempel fra Alssundbroen



Kilde: Wikipedia.



- Chloridprofiler målt på Alssundbroen efter 31 års eksponering i havvand.
- Sammenligning med beregnet chloridindtrængning



Forslag til ny model for chloridindtrængning

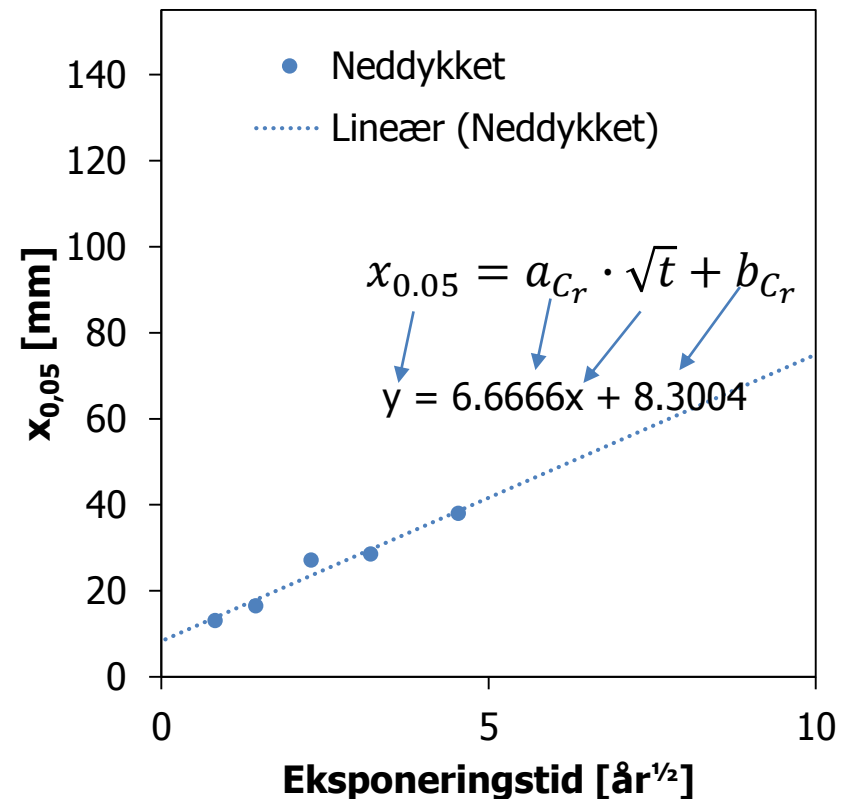
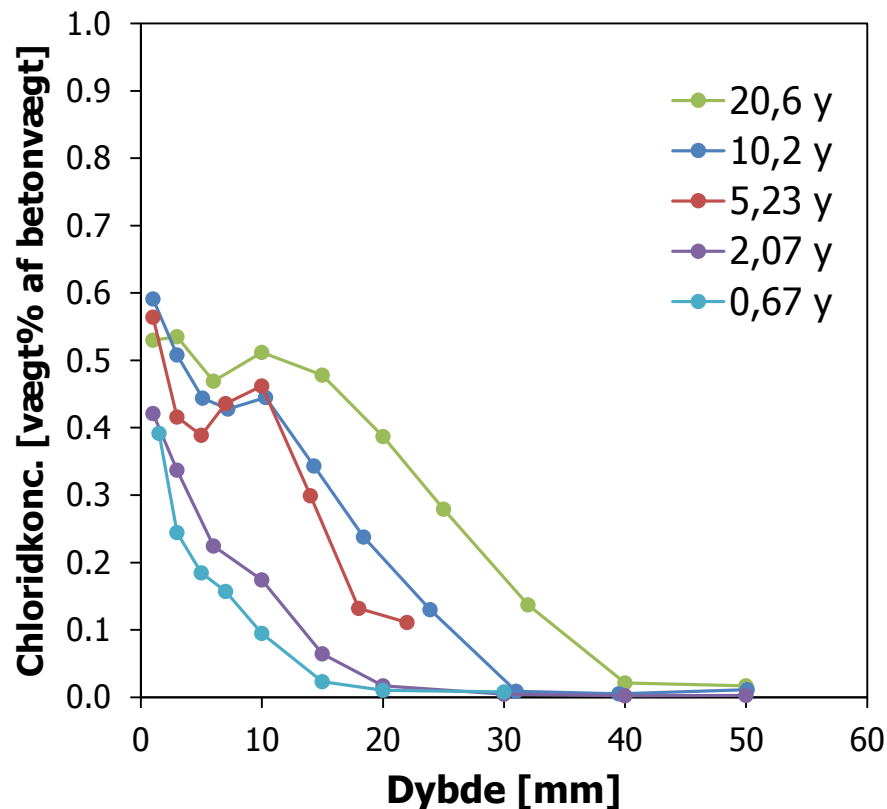
- Resultater fra betonkonstruktioner marine eksponeringsmiljøer:
 - Chlorid-diffusionskoefficienter bliver mere eller mindre konstante efter 5 til 10 års eksponering.
- Foreslået ny model for chloridindtrængning i beton:
 - Mere "simpel" tilgang uden anvendelse af en *ageing factor*.
 - Indtrængningen modelleres ved en simpel lineær relation mellem indtrængningsdybden og kvadratroden af eksponeringstiden.
 - Kan benyttes til at estimere levetiden for betonkonstruktioner i marine miljøer.

Forslag til ny model for chloridindtrængning

Beton 12-35 fra Träslövsläge, Sverige

Eksponeringsmiljø: Neddykket i havvand

Binder: 85% PC + 10% flyvaske + 5% mikrosilica



Forslag til ny model for chloridindtrængning

$$x_{C_r} = a_{C_r} \cdot \sqrt{t} + b_{C_r}$$

C_r = referencekoncentration af chlorid, f.eks. 0.05 %Cl af beton

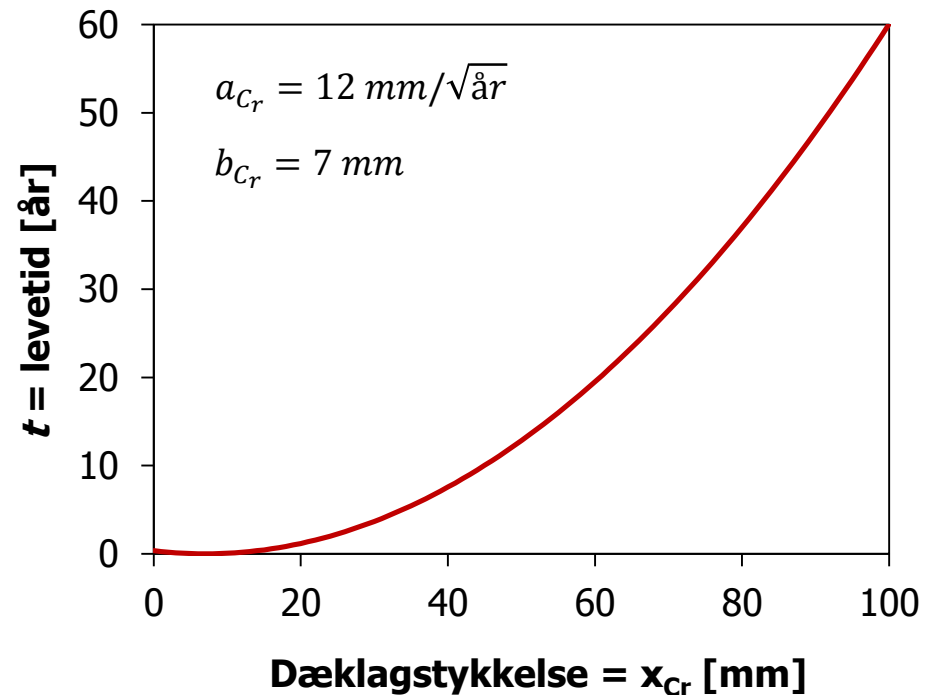
a_{C_r} = indtrængningsrate af referencekoncentration (C_r) når en konstant indtrængningssituation er opnået

b_{C_r} = sum af yderligere indtrængning hidrørende fra f.eks. hurtig tidlig indtrængning pga. initial kapillarsugning og forhøjet permeabilitet i tidlig alder

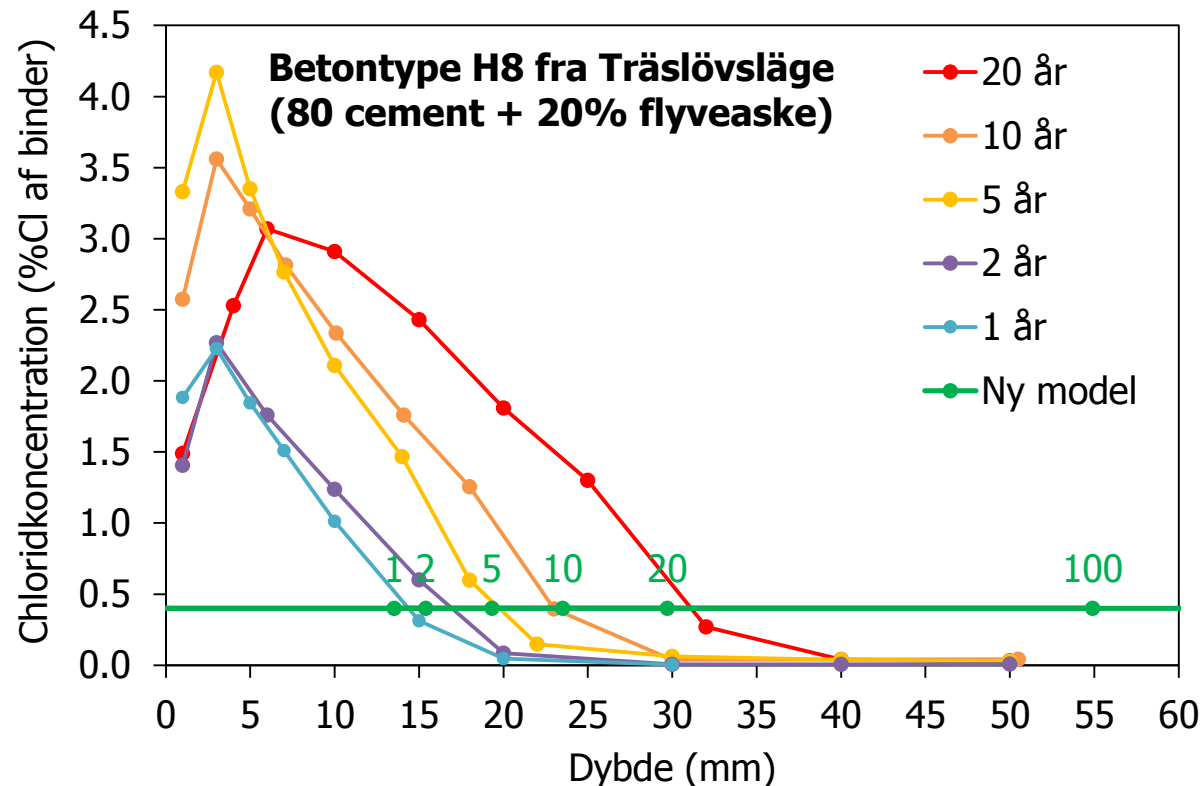
Levetidsberegninger for hypotetisk beton med ny model

$$t = \left(\frac{x_{Cr} - b_{Cr}}{a_{Cr}} \right)^2$$

- $C_r = C_{crit}$ (chloridtærskelværdi)
- $x_{Cr} = x_{Ccrit}$ = tykkelse af dæklag af beton over armeringsstålet
- t = levetid indtil begyndende armeringskorrosion



Forslag til ny model for chloridindtrængning: Eksempel



- Modellen er kalibreret med data fra de viste profiler efter 1, 2 og 5 år.

Forslag til ny model for chloridindtrængning

- Nærmere beskrivelse af modellen i Magasinet Beton, nr. 1, februar 2015, s. 12-15.





TEKNOLOGISK
INSTITUT

Tak for opmærksomheden!