



**TEKNOLOGISK  
INSTITUT**

Gregersensvej  
DK-2630 Taastrup  
Telefon 72 20 20 00  
Telefax 72 20 20 19

info@teknologisk.dk  
www.teknologisk.dk



---

# LEVETIDSMODELLERING FOR CHLORIDBELASTEDE BETONKONSTRUKTIONER

## *Følsomhedsanalyse af inputparametre*

---

*Udarbejdet af:  
Søren L. Poulsen*

*December 2014*



Dato: 18. december 2014

---

## Forord

Resultaterne i denne rapport er frembragt gennem en delaktivitet i projektet *Ny teknologi til anlægs-konstruktioner (2013-2015)*, som er en resultatkontrakt indgået mellem Teknologisk Institut og *Uddannelses- og Forskningsministeriet (Styrelsen for Forskning og Innovation)*. I projektets arbejdes der med et bredt spektrum af emner relateret til anlægs-konstruktioner, bl.a. levetidsmodellering for beton-konstruktioner. I denne rapport præsenteres resultater fra en følsomhedsanalyse af inputparametre til to forskellige levetidsmodeller for chloridbelastede betonkonstruktioner.



Dato: 18. december 2014

---

## Indhold

1	Introduktion.....	4
1.1	Rapportens indhold og formål.....	4
1.2	Definition af levetid for betonkonstruktioner.....	4
1.3	Levetidsmodeller.....	4
1.4	Afgrænsning af følsomhedsanalysen.....	5
2	Følsomhedsanalyse af inputparametre til <i>fib</i> Model Code for Service Life Design.....	7
2.1	Beskrivelse af modellen.....	7
2.1.1	Beregning af chloridindtrængning vha. <i>fib</i> Model Code for Service Life Design.....	8
2.2	Udvalgte inputparametre til følsomhedsanalyse.....	9
2.3	Resultat af følsomhedsanalyse.....	10
3	Følsomhedsanalyse af inputparametre til HETEK-modellen (Mejlbro-Poulsen-modellen).....	16
3.1	Beskrivelse af modellen.....	16
3.2	Udvalgte inputparametre til følsomhedsanalyse.....	19
3.3	Resultater af følsomhedsanalysen.....	19
4	Konklusioner.....	24
5	Referencer.....	25
	Appendix 1: Betonrecepter.....	26
	Appendix 2: Inputparametre for referenceberegninger med <i>fib</i> Model Code for Service Life Design.....	27
	Appendix 3: Resultater fra følsomhedsanalyse af inputparametre til levetidsmodellering vha. <i>fib</i> Model Code for Service Life Design.....	28
	Appendix 4: Inputparametre for referenceberegninger med HETEK-modellen (Mejlbro-Poulsen-modellen).....	31
	Appendix 5: Resultater fra følsomhedsanalyse af inputparametre til levetidsmodellering vha. HETEK-modellen (Mejlbro-Poulsen-modellen).....	32

Dato: 18. december 2014

---

## 1 Introduktion

### 1.1 Rapportens indhold og formål

I denne rapport præsenteres resultaterne fra en undersøgelse, som har til formål at kortlægge, hvor følsom to udvalgte levetidsmodeller er over for ændringer i værdien af en række inputparametre. På baggrund af denne følsomhedsanalyse er formålet (1) at klarlægge, for hvilke inputparametre man bør være særlig opmærksom på at anvende passende og tilstrækkeligt præcise værdier, og (2) at give et bedre grundlag for at kunne vurdere usikkerheden af beregningsresultater fra de to udvalgte levetidsmodeller.

### 1.2 Definition af levetid for betonkonstruktioner

En betonkonstruktions levetid kan defineres som det tidinterval, hvori konstruktionen opfylder alle sine funktionskrav, dvs. krav til konstruktionens holdbarhed og egenskaber på en række veldefinerede områder (Dansk Betonforening, 1995). Disse funktionskrav kan f.eks. være sikkerhed mod kollaps, sikkerhed mod nedfald, stivhed, tæthed, planhed, ruhed, udseende osv. I de seneste år er de funktionskrav, som opstilles i en konstruktions projekteringsfase, ofte blevet suppleret med et krav om en specificeret minimumslevetid. Eksempelvis var der et krav om mindst 100 år levetid ved anlæggelsen af Storebæltsbroen, og i forbindelse med den kommende Femernforbindelse mellem Danmark og Tyskland er der specificeret et krav om minimum 120 års levetid.

### 1.3 Levetidsmodeller

En reel eftervisning af, at en given konstruktion er i stand til at opnå en ønsket levetid med en vis pålidelighed, kræver i realiteten at der udføres eksponeringsforsøg med en varighed svarende til hele den ønskede levetid! Da gennemførelsen af så langvarige forsøg selvsagt ikke er en reel mulighed i praksis, anvender man i stedet typisk en levetidsmodel til at dokumentere en konstruktions forventede levetid, dvs. en model som beskriver, hvorledes konstruktionens holdbarhed relaterer sig til materialer, konstruktionens udformning samt miljøpåvirkninger. Man kan med andre ord sige, at en levetidsmodel er en matematisk model, der kan benyttes til at fremskrive processer, som potentielt kan føre til nedbrydning af konstruktionens dele og dermed til levetidens ophør. Det kan f.eks. være den proces, hvorved chlorider eller CO<sub>2</sub> fra det omgivende eksponeringsmiljø trænger ind i en betonkonstruktion og fører til korrosion det indstøbte armeringsstål, hvilket efterfølgende kan give anledning til nedbrydning af selve betonen, da dannelsen af korrosionsprodukter er ledsaget af en potentielt set skadelig volumenforøgelse.

Der findes et væld af sådanne modeller til beregning af betonkonstruktioners forventede levetid, og man skelner i den sammenhæng mellem deterministiske og probabilistiske levetidsmodeller. En deterministisk models forudsigelser er præcist fastlagte gennem kendte relationer mellem tilstande og hændelser, uden plads til tilfældige variationer. Det vil med andre ord sige, at giver man en

Dato: 18. december 2014

---

deterministisk levetidsmodel ét input, så vil den altid levere ét og samme output. I modsætning hertil fungerer en probabilistisk levetidsmodel på den vis, at modellen på baggrund af et givet sæt af inputparametre estimerer sandsynligheden for, at en given hændelse vil indtræffe til et givent tidspunkt.

En anden distinktion, man kan gøre i forhold til levetidsmodeller, er mellem empirisk og mekanistisk (fysisk/kemisk) funderede modeller. Empiriske modeller er baseret på observationer og eksperimenterelle data og kræver i princippet ikke meget i form af viden eller forståelse af de processer, man forsøger at modellere. Man kan sige, at en empirisk model er baseret på en slags *trail and error*-tilgang, hvor man opstiller en model på baggrund af målte data, som så skal kan bruges til at forudsige f.eks. indtrængningen af chlorid i en beton, uden at man nødvendigvis har et dybere kendskab kender til de faktiske processer, der fører til indtrængningen. En mekanistisk levetidsmodel, derimod, er baseret på den fysik og kemi, som er gældende for adfærden i de processer, der modelleres. En mekanistisk model kræver således en grundlæggende forståelse af den fysik/kemi, som ligger til grund for de processer, man ønsker at modellere.

Fælles for alle de ovennævnte typer af levetidsmodeller er, at de på en eller anden vis kræver anvendelse af en række inputparametre, som i sidste ende er bestemmende for, hvilken levetid, den givne model forudsiger. Det kan f.eks. dreje sig om værdier, som vedrører det aktuelle eksponeringsmiljø, f.eks. chloridkoncentrationen ved en betonkonstruktions overfalde eller temperaturen i det omgivende miljø. Det kan også være parametre, som beskriver konstruktionsmaterialernes egenskaber, eksempelvis diffusionskoefficienten for chlorid i en bestemt betontype, eller tærskelværdien for chloridinitieret armeringskorrosion, dvs. den minimale koncentration af chlorid, som giver anledning til korrosion af armeringsstålet i en betonkonstruktion.

Da værdien af sådanne inputparametre er bestemmende for den levetid, som beregnes vha. modellerne, er det selvfølgelig helt afgørende at være omhyggelig med at anvende passende og pålidelige data for disse parametre. Benyttes uegnede værdier for inputparametrene, kan det generelt resultere i urealistiske estimater for levetiden af en given konstruktion. På samme vis er det væsentligt at have sig for øje, hvor følsom en levetidsmodels beregninger er mht. værdierne af dens forskellige inputparametre. Blot små ændringer i værdien af visse parametre kan således have en signifikant indflydelse på den beregnede levetid.

## 1.4 Afgrænsning af følsomhedsanalysen

De udvalgte levetidsmodeller til følsomhedsanalyse af inputparametre er (1) *fib* Model Code for Service Life Design [*fib* Bulletin No. 34, 2006] og (2) HETEK-modellen (Mejlbro-Poulsen-modellen) [Nilsson *et al.*, 1997; Poulsen & Mejlbro, 2006]. Disse modeller er udvalgt fordi de repræsenterer alment anerkendte og ofte citerede værktøjer til estimering af levetiden for chloridbelastede betonkonstruktioner. Modellerne er nærmere beskrevet i Afsnit 2 og 3, hvor også inputparametrene, som er udvalgt til analyse, er beskrevet.

Dato: 18. december 2014

---

Følsomhedsanalysen er udført ved at beregne levetider for en hypotetisk betonkonstruktion, som er eksponeret i et neddykket marint miljø. Alle beregningerne er gentaget for tre forskellige betonsammensætninger med tre forskellige bindersammensætninger: Beton A med 100% Portland cement, Beton B med 75% Portland cement + 25% flyveaske og Beton C med 84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilika. På den vis belyser analysen også, hvilken effekt de mineralske tilsætninger flyveaske og mikrosilika har for levetidsberegningerne. Recepter for de tre anvendte betontyper er angivet i Appendix 1.

I forbindelse med de udførte beregninger er levetiden defineret som varigheden af perioden fra første eksponering indtil initiering af armeringskorrosion som følge af chloridindtrængning gennem et 75 mm tykt dæklag.

Den anvendte fremgangsmåde for følsomhedsanalysen er en såkaldt 'one-at-a-time'-metode, hvor effekten af inputvariationer på den givne models output (levetiden) undersøges ved kun at ændre én modelparameter ad gangen, mens de øvrige holdes konstante [Hamby, 1994]. De udvalgte modelparametre varieres således én ad gangen med  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$  og  $\pm 5\%$  i forhold til værdierne af modelparametrene fra en referenceberegning, dvs. fra en beregning, som er udført med hvad der antages at være det mest optimale valg af modelparametre for den givne beton i det givne eksponeringsmiljø. De resulterende ændringer i modelens output kvantificeres ved følsomhedsparameteren  $\varphi(\%)$  efter nedenstående formel:

$$\varphi(\%) = \left( \frac{L_{\Delta,i} - L_{\text{ref}}}{L_{\text{ref}}} \right) \cdot 100\% \quad (1.1)$$

hvor  $L_{\Delta,i}$  er den beregnede levetid, som fremkommer efter en ændring  $\Delta$  ( $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$  eller  $\pm 5\%$ ) af modelparameteren  $i$  i forhold til en referenceværdi for  $i$ , og  $L_{\text{ref}}$  er levetiden fra referenceberegningen. På den måde angiver  $\varphi(\%)$  en procentvis forskel mellem referencelevetiden og den levetid, som beregnes ved at ændre modelparametren  $i$  med f.eks.  $+5\%$  i forhold denne parameters værdi i referenceberegningen. Beregningerne med udvalgte procentvise ændringer af modelparametre giver mulighed for at rangordne de forskellige modelparametre med hensyn til, hvor følsom modellen ift. ændringer i deres værdi.

Som et supplement til ovenstående følsomhedsanalyse er der desuden foretaget tilsvarende levetidsberegninger for de tre betontyper, hvor de samme udvalgte modelparametre igen varieres én ad gangen. Forskellen er, at der *ikke* udregnes levetider ved at ændre referenceværdien af de udvalgte modelparametre med faste procentsatser. I stedet varieres de enkelte modelparametre således, at der beregnes en relativt fininddelt serie af levetider over et passende bredt interval, som dækker alle de realistisk tænkelige værdier for den enkelte modelparameter. På baggrund af disse beregninger er der optegnet kurver for de tre betontyper, hvor den modellerede levetid er plottet som en funktion af den udvalgte modelparameter. Disse kurver giver et god indblik i modelberegningernes afhængighed af de

Dato: 18. december 2014

---

forskellige modelparametre, og giver mulighed for at vurdere bindersammensætningernes betydning for de beregnede levetider ved afbildning af kurverne for de tre beton typer i den samme figur for en given modelparameter.

## 2 Følsomhedsanalyse af inputparametre til *fib* Model Code for Service Life Design

### 2.1 Beskrivelse af modellen

International Federation for Structural Concrete (*fib*) har udgivet *Model Code for Service Life Design* [*fib* Bulletin No. 34, 2006] (herefter forkortet til MC-SLD), som indeholder vejledninger ift. levetidsdesign for betonkonstruktioner. Indholdet i MC-SLD bygger videre på resultaterne fra det fælleseuropæiske forskningsprojekt DuraCrete [The European Union – Brite EuRam III, 2000], og i dokumentet opereres der med fire overordnede tilgange til levetidsdesign:

- Fuld probabilistisk
- Semi-probabilistisk (deterministisk)
- Deemed-to-satisfy
- Avoidance of deterioration

I den fuldt probabilistiske tilgang – den mest sofistikerede af de fire tilgange – tages der højde for den spredning, som er associeret med både materialernes modstandsdygtighed over for nedbrydningsmekanismer og med det omgivende eksponeringsmiljøes påvirkninger. Denne tilgang kræver en kvantificering af den statistiske fordeling af de forskellige inputparametre, som anvendes til beregning af levetiden for en betonkonstruktion.

Den semi-probabilistiske tilgang er i praksis en deterministisk tilgang til levetidsdesign, hvor der tages højde for den probabilistiske karakter af problemstillingen ved at introducere såkaldte *partial safety factors*. I denne tilgang benyttes de samme grundlæggende matematiske modeller for eksempelvis chloridindtrængning og karbonatisering, som i den fuldt probabilistiske tilgang.

*Deemed-to-satisfy*-tilgangen er sammenlignelig med den tilgang, som findes i nutidens standarder. De forskrevne regler i standarderne er imidlertid ikke baseret på fysisk og kemisk korrekte modeller, men nærmere på et praktisk (og nogle gange misfortolket) erfaringsgrundlag. Den sidste tilgang (avoidance of deterioration) er baseret på anvendelsen af materialer med en meget høj modstandsdygtighed over for diverse nedbrydningsmekanismer, f.eks. anvendelsen af rustfirt armeringsstål.

I *fib* Model Code for Service Life Design (herefter forkortet til MC-SLD) opereres der med følgende mekanismer for nedbrydning af betonen i en konstruktion: (1) armeringskorrosion forårsaget af chlorider, (2) armeringskorrosion forårsaget af karbonatisering samt (3) frost/tø-angreb. Andre nedbrydningsmekanismer, så som alkali-kiselreaktioner og sulfatangreb, er ikke indbefattet i MC-SLD,

Dato: 18. december 2014

hovedsageligt af den årsag, at der på nuværende tidspunkt ikke foreligger alment accepterede og tilstrækkeligt præcise modeller for disse nedbrydningsmekanismer.

De formler, som anvendes til at beskrive ovennævnte nedbrydningsmekanismer, har i *fib* MC et empirisk fundament. Det vil sige, at modellernes forskellige beregningsparametre er blevet kvantificeret på stokastisk vis for forskellige materialer og eksponeringsforhold på baggrund af en stor samling af observationer fra laboratoriet og fra felten. Modellerne er desuden blevet valideret ved at sammenligne den beregnede performance med resultater fra eksisterende betonkonstruktioner eller stor-skala laboratorie-simuleringer.

I forbindelse med følsomhedsanalysen, som præsenteres i denne rapport, er MC-SLD blevet anvendt til at beregne levetider for hypotetiske betonkonstruktioner placeret i et neddykket marint eksponeringsmiljø. Alle beregningerne er foretaget ved brug af den semi-probabilistiske (deterministiske) tilgang til levetidsberegninger, og armeringskorrosion forårsaget af chloridindtrængning er antaget som værende den bestemmende nedbrydningsmekanisme, dvs. at der i beregningerne ikke tages højde for andre nedbrydningsmekanismer end chloridinitieret armeringskorrosion.

### 2.1.1 Beregning af chloridindtrængning vha. *fib* Model Code for Service Life Design

Beregning af chloridindtrængning er i MC-SLD baseret på fejlfunktionsløsningen til Ficks 2. lov, hvor der tages højde for tidsafhængigheden af diffusionskoefficienten for chlorid, men hvor chloridkoncentrationen i betonoverfladen regnes som værende konstant. Den grundlæggende formel (*limit-state equation*) til modellering af chloridinitieret armeringskorrosion er:

$$C_{\text{crit}} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{s, \Delta x} - C_0) \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{app}, C} \cdot t}} \right) \right] \quad (2.1)$$

Symbolforklaringer:

- $C_{\text{crit}}$  = chloridtærskelværdien [vægt% af binder]
- $C(x = a, t)$  = chloridkoncentrationen ved armeringsdybden ( $a$ ) til tiden  $t$  [vægt% af binder]
- $C_{s, \Delta x}$  = chloridkoncentrationen ved betonoverfladen [vægt% af binder]
- $C_0$  = det initiale chloridindhold i betonen [vægt% af binder]
- erf = fejlfunktionen (*error function*)
- $\Delta x$  = dybde af "konvektionszone" [mm] (betonlag yderst i konstruktionen, hvor chloridindtrængningen afviger fra Ficks 2. lov for diffusion. Dette er kun relevant i forbindelse med eksponering i splash eller atmosfærisk zone. For beton neddykket i havvand er  $\Delta x = 0$ )
- $D_{\text{app}, C}$  = den tilsyneladende diffusionskoefficient for chlorid [ $\text{mm}^2/\text{år}$ ]

Den tilsyneladende diffusionskoefficient,  $D_{\text{app}, C}$  estimeres ud fra følgende tre ligninger:



Dato: 18. december 2014

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (2.2)$$

$$k_e = \exp \left[ b_e \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right] \quad (2.3)$$

$$A(t) = \left( \frac{t_0}{t} \right)^n \quad (2.4)$$

Symbolforklaringer:

- $k_e$  = "environmental transfer" variabel [-], som tager højde for effekten af  $T_{real}$  på  $D_{app,C}$
- $D_{RCM,0}$  = chloridmigrationskoefficient [ $\text{mm}^2/\text{år}$ ]
- $k_t$  = "transfer" parameter [-]
- $A(t)$  = funktion som tager højde for den tidsmæssige udvikling af chloriddiffusionskoefficienten
- $b_e$  = en regressionsvariabel [K]
- $T_{ref}$  = standard test temperatur [K] (defineret som 293.15 K = 20 °C)
- $T_{real}$  = betonkonstruktionens temperatur [K]
- $t_0$  = betonens alder ved måling af  $D_{RCM,0}$  [år]
- $t$  = tid [år]
- $n$  = ageing factor [-] som beskriver den tidsmæssige udvikling af chloriddiffusionskoefficienten

En detaljeret beskrivelse af ovenstående formler og modelparametre kan findes i *Model Code for Service Life Design* [fib Bulletin No. 34, 2006].

## 2.2 Udvalgte inputparametre til følsomhedsanalyse

For MC-SLD er der udført følsomhedsanalyser for fire udvalgte inputparametre:

- Chloridtærskelværdi ( $C_{crit}$ )
- Chloridkoncentration i betonoverfladen ( $C_s$ )
- Ageing factor ( $n$ )
- Eksponeringstemperaturen ( $T_{real}$ )

Chloridtærskelværdien angiver den minimale koncentration af chlorid (i armeringsdybden), som giver anledning til initering af armerringskorrosion, mens  $C_s$  er den teoretiske overfladekoncentration, som fremkommer ved modellering af et chloridprofil gennembrug af fejlfunktionsløsningen til Ficks 2. diffusionslov. Ageing factoren ( $n$ ) er en eksponent, som udtrykker chloriddiffusionskoefficientens tidsafhængighed, nærmere bestemt hastigheden af chloriddiffusionskoefficientens henfald med tid,

Dato: 18. december 2014

---

og  $T_{\text{real}}$  angiver temperaturen af den konstruktionsdel, for hvilken indtrængningen af chlorid modelleres.

De tre første inputparametre er udvalgt primært med den begrundelse, at de repræsenterer tre materialeafhængige parametre, som typiske er behæftet med en relativt stor usikkerhed. Det skyldes blandt andet, at disse parametres værdi generelt fastlægges ud fra generiske tabel-data i MC-SLD eller ved at anvende data for mere eller mindre sammenlignelige betoner i litteraturen. Det vil sige, at værdien af parametrene typisk ikke beror på eksperimentelt frembragte data for den eksakte betonsammensætning og de eksakte eksponeringsforhold, man ønsker at modellere.

Eksponeringstemperaturen er desuden udvalgt til følsomhedsanalyse, da det ind imellem kan være en parameter, hvis betydning overses eller ignoreres i forbindelse med levetidsberegninger for betonkonstruktioner.

### 2.3 Resultat af følsomhedsanalyse

Referenceberegninger for Beton A, Beton B og Beton C resulterede i estimerede levetider på henholdsvis 10 år, 113 år og 1243 år, og de anvendte inputparametre til beregningerne fremgår af Appendix 2. Resultaterne af følsomhedsanalysen for de fire parametre  $C_{\text{crit}}$ ,  $C_s$ ,  $n$  og  $T_{\text{real}}$  er vist i Fig. 2.1, Fig. 2.2 og Fig. 2.3 for henholdsvis Beton A, B og C. De samme resultater er også angivet i tabelform i Appendix 3.

Det gælder for alle tre betontyper, at ageing factoren  $n$  er den af de fire analyserede modelparametre, hvor modelberegningerne er mest følsom over for ændringer. Dette er i særlig grad udtalt for Beton B og C, hvilket skyldes, at referenceværdien for disse to betoner er relativt høj ( $n = 0.60$ ), og jo højere ageing factor, des mere følsom er modellen over for selv ganske små ændringer i inputværdien. Eksempelvis resulterede en ændring i referenceværdien af  $n$  med blot +5% (dvs. fra  $n = 0.60$  til  $n = 0.62$ ) for Beton C i en forøgelse af levetiden med 118% i forhold til referencelevetiden, altså mere end en fordobling af levetiden.

Fig. 2.1-2.3 viser også, at modellen er næstmest følsom over for ændringer i  $T_{\text{real}}$  når det gælder Beton A og C. For Beton C giver en ændring af referenceværdien for  $T_{\text{real}}$  (20°C) med -20% ( $T_{\text{real}} = 16^\circ\text{C}$ ) for eksempel anledning til en levetid, som er 76% højere end referencelevetiden. Følsomheden over for variationer i  $T_{\text{real}}$ ,  $C_{\text{crit}}$  og  $C_s$  er alle nogenlunde på samme niveau for Beton B. For både Beton A og C er levetidsberegningernes følsomhed over for ændringer af  $C_{\text{crit}}$  og  $C_s$  også stort set på samme niveau.

Dato: 18. december 2014

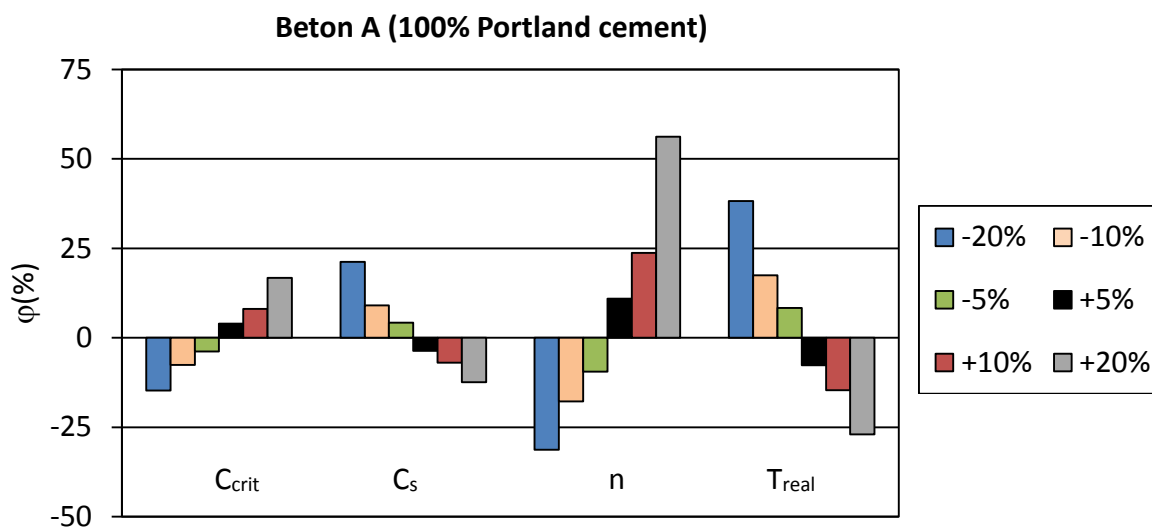


Fig. 2.1. Resultaterne fra følsomhedsanalyse af inputparametrene  $C_{crit}$ ,  $C_s$ ,  $n$  (ageing factor) og  $T_{real}$  ved levetidsberegninger for Beton A foretaget med chloridindtrængningsmodellen fra fib Model Code for Service Life Design.  $\varphi(\%)$  angiver den procentvise ændring ift. referencelevetiden, som beregnes ved at ændre den enkelte modelparameter ( $C_{crit}$ ,  $C_s$ ,  $n$  eller  $T_{real}$ ) med henholdsvis -20%, -10%, -5%, +5%, +10%, +20% i forhold parameterens værdi i referenceberegningen.

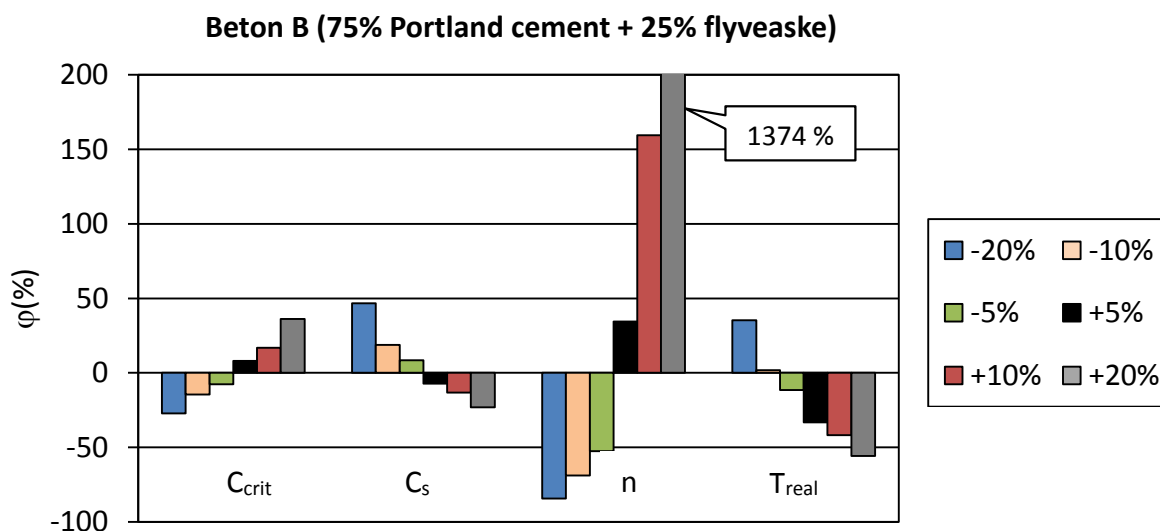


Fig. 2.2. Resultaterne fra følsomhedsanalyse af inputparametrene  $C_{crit}$ ,  $C_s$ ,  $n$  (ageing factor) og  $T_{real}$  ved levetidsberegninger for Beton B foretaget med chloridindtrængningsmodellen fra fib Model Code for Service Life Design.  $\varphi(\%)$  angiver den procentvise ændring ift. referencelevetiden, som beregnes ved at ændre den enkelte modelparameter ( $C_{crit}$ ,  $C_s$ ,  $n$  eller  $T_{real}$ ) med henholdsvis -20%, -10%, -5%, +5%, +10%, +20% i forhold parameterens værdi i referenceberegningen.

Dato: 18. december 2014

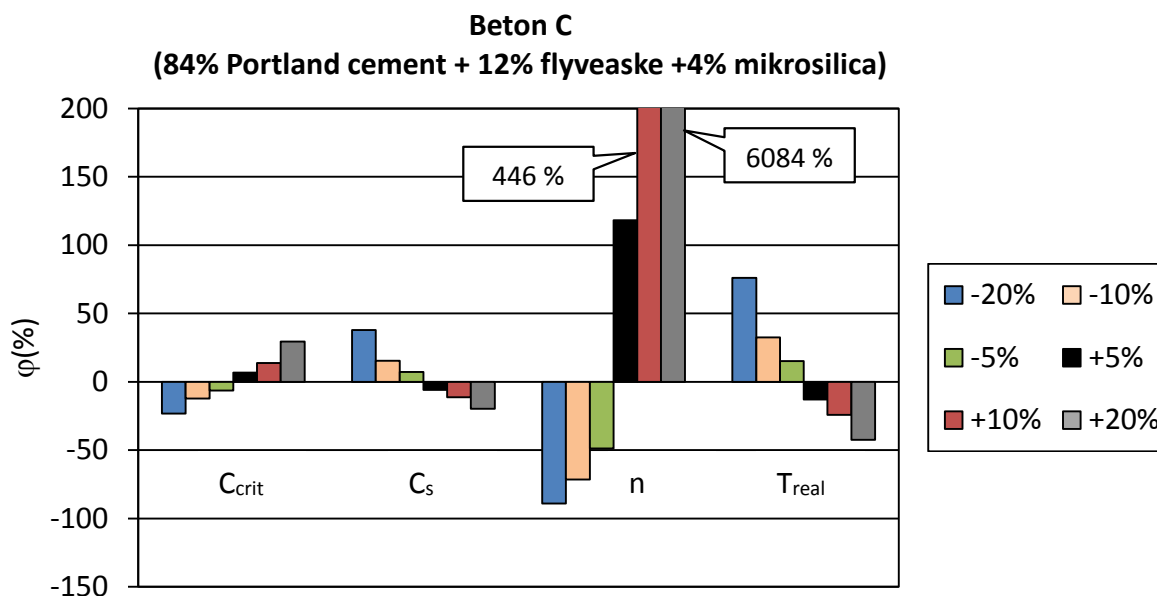


Fig. 2.3. Resultaterne fra følsomhedsanalyse af inputparametrene  $C_{crit}$ ,  $C_s$ ,  $n$  (ageing factor) og  $T_{real}$  ved levetidsberegninger for Beton C foretaget med chloridindtrængningsmodellen fra fib Model Code for Service Life Design.  $\phi$ (%) angiver den procentvise ændring ift. referencelevetiden, som beregnes ved at ændre den enkelte modelparameter ( $C_{crit}$ ,  $C_s$ ,  $n$  eller  $T_{real}$ ) med henholdsvis -20%, -10%, -5%, +5%, +10%, +20% i forhold parameterens værdi i referenceberegningen.

Selv om modellens følsomheden mht. ændring i  $C_{crit}$  og  $C_s$  generelt er mindre end over for ændringer i værdien af  $n$  og  $T_{real}$ , så kan variationer af  $C_{crit}$  og  $C_s$  stadig have signifikant betydning for den beregnede levetid. Hvis  $C_{crit}$  eksempelvis ændres fra referenceværdien med -20%, dvs. fra 0.6 til 0.48 (vægt% af binder), så resulterer det i levetider, der er -15%, -27% og -23% reduceret i forhold til referencelevetiden for henholdsvis Beton A, B og C. Dette skal ses i lyset af, at der på nuværende tidspunkt stadig ikke findes en almen accepteret metode til bestemmelse af chloridtærskelværdier, og at der generelt ses en enorm spredning i litteraturen mht. eksperimentelt bestemt tærskelværdier, selv for betoner, som umiddelbart er sammenlignelige hvad angår bindersammensætning, vand/cement-forhold og eksponeringsmiljø. Inputværdien af chloridtærskelværdien er med andre ord behæftet med en stor usikkerhed, hvilket selvsagt medføre en ikke ubetydelig usikkerhed i levetidsberegningerne.

Fig. 2.4 – 2.7 viser beregnede levetider for Beton A, B og C som funktion af henholdsvis  $C_{crit}$ ,  $C_s$ , ageing factor  $n$  og  $T_{real}$ . De optegnede kurver i figurene er fremkommet ved at at forbinde serier af beregnede levetider, hvor modelparametrene  $C_{crit}$ ,  $C_s$ ,  $n$  og  $T_{real}$  varieres over et passende interval i *steps* på henholdsvis 0.1 [vægt% af binder], 0.2 [vægt% af binder], 0.05 [-] og 5 [°C].

Dato: 18. december 2014

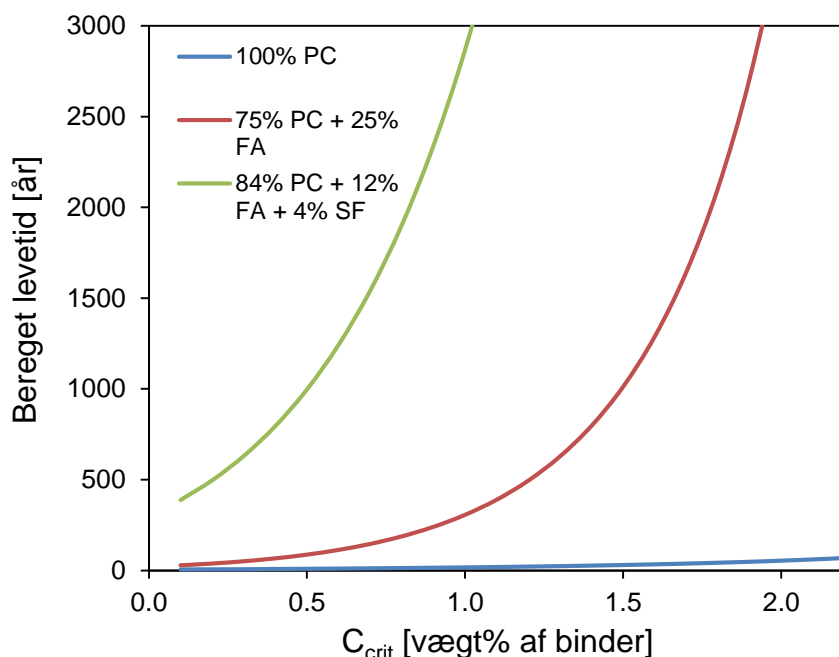


Fig. 2.4. Beregnet levetid som en funktion af chloridtærskelværdien for armeringskorrosion ( $C_{crit}$ ) for Beton A, B og C med bindersammensætninger af henholdsvis 100% Portland cement, 75% Portland cement + 25% flyveaske og 84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica. Levetidsberegningerne er foretaget vha. chloridindtrængningsmodellen i fib Model Code for Service Life Design.

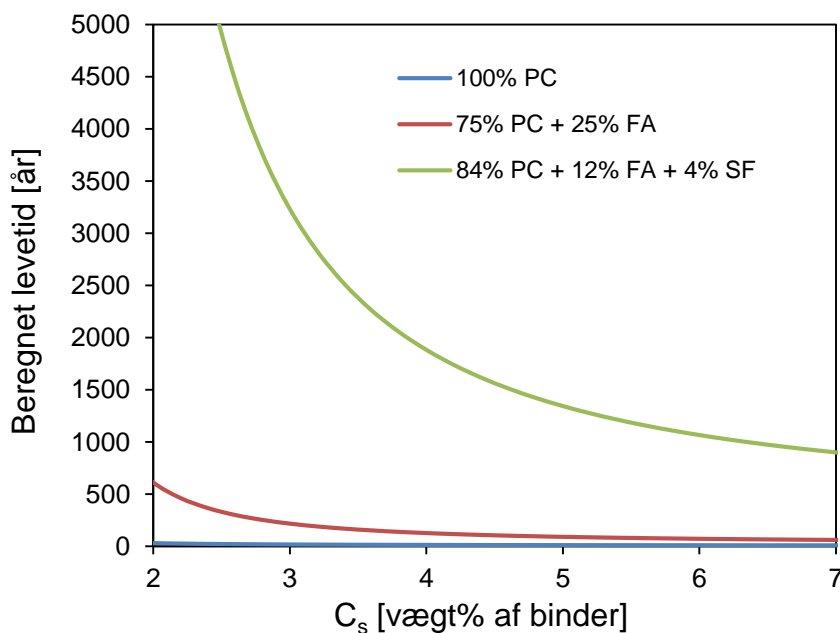


Fig. 2.5. Beregnet levetid som en funktion af chloridkoncentrationen i den eksponerede betonoverflade ( $C_s$ ) for Beton A, B og C med bindersammensætninger af henholdsvis 100% Portland cement, 75% Portland cement + 25% flyveaske og 84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica. Levetidsberegningerne er foretaget vha. chloridindtrængningsmodellen i fib Model Code for Service Life Design.

Dato: 18. december 2014

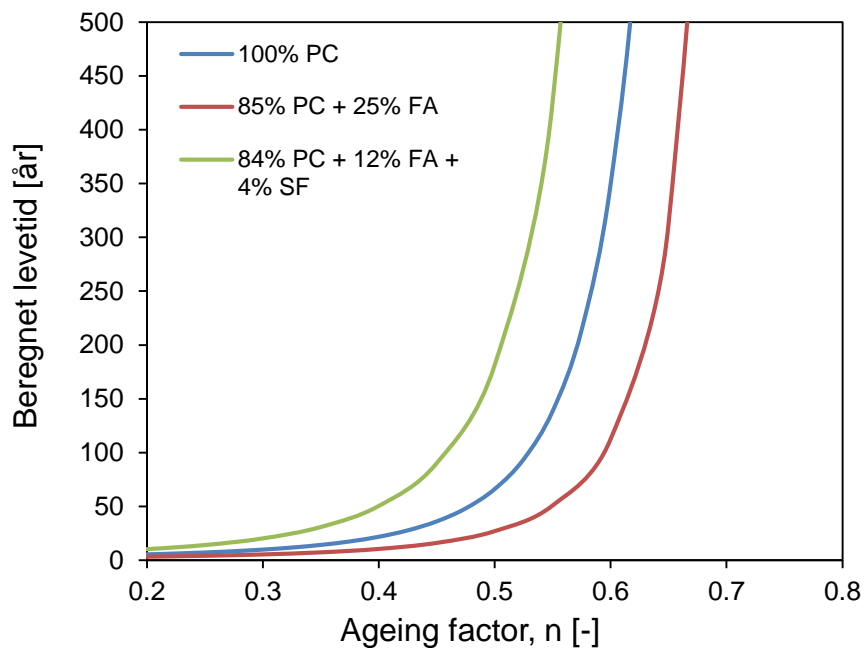


Fig. 2.6. Beregnet levetid som en funktion af ageing factoren  $n$  for Beton A, B og C med bindersammensætninger af henholdsvis 100% Portland cement, 75% Portland cement + 25% flyveaske og 84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica. Levetidsberegningerne er foretaget vha. chloridindtrængningsmodellen i fib Model Code for Service Life Design.

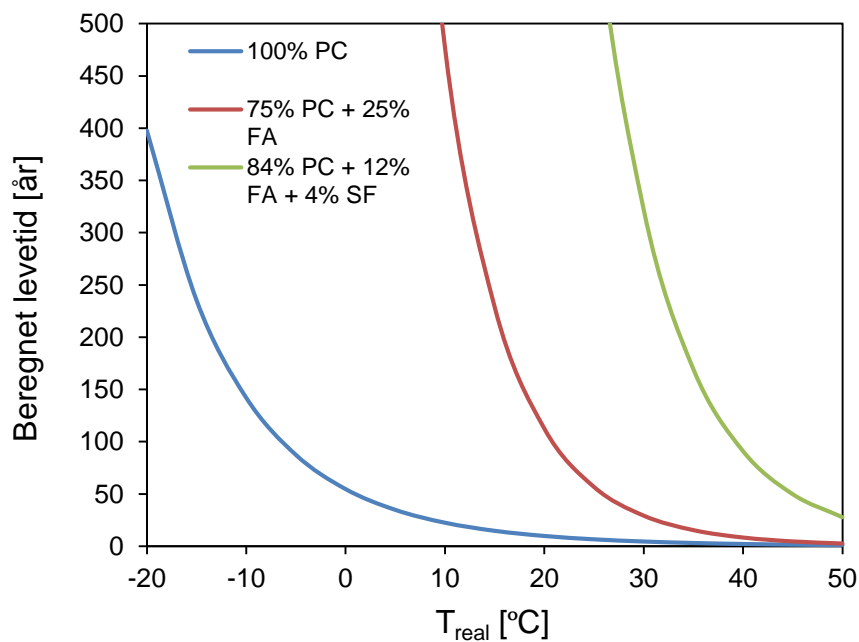


Fig. 2.7. Beregnet levetid som en funktion af betonkonstruktionens temperatur ( $T_{real}$ ) for Beton A, B og C med bindersammensætninger af henholdsvis 100% Portland cement, 75% Portland cement + 25% flyveaske og 84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica. Levetidsberegningerne er foretaget vha. chloridindtrængningsmodellen i fib Model Code for Service Life Design.

Dato: 18. december 2014

---

Alle figurerne viser, at der er endog meget stor forskel på de beregnede levetider for de tre betontyper. Generelt viser Beton A klart de laveste beregnede levetider, mens de højeste levetider generelt beregnes for Beton C, og levetiderne for Beton B typisk ligger mellem de to andre betontyper. Dette generelle billede skyldes hovedsageligt kombinationerne af de forskellige værdier for  $D_{RCM,0}$  og ageing factoren  $n$  for de tre betoner. En lav chloridmigrationskoefficient ( $D_{RCM,0} = 306 \text{ mm}^2/\text{år}$ ) kombineret med en høj ageing factor ( $n = 0.6$ ) resulterer i de meget høje levetider for Beton C, mens den noget lavere ageing factor for Beton A ( $n = 0.3$ ) giver meget kortere levetider. Den højeste  $D_{RCM,0}$ -værdi er målt for Beton B ( $867 \text{ mm}^2/\text{år}$ ), hvilket trækker i retningen af lave levetider, men den højere ageing factor for Beton B ( $n = 0.6$ ) resulterer i, at Beton A generelt udviser lavere levetider end Beton B, på trods af en lavere chloridmigrationskoefficient ( $D_{RCM,0} = 514 \text{ mm}^2/\text{år}$ ).

Som tidligere nævnt udviser de chloridtærskelværdier, som er angivet i litteraturen, generelt en meget stor spredning, hvilket i sidste ende kan have en væsentlig betydning for den beregnede levetid, hvis inputtet af  $C_{crit}$  baseres på en værdi hentet fra litteraturen. Kurverne i Fig. 2.4 belyser denne problematik: Hvis man for Beton B f.eks. ændrer  $C_{crit}$  fra 0.6 til 1.0 vægt%/binder (begge er værdier man vil kunne finde i litteraturen for denne betontype), så forøges levetiden fra 113 år til 306 år.

Det ses i Fig. 2.5, hvorledes den beregnede levetid aftager med stigende værdier for  $C_s$ . Eksempelvis vil en ændring af  $C_s$  fra 4.0 til 5.0 vægt%/binder for Beton B resultere i et fald i levetiden fra 126 år til 90 år. Hvis inputtet til  $C_s$  hentes fra litteraturen, så vil man med stor sandsynlighed nemt kunne finde værdier for  $C_s$  både i nærheden af 4.0 og 5.0 vægt%/binder for en beton, som er sammenlignelig med Beton B. Dette eksempel understreger vigtigheden af at være påpasselig med at finde pålidelig og passende data for  $C_s$  til sine levetidsberegninger.

Fig. 2.6 viser, hvorledes betydningen af ageing factoren  $n$  for den beregnede levetid accelerer meget kraftig i takt med at værdien for  $n$  vokser. Dette gælder for alle tre betontyper. Det er med andre ord altafgørende at anvende en passende værdi for  $n$  for at opnå en pålidelig levetidsberegning, specielt hvis der er tale om en relativt høj  $n$ -værdi. For bindersystemer baseret på Portland cement i kombination med mineralske tilsætninger som flyveaske og mikrosilica ser man i litteraturen ofte  $n$ -værdier, som placerer sig et sted mellem 0.40 og 0.6, f.eks. Markeset & Skjølsvold [2010]. For en betontype som f.eks. Beton C dækker dette interval af  $n$ -værdier beregnede levetider mellem 50 år og 1243 år!

I Fig. 2.7 illustrer kurvernes tiltagende stejle hældninger med faldende temperatur den dramatiske betydning af ændring i betonens teoretiske temperatur ( $T_{real}$ ) for den beregnede levetid. For Beton B betyder en ændring fra f.eks.  $20^\circ\text{C}$  til  $10^\circ\text{C}$ , at levetiden stiger fra 113 år til 477 år. Dette eksempel understreger vigtigheden af at anvende en realistisk værdi for  $T_{real}$  i levetidsberegninger baseret på MC-SLD.

Dato: 18. december 2014

### 3 Følsomhedsanalyse af inputparametre til HETEK-modellen (Mejlbro-Poulsen-modellen)

#### 3.1 Beskrivelse af modellen

I midten af 1990'erne gennemførte Vejdirektoratet en række forsknings- og udviklingsprojekter, som samlet set blev navngivet HETEK (Høj kvalitetsbeton, Entreprenørens TEKnologi) [Nilsson et al., 1997; Poulsen and Mejlbro, 2006]. Et af delprojekterne omhandlede indtrængning af chlorid i beton og blev udført af et konsortium bestående af AEC Rådgivende Ingeniører A/S, Chalmers Tekniske Højskole og Cementa AB. Her var slutmålet at udvikle et system til estimering af levetiden for anlægskonstruktioner af beton udsat for chloridpåvirkning fra havvand eller tørsalte.

Den model, der i projektet blev udviklet til at beskrive indtrængningen af chlorid i beton, har fået navnet HETEK-modellen, men er også kendt som Mejlbro-Poulsen-modellen [Nilsson *et al.*, 1997; Frederiksen and Poulsen, 1997; Poulsen and Mejlbro, 2006]. Denne indtrængningsmodel repræsenterer en analytisk løsning til Ficks 2. lov, hvor både diffusionskoefficienten og overfladekoncentrationen regnes som tidsafhængige.

HETEK-modellen har et empirisk fundament og er udarbejdet på baggrund af talrige observationer fra marine eksponeringspladser, undersøgelser af marint eksponerede betonkonstruktioner samt resultater fra diverse laboratorieeksperimenter. Det vil sige, at de faktiske kemiske og fysiske processer, der er involveret i forbindelse med indtrængning af chlorid i beton, ikke modelleres i HETEK-modellen. Målet med modellen er i stedet at beskrive resultatet af disse fysiske og kemiske processer i transporten, altså det opnåede chloridprofil.

Tiden fra første eksponering indtil korrosionsstart beregnes i Mejlbro-Poulsen-modellen ved følgende ligning:

$$t_{cr} = t_{ex} \times \left\{ \frac{0.5 \cdot c}{\sqrt{t_{ex} D_{aex}} \times \text{inv} \Lambda_p(v_{cr})} \right\}^{\frac{2}{1-\alpha}} \quad (3.1)$$

Symbolforklaringer:

- $t_{cr}$  = tiden fra første eksponering indtil korrosionsstart [år]
- $t_{ex}$  = betonens modenhed ved første eksponeringstidspunkt [år]
- $c$  = dæklagets tykkelse [mm]
- $D_{aex}$  = tilsyneladende chloriddiffusionskoefficient ved tiden  $t = t_{ex}$  [ $\text{mm}^2/\text{år}$ ]
- $\text{inv} \Lambda_p$  = den inverse  $\Lambda_p$  funktion [-] [cf. Mejlbro, 1996]
- $v_{cr}$  = dimensionsløs parameter til beregning af  $t_{cr}$  [-]
- $\alpha$  = eksponent (*ageing parameter*) som udtrykker chloriddiffusionens tidsafhængighed [-]

Til at udregne værdierne for  $D_{aex}$ ,  $\alpha$  og  $v_{cr}$  i ligning 3.1 anvendes nedenstående familie af ligninger, mens værdier af  $\text{inv} \Lambda_p(v_{cr})$  f.eks. kan findes ved opslag i Tabel 8.6 i Mejlbro & Poulsen [2006].



Dato: 18. december 2014

$$D_{aex} = D_1 \times \left( \frac{D_1}{D_{100}} \right)^\theta \quad (3.2)$$

$$D_1 = B \cdot (\text{eqv}\{wL/c\}_D)^N \times k_{D_1,env} \quad (3.3)$$

$$\text{eqv}\{wL/c\}_D = \frac{W + k_{air,D} \cdot L}{PC + FA \cdot k_{FA,D} + SF \cdot k_{SF,D}} \quad (3.4)$$

$$D_{100} = D_1 \times \left( \frac{1}{100} \right)^\alpha \quad (3.5)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \times \log_{10} \left( \frac{1}{t_{ex}} \right) \quad (3.6)$$

$$\alpha = k_\alpha \cdot (1 - 1,5 \cdot \text{eqv}\{wL/c\}_D) \quad (3.7)$$

$$v_{cr} = \frac{C_{cr} - C_i}{S_p} \times \left( \frac{\sqrt{t_{ex} D_{aex}}}{0,5 \cdot c} \right)^{2p} \quad (3.8)$$

$$p = \frac{\log_{10}(C_{100}/C_1)}{\log_{10} \left( \frac{100 - t_{ex}}{1 - t_{ex}} \times \frac{D_{100}}{D_1} \right)} \quad (3.9)$$

$$C_1 = (A \cdot \text{eqv}\{w/c\}_C + k_{air,C} \cdot L) \cdot k_{C1,env} \quad (3.10)$$

$$\text{eqv}\{w/c\}_C = \frac{W}{PC + FA \cdot k_{FA,C} + SF \cdot k_{SF,C}} \quad (3.11)$$

$$C_{100} = C_1 \times k_{C100} \quad (3.12)$$

$$S_p = C_1 \times \left( \left( \frac{D_1}{D_{100}} \right)^\theta \times \frac{t_{ex}}{1 - t_{ex}} \right)^p \quad (3.13)$$

$$C_{cr} = k_{cr,env} \times \exp(-1,8 \times \text{eqv}\{w/c\}_{cr}) \quad (3.14)$$

$$\text{eqv}\{w/c\}_{cr} = \frac{W}{PC \cdot k_{PC,cr} + FA \cdot k_{FA,cr} + SF \cdot k_{SF,cr}} \quad (3.15)$$

Dato: 18. december 2014

### Symbolforklaringer:

- $D_1$  = chloriddiffusionskoefficient efter 1 års eksponering [ $\text{mm}^2/\text{år}$ ]
- $D_{100}$  = chloriddiffusionskoefficient efter 100 års eksponering [ $\text{mm}^2/\text{år}$ ]
- $\theta$  = parameter til beregning af  $D_{\text{aex}}$  [-]
- $B$  = koefficient til beregning af  $D_1$  [ $\text{mm}^2/\text{år}$ ]
- $N$  = koefficient til beregning af  $D_1$  [-]
- $k_{D1,\text{SUB}}$  = miljøfaktor til beregning af  $D_1$  for beton i neddykket marint eksponeringsmiljø [-]
- $W$  = indholdet af vand i betonen [ $\text{kg}/\text{m}^3$  beton]
- $PC$  = indholdet af Portland cement i betonen [ $\text{kg}/\text{m}^3$  beton]
- $FA$  = indholdet af flyveaske i betonen [ $\text{kg}/\text{m}^3$  beton]
- $SF$  = indholdet af mikrosilika (*silica fume*) i betonen [ $\text{kg}/\text{m}^3$  beton]
- $k_{\text{air},D}$  = parameter som bestemmer hvor stort et volume af betonens luftbobler, der opfører sig som vand [ $\text{kg}/\%$ ]
- $k_{FA,D}$  = effektivitetsfaktor for flyveaske til beregning af  $D_1$  [-]
- $k_{SF,D}$  = effektivitetsfaktor for mikrosilika [-]
- $k_{\alpha}$  = miljøfaktor til beregning af  $\alpha$  [-]
- $L$  = luftindholdet i betonen [%]
- $\text{eqv}\{wL/c\}_D$  = "ækvivalent" vand/binder-forhold, som indgår i formlen til beregning af  $D_1$ .
- $v_{cr}$  = parameter til beregning af  $t_{cr}$  [-]
- $C_{cr}$  = chloridtærskelværdi for armeringskorrosion [vægt% af binder]
- $C_i$  = initielt indhold af chlorid i betonen [vægt% af binder]
- $S_p$  = faktor knyttet til koncentrationen af chlorid i betonoverfalden. Afhænger af betonens sammensætning og eksponeringsmiljøet. [vægt% af binder]
- $p$  = parameter som beskriver tidsafhængigheden af overfladekoncentrationen af chlorid. Afhænger af betonens sammensætning og eksponeringsmiljøet. [-]
- $C_1$  = estimeret chloridindhold i betonoverfladen efter 1 års eksponering i havvand [vægt% af binder]
- $C_{100}$  = estimeret chloridindhold i betonoverflade efter 100 års eksponering i havvand [vægt% af binder]
- $A$  = koefficient til beregning af  $C_1$  [vægt% af binder]
- $\text{eqv}\{w/c\}_c$  = "ækvivalent" vand/cement-forhold som indgår i formlen til beregning af  $C_1$  [-]
- $k_{FA,C}$  = effektivitetsfaktor for flyveaske til beregning af  $C_1$  [-]
- $k_{SF,C}$  = effektivitetsfaktor for mikrosilika til beregning af  $C_1$  [-]
- $k_{C100}$  = miljøfaktor til beregning af  $C_{100}$  [-]
- $k_{cr,\text{SUB}}$  = miljøfaktor til beregning af  $C_{cr}$  [-]
- $\text{eqv}\{w/c\}_{cr}$  = "ækvivalent" vand/cement-forhold, som indgår i formlen til beregning af  $C_{cr}$  [-]
- $k_{PC,cr}$  = effektivitetsfaktor for Portland cement til beregning af  $C_{cr}$  [-]
- $k_{FA,cr}$  = effektivitetsfaktor for flyveaske til beregning af  $C_{cr}$  [-]
- $k_{SF,cr}$  = effektivitetsfaktor for mikrosilika til beregning af  $C_{cr}$  [-]

En nærmere beskrivelse af modellen og dens formler kan findes i Nilsson *et al.* [1997], Frederiksen and Poulsen [1997] samt Poulsen and Mejlbro [2006].

Dato: 18. december 2014

## 3.2 Udvalgte inputparametre til følsomhedsanalyse

Som udgangspunkt har HETEK-modellen brug for følgende otte inputparametre til en levetidsberegning:

- $W$  = vandindhold i betonen [ $\text{kg}/\text{m}^3$  beton]
- $PC$  = indhold af Portland cement i betonen [ $\text{kg}/\text{m}^3$  beton]
- $FA$  = indhold af flyveaske i betonen [ $\text{kg}/\text{m}^3$  beton]
- $SF$  = indhold af mikrosilica i betonen [ $\text{kg}/\text{m}^3$  beton]
- $C_i$  = det initiale indhold af chlorid i betonen [vægt% af binder]
- $t_{\text{ex}}$  = betonens alder ved første eksponering til chloridholdigt miljø [år]
- $c$  = dæklagets tykkelse [mm]
- $L$  = betonens luftindhold [%]

Ud fra disse otte inputparametre kan alle de nødvendige beregninger foretages med modellens familie af ligninger (Lign. 3.1 – 3.15). Det bemærkes således, at hverken chloridtærskelværdien (betegnes med symbolet  $C_{cr}$  i HETEK-modellen), overfladekoncentrationen af chlorid, en ageing parameter til beskrivelse af diffusionskoefficientens tidsafhængighed, er modelparametre, man umiddelbart selv definerer ved input af en bestemt værdi, som det er tilfældet med *fib* Model Code for Service Life Design [*fib* Bulletin No. 34, 2006]. I stedet beregnes disse parametre gennem modellens familie af ligninger (Lign. 3.1 – 3.15).

For HETEK-modellen er der udført følsomhedsanalyser for følgende tre udvalgte inputparametre:

- Chloridtærskelværdien ( $C_{cr}$ )
- Betonens alder ved første eksponering til chlorider ( $t_{\text{ex}}$ )
- Betonens luftindhold ( $L$ )

Som antydnet ovenfor, så er  $C_{cr}$  egentlig en parameter, der fastlægges entydigt gennem Lign. 3.14, men chloridtærskelværdien kan alternativt også indsættes direkte i beregningerne med en bestemt ønsket værdi. I forbindelse med følsomhedsanalysen, er  $C_{cr}$  derfor blevet indsat direkte i Lign. 3.8 med de forskellige udvalgte værdier, som undersøges i følsomhedsanalysen, dvs. værdien af  $C_{cr}$  fra referenceberegningen  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$  eller  $\pm 5\%$ .

## 3.3 Resultater af følsomhedsanalysen

Referenceberegninger foretaget med HETEK-modellen for Beton A, Beton B og Beton C resulterede i estimerede levetider på henholdsvis 55 år, 102 år og 88 år, og de anvendte inputparametre til beregningerne fremgår af Appendix 4. Resultaterne af følsomhedsanalysen for de tre parametre  $C_{cr}$ ,  $t_{\text{ex}}$  og  $L$  er vist i Fig. 3.1, Fig. 3.2 og Fig. 3.3 for henholdsvis Beton A, B og C. De samme resultater er også angivet i tabelform i Appendix 5.

For alle tre betontyper gælder, at modelberegningerne er markant mest følsom over for ændringer i modelparametren  $C_{cr}$  i sammenligning med  $t_{\text{ex}}$  og  $L$ . For Beton A giver en ændring af referenceværdien

Dato: 18. december 2014

for chloridtærskelværdien ( $C_{cr} = 1.83$  vægt% af binder) med -20% ( $C_{cr} = 1.46$  vægt% af binder) for eksempel anledning til en levetid, som er 25% kortere end referencelevetiden.

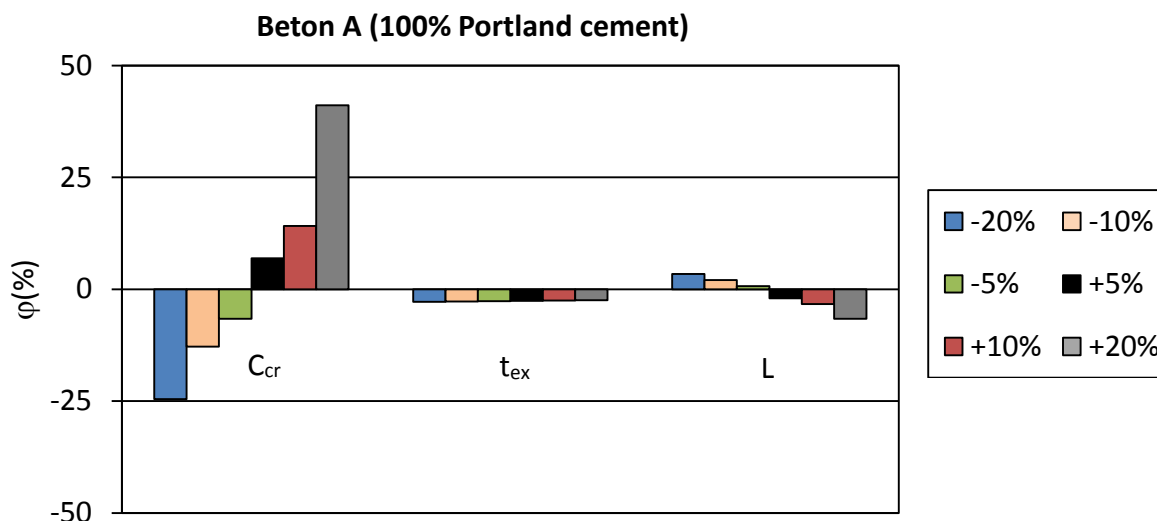


Fig. 3.1. Resultaterne fra følsomhedsanalyse af inputparametrene  $C_{cr}$ ,  $t_{ex}$  og L ved levetidsberegninger for Beton A foretaget med chloridindtrængningsmodellen fra HETEK-modellen.  $\varphi(\%)$  angiver den procentvise ændring ift. referencelevetiden, som beregnes ved at ændre den enkelte modelparameter ( $C_{cr}$ ,  $t_{ex}$ , L) med henholdsvis -20%, -10%, -5%, +5%, +10%, +20% i forhold parameterens værdi i referenceberegningen.

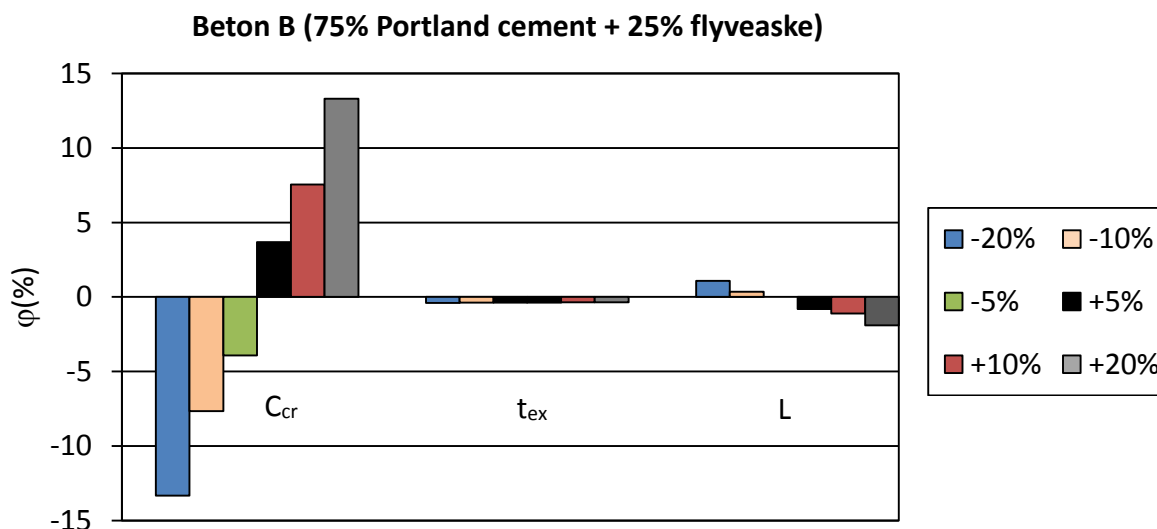


Fig. 3.2. Resultaterne fra følsomhedsanalyse af inputparametrene  $C_{cr}$ ,  $t_{ex}$  og L ved levetidsberegninger for Beton B foretaget med chloridindtrængningsmodellen fra HETEK-modellen.  $\varphi(\%)$  angiver den procentvise ændring ift. referencelevetiden, som beregnes ved at ændre den enkelte modelparameter ( $C_{cr}$ ,  $t_{ex}$ , L) med henholdsvis -20%, -10%, -5%, +5%, +10%, +20% i forhold parameterens værdi i referenceberegningen.

Dato: 18. december 2014

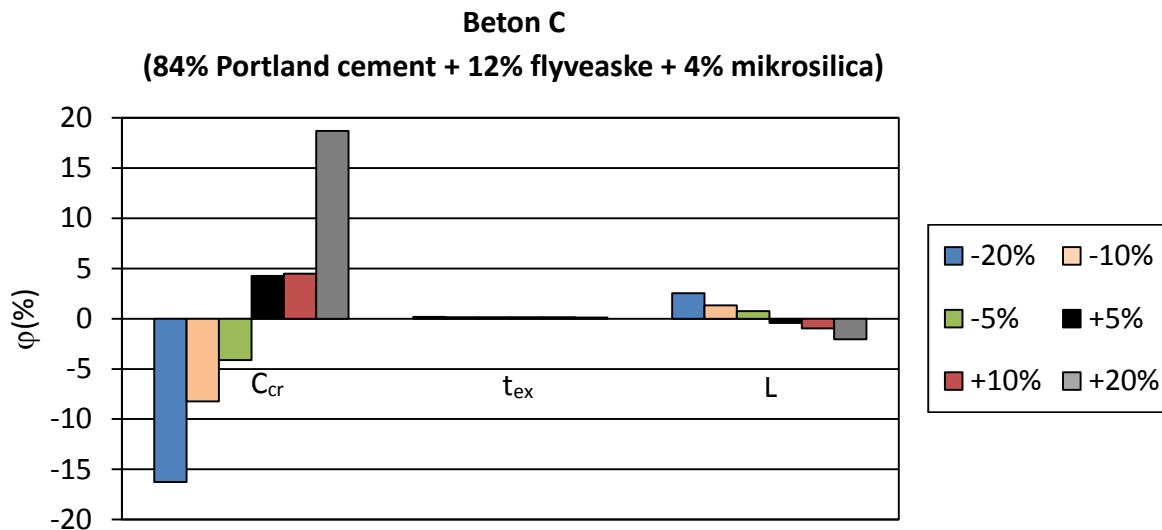


Fig. 3.3. Resultaterne fra følsomhedsanalyse af inputparametrene  $C_{cr}$ ,  $t_{ex}$  og L ved levetidsberegninger for Beton C foretaget med chloridindtrængningsmodellen fra HETEK-modellen.  $\varphi(\%)$  angiver den procentvise ændring ift. referencelevetiden, som beregnes ved at ændre den enkelte modelparameter ( $C_{cr}$ ,  $t_{ex}$ , L) med henholdsvis -20%, -10%, -5%, +5%, +10%, +20% i forhold parameterens værdi i referenceberegningen.

Modellens følsomhed over for variationer i  $t_{ex}$  er lav for alle tre betontyper, og er nærmest ubetydelig for Beton B og C, i det mindste for de her i rapporten undersøgte variationer. Betydningen af variationer for L mht. de beregnede levetider er også relativ lille, og dette gælder både for Beton A, B og C.

Fig. 3.4 – 3.6 viser beregnede levetider for Beton A, B og C som funktion af henholdsvis  $C_{cr}$ ,  $t_{ex}$ , og L. De optegnede kurver i figurerne er fremkommet ved at forbinde serier af beregnede levetider, hvor modelparametrene  $C_{cr}$ ,  $t_{ex}$  og L varieres over et passende interval i tilstrækkeligt små steps.

I alle tre figurer viser Beton B altid de højeste levetider efterfulget af Beton C, mens de beregnede levetider for Beton A er klart de laveste på alle figurerne. Det observeres desuden, at levetidsberegningernes afhængighed af både  $C_{cr}$  og L er af noget nær lineær karakter. Der ses med andre ord ikke en voldsomt accelereret stigning i de beregnede levetider med stigende eller faldende værdier for disse parametre, som det er tilfældet med nogle af modelparametrene i *fib* Model Code for Service Life Design. Mht. levetidsberegningernes afhængighed af værdien af  $t_{ex}$ , så ses der for alle tre betontyper et næsten konstant niveau for levetiden i intervallet fra 7 døgn til ca. 200 døgn, hvorefter der observeres et svagt fald i levetiden med stigende alder for første eksponering.

Dato: 18. december 2014

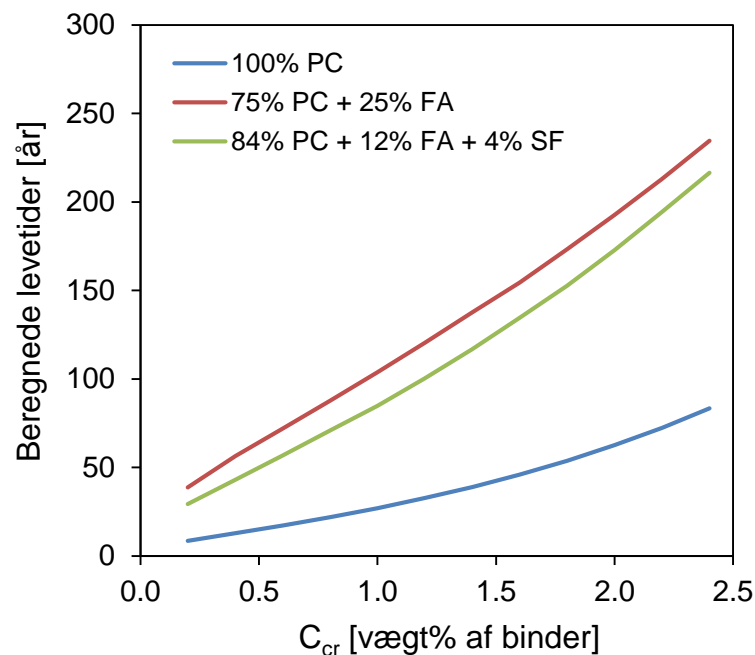


Fig. 3.4. Beregnet levetid som en funktion af chloridtærskelværdien for armeringskorrosion ( $C_{cr}$ ) for Beton A, B og C med bindersammensætninger af henholdsvis 100% Portland cement, 75% Portland cement + 25% flyveaske og 84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica. Levetidsberegningerne er foretaget vha. HETEK-modellen.

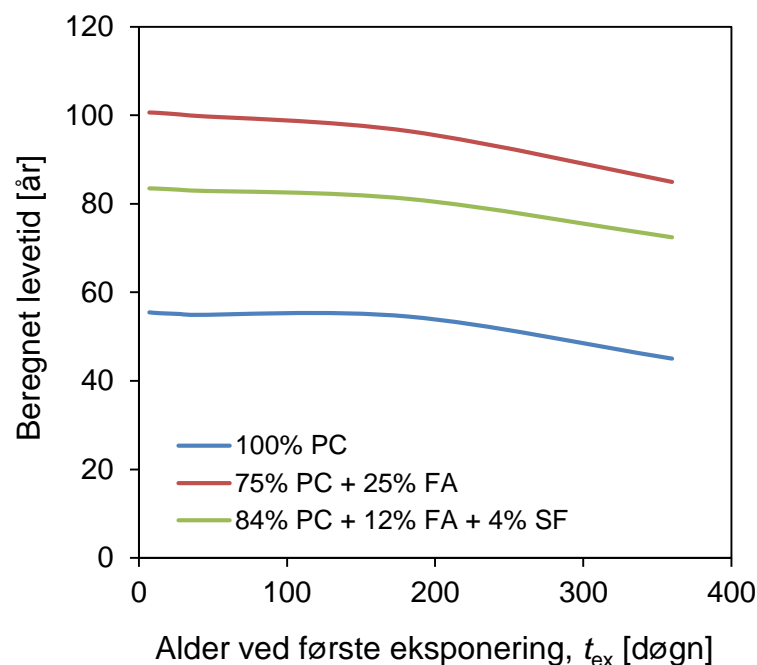


Fig. 3.5. Beregnet levetid som en funktion af betonens alder ved første eksponering til et chloridholdigt miljø ( $t_{ex}$ ) for Beton A, B og C med bindersammensætninger af henholdsvis 100% Portland cement, 75% Portland cement + 25% flyveaske og 84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica. Levetidsberegningerne er foretaget vha. HETEK-modellen.

Dato: 18. december 2014

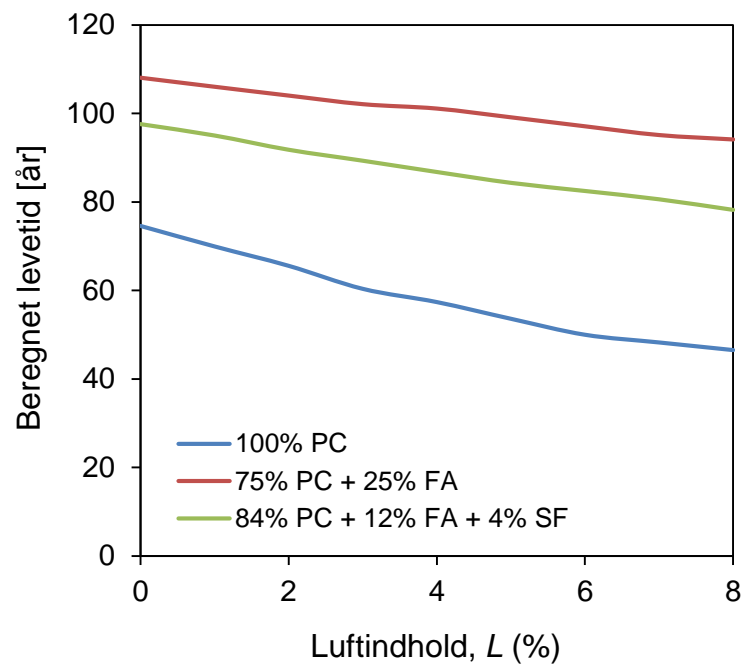


Fig. 3.6. Beregnet levetid som en funktion af betonens luftindhold (L) for Beton A, B og C med bindersammensætninger af henholdsvis 100% Portland cement, 75% Portland cement + 25% flyveaske og 84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica. Levetidsberegningerne er foretaget vha. HETEK-modellen.



Dato: 18. december 2014

---

## 4 Konklusioner

Der er udført følsomhedsanalyser for en række udvalgte inputparametre til to forskellige chloridindtrængningsmodeller, som ofte anvendes til at beregne levetiden for armerede betonkonstruktioner i chloridbelastede eksponeringsmiljøer. De to undersøgte modeller er *fib* Model Code for Service Life Design og HETEK-modellen, og følsomhedsanalyserne er foretaget med udgangspunkt i tre forskellige betoner med bindere bestående af henholdsvis 100% Portland cement, 75% Portland cement + 25% flyveaske og 84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica.

De præsenterede resultater understreger, at det generelt er af altafgørende betydning at anvende passende og valide inputdata til modelberegningerne, hvis man ønsker at opnå et pålideligt beregningsresultat, dvs. en pålidelig levetid for den givne betonkonstruktion. Dette gør sig i særlig grad gældende i forbindelse med *fib* Model Code for Service Life Design, hvor relativt små ændringer i inputparametre så som chloridtærskelværdien for armeringskorrosion ( $C_{crit}$ ) kan afstedkomme væsentlige ændringer i den beregnede levetid.

Allermest følsom viste *fib* Model Code for Service Life Design sig at være over for variationer i værdien af ageing factoren  $n$ , hvor selv helt små ændringer i denne inputparameters værdi kan resultere i dramatiske ændringer i levetiden. Følsomhedsanalyserne afslørede også, at det i forbindelse med *fib* Model Code for Service Life Design er meget væsentligt for pålideligheden af den beregnede levetid at anvende en passende værdi for inputparameteren  $T_{real}$ , dvs. betonkonstruktionens temperatur.

Ud af de tre undersøgte inputparametre (chloridtærskelværdien ( $C_{cr}$ ), tidpunktet for første chlorideksponering ( $t_{ex}$ ) og betonens luftindhold ( $L$ )) viste HETEK-modellen sig at være klart mest følsom over for variationer i chloridtærskelværdien.

Både *fib* Model Code for Service Life Design og HETEK-modellen gav betydeligt højere estimerede levetider for de to betoner med mineralske tilsætninger (flyveske  $\pm$  mikrosilica) i binderen i sammenligning med betonen med 100% Portland cement.





Dato: 18. december 2014

---

## 5 Referencer

Boubitsas, D., Tang, L. & Utgenannt, P. Chloride Ingress in Concrete Exposed to Marine Environment – Field data up to 20 years' exposure, SBUF-rapport 12684, p. 1-137, 2014.

Dansk Betonforening. Armeringskorrosion i chloridpåvirket beton. Publikation nr. 44, p. 1-34, 1995.

*fib* Bulletin No. 34 - Model Code for Service Life Design, p. 1-116, 2006.

J.M. Frederiksen and E. Poulsen. HETEK Report No.123, Chloride Penetration into Concrete, Manual, 1997, p. 1-48.

G. Markset and O. Skjølvold. Time dependent chloride diffusion coefficient – Field studies of concrete exposed to marine environment in Norway, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Service Life Design for Infrastructures, 4-6 October 2010, Delft, Nederland, pp. 83-90.

Mejlbro, L. The Complete Solution to Fick's Second Law of Diffusion with Time-dependent Coefficient and Surface Concentration. In Durability of Concrete in Saline Environment. CEMENTA Special Publication, Danderyd, Sweden, p. 127-158, 1996.

Nilsson, L.-O., Sandberg, P., Poulsen, E., Tang, L., Andersen, A. and Frederiksen, J.M. HETEK – A system for estimation of chloride ingress into concrete (Theoretical background). Vejdirektoratet, Report No. 83, p. 1-168, 1997.

Poulsen, E. and Mejlbro, L. Diffusion of chloride in concrete – Theory and application. Taylor and Francis Inc, New York, USA, p. 1-442, 2006.

The European Union – Brite EuRam III. DuraCrete – Final Technical Report, p. 1-138, 2000.

Dato: 18. december 2014

## Appendix 1: Betonrecepter

Følsomhedsanalysens levetidsberegning er udført med udgangspunkt i tre forskellige betoner, hvis sammensætninger fremgår af nedenstående tabel.

Beton ID			A	B	C
Pulversam- mensætning [%-vægt]	Lav-alkali sulfatbestandig Portland cement	CEM I 42.5 N	100	75	84
	Flyveaske	EN 450-1 N	-	25	12
	Mikrosilika	50 %-vægt slurry	-	-	4
Beton sammensætning	Cement	kg/m <sup>3</sup>	365	300	300
	Flyveaske	kg/m <sup>3</sup>	-	100	43
	Mikrosilika (fast stof)	kg/m <sup>3</sup>	-	-	14
	Vandindhold	l/m <sup>3</sup>	146	140	140
	Tilslag 0/2	kg/m <sup>3</sup>	695	642	677
	Tilslag 4/8	kg/m <sup>3</sup>	377	367	377
	Tilslag 8/16	kg/m <sup>3</sup>	266	271	272
	Tilslag 16/22	kg/m <sup>3</sup>	529	541	543
	Luftindblandingsmiddel	kg/m <sup>3</sup>	1.7	2.3	1.6
	Superplasticizer	kg/m <sup>3</sup>	2.8	2.2	2.9
Nominel ækvivalent vand/cement-forhold*			0.4	0.4	0.4

\* Til beregning af de ækvivalente vand/cement-forhold er der anvendt aktivitetsfaktorer på 2 og 0,5 for henholdsvis mikrosilika og flyveaske.

Dato: 18. december 2014

## Appendix 2: Inputparametre for referenceberegninger med *fib* Model Code for Service Life Design

Inputparameter	Beton A (100% Portland cement)	Beton B (75% Portland cement + 25% flyveaske)	Beton C (84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica)
$C_{crit}^{1)}$ [wt%/binder]	0.6	0.6	0.6
$C_0$ [wt%/binder]	0.001	0.001	0.001
$C_{S,\Delta x}^{2)}$ [wt%/binder]	5.0	5.2	5.3
$a$ [mm]	75	75	75
$\Delta x$ [mm]	0	0	0
$k_e$ [-]	1.25	1.25	1.25
$b_e$ [K]	4800	4800	4800
$T_{ref}$ [K]	293.15	293.15	293.15
$T_{real}$ [K]	293.15	293.15	293.15
$D_{RCM,0}^{3)}$ [mm <sup>2</sup> /år]	514.04	867.00	305.9
$k_t$ [-]	1	1	1
$n$ [-]	0.3	0.6	0.6
$t_0$ [år]	0.0849	0.0877	0.0822

<sup>1)</sup> Den anvendte chloridtærskelværdier for de tre betontyper er en tabelværdi fra *fib* Model Code for Service Life Design [*fib* Bulletin No. 34, 2006].

<sup>2)</sup> Værdierne af  $C_S$  for Beton A, B og C er estimeret ud fra med eksperimentelle data bestemt for sammenlignelige betontyper fra den marine eksponeringsstation i Träslövsläge i Sverige [Boubitsas *et al.*, 2014].

<sup>3)</sup> De angivne værdier for  $D_{RCM,0}$  (chloridmigrationskoefficienter) er bestemt eksperimentelt på Teknologisk Institut for betoner med sammensætninger som Beton A, B og C. Værdierne for  $D_{RCM,0}$  er bestemt for betoner med en alder på ca. 30 døgn ( $=t_0$ ).

Dato: 18. december 2014

### Appendix 3: Resultater fra følsomhedsanalyse af inputparametre til levetidsmodellering vha. *fib* Model Code for Service Life Design

Beton ID	Beton A					
Bindersammensætning	100% Portland cement					
Beregnings-ID	C <sub>crit</sub> [wt% binder]	C <sub>s</sub> [wt% binder]	Ageing factor n [-]	T <sub>real</sub> [°C]	Beregnet levetid [år]	φ(%)
Reference-beregning	0.60	5	0.3	20	9.9	-
C <sub>crit</sub> -20%	0.48	5	0.3	20	8.4	-14.7
C <sub>crit</sub> -10%	0.54	5	0.3	20	9.1	-7.6
C <sub>crit</sub> -5%	0.57	5	0.3	20	9.5	-3.9
C <sub>crit</sub> +5%	0.63	5	0.3	20	10.3	4.0
C <sub>crit</sub> +10%	0.66	5	0.3	20	10.7	8.1
C <sub>crit</sub> +20%	0.72	5	0.3	20	11.5	16.7
C <sub>s</sub> -20%	0.6	4	0.3	20	12.0	21.2
C <sub>s</sub> -10%	0.6	4.5	0.3	20	10.8	9.0
C <sub>s</sub> -5%	0.6	4.75	0.3	20	10.3	4.2
C <sub>s</sub> +5%	0.6	5.25	0.3	20	9.5	-3.7
C <sub>s</sub> +10%	0.6	5.5	0.3	20	9.2	-6.9
C <sub>s</sub> +20%	0.6	6	0.3	20	8.6	-12.4
n -20%	0.6	5	0.24	20	6.8	-31.3
n -10%	0.6	5	0.27	20	8.1	-17.8
n -5%	0.6	5	0.285	20	8.9	-9.5
n +5%	0.6	5	0.315	20	11.0	11.0
n +10%	0.6	5	0.33	20	12.2	23.7
n +20%	0.6	5	0.36	20	15.4	56.2
T <sub>real</sub> -20%	0.6	5	0.3	16	13.6	0.0
T <sub>real</sub> -10%	0.6	5	0.3	18	11.6	38.2
T <sub>real</sub> -5%	0.6	5	0.3	19	10.7	17.4
T <sub>real</sub> +5%	0.6	5	0.3	21	9.1	8.3
T <sub>real</sub> +10%	0.6	5	0.3	22	8.4	-7.6
T <sub>real</sub> +20%	0.6	5	0.3	24	7.2	-14.7

Dato: 18. december 2014

Beton ID	Beton B					
Bindersam- mensætning	75% Portland cement + 25% flyveaske					
Beregnings-ID	C <sub>crit</sub> [wt% binder]	C <sub>s</sub> [wt% binder]	Ageing factor n [-]	T <sub>real</sub> [°C]	Beregnet levetid [år]	φ(%)
Reference- beregning	0.6	4.3	0.6	20	112.5	0.0
C <sub>crit</sub> -20%	0.48	4.3	0.6	20	81.9	-27.2
C <sub>crit</sub> -10%	0.54	4.3	0.6	20	96.1	-14.6
C <sub>crit</sub> -5%	0.57	4.3	0.6	20	104.0	-7.5
C <sub>crit</sub> +5%	0.63	4.3	0.6	20	121.6	8.1
C <sub>crit</sub> +10%	0.66	4.3	0.6	20	131.3	16.8
C <sub>crit</sub> +20%	0.72	4.3	0.6	20	153.0	36.1
C <sub>s</sub> -20%	0.6	3.44	0.6	20	165.0	46.7
C <sub>s</sub> -10%	0.6	3.87	0.6	20	133.6	18.8
C <sub>s</sub> -5%	0.6	4.085	0.6	20	122.0	8.5
C <sub>s</sub> +5%	0.6	4.515	0.6	20	104.4	-7.2
C <sub>s</sub> +10%	0.6	4.73	0.6	20	97.5	-13.3
C <sub>s</sub> +20%	0.6	5.16	0.6	20	86.4	-23.2
n -20%	0.6	4.3	0.48	20	17.6	-84.3
n -10%	0.6	4.3	0.54	20	35.2	-68.7
n -5%	0.6	4.3	0.57	20	53.4	-52.5
n +5%	0.6	4.3	0.63	20	151.1	34.4
n +10%	0.6	4.3	0.66	20	291.7	159.4
n +20%	0.6	4.3	0.72	20	1658.1	1374.4
T <sub>real</sub> -20%	0.6	4.3	0.6	16	152.2	35.4
T <sub>real</sub> -10%	0.6	4.3	0.6	18	114.5	1.8
T <sub>real</sub> -5%	0.6	4.3	0.6	19	99.4	-11.6
T <sub>real</sub> +5%	0.6	4.3	0.6	21	75.2	-33.1
T <sub>real</sub> +10%	0.6	4.3	0.6	22	65.5	-41.8
T <sub>real</sub> +20%	0.6	4.3	0.6	24	49.8	-55.7



Dato: 18. december 2014

Beton ID	Beton C					
Bindersam- mensætning	84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica					
Beregnings-ID	C <sub>crit</sub> [wt% binder]	C <sub>s</sub> [wt% binder]	Ageing factor n [-]	T <sub>real</sub> [°C]	Beregnet levetid [år]	φ(%)
Reference- beregning	0.6	5.3	0.6	20	1242.7	0.0
C <sub>crit</sub> -20%	0.48	5.3	0.6	20	953.2	-23.3
C <sub>crit</sub> -10%	0.54	5.3	0.6	20	1089.5	-12.3
C <sub>crit</sub> -5%	0.57	5.3	0.6	20	1163.9	-6.3
C <sub>crit</sub> +5%	0.63	5.3	0.6	20	1326.4	6.7
C <sub>crit</sub> +10%	0.66	5.3	0.6	20	1415.0	13.9
C <sub>crit</sub> +20%	0.72	5.3	0.6	20	1608.3	29.4
C <sub>s</sub> -20%	0.6	4.24	0.6	20	1712.8	37.8
C <sub>s</sub> -10%	0.6	4.77	0.6	20	1435.1	15.5
C <sub>s</sub> -5%	0.6	5.035	0.6	20	1330.8	7.1
C <sub>s</sub> +5%	0.6	5.565	0.6	20	1167.6	-6.0
C <sub>s</sub> +10%	0.6	5.83	0.6	20	1102.9	-11.3
C <sub>s</sub> +20%	0.6	6.36	0.6	20	997.2	-19.8
n -20%	0.6	5.3	0.48	20	134.9	-89.1
n -10%	0.6	5.3	0.54	20	354.2	-71.5
n -5%	0.6	5.3	0.57	20	635.0	-48.9
n +5%	0.6	5.3	0.63	20	2711.9	118.2
n +10%	0.6	5.3	0.66	20	6791.3	446.5
n +20%	0.6	5.3	0.72	20	76846.1	6083.6
T <sub>real</sub> -20%	0.6	5.3	0.6	16	2189.3	76.2
T <sub>real</sub> -10%	0.6	5.3	0.6	18	1646.3	32.5
T <sub>real</sub> -5%	0.6	5.3	0.6	19	1429.7	15.0
T <sub>real</sub> +5%	0.6	5.3	0.6	21	1081.3	-13.0
T <sub>real</sub> +10%	0.6	5.3	0.6	22	941.7	-24.2
T <sub>real</sub> +20%	0.6	5.3	0.6	24	716.3	-42.4

Dato: 18. december 2014

---

#### Appendix 4: Inputparametre for referenceberegninger med HETEK-modellen (Mejlbro-Poulsen-modellen)

Inputparameter	Beton A (100% Portland cement)	Beton B (75% Portland cement + 25% flyveaske)	Beton C (84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica)
Vand [kg/m <sup>3</sup> i beton]	146	140	140
Portland cement [kg/m <sup>3</sup> i beton]	365	300	300
Flyveaske [kg/m <sup>3</sup> i beton]	0	100	43
Mikrosilica [kg/m <sup>3</sup> i beton]	0	0	14
C <sub>i</sub> [vægt%/binder]	0.001	0.001	0.001
C <sub>cr</sub> [år]	1.83	0.95	1.01
t <sub>ex</sub> [år]	0.077	0.077	0.077
c [mm]	75	75	75
L [%]	4.5	4.5	4.5



Dato: 18. december 2014

## Appendix 5: Resultater fra følsomhedsanalyse af inputparametre til levetidsmodellering vha. HETEK-modellen (Mejlbro-Poulsen-modellen)

Beton ID	Beton A							
Bindersammensætning	100% Portland cement							
Beregnings-ID	$C_{cr}$ [vægt% af binder]	$t_{ex}$ [år]	Luftindhold L [%]	$p$ [-]	$v_{cr}$ [-]	inv $\Lambda_p(v_{cr})$ [-]	Beregnet levetid [år]	$\phi$ (%)
Referenceberegning	1.83	0.077	4.5	0.192	0.4079	0.6042	55.48	-
$C_{cr}$ -20%	1.46	0.077	4.5	0.192	0.3255	0.6787	41.87	-24.53
$C_{cr}$ -10%	1.65	0.077	4.5	0.192	0.3662	0.6395	48.36	-12.84
$C_{cr}$ -5%	1.74	0.077	4.5	0.192	0.3865	0.6214	51.84	-6.57
$C_{cr}$ +5%	1.92	0.077	4.5	0.192	0.4272	0.5877	59.33	6.93
$C_{cr}$ +10%	2.01	0.077	4.5	0.192	0.4476	0.572	63.34	14.17
$C_{cr}$ +20%	2.20	0.077	4.5	0.192	0.4883	0.524	78.31	41.16
$t_{ex}$ -20%	1.83	0.0614	4.5	0.193	0.4084	0.61134	53.92	-2.80
$t_{ex}$ -10%	1.83	0.0690	4.5	0.193	0.4082	0.61117	53.96	-2.74
$t_{ex}$ -5%	1.83	0.0729	4.5	0.192	0.4080	0.611	54.00	-2.67
$t_{ex}$ +5%	1.83	0.0805	4.5	0.192	0.4078	0.61083	54.03	-2.61
$t_{ex}$ +10%	1.83	0.0844	4.5	0.192	0.4076	0.61066	54.07	-2.54
$t_{ex}$ +20%	1.83	0.0921	4.5	0.191	0.4074	0.61049	54.11	-2.48
L -20%	1.83	0.077	3.6	0.192	0.4237	0.5959	57.37	3.40
L -10%	1.83	0.077	4.05	0.192	0.4157	0.5992	56.61	2.03
L -5%	1.83	0.077	4.275	0.192	0.4118	0.60254	55.85	0.67
L +5%	1.83	0.077	4.725	0.192	0.4041	0.6093	54.36	-2.01
L +10%	1.83	0.077	4.95	0.192	0.4004	0.6127	53.64	-3.32
L +20%	1.83	0.077	5.4	0.192	0.3932	0.6214	51.8	-6.6





Dato: 18. december 2014

Beton ID	Beton B							
Bindersam- mensætning	75% Portland cement + 25% flyveaske							
Beregnings- ID	$C_{cr}$ [vægt% af binder]	$t_{ex}$ [år]	Luftindhold L [%]	$p$ [-]	$v_{cr}$ [-]	inv $\Lambda_p(v_{cr})$ [-]	Beregnet levetid [år]	$\phi$ (%)
Reference- beregning	0.95	0.077	4.5	0.234	0.080	1.1074	101.94	-
$C_{cr}$ -20%	0.76	0.077	4.5	0.234	0.064	1.1622	88.35	-13.33
$C_{cr}$ -10%	0.85	0.077	4.5	0.234	0.072	1.1376	94.14	-7.65
$C_{cr}$ -5%	0.90	0.077	4.5	0.234	0.076	1.1225	97.94	-3.92
$C_{cr}$ +5%	1.00	0.077	4.5	0.234	0.084	1.0940	105.69	3.68
$C_{cr}$ +10%	1.04	0.077	4.5	0.234	0.088	1.0805	109.63	7.54
$C_{cr}$ +20%	1.14	0.077	4.5	0.234	0.096	1.0616	115.50	13.30
$t_{ex}$ -20%	0.95	0.0614	4.5	0.235	0.07961	1.10887	101.54	-0.39
$t_{ex}$ -10%	0.95	0.0690	4.5	0.234	0.07962	1.10883	101.55	-0.38
$t_{ex}$ -5%	0.95	0.0729	4.5	0.234	0.07962	1.10883	101.55	-0.38
$t_{ex}$ +5%	0.95	0.0805	4.5	0.234	0.07963	1.10879	101.56	-0.37
$t_{ex}$ +10%	0.95	0.0844	4.5	0.233	0.07964	1.10876	101.57	-0.36
$t_{ex}$ +20%	0.95	0.0921	4.5	0.233	0.07965	1.10872	101.58	-0.35
L -20%	0.95	0.077	3.6	0.234	0.0812	1.1034	103.04	1.09
L -10%	0.95	0.077	4.05	0.234	0.0804	1.1061	102.30	0.36
L -5%	0.95	0.077	4.275	0.234	0.0800	1.1074	101.94	0.00
L +5%	0.95	0.077	4.725	0.234	0.0792	1.1104	101.12	-0.80
L +10%	0.95	0.077	4.95	0.234	0.0789	1.1115	100.82	-1.10
L +20%	0.95	0.077	5.4	0.234	0.0781	1.1146	100.01	-1.89



Dato: 18. december 2014

Beton ID	Beton C							
Bindersam- mensætning	84% Portland cement + 12% flyveaske + 4% mikrosilica							
Beregnings- ID	$C_{cr}$ [vægt% af binder]	$t_{ex}$ [år]	Luftindhold L [%]	$p$ [-]	$v_{cr}$ [-]	inv $\Lambda_p(v_{cr})$ [-]	Beregnet levetid [år]	$\varphi$ (%)
Reference- beregning	1.01	0.077	4.5	0.226	0.1242	0.9805	87.50	
$C_{cr}$ -20%	0.80	0.077	4.5	0.226	0.0993	1.0434	73.27	-16.27
$C_{cr}$ -10%	0.91	0.077	4.5	0.226	0.1118	1.0105	80.29	-8.24
$C_{cr}$ -5%	0.96	0.077	4.5	0.226	0.1180	0.9951	83.88	-4.13
$C_{cr}$ +5%	1.06	0.077	4.5	0.226	0.1304	0.9663	91.23	4.26
$C_{cr}$ +10%	1.11	0.077	4.5	0.226	0.1366	0.9656	91.41	4.47
$C_{cr}$ +20%	1.21	0.077	4.5	0.226	0.1491	0.9234	103.87	18.70
$t_{ex}$ -20%	1.01	0.0614	4.5	0.227	0.12424	0.97995	87.65	0.17
$t_{ex}$ -10%	1.01	0.0690	4.5	0.226	0.12422	0.98000	87.64	0.15
$t_{ex}$ -5%	1.01	0.0729	4.5	0.226	0.12422	0.98000	87.64	0.15
$t_{ex}$ +5%	1.01	0.0805	4.5	0.226	0.12421	0.98002	87.63	0.15
$t_{ex}$ +10%	1.01	0.0844	4.5	0.225	0.12420	0.98005	87.62	0.14
$t_{ex}$ +20%	1.01	0.0921	4.5	0.225	0.12419	0.98007	87.62	0.13
L -20%	1.01	0.077	3.6	0.226	0.1276	0.9720	89.71	2.53
L -10%	1.01	0.077	4.05	0.226	0.1259	0.9760	88.66	1.32
L -5%	1.01	0.077	4.275	0.226	0.1251	0.9779	88.17	0.76
L +5%	1.01	0.077	4.725	0.226	0.1234	0.9819	87.14	-0.41
L +10%	1.01	0.077	4.95	0.226	0.1226	0.9838	86.66	-0.96
L +20%	1.01	0.077	5.4	0.226	0.1210	0.9876	85.71	-2.04