



LUND UNIVERSITY

Livslängdsberäkning med avseende på kloridinitierad armeringskorrosion : bedömning av alternativa beräkningsprinciper

Fagerlund, Göran

2002

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Fagerlund, G. (2002). *Livslängdsberäkning med avseende på kloridinitierad armeringskorrosion : bedömning av alternativa beräkningsprinciper*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7163). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

LIVSLÄNGDSBERÄKNING MED AVSEENDE PÅ KLORIDINITIERAD ARMERINGSKORROSION

Bedömning av alternativa beräknings-
principer

Göran Fagerlund



TVBM-7163

Lund 2002

LIVSLÄNGDSBERÄKNING MED AVSEENDE PÅ KLORIDINITIERAD ARMERINGSKORROSION

**Bedömning av alternativa beräknings-
principer**

Göran Fagerlund

Innehåll	Sid
Introduktion	2
1. Fri och bunden klorid	3
2. Villkor för start av korrosion. Definition av livslängd	3
3. Princip 1; Beräkning baserad på total kloridhalt	4
3.1 Beräkning av kloridinträngning	4
3.2 Tröskelvärde av total klorid	5
3.3 Beräkningsexempel	5
3.4 Problem vid användning av Princip 1	6
3.5 Slutsats	7
4. Princip 2; Beräkning baserad på fri kloridhalt	8
4.1 Diffusionsprocess för fri klorid	8
4.2 Tröskelvärde av fri klorid	9
4.3 Beräkning av livslängd	11
4.4 Slutsats	
5. Deterministisk och stokastisk beräkning	13
6. Slutsatser	14

Livslängdsberäkning med avseende på kloridinitierad armeringskorrosion

Bedömning av alternativa beräkningsprinciper

Introduktion

Armeringskorrosion startar när det passiverande skiktet på armeringsstångens yta bryts igenom, antingen genom karbonatisering av betongens ytskikt, eller genom att klorider av farlig koncentration nått stålytan. Klorider kan emanera från lösalt eller havsvatten.

Livslängden brukar räknas som tiden från gjutning av konstruktionen till dess korrosion startar. Den kan beräknas genom kännedom om hur snabbt karbonatiseringsprocessen eller kloridinträngningen sker. Dessa processer är ofta diffusionsstyrda och avgörs därför av betongens täthet mot koldioxid och kloridjoner. När det gäller kloridinitierad korrosion är även det sk tröskelvärde på kloridkoncentration avgörande för livslängden. Tröskelvärdet är den koncentration som aktiverar korrosion.

Mycket forskning har framförallt ägnats åt att beskriva diffusionsprocesserna, medan mindre forskning har ägnats åt tröskelvärdet.

Metoder har utvecklats för förhandsberäkning av livslängden med avseende på korrosion. Därvid kan man urskilja två olika principer:

- 1: Beräkningen baseras på den *totala* kloridhalten i betongen. Såväl diffusionsprocessen som tröskelvärdet uttrycks i total kloridhalt.
- 2: Beräkningen baseras på den *fritt rörliga* delen av kloridjonerna i betongen. Denna kloridhalt brukar kallas fri klorid. Såväl diffusionsprocessen som tröskelvärdet uttrycks i fri kloridhalt.

I princip skall båda beräkningsprinciperna leda till samma livslängd eftersom det finns ett samband mellan fri kloridhalt och total kloridhalt. Avsikten med denna rapport är att översiktligt jämföra de båda beräkningsprinciperna för att därmed försöka finna vilken som ger bästa möjlighet att förutse livslängden.

1. Fri och bunden klorid

Kloridhalten i betong är summan av fri (rörlig klorid) och bunden (adsorberad och kemiskt bunden) klorid:

$$c_{\text{tot}} = c_{\text{fri}} + c_{\text{bunden}} \quad (1)$$

Där c står för kloridhalt i allmänhet (tex uttryckt i % av betongvikt, % av cementvikt, kg per m³ betong eller mol per liter porvätska).

Sambandet mellan fri och bunden klorid beskrivs av den sk bindingsisotermen. Enligt Tuutti är fri och bunden klorid linjärt beroende av varandra¹:

$$c_{\text{bunden}} = \text{konstant} \cdot c_{\text{fri}} \quad (2)$$

Enligt andra mätningar är sambandet icke-linjärt. Ett vanligt använt samband är²

$$c_{\text{bunden}} = \text{konstant} \cdot c_{\text{fri}}^a \quad (3)$$

Där a är en exponent. $a < 1$, dvs allt mindre klorid binds ju högre den totala kloridhalten är. Betongen "mättas" alltså så småningom med bunden klorid. Vid tillräckligt hög total kloridkoncentration blir enligt ekv (3) i stort sett all nytillkommande klorid fri.

Vid beräkning av kloridinträngning i betong och därur beräknad livslängd kan man antingen utgå från totalklorid eller från enbart fri klorid. I denna rapport visas att beräkningar baserade på fri klorid ger fysikaliskt rimligare resultat eftersom den använda grundekvationen för kloridtransport, Ficks lag, baseras på fritt rörlig diffunderande substans. Samtidigt är tröskelnivån för start av korrosion beroende på fri klorid och inte på totalklorid.

2. Villkor för start av korrosion. Definition av livslängd

Korrosion på ingjuten armering startar när kloridkoncentrationen vid stålytan uppnår en kritisk nivå, som brukar benämnas *tröskelnivån*. Villkor för korrosion är alltså

$$c \geq c_{\text{thr}} \quad (4)$$

Där c_{thr} är tröskelnivån uttryckt i samma enhet som c .

Detta villkor definierar normalt även livslängden eftersom man normalt inte tolererar att korrosion pågår i konstruktionen.

¹ J.K. Tuutti. "Corrosion of steel in concrete". Cement och Betong Institutet. Research Fo 4.82, 1982.

² J.L. Tang. "Chloride transport in concrete". Department of Building Materials, Chalmers University of Technology. Publication P-96:6, 1996.

3. Princip 1; Beräkning baserad på total kloridhalt (Den vanligen använda metoden)

3.1 Beräkning av kloridinträngning

Vid beräkning enligt Princip 1 används enbart *totala* kloridhalten.

Beräkningar baseras på Ficks lag, som vid "non-steady state" skrivs

$$dc/dt = \delta_{cl} d^2c/dx^2 \quad (5)$$

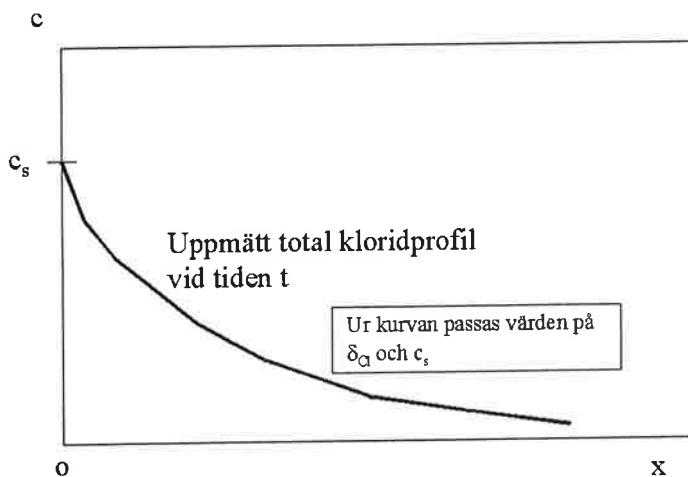
Där c är *totala* kloridhalten och δ_{cl} är transportkoefficienten (diffusionskoefficienten) för kloridtransport i betongen. Kloridhalten kan uttryckas på valfritt sätt. Oftast används vikt-% av cementhalten eller vikt-% av betongen eftersom det är lättast att experimentellt bestämma dessa värden.

Lösningen till ekvationen för halvoändlig kropp utsatt för endimensionell kloridtransport med konstant koncentration vid betongytan är

$$c_{x,t}/c_s = \text{erfc}\{x/(4 \cdot \delta_{cl} \cdot t)^{1/2}\} \quad (6)$$

där $c_{x,t}$ är kloridkoncentrationen på djupet x från betongytan vid tiden t , c_s är ytkoncentrationen (total kloridhalt) och erfc är den sk komplementära felfunktionen ($\text{erfc} = 1 - \text{erf}$, där erf är felfunktionen). Felfunktionen finns tabellerad i standardverk över matematiska funktioner.

Det enda man i princip behöver veta för att beräkna kloridprofilen vid en viss tidpunkt är alltså värden på c_s och δ_{cl} . I princip borde dessa värden kunna bestämmas genom analys av verkliga kloridprofiler för betong som exponerats för kloridhaltigt vatten i fält eller i laboratoriet. Om Ficks lag gäller strikt finns entydiga värden på c_s och δ_{cl} . Man använder alltså uppmätt kloridprofil och ekv (6) för att genom anpassning få värdena c_s och δ_{cl} . Principen visas i Fig 1.³



Figur 1: Princip för bestämning av ytkoncentration och kloridtransportkoefficient.

³) OBS. I verkligheten är diffusionskoefficienten inte konstant utan tidsberoende, särskilt i marin miljö. Detta försummas i det fortsatta resonemanget eftersom samma förhållande gäller vid beräkningsprincip 2. Man kan delvis komma undan denna komplikation genom att använda en *effektiv* konstant diffusionskonstant som utgör den konstanta koefficient som skulle ha gett ungefär samma kloridprofil i fält som den som finns i den aktuella betongen.

När dessa data är kända kan man i princip lätt beräkna erforderligt täckskikt för önskad livslängd. Den ”enda” information man måste ha är tröskelvärde på total kloridkoncentration för start av korrosion. Erforderligt täckskikt fås ur lösningen på Ficks lag, ekv (6), som nu skrivs:

$$c_{thr}/c_s = \operatorname{erfc}\{T/(4 \cdot \delta_{Cl} \cdot t_{liv})^{1/2}\} \quad (6')$$

Där T är erforderligt täckskikt och t_{liv} är önskad livslängd.

3.2 Tröskelvärde av total klorid

Tröskelvärde uttryckt i total kloridhalt är otillräckligt känt. Oftast används schablonvärden som inte är experimentellt säkerställda. Föreslagna värden är⁴

Tabell 1: Tröskelvärden uttryckta i vikt-% totalchlorid (syralöslig klorid) av cementvikten.

Miljötyp	Bindemedelstyp			
	Portlandcement CEM I	8% silikastoft	15% flygaska	15% masugnsslagg
Cyklisk fuktbelastning	0,7 (variation 0,6-2,2)	0,4 (var 0,3-1,5)	0,5	0,5
Konstant hög Fuktnivå	1,5 (var 1,5-2,2)	0,8 (var 0,8-1,9)	1,0 (var 0,9-1,4)	1,0 (var 0,8-2,0)
Marin miljö	0,8 (var 0,6-2,2)	0,5 (var 0,5-1,0)	0,6 (var 0,4-0,8)	0,6 (var 0,5-1,2)
Tösaltningsmiljö	0,6 (var 0,4-1,0)	0,3	0,4	0,4

De stora variationsområdena återspeglar osäkerheten. Följande kan noteras:

- 1: Alla portlandcement anses ha samma tröskelvärde oavsett cementets kemiska sammansättning, tex dess alkalihalt. Detta kan knappast vara riktigt.
- 2: Inblandning av mineraliska restmaterial anses sänka tröskelvärde. Detta är rimligt. Nivån på sänkningen är dock osäker.

3.3 Beräkningsexempel

Exempel 1: Ur fältförsök (uppmätt total kloridkurva) finner man att $\delta_{Cl} = 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ och $c_s = 1,2\%$ av cementvikten. Tröskelvärde för start av korrosion anses vara 0,5% av cementvikten. Önskad livslängd är 120 år ($3,78 \cdot 10^9$ sek).

Erforderligt täckskikt fås då ur lösningen till följande ekvation:

$$0,5/1,2 = 0,42 = \operatorname{erfc}\{T/(4 \cdot 2 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2}\} \quad (6'')$$

Ur lösningen till erfc finner man att $0,42 = \operatorname{erfc}(0,57)$. Dvs,

$$0,57 = T/(4 \cdot 2 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2}$$

Erforderligt täckskikt är: $T = 0,099 \text{ m} = 100 \text{ mm}$

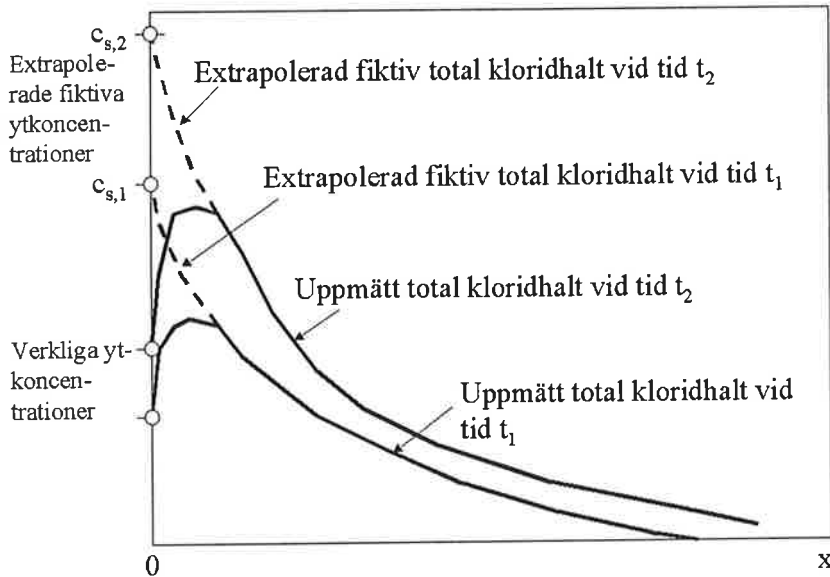
⁴) Svenska Betongföreningen: "Beständiga Betongkonstruktioner". Betongrapport nr 1, Utgåva 2, 1998. Se även P. Sandberg: "Chloride initiated reinforcement corrosion in marine concrete". Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-1015, 1998.

3.4 Problem vid användning av Princip 1

Att använda total kloridhalt medför flera problem vara de allvarligaste sammanhänger med ytkoncentration och tröskelnivå:

1: Ytkoncentrationen är ett fiktivt värde som varierar kraftigt med exponeringstiden

Kloridprofiler för *total* klorid ser inte ut som i Fig 1 utan har ett maximum någon cm från ytan; se Fig 2. Orsaken till detta är inte klar. Troligen är betongens kloridbindande förmåga mindre i ytskiktet beroende på tex karbonatisering eller kemisk påverkan från omgivande vatten



Figur 2: Verkliga totala kloridprofiler. Den fiktiva ytkoncentrationen varierar med tiden

Detta innebär att man måste passa fram ett värde på en fiktiv ytkoncentration som kommer att vara olika vid olika exponeringstider. Den verkliga ytkoncentrationen är mycket lägre. Den ytkoncentration man använder för beräkning av livslängd har alltså ingen fysikalisk signifikans. Man kan därför starkt ifrågasätta om Ficks lag över huvud taget bör användas när koncentrationer uttrycks i total klorid. Det är faktiskt enbart de fria kloridjonerna som vandrar under en koncentrationsgradient.

Livslängdsberäkningen blir dessutom osäker eftersom man måste använda en tidsberoende ytkoncentration.

Exempel 2: Antag att man bestämt total kloridprofil för en viss typ av betong efter viss tid, tex 5 år. Man passar fram värdena $\delta_{cl}=2 \cdot 10^{-12}$ och $c_s=1,2$ % av cementvikten (fiktivt extrapolerat värde enligt Fig 2). Tröskelvärdet antas vara 0,5 vikt-%. Enligt Exempel 1 ovan erfordras då **100 mm** täcksikt för 120 års livslängd.

Antag att ytkoncentrationen gradvis ökar så att den är $c_s=2$ vikt-% efter 10 år. Täcksiktet ges då i stället av uttrycket

$$0,5/2=0,25=\text{erfc}\{T/(4 \cdot 2 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2}\}$$

$$0,25=\text{erfc}(0,81)$$

Dvs $T=140$ mm

40% större täcksikt erfordras.

2: Tröskelnivå för totalkoncentration är mycket oklar

I princip kan inga definitiva värden på totalklorid som startar korrosion existera eftersom det är de fria kloridjonerna som initierar korrosion. Det gör att tröskelvärde uttryckt i total kloridhalt är mycket osäkert.

Exempel 3: Samma ytkoncentration och transportkoefficient som i exempel 1.

Alt 1: Tröskelnivå $c_{thr}=0,5\%$ av cementvikten.

Enligt Exempel 1 erfordras **100 mm** täcksikt för 120 års livslängd

Alt 2: Tröskelnivån är $c_{thr}=0,7\%$ av cementvikten.

Täcksiktet fås nu ur ekvationen

$$\begin{aligned} 0,7/1,2=0,58 &= \operatorname{erfc}\{T/(4 \cdot 2 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2}\} \\ 0,58 &= \operatorname{erfc}(0,40) \end{aligned}$$

Dvs täcksiktet är **70 mm**

Täcksiktet har nu minskat med 30%.

Alt 3: Tröskelnivån är $c_{thr}=0,3\%$ av cementvikten

Täcksiktet fås nu ur ekvationen

$$\begin{aligned} 0,3/1,2=0,25 &= \operatorname{erfc}\{T/(4 \cdot 2 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2}\} \\ 0,25 &= \operatorname{erfc}(0,81) \end{aligned}$$

Dvs täcksiktet **T=140 mm**

Täcksiktet har nu ökat med 40%.

Exemplet visar att tröskelvärde har mycket stor betydelse för täcksiktet; en variation i tröskelvärde från 0,3% till 0,7% medför en variation i erforderligt täcksikt från 140 mm till 70 mm. Så länge tröskelvärde uttryckt i total kloridhalt är okänt blir livslängdsberäkningen mycket osäker.

3.5 Slutsats

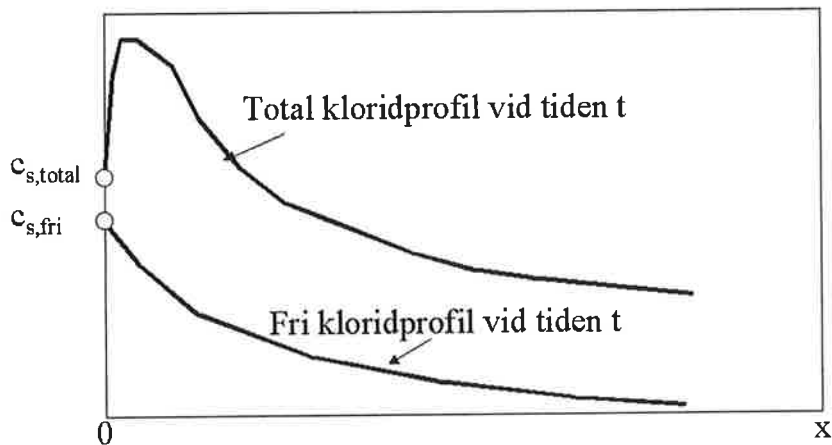
Livslängdsberäkning enligt Princip 1 genom användning av total kloridhalt och Ficks lag är inte logisk. Det existerar nämligen vare sig väldefinierade ytkoncentrationer eller väldefinierade tröskelvärden uttryckta i total kloridhalt. Total kloridhalt i samband med diffusion saknar dessutom fysikalisk signifikans eftersom bundna andelen av totala klorider inte deltar i diffusionsprocessen.

Tröskelvärden kan inte beräknas utan måste baseras på observationer vilka är mycket svåra att genomföra

4. Princip 2; Beräkning baserad på fri kloridhalt

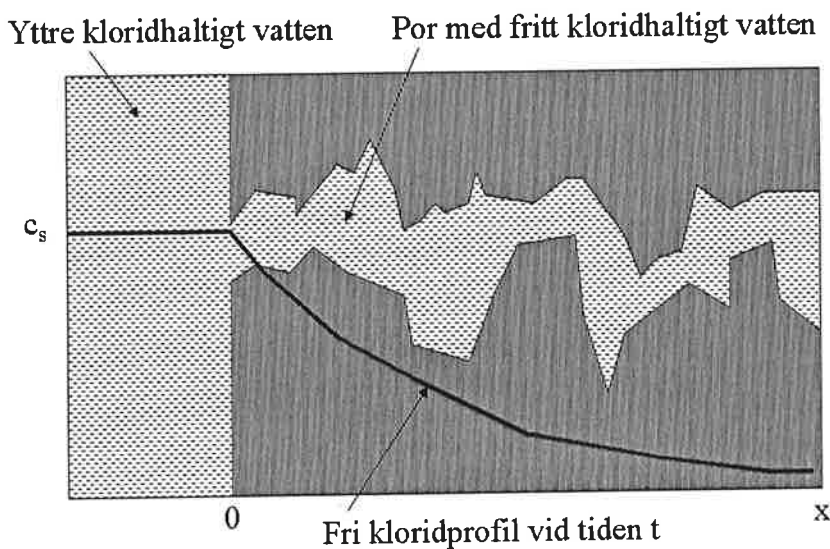
4.1 Diffusionsprocessen för fri klorid

Eftersom det enbart är fria kloridjoner som förorsakar korrosion är det logiskt att beräkna livslängd med utgångspunkt från diffusion av fri klorid. I Fig 3 visas principen för hur fri kloridkoncentrationsprofil ser ut. Det finns ingen anledning att anta att fri koncentration skulle nå sitt maximum på ett visst djup från ytan vilket är fallet för totalklorid. Maximum för fri klorid bör nås vid själva ytan och då i normalfallet motsvara kloridkoncentrationen hos den lösning som belastar ytan.



Figur 3: Fri kloridprofil jämfört med total kloridprofil. Principiellt

I Fig 4 visas principiellt hur fria kloridkoncentrationen bör se ut i porsystemet hos en betong belastad med konstant yttre kloridhaltigt vatten. I ytan är kloridhalten i porerna exakt densamma som i yttre lösningen. Sedan avtar kloridhalten gradvis på grund av en diffusionsprocess (vilken dock även innehåller en kloridbindningsprocess som bromsar inflödet av fria klorider).



Figur 4: Fri kloridprofil i porsystemet hos en betong som är nedsänkt i en kloridlösning med koncentrationen c_s .

Hur diffusionsprocessen förlöper beror på hur kloridjoner binds till betongen. I det enklaste fallet är bunden klorid direkt proportionell mot fri klorid. Man kan då direkt använda Ficks lag

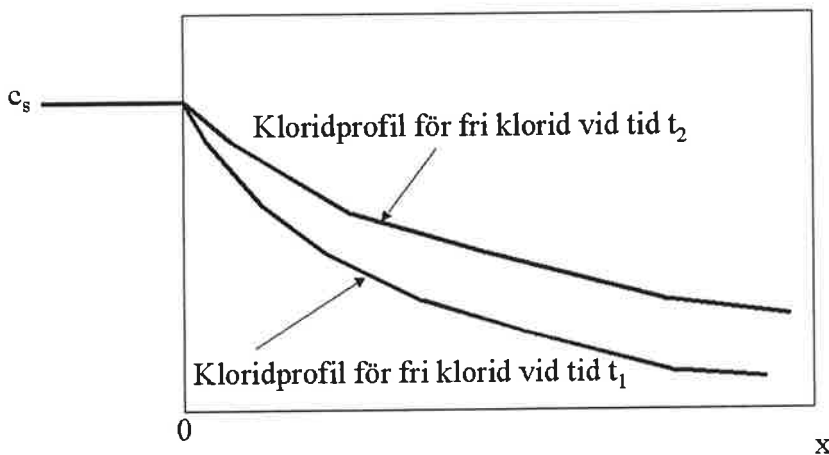
$$dc/dt = \delta_{Cl,eff} d^2c/dx^2 \quad (5a)$$

Där c i detta fall är *fri* klorid och $\delta_{Cl,eff}$ är transportkoefficienten för *fri* klorid inkluderande effekten av kloridbindning; ju större kemisk bindning desto lägre blir $\delta_{Cl,eff}$. Vid oändlig bindning, dvs om all klorid binds, blir $\delta_{Cl,eff} = 0$.

Lösningen till denna ekvation är densamma som för total klorid. Enda skillnaden är att c denna gång uttrycker enbart fri klorid.

$$c_{x,t}/c_s = \text{erfc}\{x/(4 \cdot \delta_{Cl} \cdot t)^{1/2}\} \quad (6a)$$

Till skillnad från vad som gäller för total klorid kommer ytkoncentrationen c_s att vara konstant oberoende av exponeringstiden. Fria kloridprofilen vid två olika tidpunkter kommer därför att se ut som enligt Fig 5. Man har alltså till skillnad från när total kloridhalt används som drivkraft en verklig diffusionsprocess utgående från en konstant ytkoncentration.



Figur 5: Fria kloridprofiler vid två tidpunkter (jfr Fig 2)

4.2 Tröskelvärde av fri klorid

Även *tröskelnivån* för start av korrosion kan uttryckas på ett teoretiskt riktigare sätt när fri kloridhalt används. Teoretiskt sett bör det nämligen finnas samband mellan koncentration av fria kloridjoner och korrosionsrisk. Däremot finns inget teoretiskt samband mellan total kloridhalt och korrosionsrisk. För stål i fri kloridlösning har tröskelvärdet visat sig vara proportionellt mot lösningens OH-jonkoncentration. Följande samband gäller enligt Hausmann⁵:

$$[Cl_{thr}] = 0,6 \cdot [OH] \quad (7)$$

Där $[Cl_{thr}]$ är tröskelnivån uttryckt i mol/liter och $[OH]$ är OH-jonkoncentrationen i mol/liter.

⁵) D. A. Hausmann: "Steel corrosion in concrete". Materials Protection, Nov. 1967

Överslagsmässigt kan man anta att samma relation gäller för armeringsstål i porlösning.

OH-jonkoncentrationen beror på cementets innehåll av vattenlösliga alkalioxider; främst Na_2O och K_2O , samt på mängden porvatten som kan lösa alkalioxid.

Cementets alkalihalt kan uttryckas i sk ekvivalent Na_2O :

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{ekv}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,66 \cdot \text{K}_2\text{O} \quad (\% \text{ av cementvikten}) \quad (8)$$

Om cementets lösliga alkalihalt uttryckt som $(\text{Na}_2\text{O})_{\text{ekv}}$ är x vikt-% och mängden cement är C kg/m^3 så är mängden OH-joner $0,32 \cdot x \cdot C$ mol/m^3 .

Betongens totala vattenhalt vid fullständig vattenmättnad är lika med dess totala porositet (exkl luftporer). Vattenhalten är därför:

$$W = C(\text{vct} - 0,19 \cdot \alpha) \quad (\text{kg/m}^3) \quad (9)$$

Där α är hydratationsgraden.

OH-jonkoncentrationen är därför (förutsatt att allt porvatten löser alkali)

$$[\text{OH}] = 0,32 \cdot x / (\text{vct} - 0,19 \cdot \alpha) \quad (\text{mol/liter}) \quad (10)$$

Hydratationsgraden hos äldre betong kan anses vara lägst 0,8. OH-jonkoncentrationen är då

$$[\text{OH}] = 0,32 \cdot x / (\text{vct} - 0,15) \quad (\text{mol/liter}) \quad (11)$$

Tröskelvärde för fri klorid är alltså

$$[\text{Cl}_{\text{thr}}] = 0,6 \cdot 0,32 \cdot x / (\text{vct} - 0,15) = 0,19 \cdot x / (\text{vct} - 0,15) \quad (\text{mol/liter}) \quad (12)$$

Fördelen med att använda fri klorid vid livslängdsberäkningar är att man kan ta hänsyn till cementtypen. Man får tex högre kloridtröskelvärde vid högalkaliskt cement än vid lågalkaliskt. Vid inblandning av silikarika restmaterial minskas alkaliteten och därmed tröskelvärde. Effekten kan beräknas enligt principen ovan.

Exempel 4: Antag ett *lågalkaliskt* cement med 0,6% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$, dvs $x=0,6$. Betongens $\text{vct}=0,40$. Kloridtröskelvärde är då

$$[\text{Cl}_{\text{thr}}] = 0,19 \cdot 0,6 / (0,4 - 0,15) = \mathbf{0,46 \text{ mol/liter}}$$

(OH-jonkoncentration 0,77 mol/liter)

Detta motsvarar en kloridhalt i porvattnet av $0,46 \cdot 35,5 = 16,3$ g/liter dvs 1,6 vikt-%.

Följaktligen kan inte korrosion ske i tex bräckt vatten eftersom detta har lägre kloridkoncentration än vad som erfordras för korrosionsstart (ca 0,6 vikt-% jämfört med 1,6 vikt-%)

Exempel 5: Ett ännu mer lågalkaliskt cement med 0,3% (Na₂O)_{ekv}, dvs x=0,3. Vattencementtal och hydratationsgrad är desamma som i Exempel 4. Kloridtröskelvärdet blir

$$[Cl_{thr}] = 0,19 \cdot 0,3 / (0,4 - 0,15) = 0,23 \text{ mol/liter}$$

(OH-jonkoncentration 0,38 mol/liter)

Nu kan korrosion ske i bräckt vatten förutsatt att nivån 0,23 mol/liter nås vid järnens nivå. Detta tar tid; se avsnitt 4.3.

Exempel 6: Inblandning av silikastoft reducerar alkaliteten. Enligt mätningar av Page & Vennesland kan man vid 10% inblandning i en viss betong få ett en sänkning av pH-värdet från ca 13,8 till ca 13,4.⁶

Detta medför en sänkning av OH-jonkoncentrationen från ca 0,63 mol/liter till ca 0,25 mol/liter. Följaktligen minskar kloridtröskelvärdet från ca 0,38 mol/liter till ca 0,15 mol/liter.

4.3 Beräkning av livslängd

Beräkning av livslängd sker på samma sätt som när total kloridhalt används, dvs genom användning av ekv (6a). Några exempel ges nedan.

Exempel 7: En betong med vct=0,38 och med ett cement med löslig alkalihalt motsvarande (Na₂O)_{ekv}=0,5% används i en marin miljö (havsvatten) med kloridhalten 2,1 vikt-% vilket motsvarar 21 g/liter eller 21/35,5 = 0,59 mol/liter.

Kloriddiffusionstalet är $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Kloridtröskelvärdet är:

$$[Cl_{thr}] = 0,19 \cdot 0,5 / (0,38 - 0,15) = 0,41 \text{ mol/liter}$$

Erforderligt täckskikt fås ur

$$0,41 / 0,59 = 0,69 = \text{erfc} \left\{ T / (4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2} \right\}$$

$$0,69 = \text{erfc}(0,28)$$

Erforderligt täckskikt är då **T=57 mm**

Exempel 8: Exakt samma som Exempel 7, men cementets alkalihalt är bara 0,3%

Kloridtröskelvärdet är:

$$[Cl_{thr}] = 0,19 \cdot 0,3 / (0,38 - 0,15) = 0,25 \text{ mol/liter}$$

Erforderligt täckskikt fås ur

$$0,25 / 0,59 = 0,36 = \text{erfc} \left\{ T / (4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2} \right\}$$

$$0,36 = \text{erfc}(0,80)$$

Erforderligt täckskikt är då **T=120 mm**

⁶) C.L. Page & Ö. Vennesland. "Pore solution composition and chloride binding capacity of silica fume cement pastes". Materials and Structures, RILEM, Vol 16, No 19, 1985.

Exempel 9: Se Exempel 6. Erforderligt täcksikt beräknas för betong med och utan silikastoft. Tröskelvärden enligt Exempel 6 används. Yttre kloridhalt antas vara 0,59 mol/liter.

Vid inblandning av silikastoft antas kloriddiffusionstalet minska från $2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ till $0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Utan silikastoft:

Tröskelvärdet är enligt Exempel 6, 0,38 mol/liter

$$0,38/0,59 = 0,64 = \text{erfc}\{T/(4 \cdot 2 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2}\}$$

$$0,64 = \text{erfc}(0,33)$$

Erforderligt täcksikt för 120 års livslängd är **T=57 mm**

Med silikastoft:

Tröskelvärdet är enligt Exempel 6, 0,15 mol/liter

$$0,15/0,59 = 0,25 = \text{erfc}\{T/(4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2}\}$$

$$0,25 = \text{erfc}(0,81)$$

Erforderligt täcksikt för 120 års livslängd är **T=70 mm**

Trots att diffusionstalet minskar vid inblandning av silikastoft ökar erforderligt täcksikt. En sänkning av tröskelvärdet med 60% ger större negativ effekt än en sänkning av kloriddiffusionstalet med 75%.

Exemplen visar att man genom att använda fri klorid vid beräkningen kan låta ytkoncentrationen vara konstant samtidigt som man tar hänsyn till cementets alkalitet.⁷

4.4 Slutsats

Genom att använda fri klorid vid beräkning av livslängd minskar man problemet att definiera tröskelvärdet och undviker man att behöva använda fiktiva ytkoncentrationer. Tröskelvärdet kan bedömas kvantitativt ur cementtypen. Som ytkoncentration kan användas verkliga kloridkoncentrationer hos omgivande vatten.

⁷) I verkligheten kan man få en viss urlakning av alkalier från betongens ytskikt. Detta kommer att sänka tröskelvärdet. Man kan ta hänsyn till urlakningseffekten genom att låta parametern x i ekv (11) och (12), vilken uttrycker betongens alkalitet, minska. Urlakningen kan beräknas med Ficks lag genom kännedom om betongens diffusionskonstant för OH-joner och korresponderande katjoner. Ficks lag uttrycks nu på följande sätt:

$$[\text{OH}]_{x,t}/[\text{OH}]_0 = 1 - \text{erfc}\{T/(4 \cdot \delta_{\text{OH}} \cdot t)^{1/2}\}$$

Där $[\text{OH}]_{x,t}$ är OH-jonkoncentrationen på djupet x från ytan vid tiden t . $[\text{OH}]_0$ är OH-jonkoncentrationen i betongen före urlakning. Den fås ur ekv (11). δ_{OH} är diffusionskoefficienten för OH-joner.

Exempel: OH-jonkoncentrationen före urlakning är 0,40 mol/liter (lågalkaliskt cement med 0,3% alkali och vct 0,40). Diffusionskonstanten för OH-joner är $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Täcksiktet är 50 mm. OH-jonkoncentrationen vid stålytan hos betong nedsänkt under 120 år i vatten fås då ur

$$[\text{OH}]_{50\text{mm},120\text{år}}/0,40 = 1 - \text{erfc}\{0,05/(4 \cdot 10^{-12} \cdot 3,78 \cdot 10^9)^{1/2}\} = 1 - \text{erfc}(0,41) = 0,44$$

$$[\text{OH}]_{50\text{mm},120\text{år}} = 0,44 \cdot 0,40 = 0,18 \text{ mol/liter.}$$

Alkaliteten är således i stort sett halverad.

5. Deterministisk och stokastisk beräkning

Livslängdsberäkningen kan göras *deterministiskt* genom att man använder fixa värden på ingående parametrar, nämligen:

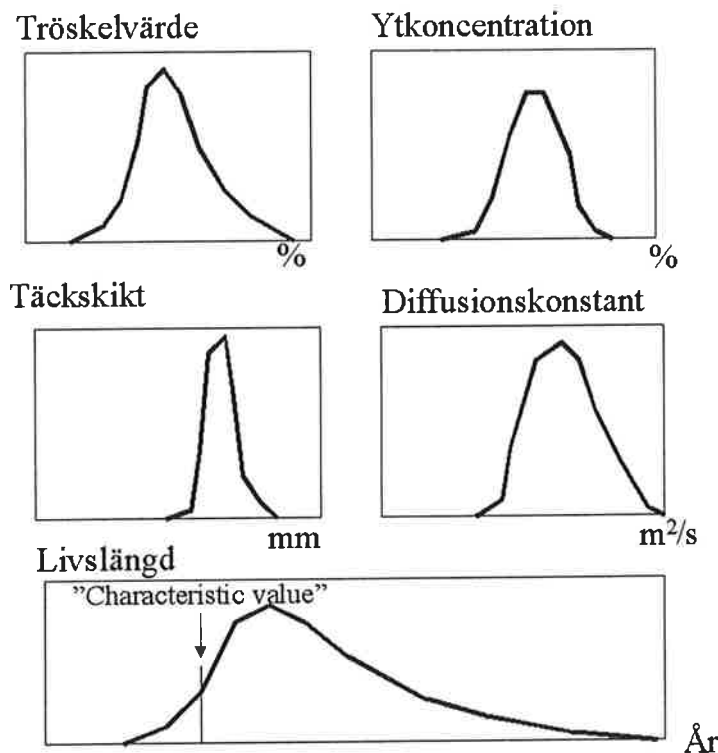
- Täcksikt
- Kloriddiffusionskoefficient
- Tröskelvärde
- Ytkoncentration

Ficks lag ger då ett fixt värde på livslängden. Denna typ av beräkning har genomförts i exemplen ovan.

Man kan också låta ovannämnda parametrar utgöras av stokastiska variabler; se Fig 6.

Variablerna är oberoende och kan därför sättas in som oberoende stokastiska fördelningar i Ficks lag, varvid man som resultat får en sannolikhetsfördelning för livslängden; Fig 6. Denna typ av *stokastisk* beräkning går tillbaka på arbeten av Siemes och hans medarbetare⁸ och har vidareutvecklats inom EU-projektet Duracrete⁹.

Än så länge har man vid tillämpning av stokastisk livslängdsberäkning utgått från Princip 1, dvs total kloridhalt. Metodiken är naturligtvis lika användbar för fri klorid.



Figur 6: Stokastisk beräkning av livslängd. Ingående parametrar är stokastiska variabler vilket medför att även beräknad livslängd är en stokastisk variabel.

⁸) A.J.M. Siemes, A.C.M. Vrouwenvelder, A. Van den Beukel: "Durability of buildings. A reliability analysis". Heron, 1985(30):3.

⁹) DURACRETE. "Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures". EU-Contract BRPC-CT95-0132. Project BE95-1347

6. Slutsatser

Analysen ovan visar att beräkningsprincip 2 är fördelaktigare än princip 1. Dels är den teoretiskt mer rimlig eftersom randvillkoret avseende kloridkoncentration vid betongytan torde vara mer väldefinierat, vilket är en förutsättning för användning av enkel diffusionsteori, dels är det lättare att förutse (förhandsberäkna) tröskelvärde. Svårigheten ligger i att bestämma diffusionskoefficienten för fri klorid genom laboratorie- eller fältförsök. Vid högre vattencementtal är det förhållandevis enkelt att bestämma den fria kloridprofilen genom "porpressning" varvid betongen krossas under högt tryck så att en vattendroppe pressas ut. Denna kan sedan analyseras med avseende på kloridhalten. Vid tät betong är detta omöjligt. Ett alternativ är att bestämma totalkloridprofil och genom antagande av en sannolik bindningsisoterm beräkna den fria kloridprofilen teoretiskt. Därefter kan diffusionskonstanten beräknas. Utveckling av metoder att bestämma fri kloridprofil är en angelägen uppgift.

Analysen visar att osäkerheten i materialdata leder till stor osäkerhet i beräkning av förväntad livslängd oavsett vilken beräkningsprincip som används. Denna osäkerhet förefaller vara ännu större när beräkningen baseras på total kloridhalt (princip 1) eftersom ytkoncentration och tröskelvärde torde vara mer osäkra när de uttrycks i totalklorid.