

**Balco AB**

# Balco, tekniska studier av balkonginglasningar

- Inverkan på karbonatisering och  
armeringskorrosion

**Förhandskopia**

**Stockholm 2010-07-15**

# Balco, tekniska studier av balkonginglasningar

- Inverkan på karbonatisering och armeringskorrosion

Datum 2010-07-15  
Uppdragsnummer 61221037830  
Utgåva/Status Förhandskopia

Per Hammarström  
Uppdragsledare

Ali Farhang  
Handläggare

Per Hammarström  
Granskare

Ramböll Sverige AB  
Box 17009, Krukmakargatan 21  
104 62 Stockholm

Telefon 010-615 60 00  
Fax 010-615 20 00  
[www.ramboll.se](http://www.ramboll.se)

Unr 61221037830

Organisationsnummer 556133-0506

## Innehållsförteckning

<b>1.</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>1</b>
1.1	Uppdragsbeskrivning .....	1
1.2	Orientering.....	1
<b>2.</b>	<b>Bakgrund om karbonatisering och armeringskorrosion.....</b>	<b>3</b>
2.1	Initiering av armeringskorrosion genom karbonatisering.....	3
2.2	Korrosion av ingjuten armering i karbonatiserad betong .....	5
<b>3.</b>	<b>Inverkan av inglasning på betongens relativa fuktighet .....</b>	<b>7</b>
3.1	Våttid .....	7
3.2	Ytfuktighet .....	8
3.3	Fuktprofil i betong .....	10
3.4	Inverkan av inglasning på ytfuktighet och våttid .....	12
<b>4.</b>	<b>Inverkan av inglasning på koldioxidens ytkoncentration och luftomsättningen .....</b>	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>Inverkan av inglasningen på karbonatisering .....</b>	<b>13</b>
<b>6.</b>	<b>Inverkan av inglasningens på armeringskorrosion .....</b>	<b>18</b>
<b>7.</b>	<b>Inverkan av inglasning på betongkonstruktionens livslängd .....</b>	<b>19</b>
7.1	Beräkning av propageringstid (med och utan inglasning).....	20
<b>8.</b>	<b>Inverkan av inglasning på frostsador i betong.....</b>	<b>24</b>
8.1	Inre frostsador av frysning i rent vatten .....	24
<b>9.</b>	<b>Utförda mätningar i Finland .....</b>	<b>25</b>
9.1	Introduktion.....	25
9.2	Utförda mätningar och resultat .....	25
9.3	Viktiga slutsatser ur Mattilas experiment .....	29
<b>10.</b>	<b>Slutsatser .....</b>	<b>30</b>
<b>11.</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>31</b>
	<b>Bilaga A</b> Beräkningsmodell för armeringskorrosionens initieringsperiod enligt Duracrete	
	<b>Bilaga B</b> Beräkningsmodell för armeringskorrosionens propageringsperiod enligt Duracrete	

## Balco, tekniska studier av balkonginglasningar - Inverkan på karbonatisering och armeringskorrosion

### 1. Inledning

#### 1.1 Uppdragsbeskrivning

Ramböll har fått i uppdrag av Balco AB att vetenskapligt bevisa ett antal förmodade positiva effekter vid inglasning av balkonger, bland annat korrosionsskydd, bullerreducering samt energibesparing. Denna rapport behandlar delen korrosionsskydd.

#### 1.2 Orientering

Vid inglasning av balkonger sker ur Korrosionsskydd viktiga förändringar. Nedan beskrivs under varje punkt både förändringen och dess eventuella effekt.

Förändring	Eventuell påverkan (hypoteser)
Fasaden skärmas av mot direkt vindpåverkan och därmed luftomsättningen reduceras kraftigt.	Detta bör påverka karbonatiseringshastigheten i betong.
Fasaden skärmas av mot direkt nederbörd.	Fuktbelastningen på all betong reduceras kraftigt.  Relativa fuktigheten i betong minskar, vilket bör resultera i reduktion av korrosionshastighet hos armering i karbonatiserad betong.  Karbonatiseringshastigheten bör öka vid lägre relativ fuktighet.  Risken för korrosion i övriga stålkonstruktioner och ståldetaljer bör minska.
Luften på balkongen värms upp av både solens strålning och eventuellt uppvärmning av inomhusklimatet.	När temperaturen i en inglasade balkong stiger, minskar också luftens fuktighet i en inglasade balkong.  Risk för kondens på betongytor bör minska.
Betongens överkant kan efter inglasning beläggas med golv.	Detta ger ytterligare skydd mot karbonatisering och fuktbelastning.

De ovanstående förändringarna tyder på en väsentlig inverkan på korrosionsskyddet genom ett förändrat fukttinnehåll i all betong samt förändring av korrosionshastighet hos armeringen i betong.

De nämnda effekterna av inglasning på karbonatisering och armeringskorrosion har teoretisk studerats i denna rapport enligt följande rubriker:

- En teoretisk studie av inglasningens effekt på betongens relativa fuktighet
- En teoretisk studie av inglasningens effekt på koldioxidens ytkoncentration och luftomsättning.
- En teoretisk studie av inglasningens effekt på armeringskorrosion på grund av (i) förändrad karbonatiseringshastighet och (ii) mindre fukthalt i betong.
- En teoretisk jämförelse av livslängder med hänsyn till armeringskorrosion i karbonatiserad betong hos en regnutsatt balkong samt en inglasad balkong.

I denna rapport studeras fallet med och utan inglasning och det förutsätts att inglasningen är helt. En delvis öppen inglasning är inte intressant ur korrosionsskyddssynpunkt.

De teoretiska studierna bör kompletteras med följande mätningar under minst 1 år:

- Verifiering av inglasningens effekt på betongens relativa fuktighet genom provtagningar och/eller in-situ mätningar. Även luftens fuktighet och temperatur skall mätas i ett par lämpliga referensobjekt.
- Verifiering av inglasningens effekt på koldioxidens ytkoncentration och luftomsättningen genom mätningar hos ett par lämpliga referensobjekt.
- Verifiering av inglasningens effekt på korrosionshastighet i ett par lämpliga referensobjekt.

För närvarande finns inga mätningar utförda, men liknande experiment har utförts i Finland och en kort sammanfattning av viktiga observationer redovisas i denna rapport.

## 2. Bakgrund om karbonatisering och armeringskorrosion

### 2.1 Initiering av armeringskorrosion genom karbonatisering

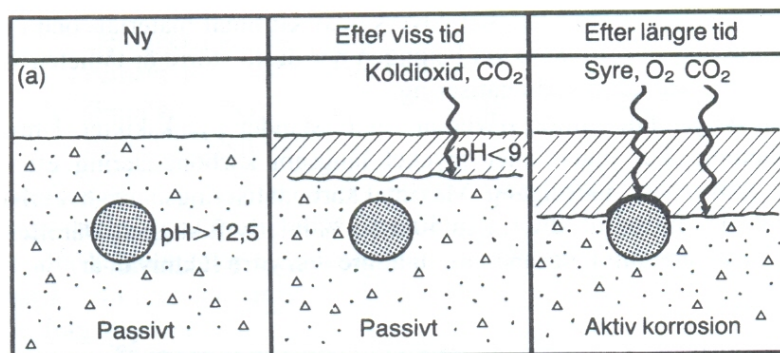
Eftersom det vid cementreaktionen bildats alkaliska hydroxider är betong normalt ett mycket alkaliskt material, med ett pH-värde på 13-14. På ett i betongen ingjutet stål bildas på grund av detta en tunn hinna av svårösliga föreningar, som skyddar stålet från korrosion. Denna process kallas för passivering. Passiviseringen kan dock brytas och armeringskorrosion uppstå när omgivande betongens PH-värde sänks.

Om betongen befinner sig i en miljö där betongens relativa fuktighet (RH) är inom ett visst intervall sker en kemisk reaktion. Koldioxiden i luften tränger in i betongen, upplöses i den fukt som finns i kapilärporer och bildar kolsyra, som omvandlar betongens kalciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  till kalciumkarbonat.

Detta förlopp, som kallas för karbonatisering, är en helt naturlig reaktion och medför inte att betongen försämras på något sätt. Däremot har den till följd att pH-värdet i betong sänks från 13-14 till 7-8.

Penetrationen av koldioxid i betong är en diffusion process Den är snabb när betongen är ganska torr. Men kolsyrans reaktion inte uppstår om betongen är för torr. Detta är anledningen till de mest gynnsamma villkor för att få in av koldioxid motsvarar en relativ fuktighet på ca 65 %.

Karbonatiseringen börjar på ytan och tränger sedan längre och längre in i betongen, som en front. Betongen får en yttre del med lågt pH, och en inre med högt pH. Så småningom sträcker sig den yttre delen så långt in att den når armeringsjärnen, vars passivitet bryts, och om det då finns nog mycket fukt i betongen börjar armeringsstålet korrodera, se figur 2.1.



Figur 2.1: Karbonatisering (ur Burström, Byggnadsmaterial. 2001).

Karbonatisering sker snabbare på torra ytor än på fuktiga, eftersom vattnet hindrar koldioxiden från att förflytta sig i betongen. Samtidigt sker korrosion

snabbast i en så fuktig miljö som möjligt. Detta medför att armeringskorrosion till följd av karbonatisering sker snabbast i en miljö där RH ligger på 70-100 %.

När karbonatiseringsprocessen väl är igång beror dess hastighet främst på betongens vattencement- tal (vct). Ett lågt vct innebär en större täthet, vilket i sin tur innebär att det tar längre tid för karbonatiseringsfronten att ta sig fram.

För att korrosion ska äga rum krävs förutom tillgång till vatten också tillgång till syre. Därmed utgör en tät och välkompakterad betong ett större skydd för stålet än en gles. Till följd av att ett korroderat stål har en volym som är två till fem gånger större än ett icke korroderat stål uppstår spänningar i betongen, som så småningom leder till att den spricker och faller sönder. Detta kallas för rostsprängning. Armeringskorrosion leder också till att armeringsjärnets tvärsnittsytta minskar, och därmed minskar också dess bärförmåga.

De miljöberoende faktorerna såsom regn är ofta svårt att påverka medan de materialberoende faktorerna kan man genom olika val av betongsammansättning och härdning. Bindemedel är en stor faktor för karbonatiseringshastigheten eftersom sammansättningen av bindemedel bestämmer mängden

karboniserbart material och även betongens täthet mot  $CO_2$ . Betong av Portlandcement har en högre halt karboniserbart kalk jämfört med betong med tillsats av flygaska eller silikastoft, trots detta är det svårt att påvisa att de senare karboniseras snabbare. Betong med flygaska och silikastoft har en tätare struktur vilket gör det svårare för  $CO_2$  att tränga in. Således är svårt att generalisera materialinverkan på karbonatiseringen, (Betonghandboken-Material, 1997).

Vattencementtalet är en annan viktig faktor som påverkar karbonatiseringshastigheten eftersom tätheten i betongen starkt beror på vct-talet. Med ett högt vct fås en försämrad täthet och samtidigt fås mindre mängd karboniserbara ämnen eftersom andelen vatten är stor.

Förutom täcksiktets beskaffenheter har dess tjocklek mycket stor betydelse för tiden tills karbonatiseringsfronten når armeringen. En fördubbling av täcksiktets tjocklek ökar initieringstiden med en faktor 4, (Betonghandboken-Material, 1997).

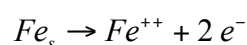
Arbetsutförandet för betongen är också en faktor som har betydelse för karbonatiseringen. Det är viktigt att få ett tätt och så homogent täcksikt som möjligt för att fördröja processen.

## 2.2 Korrosion av ingjuten armering i karbonatiserad betong

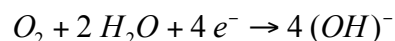
Korrosion kan med en enkel modell förklaras genom att laddningar transporteras mellan en anod och en katod, vilket drivs av en potentialskillnad mellan dessa. Potentialskillnaden beror på olika miljöfaktorer som varierar med pH, syrehalt, fukthalt, kloridhalt eller kombinationer av dessa. Positiva metalljonerna ( $Fe^{2+}$ ) frigörs vid anoden och reagerar vid katoden med hydroxyljoner ( $OH^-$ ) och bildar rost ( $Fe(OH)_2$ ). Det finns två olika sorters korrosion, jämn avfrätning och punktformig frätning ("pitting"=gropfrätning). Om de anodiska och katodiska ytorna är ungefär lika stora fås en jämn avfrätning. Om däremot den anodiska ytan är mycket liten i förhållande till den katodiska fås istället en gropfrätning, vilket oftast uppkommer p.g.a. kloridsamlingar. Denna form av korrosion är mycket djupgående och kan leda till allvarliga konsekvenser på armerade konstruktioner, (Burström, Byggnadsmaterial, 2001).

I en karbonatiserad betong (då PH-värdet i porlösning är mindre än 9) och tillgång till syre, vatten kan anod och katod reaktioner presenteras på följande sätt.

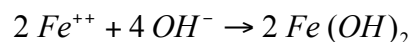
Ekvationen nedan visar att frigörningen av elektroner.



Och den katodiska reaktionen med syre och vatten som:

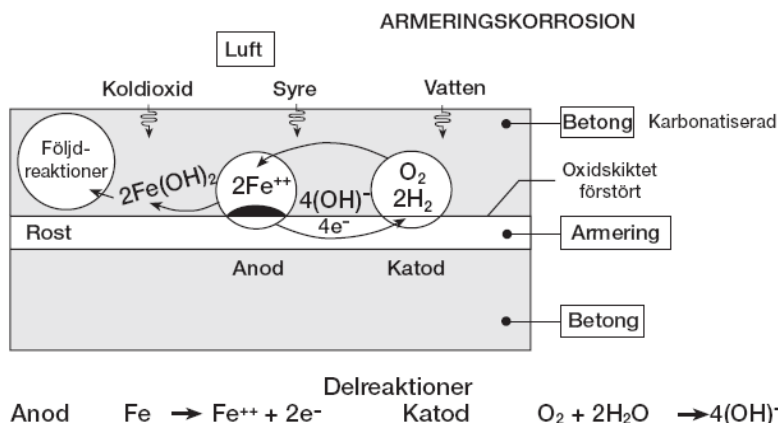


Arean av stålytan som täcks av den passiva skyddsfilmerna fungerar som katod. Elektroner som frigörs från anoden färdas genom stålet till katodytan. Syrediffusionen i betongporerna eller från atmosfärsluften, fångar den inkommande elektronen från stålet och ger upphov till en reduktion av syret i närvaron av vatten som då formar hydroxyljoner. Följaktligen blir jonerna upplösta i porvattnet då reagerar med hydroxyljonerna och bildar järnhydroxid



Primära faktorer för att korrosion ska starta är:

- Tillgänglighet till syre
- Betongens fuktighet
- Betongens PH värdet

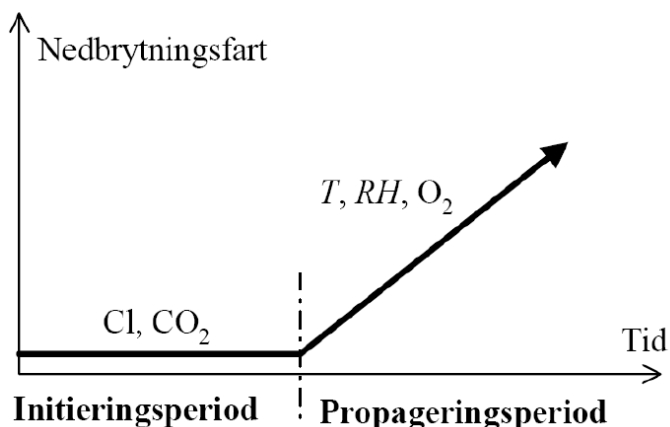


Figur 1.2: Korrosion under inverkan av karbonatisering

Stålet i betongkonstruktioner är skyddade av ett täckande betongskikt som är mycket alkalisk. Det gör att korrosion inte kan starta initialt. Korrosionsprocessen kan enligt Tuutti (Tuutti, 1982) delas in i en initierings- och propageringsperiod. Under initieringsperiod sker ingen korrosion men det fortgår förändringar i täcktskiktet. Korrosionen kan starta när fronten för karbonatiseringen av täcktskiktet nått armeringen eller när kloridkoncentrationen vid armeringen nått ett kritiskt värde, kloridtröskelvärdet. Korrosionsperioden även kallad propageringsperioden är relativt kort för utomhuskonstruktioner, med vårt klimat ca 5-20 år.

Eftersom denna tid är kort så är det nödvändigt att ha en längre initieringsperiod och på så vis få en längre livslängd. Längden för initieringsperioden styrs av en mängd faktorer såsom miljö, permeabilitet, cementtyp och vct, (Betonghandboken-Material, 1997).

Ett annat alternativt är att förändra förutsättningarna för armeringskorrosion och därmed förlänga propageringsperioden. Till exempel genom att minska betongens fuktighet kan man påverka korrosionshastigheten och livslängden, se avsnitt 3.



Figur 2.3: Korrosionsmodell enligt Tuutti (Tuutti, 1982)

### 3. Inverkan av inglasning på betongens relativa fuktighet

En av de viktigaste parametrar som möjliggör att ingjuten armering korroderar är fukt i det täckande betongskiktet. Fuktprofilen i betong närmast betongytan i sin tur beror på fuktförhållandena vid betongyta.

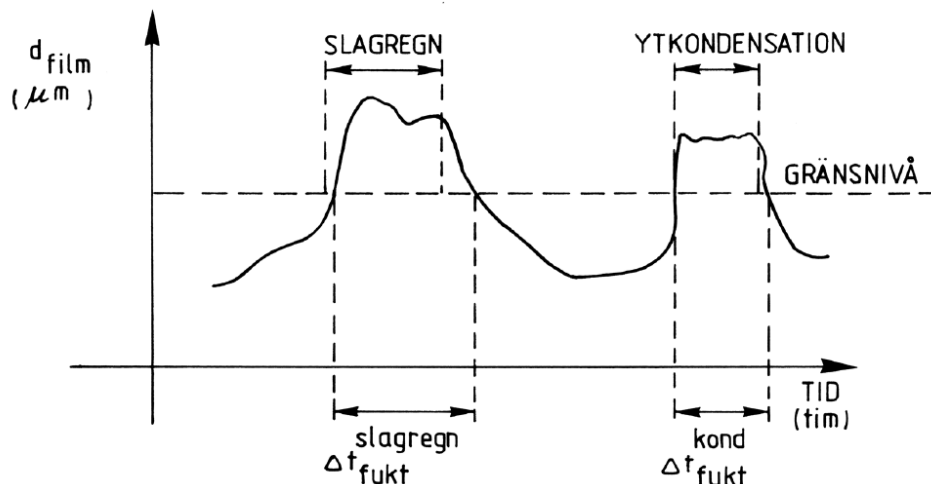
Vid fallet balkong utan inglasning gäller två fuktkällor vid betongyta. Det första är vatten vid betongyta (fuktfilm) och ofta mäts som våttid i timmar. Det andra är ytfuktighet hos betongen på grund av luftens relativa fuktighet (RF i %) under resterande tid då ytan inte är våt.

#### 3.1 Våttid

Ytan kan vara exponerad för nederbörd, ytkondensation och/eller rinnande vatten och detta visas genom begreppet våttid. Våttiden är den tid då konstruktionens yta är våt p.g.a. ytkondensation, nederbörd och vatten som rinner från högre liggande delar.

Våttiden är inte densamma som den tid ytan är exponerad för nederbörd, ytkondensation och/eller rinnande vatten. Det finns det en viss förskjutning i tiden, då fuktfilmen inte bildas omedelbart när ytan blir exponerad och filmen inte försvinner direkt när exponeringen slutar. Avgörande för skillnaden mellan våttiden på ytan och exponeringen för nederbörd etc. är materialens fukttekniska egenskaper, t.ex. vattenuppsugningsförmågan.

I figur 3.1 illustreras skillnader mellan våttid (definierat som en fuktfilm med en tjocklek större än ett visst värde) och exponering för nederbörd (slagregn) respektive ytkondensation.



Figur 3.1: Principiellt utseende på skillnader mellan fuktbelastning och våttid för en vertikal yta i ett poröst material, Svennerstedt (1989). (ur BFR nr 12, 2007)

Enligt figur 3.1 är skillnaden mellan våttiden och tiden för exponering större för slagregn än för ytkondensation. Det beror på att mängden fukt som tillförs är betydligt större vid slagregn än vid ytkondensation, vilket i sin tur medför att mängden fukt som tränger in i materialet också blir större. Följden är att materialet är tillräckligt fuktigt även efter det att regnet slutat, för att en fuktfilm med viss tjocklek ska kunna bibehållas. Mängden fukt som tillförs genom ytkondensation är däremot inte tillräcklig för att fuktfilmen skall vara tillräckligt tjock under någon längre tid.

### 3.2 Ytfuktighet

Samspelet mellan luftens RF och ytans fuktighet kan beräknas enligt nedanstående ekvation.

Fuktförhållandena vid en yta kan uttryckas som ekvivalent ytfuktighet (RF) och våttid. Den ekvivalenta ytfuktigheten kan uttryckas som en funktion av den ekvivalenta yttemperaturen och av fuktförhållandena i omgivande luft, se nedanstående ekvationen, (BFR nr 12, Vägledning för livslängdsdimensionering av betongkonstruktioner, 2007).

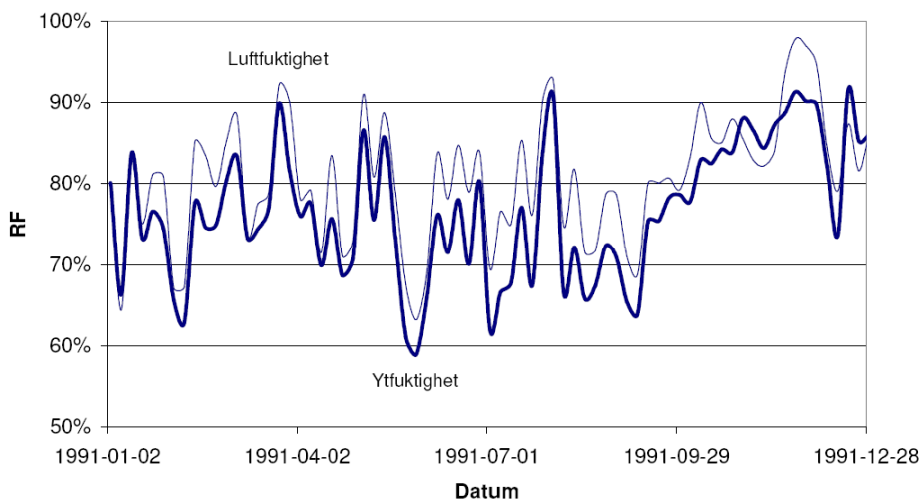
$$RF_{yta,ekv} = \frac{RF_{luft} \cdot v_s(T_{luft})}{v_s(T_{yta,ekv})} = \frac{v_{luft}}{v_s(T_{yta,ekv})}$$

$RF_{yta,ekv}$  är relativ fuktighet vid ytan. [%]

$RF_{luft}$  är relativ fuktighet i luften. [%]

$v_s(T_{\text{luft}})$  är mättnadsånghalten i luften vid en viss  $T_{\text{luft}}$  [g/m<sup>3</sup>]  
 $v_s(T_{\text{yta,ekv}})$  är mättnadsånghalten i luften vid en viss  $T_{\text{yta,ekv}}$  [g/m<sup>3</sup>]  
 $v_{\text{luft}}$  är luftens ånghalt. [g/m<sup>3</sup>]

Figur 3.2 visar för en horisontell betongyta hur en beräknad ekvivalent ytfuktighet följer den uppmätta luftfuktigheten.



Figur 3.2: Uppmätta luftfuktigheter och beräknad ekvivalent ytfuktighet för en horisontell betongyta i Holzkirchen (södra Tyskland) 1991. (medelvärden för fem dagar). Data från IBP (1995). Ur BFR nr 12, 2007)

Av figur 3.2 framgår att den uppmätta luftfuktigheten generellt är högre än den beräknade ekvivalenta ytfuktigheten. Detta beror på att den ekvivalenta yttemperaturen oftast är högre än lufttemperaturen. Högre yttemperatur ger

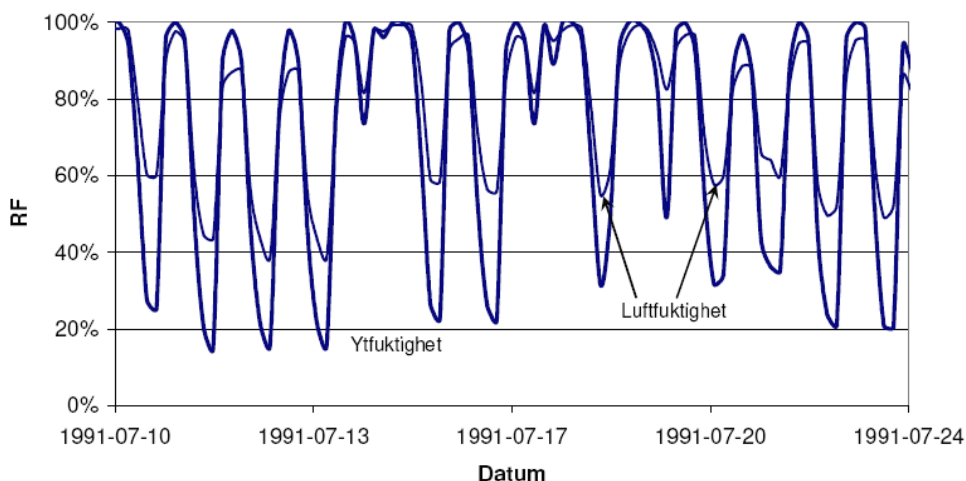
högre mättnadsånghalt vid ytan och detta gör att kvoten  $\frac{v_s(T_{\text{luft}})}{v_s(T_{\text{yta,ekv}})}$  blir mindre

än 1 och ytfuktigheten  $RF_{\text{yta,ekv}}$  mindre än luftens relativa fuktighet  $RF_{\text{luft}}$ .

Om den ekvivalenta ytfuktigheten överskrider 100 % RF, dvs. den ekvivalenta yttemperaturen är lägre än luftens daggpunkt, kondenserar fukt på ytan. Den mängd som kondenserar beror på skillnaden mellan luftens ånghalt och mättnadsånghalten vid ytan samt på materialets förmåga att ta upp fukt.

figur 3.3 visar uppmätta luftfuktigheter och beräknade ekvivalenta ytfuktigheter för en horisontell betongyta i Holzkirchen (i södra tyskland) (medelvärden för fyra timmar – två veckor i juli 1995).

Av figur 3.3 framgår att skillnaden mellan luft- och ytfuktigheterna är stor (fyra timmars medelvärden). Skillnaden är störst under soliga dagar, beroende på att den ekvivalenta yttemperaturen,  $T_{yta,ekv}$ , då är betydligt högre än lufttemperaturen,  $T_{luft}$ . Under nätter med stor utstrålning kan  $RF_{yta,ekv}$  bli större än 100 %, vilket innebär ytkondensation, dvs.  $T_{yta,ekv}$  är lägre än dagtemperaturen, (BFR nr 12, 2007).



Figur 3.3: Uppmätta luftfuktigheter och beräknade ekvivalenta ytfuktigheter för en horisontell betongyta i Holzkirchen (i södra tyskland) (medelvärden för fyra timmar – två veckor i juli). Data från IBP (1995). (ur BFR nr 12, Vägledning för livslängdsdimensionering av betongkonstruktioner, 2007)

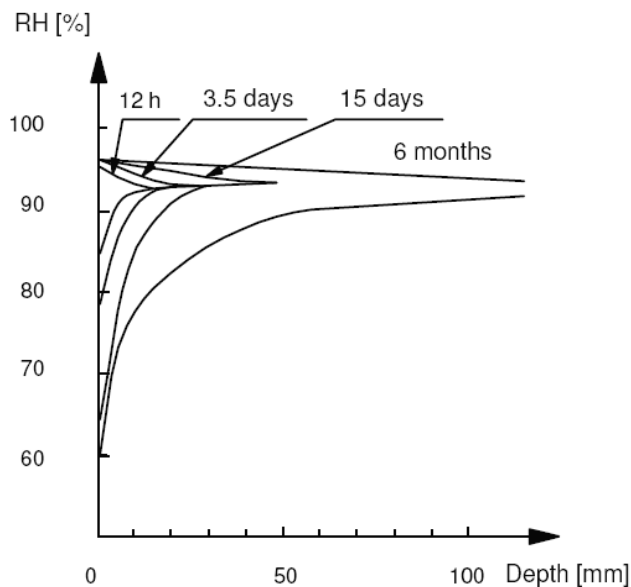
*Variationen av  $T_{yta,ekv}$  i förhållande till  $T_{luft}$  är avgörande för risken av ytkondens. Det är mycket troligt att i en inglasade balkong är risken för kondens betydligt lägre än balkong utan inglasning. Detta beror på att  $T_{yta,ekv}$  kommer att alltid vara större än  $T_{luft}$  på grund av inglasningen. Detta bör kartläggas i en inglasade balkong genom fuktighets- och temperaturmätningar.*

### 3.3 Fuktprofil i betong

Betongens ytfuktighet och våttid samt dess variationer ger upphov till en respons, beskriven av betongens fuktillstånd. Detta varierar med djupet och tiden,

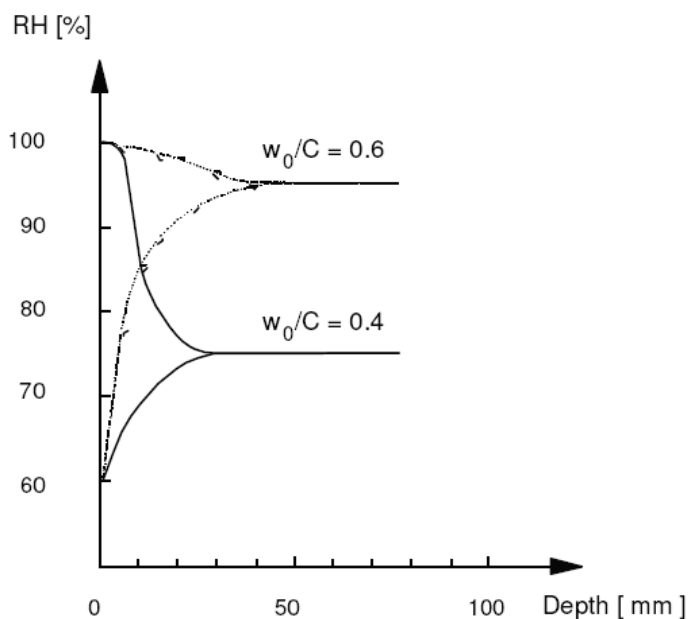
beroende på ytfuktighetens och våttidernas storlek och variationer, och kan bestämmas med lagen för konservering av materia och energi.

Här ges exempel på hur fuktillståndet kan se ut i en dimension (1D) beroende på randvillkoren. Information om hur fuktillståndet kan bestämmas rent praktiskt finns i DuraCrete (1999), (BFR nr 12, 2007).



Figur 3.4: Beräknade fuktprofiler i betonger exponerade för cykliska fuktbelastningar. Arfvidsson & Hedenblad (1991). (ur BFR nr 12, Vägledning för livslängdsdimensionering av betongkonstruktioner, 2007)

Generellt förändras fuktillståndet betydligt långsammare än temperaturlståndet. Detta framgår av figur 3.4, där förändringar av fuktbelastningen vid ytan märks på ca 30 mm djup först efter 2 veckors exponering, och på 100 mm efter 6 månader.



Figur 3.5: Beräknade fuktprofiler i betonger med olika sammansättningar, exponerade för cykliska fuktbelastningar. Arfvidsson & Hedenblad (1991).

Vatten-cement-talet definieras och visas som Kvoten  $w_0/C$  och påverkar tiden för uttorkning och uppfuktning. Fukttillståndet på större djup är relativt konstant, men påverkas av betongsammansättningen och  $w_0/C$  som framgår av figur 3.5.

### 3.4 Inverkan av inglasning på ytfuktighet och våttid

De troliga effekterna av inglasning på armeringskorrosion uppstår på grund av förändrat fuktförhållande i betongplatta och omgivande luft. Om betongytan behålls torr under en viss period kommer betongens fuktighet i armeringsnivå att minska och därmed minskar korrosionshastigheten under propageringsfasen.

Våttiden på grund av nederbörd, rinnande vatten är nästan noll.

Våttiden på grund av ytkondens minskar kraftigt. Detta beror på att både luftens temperatur och framför allt betongytans temperatur kommer att vara högre i en inglasade balkong. Genom mätningar av luftens och betongens temperatur och fuktighet kan man bestämma reduktionen av våttid i timmar pga ytkondens.

*Inneluftens fuktighet (i jämförelse med uteluftens fuktighet) minskar och därmed minskar Ytfuktigheten på grund av inglasningen. I vilken grad minskar ytfuktigheten beror på uppvärmning av inneluften vilket sker genom solstrålning och konvention (uppvärmning av inneluft).*

#### 4. Inverkan av inglasning på koldioxidens ytkoncentration och luftomsättningen

Den karakteristiska koldioxidkoncentrationen i fria luften intill en betongyta är omkring  $5.0 \cdot 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup> (per m<sup>3</sup> luft). Den har dock ökat kraftigt på senare år och långtidsprognoser pekar på värden uppåt  $8.0 \cdot 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup> i ett hundraårsperspektiv, (BFR nr 12, 2007).

För betongytor inuti mer eller mindre slutna utrymmen är koldioxidkoncentrationen lägre på grund av att betongytorna konsumerar luftens koldioxid. Hur mycket lägre koncentrationen blir beror på hur stor luftomsättningen är i dessa utrymmen och hur stor konsumtionen av koldioxid är, dvs. betongsammansättning, mikroklimat och hur djupt karbonatiseringen redan gått.

*Det är mycket troligt att inglasningen av balkongutrymmen bidrar till en mindre luftomsättning vid betongytor. Luftomsättning och koldioxidkoncentration bör mätas i balkonger med och utan inglasning i syfte att klargöra eventuella skillnader. Utan noggranna mätningar är det svårt att bestämma inglasningens effekt på luftomsättning och luftens CO<sub>2</sub> koncentration vid betongytor.*

#### 5. Inverkan av inglasningen på karbonatisering

Karbonatisering uppkommer när koldioxid från luften tränger in i betongen och reagerar med kalciumhydroxiden. Det bildas en karbonatiseringsfront som gradvis tränger in djupare i betongen vilket ger upphov till en kraftig sänkning av pH-värdet i betongen. Korrosionen kan starta när karbonatiseringsfronten har nått armeringen.

Hastigheten för karbonatiseringsfronten bestäms av omgivningens CO<sub>2</sub> koncentration, betongens förmåga att ta upp CO<sub>2</sub> och diffusionshastigheten för CO<sub>2</sub>.

Eftersom betong inte är ett homogent material så fortlöper karbonatiseringen olika fort i tvärsnittet. Ett medelvärde beräknas därför lämpligtvis för karbonatiseringen.

En enkel beräkningsmodell för karbonatiseringsfronten dvs karbonatiseringsdjupet kan beskrivas på följande sätt (4):

$$x = k \sqrt{t}$$

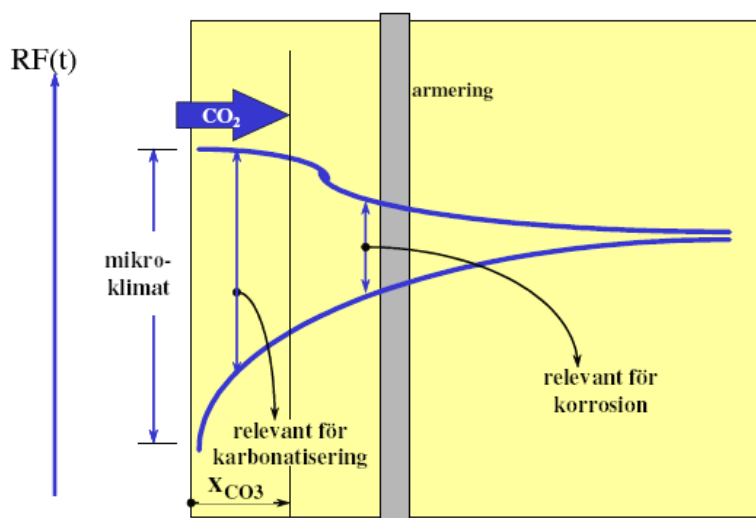
där

$x$  är karbonatiseringsdjup  
 $k$  är koefficient  
 $t$  är tid

Värdet på koefficienten ( $k$ ) kan teoretiskt beräknas om man vet betongens diffusionkoefficient för  $CO_2$ , betongens  $CO_2$ -absorption samt den omgivande  $CO_2$ -koncentrationen.

Karbonatiseringsförloppet är relativt komplicerat om man tar hänsyn till alla viktiga delprocesser under verkliga klimatförhållanden. När det gäller balkongplatta utan inglasning varierar täcksiktets fuktförhållanden normalt under årets olika perioder och påverkas starkt av regn som träffar betongytan. Fuktvariationerna hos betongen ser ut som i figur 5.1, (BFR nr 12, 2007).

Diffusionen av koldioxid skall därför periodvis ske genom ett relativt fuktigt täcksikt med stort diffusionsmotstånd, olika på olika djup. Andra perioder är täcksiktet relativt torrt och diffusionsmotståndet är då betydligt mindre, särskilt närmast den torra ytan. Den delen av betongen som är karbonatiserad har dessutom andra fuktbindningsegenskaper än betongen djupare in, (BFR nr 12, 2007).



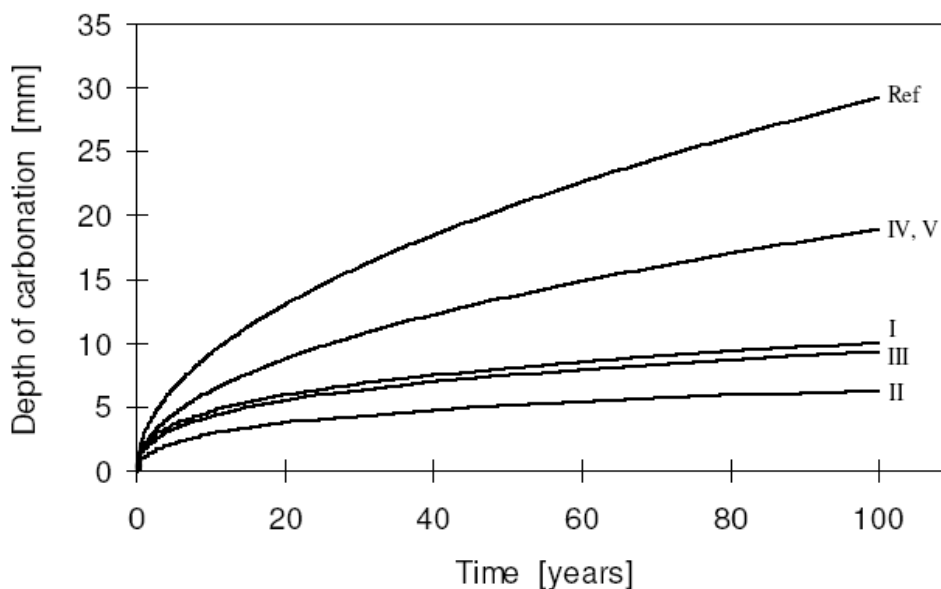
Figur 5.1: Effekten av fuktvariationer på initiering av armeringskorrosion av karbonatisering, (BFR nr 12, 2007).

Koldioxiden skall reagera med större delen av den karbonatiserbara mängden kalk innan den kan tränga längre in. Hur mycket detta är beror bland annat på fuktnivån och betongens ålder.

En korrekt beskrivning av alla dessa aspekter fordrar en komplicerad datormodell. En sådan, "mikromodell", utvecklades av CEB (1997), men används främst för att kvantifiera parametrarna i enklare "meso-modeller". Modellerna enligt DuraCrete (1998) för initiering av armeringskorrosion p g a karbonatisering är densamma som "meso-modellen" enligt CEB (1997), (BFR nr 12, 2007).

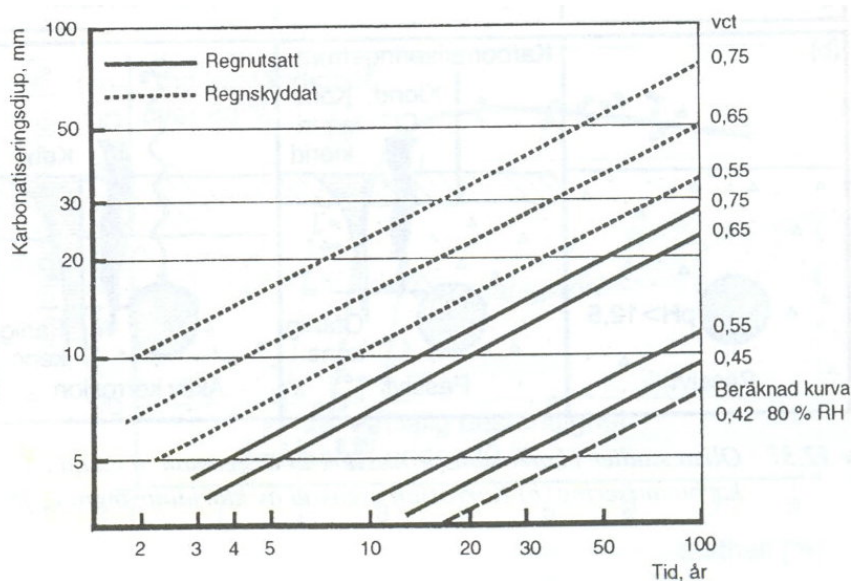
Karbonatiseringshastigheten påverkas av ett antal material- och miljöberoende faktorer enligt ovan. Den omgivande miljön påverkar fuktillståndet i täcktskiktet. I en torr betong sker ingen eller mycket långsam karbonatisering eftersom den kräver en viss tillgång till fukt. En maximal karbonatisering sker när den relativa fuktigheten är gynnsam, 50-60 % RF. Blir den relativa fuktigheten högre och närmar sig mättad dvs. då RF är 100 % blir karbonatiseringen långsam eller obefintlig. Vid sådan hög relativ fuktighet får koldioxiden som driver på karbonatiseringen svårt att tränga in igenom vattnet.

Figur 5.2 visar karboniseringsdjup som funktion av tid i olika delar av en och samma konstruktion, ur CEB (1997).



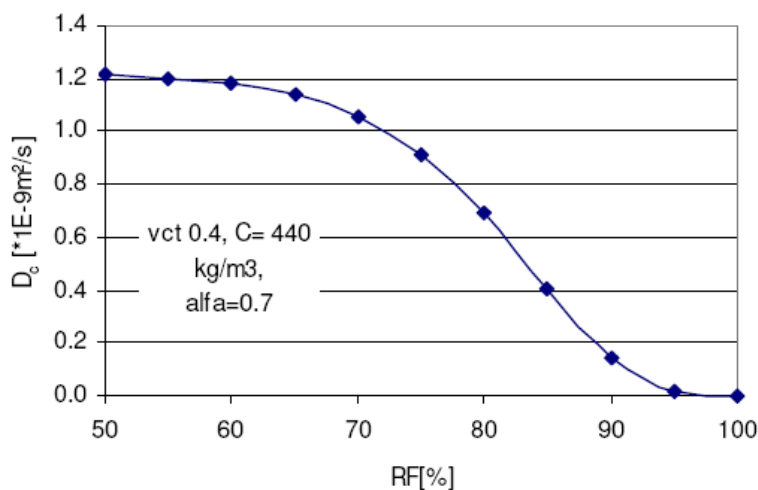
Figur 5.2. Karboniseringsdjup som funktion av tid i olika delar IV av en och samma konstruktion, dvs olika värden på  $n$ ,  $k_1$  och  $k_2$ , CEB (1997).  
 Ref är inomhusklimat,  
 I-III är olika delar som utsätts för regn  
 IV & V är skyddade mot regn.

Konstruktioner som är regnutsatta har visat sig ha en lägre karboniseringshastighet jämfört med regnskyddade, se även figur 5.3,



Figur 5.3: Karbonatiseringsdjup för regnutsatta resp. regnskyddade konstruktioner (Betonghandboken-Material, 1997).

Därför beror skillnader i karbonatiseringshastighet i figur 5.2 och 5.3 beror på skillnader i betongens fukttinnehåll. Diffusion av koldioxid i betongens kapillärporer beror på fukttinnehållet i kapillärporer och fuktberoendet är stort. Relativ fuktighet (RF) i betongens täcksikt påverkar direkt motståndet mot diffusion av koldioxid och därmed direkt initieringstiden för armeringskorrosion. Fuktberoendet visas i nedanstående figur 5.4, (BFR nr 12, 2007).



Figur 5.4: Fuktberoendet hos diffusionskoefficienten för koldioxid, enligt DuraCrete (Duracrete, 1998), (BFR nr 12, 2007).

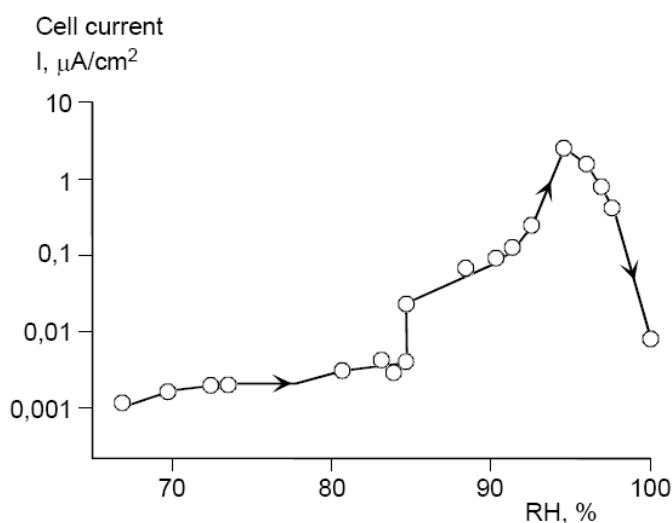
Diffusionskoefficienten är högre och nästan konstant mellan RF motsvarande 50 och 70 %. Mellan 70 och 90 är diffusionskoefficienten avtagande. För RF högre än 90 % är diffusionskoefficienten nästan obetydlig.

*Det är mycket troligt att efter inglasningen av balkongplattor (inglasning ovan och under platta) sänks betongens relativ fuktighet vid ytan och därefter påverkas RF direkt längre in i täcksiktet. Sannolikt kommer RF i betongen efter inglasning sänks från en nivå över 90 % till en nivå mellan 70 och 80 %. Detta betyder en högre diffusionskoefficient och därmed en högre karbonatiseringshastighet. För att klargöra fuktvariationen i balkongplatta efter inglasning bör fuktmätningar ske i referensobjekt med och utan inglasning.*

## 6. Inverkan av inglasningens på armeringskorrosion

Den huvudsakliga funktionen för en balkonginglasning i nordiskt klimat är att hålla regnvatten, snö och damm borta från en balkong och värmen inne. Det är uppenbart att balkonginglasning inte påverkar fukten exponeringen endast genom att förhindra att fukt tränger in i balkongen, men också genom att skapa sådana mikro-klimat som främjar torkning. Den solstrålning samt den termiska flöde genom yttervägg eller ett fönster bakom balkongen förmodligen höjer temperaturen inuti balkong, vilket ökar mättnaden underskott och kommer troligen att ytterligare sänka fukthalten i betong.

Som framgår av figur 6.1 när fukten i betongen (i armeringsnivå) ligger under 90 % RF minskar korrosionshastigheten med 90 % (Tuutti 1982). När det gäller den potentiella accelerationen av karbonatisering på grund av betongens uttorkning (Parrott 1987), är förhöjningen bara 10-20 %. Även tidigare erfarenheter vid reparation av balkonger visar att korrosionen på grund av karbonatisering vanligtvis inträffar där fuktbelastningen är högst, men inte där motsatta förhållande gäller.

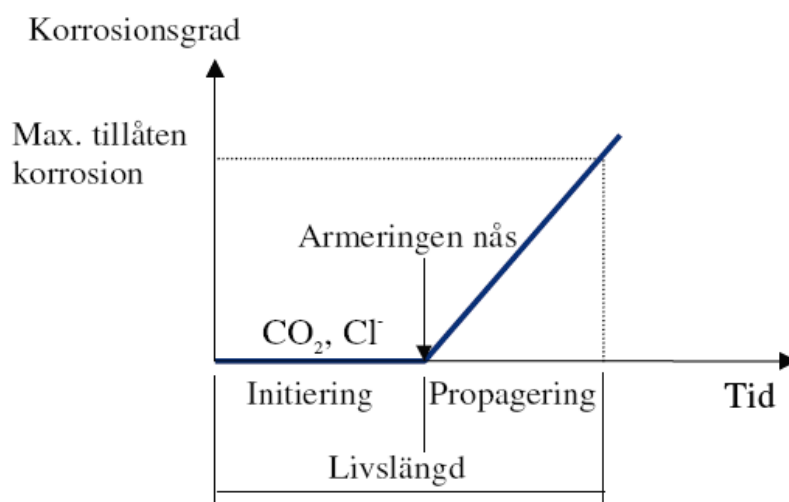


Figur 6.1: Sambandet mellan betongens RF och korrosionsströmmen enligt Tuutti (Tuutti, 1982).

*Sammanfattningsvis betyder inglasningen en torrare betongyta, mindre fukt i betong och lägre korrosionshastighet av armeringsjärn i karbonatiserad betong. Detta är den gynnsammaste inverkan av inglasningen av balkonger för korrosionsskyddet. För att klargöra fuktvariationen i balkongplatta före och efter inglasning bör fuktmätningar ske i referensobjekt med och utan inglasning.*

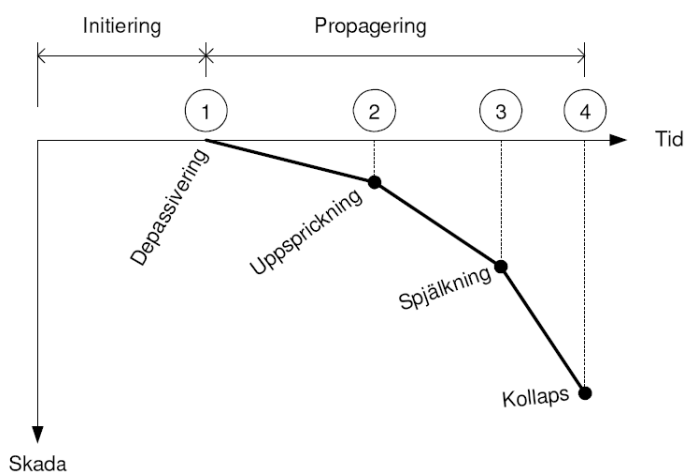
## 7. Inverkan av inglasning på betongkonstruktionens livslängd

En av de vanligaste orsakerna till initiering av korrosion är karbonatisering. Korrosion av armering begränsar ofta livslängden hos betongkonstruktioner. Vanligtvis delar man upp livslängden i en initieringsperiod (den tid det tar innan armeringen börjar korrodera) och en propageringsperiod (den tid det tar innan maximalt tillåten korrosion har nåtts), se figur 7.1.



Figur 7.1: Korrosionsmodell enligt Tuutti (Tuutti, 1982)

Maximalt tillåten korrosion sätts ofta den grad av korrosion som orsakar spjälkning av täckande betongskikt i betongen, dvs punkt 3 i figur 7.2, (BFR nr 12, 2007).



Figur 7.2: Illustration av olika händelser i samband med armeringskorrosion

Vid beräkning av betongkonstruktionens livslängd kan man välja mellan att endast utnyttja initieringsperioden, eller att tillåta en viss korrosion.

Med hjälp av modeller för hur snabb koldioxid tränger in genom täcksiktet, kan man bestämma hur lång initieringsperioden är, se bilaga A. Med hjälp av modeller som beskriver korrosionshastighet och maximalt tillåten korrosion kan propageringstiden bestämmas, se bilaga B.

## 7.1 Beräkning av propageringstid (med och utan inglasning)

Beräkningar utförs enligt beräkningsmodeller i bilaga B. Här beräknas propageringsperioden i antal år för att den aktuella sprickbredd (motsvarar 1,0 mm) som antas ge spjälkning. Kriteriet för spjälkning av täckande betongskikt sätts till 1,0 enligt Duracrete, (BFR nr 12, 2007).

Propageringsperioden beräknas för följande fall:

1. balkongplatta utan inglasning (oskyddad)
2. balkongplatta med inglasning (skyddad)

Balkongplattan i denna beräkning är en armerad betongplatta med 20 mm i täckande betongskikt och en draghållfasthet motsvarande 2 MPa. Armeringen i överkant är 16 mm i diameter. Här definieras livslängden till summan av initierings- och propageringstiden för armeringskorrosion.

### Beräkningsgång för oskyddad balkong fall 1:

Beräkningen följer modeller enligt Duracrete, (BFR nr 12, 2007) i bilaga B. Parametrar för beräkning av resistivitet:

$\rho_0^k = 57$	$\Omega\text{m}$ , potentiell elektrolytiska resistivitet
$t_{hydr} = 1$	år, betongens ålder, dock högst 1 år
$n_{res}^k = 0,23$	exponent för tidsberoende
$k_{c,res}^k = 1,0$	härdningsfaktor
$k_{RH,res}^k = 1,08$	fuktighetsfaktor, gäller för RH = 90 %
$k_{cl,res}^k = 1,0$	kloridfaktor
$T = 10$	$^{\circ}\text{C}$ , medeltemperatur, given förutsättning
$k^k = 0,025$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$ , faktor för temperaturberoende

Resistivitetens temperaturfaktor beräknas enligt ekvation nedan:

$$k_{T,res}^k = (1 + K^k (T - 20))^{-1} = (1 + 0,0025 (10 - 20))^{-1} = 1,33 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Resistivitet enligt ekvation nedan:

$$\rho^k = \rho_0^k \cdot \left( \frac{t_{hydr}}{t_0} \right)^{n_{res}^k} \cdot k_{c,res}^k \cdot k_{T,res}^k \cdot k_{RH,res}^k \cdot k_{cl,res}^k$$

$$\rho^k = 57 \cdot \left( \frac{365}{28} \right)^{0,23} \cdot 1,0 \cdot 1,33 \cdot 1,08 \cdot 1,0 = 148 \text{ } \mu\text{m}$$

Parameter för beräkning av korrosionshastighet:

$$m_0 = 882 \text{ } \mu\text{m} \cdot \Omega\text{m}/\text{år}, \text{ konstant}$$

$$F_{cl}^k = 1,0 \text{ faktor för kloridkorrosionshastighet}$$

$$\alpha^k = 2,0 \text{ faktor för eventuell gropfrätning}$$

$$\gamma_v = 1,0 \text{ partialkoefficient för korrosionshastighet}$$

$$V^d = \frac{m_0}{\rho^k} \alpha^k F_{cl}^k \gamma_v = \frac{882}{147} \cdot 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 11,9 \text{ } \mu\text{m}/\text{år}$$

För beräkning av rostangreppsdjup antas den relativa längden av våta perioder vara  $w_t = 0,75$ . Rostangreppsdjupet blir då enligt följande ekvation:

$$P^d = V^d w_t (t - t_i^d) = 11,9 \cdot 0,75 \cdot (48 - 30) = 161 \text{ } \mu\text{m}$$

Det rostangreppsdjup som behövs för att initiera en spricka är enligt följande ekvation med värden på regressionskoefficienter enligt bilaga B:

$$p_0^d = a_1 + a_2 \frac{x^d}{d} + a_3 f_{c,sp}^d = 74,4 + 7,3 \cdot \frac{20 - 0}{16} - 17,4 \cdot 2,0 = 48,7 \text{ } \mu\text{m}$$

Sprickbredd enligt följande ekvation med parametrar enligt bilaga 2:

$$w^d = w_0 + b^d (p^d - p_0^d) = w_0 + \gamma_b b^k (p^d - p_0^d)$$

$$w^d = 0,050 + 0,0886 \cdot (161 - 48,7) = 1,01 \text{ } \text{mm}$$

Här förutsätts att korrosionen startas efter 30 år då karbonatiseringsfronten når armering. Därefter tar ytterligare 19 år då korrosionen orsakar spjälkning av täcksikt hos överkantsarmering, dvs en sprickbredd motsvarande 1 mm.

### Beräkningsgång för skyddad balkong fall 2:

Beräkningen följer modeller enligt Duracrete, (BFR nr 12, 2007) i bilaga B. Parametrar för beräkning av resistivitet:

$\rho_0^k = 57$	$\Omega\text{m}$ , potentiell elektrolytiska resistivitet enligt provning
$t_{hydr} = 1$	år, betongens ålder, dock högst 1 år
$n_{res}^k = 0,23$	exponent för tidsberoende
$k_{c,res}^k = 1,0$	härdningsfaktor
$k_{RH,res}^k = 3,18$	fuktighetsfaktor, gäller för $RH \leq 80 \%$
$k_{cl,res}^k = 1,0$	kloridfaktor
$T = 15$	$^{\circ}\text{C}$ , medeltemperatur, given förutsättning
$k^k = 0,025$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$ , faktor för temperaturberoende

Resistivitetens temperaturfaktor beräknas enligt ekvation nedan:

$$k_{T,res}^k = (1 + K^k (T - 20))^{-1} = (1 + 0,0025 (15 - 20))^{-1} = 1,14 \quad ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Resistivitet enligt ekvation nedan:

$$\rho^k = \rho_0^k \cdot \left( \frac{t_{hydr}}{t_0} \right)^{n_{res}^k} \cdot k_{c,res}^k \cdot k_{T,res}^k \cdot k_{RH,res}^k \cdot k_{cl,res}^k$$

$$\rho^k = 57 \cdot \left( \frac{365}{28} \right)^{0,23} \cdot 1,0 \cdot 1,14 \cdot 3,18 \cdot 1,0 = 374 \quad \mu\text{m}$$

Parameter för beräkning av korrosionshastighet:

$m_0 = 882$	$\mu\text{m} \cdot \Omega\text{m}/\text{år}$ , konstant
$F_{cl}^k = 1,0$	faktor för kloridkorrosionshastighet
$\alpha^k = 2,0$	faktor för eventuell gropfrätning
$\gamma_v = 1,0$	partialkoefficient för korrosionshastighet

$$V^d = \frac{m_0}{\rho^k} \alpha^k F_{cl}^k \gamma_v = \frac{882}{314} \cdot 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 4,7 \quad \mu\text{m}/\text{år}$$

För beräkning av rostangreppsdjup antas den relativa längden av våta perioder vara  $w_t = 0,5$ . Rostangreppsdjupet blir då enligt följande ekvation:

$$P^d = V^d w_t (t - t_i^d) = 4,7 \cdot 0,5 \cdot (98 - 30) = 160 \quad \mu\text{m}$$

Det rostangreppsdjup som behövs för att initiera en spricka är enligt följande ekvation med värden på regressionskoefficienter enligt bilaga 2:

$$p_0^d = a_1 + a_2 \frac{x^d}{d} + a_3 f_{c,sp}^d = 74,4 + 7,3 \cdot \frac{20 - 0}{16} - 17,4 \cdot 2,0 = 48,7 \quad \mu\text{m}$$

Sprickbredd enligt följande ekvation med parametrar enligt bilaga B:

$$w^d = w_0 + b^d (p^d - p_0^d) = w_0 + \gamma_b b^k (p^d - p_0^d)$$

$$w^d = 0,050 + 0,0886 \cdot (170 - 48,7) = 1,01 \quad \text{mm}$$

Här förutsätts att korrosionen startas efter 30 år då karbonatiseringsfronten når armering. Därefter tar ytterligare 68 år då korrosionen orsakar spjälkning av täcksikt hos överkantsarmering, dvs en sprickbredd motsvarande 1 mm.

### Jämförelse av propageringsperioder (fall 1 och 2):

En jämförelse av propageringsperioderna (korrosion som ger täcksiktsspjälkning) hos armeringsjärn i en redan karbonatiserad betongplatta i en balkong med och utan inglasning visar den positiva effekten av inglasning på livslängden.

Tabell 7.1 visar inverkan av inglasningen på propageringsperiod för balkongplattor

Balkong	Betongens medelfuktighet RF [%]	Initieringsperiod, [år]	Propageringsperiod, [år]	Livslängd [år]
Oskyddad	> 90	30	18	48
Skyddad	< 80	30	68	98
Skillnader	> 10	0	50	50

Här förutsätts att inglasningen görs efter 30 år då hela täckande betongskiktet är karbonatiserat och korrosionen startas efter 30 år då karbonatiseringsfronten når armering. Men på grund av lägre fuktinnehåll i inglasade balkongplatta tar det betydligt längre tid dvs 68 år innan korrosionen orsakar spjälkning av täcksikt hos överkantsarmeringen (dvs en sprickbredd motsvarande 1 mm). Motsvarande propageringsperiod för balkongplatta utan inglasningen har räknats till 18 år.

Detta betyder att inglasningen har förlängt propageringsfasen dvs den teoretiska korrosionstiden med ca  $68-18 = 50$  år.

## 8. Inverkan av inglasning på frostsador i betong

De i Sverige viktigaste nedbrytningsmekanismerna för livslängdsprojektering av nya betongkonstruktioner är frost och armeringskorrosion.

Frostsador i betongkonstruktioner är av två helt olika typer: inre frostsador av frysning i rent vatten respektive frostavskalning vid frysning i salthaltig mljö.

### 8.1 Inre frostsador av frysning i rent vatten

För balkonger gäller ofta frostsador av frysning i rent vatten. En del av vattnet i betongens porsystem är så hårt bundet att det inte kan frysa annat än vid mycket låga temperaturer. Det övriga porvattnet är "frysbart vatten" vilket expanderar i samband med frysning till is. Expansionen ger en kraftig ökning av porvattentrycket, ett "hydrauliskt tryck", som kan spränga sönder materialet. Avgörande för om detta sker eller ej är hur stor andel av det tillgängliga porsystemet, som är fyllt med vatten. Detta uttrycks med vattenmättnadsgraden  $S$ .

Den vattenmättnadsgrad som anger gränsen för när frostsador uppstår i samband med frysning är den "kritiska vattenmättnadsgraden"  $S_{kr}$ . Denna är en materialegenskap som kan bestämmas genom ett provningsförfarande. Den är inte helt konstant utan minskar något med frystemperaturen,  $S_{kr(T)}$ . Risken för uppkomst av en inre frostsada är följaktligen kopplad till med vilken sannolikhet den "aktuella vattenmättnadsgraden"  $S_{akt}$  överstiger den kritiska,  $S_{kr(T)}$ , samtidigt som betongen fryser.

Hur stor  $S_{akt}$  blir i en betongkonstruktion är ett fuktmekaniskt problem. Det beror på betongens fuktmekaniska egenskaper, luftporsystemets struktur och hur mikroklimatet på betongytan varierar med tiden.

Betongytan som exponeras för vatten får relativt snabbt en aktuell vattenmättnadsgrad som motsvarar brytpunkten, "knickpunkten". Därefter sker fuktupptagningen mycket långsamt. Konstruktioner som står i ständig kontakt med vatten får en ständigt ökande vattenmättnadsgrad med tiden, efter hand som mer och mer av luftporsystemet fylls med vatten. Tidsperspektivet för detta är dock månader, år, årtionden och t o m sekel!

Konsekvensen av att  $S_{akt}$  är större än  $S_{kr(T)}$  då betongen fryser är en lokal frostsada i det område där  $S_{akt} > S_{kr(T)}$ . Detta ger en lokal, kraftig försämring av betonghållfastheten och styvheten. Om omfattningen blir stor kan en inre frostsprängning ge sprickor eller lossprängning av ytskiktet.

*Det är mycket troligt att i en inglasade balkong sänks den aktuella vattenmättnadsgraden i förhållande till kritiska vattenmättnadsgraden när balkongen skyddas mot fukt och regn. Risken för frostsador bör minskas. För att kartlägga detta bör fuktmätningar göras i referensobjekt med och utan inglasning.*

## 9. Utförda mätningar i Finland

### 9.1 Introduktion

I Finland har J.S. Mattila på Tampere universitet utfört mätningar på korrosionshastighet av provkroppar i balkonger med och utan inglasning. I detta avsnitt återges de viktigaste mätningar, observationer och slutsatser ur de undersökningar som utfördes av Mattila i Finland, (Mattila, 2003).

Enligt Mattila är utvärderingen av effektiviteten hos balkonginglasning att sänka fuktbelastning och vattenhalt av betongkonstruktioner är ett komplicerat problem. Uppenbarligen tycks denna inverkan vara positiv, men det är omöjligt att utvärdera kvantitativt utan mätdata från fält. Ett potentiellt sätt att utvärdera inverkan av balkonginglasning på fukthalten i betong är att övervaka den med hjälp av elektronisk utrustning. Detta är dock vetenskapligt osund metod på grund av två skäl. För det första är noggrannheten i elektronisk fuktmätning inte särskilt hög. Till exempel under ett decennium kan korrosionshastigheten i karbonatiserad betong variera mindre än mätpartens känslighet. De fuktmätare som används fungerar bäst på hygroskopiska området endast, medan korrosionen känt för att vara snabbast i delvis mättade betong, det vill säga vid superhygroskopisk fukt intervallet (Alonso et al, 1988). På grund av detta är fuktmätning inte ett tillförlitligt sätt att studera inverkan av inglasning på korrosionen, såvida inte minskningen av fukthalten är systematisk och mycket stort, (Mattila, 2003).

Ett sätt att gå runt problemet med fuktmätning är att mäta graden av korrosionen själv. Korrosionshastigheten av ingjutna stålstänger i karbonatiserad betong kan kontrolleras relativt enkelt till exempel genom metoden polarisationsmotstånd (Stern & Geary 1957). Det är ett förnuftigt sätt att få en kvantitativ bild av den skyddande effekten av balkonginglasning eftersom korrosion styrs huvudsakligen av omgivande fukt och temperatur.

### 9.2 Utförda mätningar och resultat

En skräddarsydd utrustning för övervakning av korrosionshastigheten för stål i betong har utarbetats för detta ändamål. Enheten använder tekniken polariseringsmotstånd för att mäta den momentana korrosionshastigheten (Stern & Geary 1957). Den kumulativa korrosionsangreppen kan lätt beräknas av insamlade data. Enheten använder modern datateknik så att stålet elektrisk

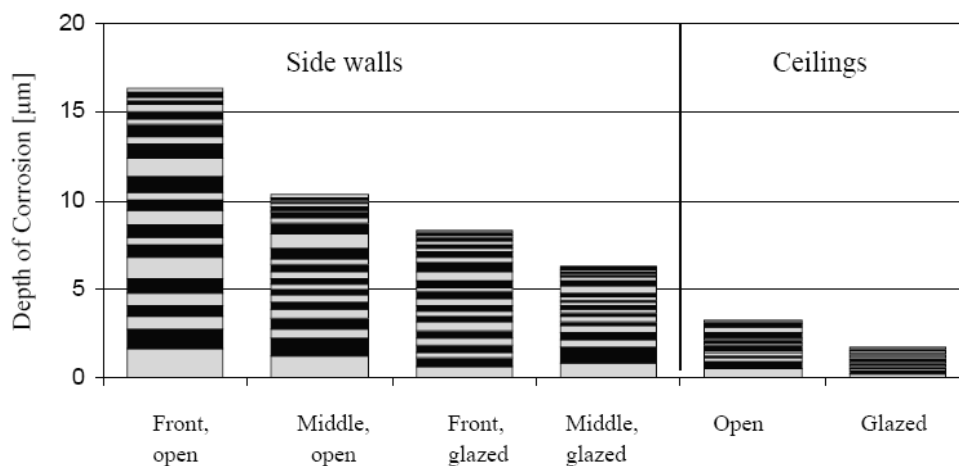
potential direkt kontrolleras av en dator. Apparaten är helt automatiskt att utföra kontinuerlig övervakning av korrosion och är utrustade med mobil dataanslutning för att hämta data från fältet. Enheten kan hantera maximalt 120 mätningar kanaler och det beskrivs närmare i (Mattila 2003).

En viktig punkt att tänka på är att uppgifterna bör samlas in från fältet där alla parametrar bestäms av mikroklimat inuti en balkong, som avgör graden av nedbrytning.

För övervakning, var speciella sensorer förberedda och monteras i balkonger av befintliga byggnader. Sensorerna innehåller armeringsjärn och lämpliga elektroder för övervakning av korrosionshastigheten av polariseringsmotstånd.

Effektiviteten av balkonginglasning att minska korrosionen utvärderades genom att övervaka korrosionshastighet som armeringsjärn har i karbonatiserad betong, både inglasade och öppna balkonger. Det som övervakningssystemet mäter är den momentana korrosionsströmmen [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]. Med hjälp av den momentana korrosionsströmmen kan man räkna den kumulativa radieförlusten av stålets i  $\mu\text{m}$  (dvs. djup korrosionsangrepp) genom att integrera korrosionsströmmen över tid och tillämpa Faradays lag.

Den kumulativa radieförlusten under 25 månader av övervakning redovisas i figur 9.1. Resultaten var mycket lika i alla de tre undersökta byggnaderna.



Figur 9.1. Genomsnittlig kumulativ radieförluster av stålet i tre byggnader i 25 månader (ur Mattila 2003)

De delar i varje stapel i figuren representerar månadsvärden med radieförlust så att den nedre delen av varje stapel representerar en radieförlust mätt i den första övervakade månaden, dvs, december 2000 och den övre delen är det sista övervakade månaden, dvs, december 2002.

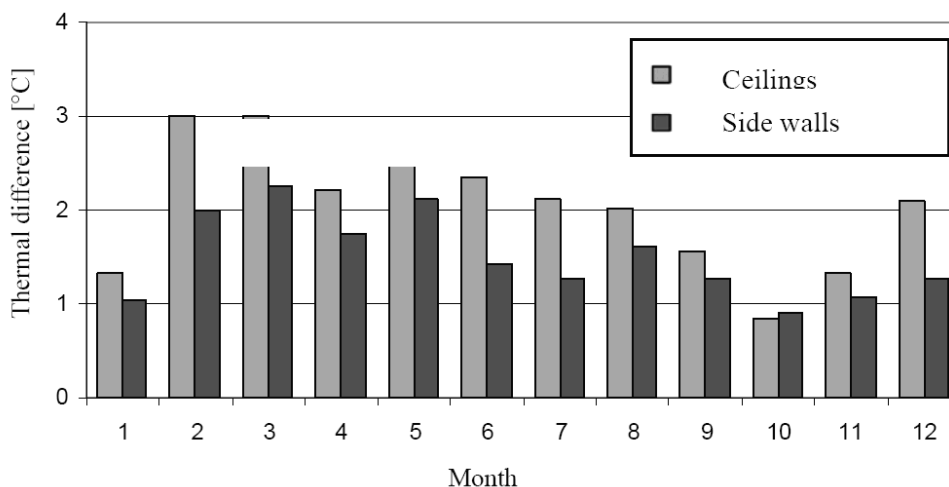
Fig. 9.1 visar att balkonginglasning minskade korrosionshastigheten för stål i betong tydligt och systematiskt. Minskningen under uppföljningsperioden var ungefär 30 till 50 % i sidoväggarna och 50 % i plattor. Att utvärdera uppmätta mängder (radieförluster), resultat från Alonso et al 1998, Andrade et al 1993 kan användas som en riktlinje. Enligt dessa är en genomsnittlig radieförlust på 50 µm som krävs för att orsaka den första synliga sprickan (0,05-0,1 mm). På grundval av detta kan beräknas grovt, varaktigheten av den aktiva korrosionen före sprickbildning i studerade strukturer. Resultatet av denna beräkning presenteras i tabell 9.1.

Tabell 9.1. Genomsnittlig årlig korrosionsdjup och beräknad varaktighet för den aktiva korrosionen i inglasad och öppna balkonger (ur Mattila 2003)

	Balcony side walls		Ceiling surfaces	
	Glazed	Open	Glazed	Open
Average yearly corrosion depth during the monitoring period [µm]	4	7	1	2
Calculated duration of the active corrosion [a]	12	7	50	25

Tabell 9.1 visar att ökad livslängd av strukturerna kan vara betydande. Det är värt att notera särskilt den låga korrosionshastigheten i takytor. Den beräknade tid för aktiv korrosion innan uppsprickning kommer att vara cirka 25 år i öppen balkong och detta kan fördubblas genom inglasning. Resultat visar att inglasade balkonger kan få decennier av återstående livslängd utan större reparation åtgärder.

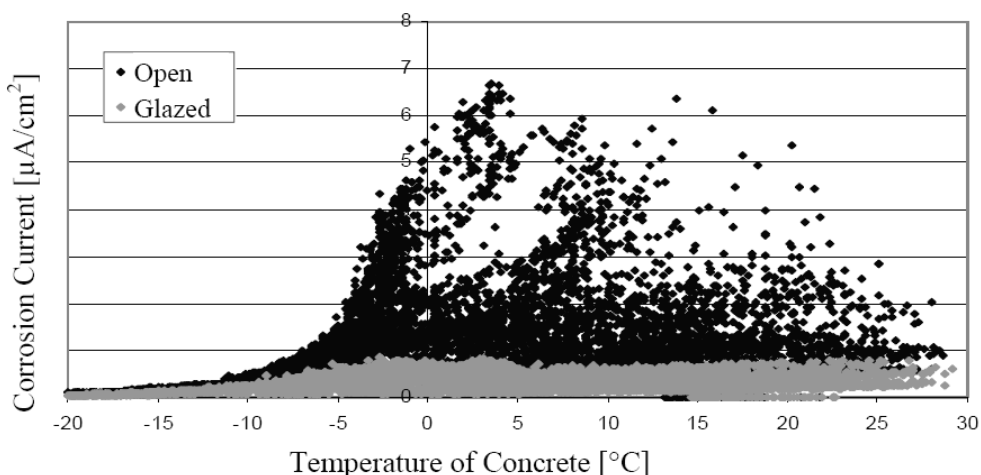
Temperaturen i betong var också kontrollerades en gång i timmen på samma ställen som korrosion mättes. De uppmätta temperaturerna bearbetades till medeltal per månad för inglasad och öppna balkonger. De månatliga skillnaderna i temperaturerna mellan inglasade och öppna balkonger redovisas i Figur 9.2. Den positiva skillnaden betyder att temperaturen var högre i inglasade balkonger.



Figur 9.2. Skillnaden på månatliga medeltemperaturen i betong hos inglasade och öppna referensbalkonger. Den positiva skillnaden är den situation som den temperaturen har varit högre i inglasade balkonger (ur Mattila 2003)

Från medeltemperaturen hos betong i figur 9.2 framgår att temperaturen är systematiskt högre i inglasade balkonger. I halva höjden av sidovägg de temperaturerna var i genomsnitt ca 1,5 °C och i tak i genomsnitt ca 2 °C högre i inglasade balkonger jämfört med öppna balkonger. Denna temperaturskillnad rådde även under den kalla årstiden då solens strålning är mycket svag. Detta synes små skillnader i temperatur kan betraktas som viktigt eftersom det ökar mättnadens underskott och därmed främjar torkning av betong.

För att bedöma risken för frostsador på grundval av korrosionshastigheten visas alla mätningar av korrosionshastigheter som funktion av temperatur i betong vid tidpunkten för korrosionshastighetsmätning. Denna visas i figur 9.3.



Figur 9.3. Momentant korrosionsström som funktion av betongens temperatur vid tidpunkten för korrosionshastighetsmätning. (ur Mattila, 2003)

Ur figur 9.3 kan man konstatera att korrosionshastighet i inglasade balkonger stanna under 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . När utvecklingen av frostsador kräver nästan full mättnad av fukt, vilket innebär korrosion strömmar på minst 4 till 5  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Därmed hindras frostsador av inglasningen. Vid bedömning av tillförlitligheten av resultaten är det viktigt att notera att resultaten är starkt beroende på klimat, särskilt på hur mycket nederbörd under övervakningsperioden. Eftersom perioden är bara lite längre tid än två år, kan förutsättningarna inte nödvändigtvis motsvara den långsiktiga genomsnittliga förhållanden.

### 9.3 Viktiga slutsatser ur Mattilas experiment

Korrosionen mättes genom att övervaka korrosionshastigheten för stål i karbonatiserad betong med hjälp av sensorer. På grundval av resultaten har Mattila dragit följande slutsatser:

- Balkonginglasning förlänger livslängden av balkonger av armerad betong genom att minska fuktbelastningen och genom att höja både luftens temperatur och betongens temperatur och därmed höja deras förmåga att torka ut.
- Livslängden är förlängd på grund av aktiv korrosion i ca 5 år i sidoväggar och för cirka 25 år i plattors undersida. Speciellt det sistnämnda gör det möjligt att undvika onödigt och svåra reparationer i den nedre ytan på balkongsplattor.
- Förutsättningarna för utvecklingen av frostsador togs bort helt och hållet av inglasningen.

## 10. Slutsatser

Syftet med denna rapport är att utvärdera effekten av inglasning på karbonatisering, armeringskorrosion och livslängd av betongplattor i balkonger. Karbonatiseringsinitierad armeringskorrosion och frost ansågs som huvudsakliga skademekanismer.

Den redovisade teoretiska analyserna i denna rapport tyder på att inglasningen har många positiv effekter enligt följande:

- + En mindre fuktbelastning efter inglasning leder till en torrare betong och en väsentligt lägre korrosionshastighet.
- + Livslängden ökar väsentlig efter inglasningen.
- + Risken för frostsador minskar på grund av mindre fukt i betongen.
- + Det inre klimatet i en inglasade balkong förbättras och luftens temperatur höjs ett flertal grader. Därmed minskar risken för ytkondens på betongytter.

Däremot inglasningen har en negativ inverkan på följande:

- Karbonatiseringshastigheten ökar på grund av betongens lägre RH dvs lägre fuktinnehåll i kapillärporer.

De utförda mätningarna i Finland bekräftar några av de ovanstående teoretiska slutsatserna. För att på ett kvantitativt sätt visa de positiva effekterna av balkonginglasning bör mätningar utföras. Här rekommenderas att både fukt och temperatur i luft och i betong mäts under tillräcklig lång tid (minst 1 år) och i ett antal referensobjekt med och utan inglasning.

Ett alternativt sätt är mätning av korrosionshastighet med hjälp av lämplig utrustning. För detta ändamål kan man placera ut ett antal provkroppar på balkonger med och utan inglasning eller att mäta korrosionshastigheten i själva balkongplattor i balkonger med och utan inglasning.

## 11. Referenser

**Burström, Per Gunnar.** Byggnadsmaterial. 2001. ISBN 91-44-011768.

**Ljungkrantz, Christer,** o.a. Betonghandbok-Material. Stockholm : AB Svensk Byggtjänst och Cementsa, 1994. ISBN 91-7332-709-3.

**BFR nr 12,** Vägledning för livslängdsdimensionering av betongkonstruktioner, 2007.

**Duracrete,** Models for environmental actions on concrete structures, 1999.

**Stern, M. and Geary, A.L.** 1957 'Electrochemical polarization, I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves', Journal of the Electrochemical Society, January 1957. 56 – 63

**Neville, A.M.** Properties of Concrete. 1995 fjärde utgåvan. ISBN 0-582-23070-5.

**Verbeck, G J.** Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete. u.o. : ACI SP 49-3, 1975.

**C. Alonso, M. Castellote, C. Andrade.** Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. u.o. : Electrochimica Acta 47, 3469–3481, 2002.

**Alonso, C., Andrade, C. and González, J.A,** 'Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types', Cement and Concrete Research 8, 687 – 698, 1988.

**Mohammed, T.U och Hamada, H.** Corrosion of steel bars in concrete with various steel surface condition. u.o. : ACI Materials Journal 103, 233-243, 2006.

**Ullberg, Mats.** Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar. u.o. : SKI Rapport 2007:13, 2006. ISSN 1104-1374, ISRN SKI-R-07/13-SE.

**J. S. Mattila.** Effect of Balcony Glazing on the Durability of Concrete Structures in Nordic Climate Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 2003.

**Tuutti, K.** 'Corrosion of steel in concrete', Swedish Cement and Concrete Research Institute CBI, Research 4:82. Stockholm, 1982.

## Bilaga A:

I bilaga A redovisas beräkningsmodell för initieringstid på grund av karbonatisering.

### Modell för beräkning av initieringstid

Karbonatiseringsmodell och de ingående parametrarna redovisas ur Duracrete (1998). Modellerna enligt DuraCrete (1998) för initiering av armeringskorrosion p g a karbonatisering är densamma som "meso-modellen" enligt CEB (1997).

$$x_{CO_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot D_c \cdot c}{B_{CO_2}}} \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n$$

där

$x_{CO_2}$  är karbonatiseringsdjupet [m],

$D_c$  är diffusionskoefficienten för koldioxid [ $m^2/s$ ],

$c$  är koldioxidkoncentrationen i omgivande luft [ $kgCO_2/m^3$ luft]

$t$  är exponeringstiden [s],

$t_0$  är en referenstid, betongens ålder då  $D_c$  mäts,

$B_{CO_2}$  är bindningskapaciteten för koldioxid, dvs. mängden koldioxid som åtgår för karbonatisering [ $kg CO_2/m^3$  betong],

$n$  är en klimatparameter

$k$  är parametrar för hänsyn till klimat, härdning respektive använd testmetod.

Som regel mäts inte diffusionskoefficienten  $D_c$  separat. Ur en karbonatiseringsdjupsmätning erhålles kvoten  $B_{CO_2}/D_c$  också kallad "effektiva karbonatiseringsmotståndet"  $R_{CO_2}$ . För att denna skall kunna användas generellt måste då alla övriga parametrar i modellen vara väl kända och under kontroll.

I fib (2004) har parametrarna  $k$  och  $n$  omformulerats något, till en miljöfaktor  $k_e$ , en härdningsfaktor  $k_c$  och en åldringsexponent  $n$ . Ekvationen blir då

$$x_k(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot c_{s,ca}^k \cdot k_{e,ca}^k \cdot k_{c,ca}^k \cdot \gamma_{Rca} \cdot t \cdot (t_0/t)^{2 \cdot n_{ca}^k}}{R_{0,ca}^k}} + \Delta x$$

Initieringstiden kan beräknas enligt ekvationen nedan:

$$t(x) = \left( \frac{(x_k - \Delta x)^2 \cdot R_{0,ca}^k}{2 \cdot c_{s,ca}^k \cdot k_{e,ca}^k \cdot k_{c,ca}^k \cdot \gamma_{Rca} \cdot t_0^{2 \cdot n_{ca}^k}} \right)^{\frac{1}{1 - 2 \cdot n_{ca}^k}}$$

där definieras;

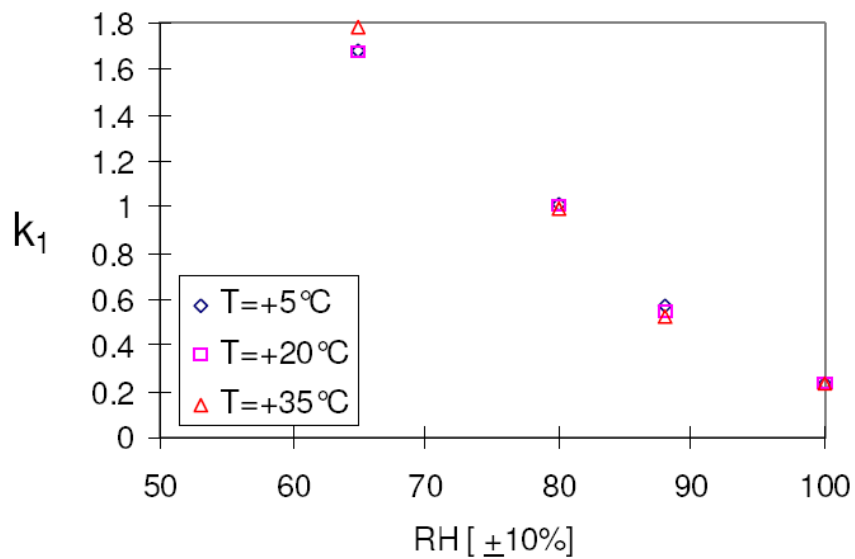
$R_{0,ca}^k$	år (kg/m <sup>3</sup> )/mm karakteristiskt värde för karbonatiseringsmotstånd, svarande mot värdet på $D_{0,ca}$ enligt ovan ( $R = D-1$ )
$t_0$	år betongens ålder vid provning, 28 d
$c_{s,ca}^k$	kg/m <sup>3</sup> koldioxidens ytkoncentration
$k_{c,ca}^k$	karakteristiskt värde för härdningsfaktor
$k_{e,ca}^k$	karakteristiskt värde för miljöfaktor
$n_{ca}^k$	karakteristiskt värde för exponent för tidsberoende
$x_k$	täckande betongskikt, mm
$\Delta x$	utförande tolerans, mm
$\gamma_{Rca}$	partialkoefficient för kloridinträngningsmotstånd
$vbt$	vatten-bindemedelstal

### **Klimatparametervärden**

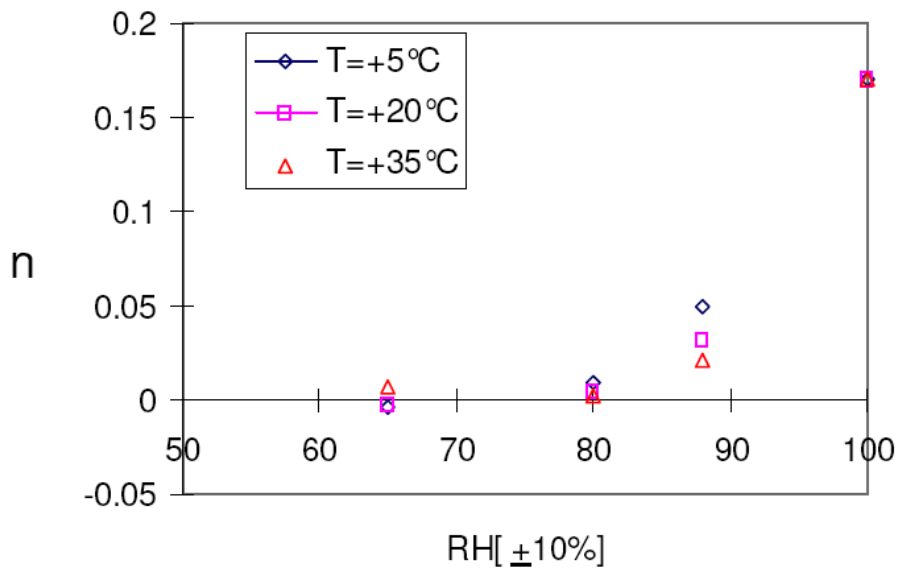
Hänsyn har också tagits till att betongsammansättning och härdning varierar något mellan olika delar av konstruktionen.

Klimatparametrarna  $k_1$  och  $n$  beror dels på RF i luften närmast betongytan, något på temperaturen, och på varaktigheten hos blöta perioder pga. (slag)regn, se figur A-1 och A.2, ur CEB (1997).

I praktiken blir de regnskyddade delarna av en betongkonstruktion dimensionerande, dvs. luftens RF vid betongytan är den viktiga klimatparametern. För att det skall vara relevant måste dock fuktigheten vara så hög att korrosion kan ske när den väl initieras, se även figur 5.2 i denna rapport.



Figur A.1: Klimatparametrarna  $k_1$  i karbonatiseringsmodellen som funktion av luftfuktighet, CEB (1997)



Figur A.2: Klimatparametrarna  $n$  i karbonatiseringsmodellen som funktion av luftfuktighet, CEB (1997)

Modellen för initiering av armeringskorrosion p g a karbonatisering innehåller ett stort antal parametrar

$$x_k(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot c_{s,ca}^k \cdot k_{e,ca}^k \cdot k_{c,ca}^k \cdot \gamma_{Rca} \cdot t \cdot (t_0/t)^{2 \cdot n_{ca}^k}}{R_{0,ca}^k}} + \Delta x$$

Geometri:

Karakteristiskt värde för täcksikt sätts till medelvärdet, eller det nominella värde som används vid dimensioneringen.

Material:

Det förutsätts att betongtillverkaren kan ange karbonatiseringsmotstånd på grundval av standardiserad provningsmetod. Karakteristiska värden bestäms som 5 %-fraktil på basis av provningsresultaten, DuraCrete (2000)

Miljöpåverkan:

Den enda variabel som beror enbart av miljön är koldioxidens ytkoncentration:

$$C_{c,sa}^k = 5,0 \times 10^{-4} \text{ kg/m (m}^3 \text{ luft)}$$

Koldioxidkoncentrationen kan komma att öka.

Utförande:

Härdningsfaktorn  $k_{c,ca}$  beror av härdningstiden enligt tabell A.1

Tabell A.1: Karakteristiskt värde för faktorn  $k_{c,ca}$  som funktion av härdningstiden.

Härdningstid, dagar	$k_{c,ca}^k$
1	4,05
3	2,10
7	1,00
28	0,76

Parametrar som beror av material och miljö:

Miljöfaktorn  $k_{e,ca}$  beror av exponering och bindemedel enligt tabell A.2.

Tabell A.2: Karakteristiskt värde för faktorn  $k_{e,ca}$  med hänsyn till bindemedel och exponering. Som synes är skillnaden beroende på cementtyp i detta fall försumbar.

Exponering	$k_{e,ca}^k$	
	Portlandcement (CEM I)	Slaggcement (CEM II/A-S)
Laboratorium 65 % RF	1,00	1,00
Utomhus regnskyddat	0,86	0,85
Utomhus regnutsatt	0,48	0,50

Exponenten för tidsberoende  $n_{ca}$  beror av exponering och bindemedel enligt tabell A.3.

Tabell A.3: Karakteristiskt värde för exponenten för tidsberoende  $n_{ca}$ .

Exponering	$n_{ca}^k$	
	Portlandcement (CEM I)	Slaggcement (CEM II/A-S)
Laboratorium 65 % RF	0	0
Utomhus regnskyddat	0,098	0,132
Utomhus regnutsatt	0,40	0,43

Rekommenderade värden på täcksiktavvikelse och partialkoefficienter ges i tabell 7.4.

Tabell A.4: Täcksiktavvikelse och partialkoefficienter m.h.t karbonatisering.

Relativ kostnad för reparationer	Låg	Normal	Hög
$\Delta x$ täcksiktavvikelse (mm)	8	14	20
$\gamma_{R_{ca}}$ karboniseringsmotstånd	1,30	2,10	3,00

Diffusionskoefficienten  $D_c$  för koldioxid [m<sup>2</sup>/s] kan mätas upp på ett karboniserat prov av den aktuella betongen antingen direkt utifrån ett koldioxidflöde eller indirekt utifrån syrgasdiffusion. Mätmetoder för detta behöver utvecklas ytterligare och verifieras. Fuktberoendet kan verifieras genom att göra fältmätningar på äldre konstruktioner. Då mäts samtidigt karboniseringsdjupet och fuktprofilen i täcksiktet.

Som regel mäts inte diffusionskoefficienten  $D_c$  eller mängden karboniserbar kalk  $B_{CO_3}$  separat. Ur en karboniseringsdjupsmätning erhålles kvoten  $D_c/B_{CO_1}$  som ett motstånd  $R_{ca}$ . För att detta skall kunna användas generellt måste då alla övriga parametrar i modellen vara väl kända och under kontroll. Lämpligen görs detta i

en laboratorieprovning med konstanta omgivningsvillkor och förhöjd koldioxidkoncentration, dvs i en accelererad karbonatiseringsprovning.

Miljöfaktorn  $k_e$  och åldringsexponenten  $n$  kan bedömas genom fältmätningar på äldre konstruktioner. Åldringsfaktorn kräver mätning på samma delar av en konstruktion vid minst två tillfällen som är relativt avlägsna i tid.

Miljöfaktorn kan kvantifieras genom jämförande mätningar på olika delar av en och samma konstruktion där klimatbelastningen varit olika. Fuktförhållandena i betongen dokumenteras då också. Eftersom sådana delar förmodligen också har olika åldringsfaktor, är det svårt att kvantifiera miljöfaktorn separat, från mätning vid bara ett tillfälle.

Härdningsfaktorn  $k_c$  är svår att experimentellt bestämma på ett relevant sätt. Det traditionella sättet är att härda betongprovkroppar på olika sätt och sedan karbonatisera dem under ett antal år eller med accelererad karbonatisering vid förhöjd koldioxidkoncentration. Genom jämförelsen mellan de olika karbonatiseringsdjupen kan härdningsfaktorn  $k_c$  bestämmas.

Härdningsfaktorn bestämd på detta sätt gäller då för den aktuella provningstiden. För längre exponeringstider, dvs långa livslängder, blir faktorn mindre och mindre eftersom bristande härdning mest påverkar de yttre delarna av betongen.

## Bilaga B:

I bilaga B redovisas beräkningsmodell för täcksiktsspjälkning på grund av armeringskorrosion under propageringsperiod.

### Täckskiktsspjälkningens dimensionerande villkor

Dimensioneringsvillkoret baseras på kriteriet att dimensioneringsvärde  $w^d$  uppnår sitt kritiska värde  $w_{cr}$ .

$$g = w_{cr} - w^d \geq 0$$

### Dimensioneringsvärden

#### Sprickbredd:

Sprickbreddens dimensioneringsvärde kan uppskattas på basis av följande uttryck, som bestäms genom regressionsanalys.

$$w^d = w_0 \quad \text{om } p_0 \leq p^d$$

$$w^d = w_0 + b^d (p^d - p_0^d) \quad \text{om } p_0 > p_0^d$$

där

$w_0$  den synliga sprickans bredd

$b^d$  dimensionerande värde för parametrar som beror av armeringsstångens placering

$p^d$  dimensioneringsvärde för aktuellt rostangreppsdjup i  $\mu\text{m}$

$p_0^d$  dimensioneringsvärde för den inträngning i  $\mu\text{m}$  som initierar uppsprickning

Dimensioneringsvärde för det rostangreppsdjup som initierar uppsprickning:

En eventuell korrosion påverkar konstruktionen på två sätt:

Vidhäftning minskar pga. spjälkningskrafter samt ger upphov till lägre hävarm på den tryckta sidan av betongkonstruktion.

Armeringens area minskar vid eventuell korrosion.



Figur B.1: Korrosion av armering och dess effekt på konstruktion

Följande formel kan användas för beräkning av dimensioneringsvärde för det rostangreppsdjup som initierar uppsprickning,  $p_0^d$ .

$$p_0^d = a_1 + a_2 \frac{x^d}{d} + a_3 f_{c,sp}^d$$

där

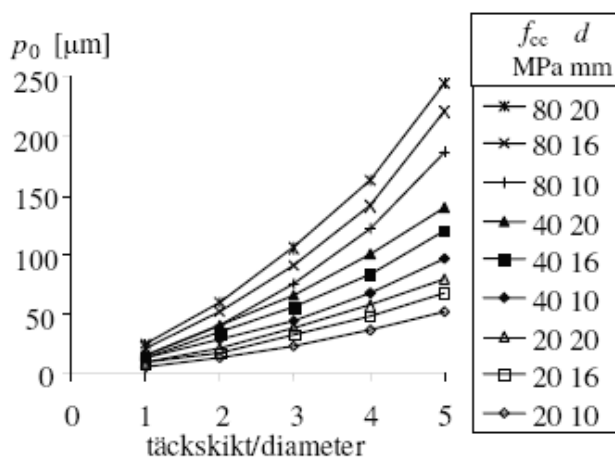
$a_1, a_2, a_3$  regressionskoefficienter

$x^d$  dimensioneringsvärde för täckskikt

$d$  stångdiameter

$f_{c,sp}^d$  dimensioneringsvärde för betongens draghållfasthet i MPa

Alternativt kan det dimensionerande värdet på  $p_0^d$  avläsas från nedanstående figur.



Figur B.2: Korrosionsdjup som spräcker täcksikt ( $p_0^d$ ) beroende av täcksikt, diameter på armeringsstång och betong, för max stenstorlek 16 mm.

Aktuellt rostangreppsdjup efter tiden  $t$ :

$$p^d = 0 \text{ om } t \leq t_i^d$$

$$p^d = V^d \cdot w_t \cdot (t - t_i^d) \text{ om } t > t_i^d$$

där

- $V^d$  dimensioneringsvärde för korrosionshastighet
- $w_t$  relativ längd av våta perioder när betongen har RF  $\geq 85\%$
- $t_i^d$  dimensioneringsvärde för tiden till korrosionsinitiering

Dimensioneringsvärde för korrosionshastighet

$$V^d = \frac{m_0}{\rho^k} \cdot \alpha^k \cdot F_{cl}^k \cdot \gamma_V$$

Där

- $m_0$  konstant i sambandet korrosionshastighet – resistivitet
- $F_{cl}^k$  karakteristisk värde på faktor för kloridkorrosionshastighet
- $\alpha^k$  karakteristisk värde på faktor för gropfrätning
- $\rho^k$  karakteristiskt värde för resistivitet
- $\gamma_V$  partialkoefficient för korrosionshastighet

Karakteristiskt värde för resistivitet:

$$\rho^k = \rho_0^k \cdot \left( \frac{t_{hydr}}{t_0} \right)^{n_{res}^k} \cdot k_{c,res}^k \cdot k_{T,res}^k \cdot k_{RH,res}^k \cdot k_{cl,res}^k$$

$\rho_0^k$  karakteristiskt värde för den potentiella elektrolytiska resistiviteten

$t_0$  betongens ålder vid tiden för acceptansprovning

$t_{hydr}$  betongens aktuella ålder, dock tillgodoses högst 1 år

$n_{res}^k$  karakteristiskt värde för resistivitetens exponent för tidsberoende

$k_{c,res}^k$  karakteristiskt värde för resistivitetens härdningsfaktor

$k_{T,res}^k$  karakteristiskt värde för resistivitetens temperaturfaktor

$k_{RH,res}^k$  karakteristiskt värde för resistivitetens fukthetsfaktor

$k_{cl,res}^k$  karakteristiskt värde för resistivitetens kloridfaktor

$$k_{T,res}^k = \left( 1 + K^k (T - 20) \right)^1$$

$K^k$  karakteristiskt värde för en faktor som beskriver resistivitetens temperaturberoende

$T$  temperatur i °C

Tid till korrosionsinitiering:

Beroende på om det är frågan om kloridinitierad eller karbonatiseringsinitierad korrosion kan tiden bestämmas med hjälp av olika beräkningar.

Parameter som beaktar armeringens läge i tvärsnitt:

$$b^d = b^k \cdot \gamma_b$$

där

$b^k$  karakteristiskt värde

$\gamma_b$  partialkoefficient

Betongens draghållfasthet:

För betongens draghållfasthet, används i detta sammanhang det karakteristiska värdet som dimensioneringsvärde.

$$f_{c,sp}^d = f_{c,sp}^k$$

## Karakteristika värden

### Geometri:

Karakteristiskt värde för täcksjikt sätts till det nominella värde som används vid dimensioneringen, eller medelvärdet om det är fråga om uppmätta värden

### Material:

Den potentiella elektrolytiska resistiviteten  $\rho_0$  används som en variabel som bestämmer motståndsförmågan med karakteristiska värde definierat som 5 %-fraktil. Det förutsätts att betongtillverkaren kan ange resistiviteten på grundval av någon standardiserad provningsmetod, t.ex. Two Electrode Method (TEM).

Karakteristisk draghållfasthet  $f_{ctk}$  för betongen definieras som 5 %-fraktil enligt aktuell norm, såsom BBK 04 eller Eurokod 2 (EN 1992-1-1). Exponenten för tidsberoende  $n_{res}$  ges i följande tabell.

Tabell B.1: Exponent för tidsberoende med hänsyn till resistivitet.

Cementtyp	$n_{res}^k$
Portlandcement (CEM I)	0,23
Slaggcement (CEM II/A-S)	0,54
Flygaskecement (CEM II/A-V, II/B-V)	0,62

### Miljöpåverkan:

Temperatur och relativ fuktighet definieras som årliga medelvärden, och kan bestämmas med ledning av meteorologiska data för aktuell plats.

I följande tabeller ges värden för faktorn för kloridkorrosionshastighet  $F_{cl}$ , relativ längd av våta perioder  $w_t$ , temperaturfaktorn  $K$ , faktorn för gropfrätning  $a$  och resistivitetsens kloridfaktor  $k_{cl,res}$ .

Tabell B.2: Karakteristiska värden för faktorn för kloridkorrosionshastighet,  $F_{cl}$ .

Förekomst av klorider	$F_{cl}^k$
Ja	2,63
Nej	1,0

Tabell B.3: Karakteristiska värden för relativ längd av våta perioder (när betongen har RF  $\geq 85$  %).

Fuktförhållanden	$w_t$
Torrt, alt. måttligt fuktigt, skyddat	0
Luftburet havsvatten	0,5
Cykliskt vått och torrt, oskyddat mot regn/havsvatten	0,75
Vått, sällan torrt, tidvattenzon	1,0

Tabell B.4: Karakteristiska värden för temperaturfaktorn  $K_k$ .

Temperatur	$K_k$
< 20°C	0,025
> 20°C	0,073

Tabell B.5: Karakteristiska värden faktorn för gropfrätning  $a$ .

Förekomst av klorider	$a^k$
Ja	9,28
Nej	2,0

Tabell B.6: Karakteristiska värden för resistivitetsens kloridfaktor  $k_{cl,res}$ .

Förekomst av klorider	$k_{cl,res}^k$
Ja	0,72
Nej	1,0

#### Utförande:

Karakteristiskt värde för resistivitetsens härdningsfaktor  $k_{c,res}$  sätts till  $k_{c,res} k = 1,0$ .

#### Parametrar som beror av material och miljö:

Värden för resistivitetsens fuktighetsfaktor  $k_{RH,res}$  ges i följande tabell.

Tabell B.7: Karakteristiskt värde för resistivitetsens fuktighetsfaktor  $k_{RH,res}$ .

Fuktförhållanden	$k_{RH,res}^k$	
	Portlandcement, (CEM I)	Slaggcement, (CEM IIA/-S)
Oskyddat	1,44	1,44
50 % RF	7,58	14,7
65 % RF	6,45	7,00
80 % RF	3,18	3,80

95 % RF	1,08	1,17
Ständigt under vatten	1,0	1,0

Övriga parametrar:

Tabell B.8: Karakteristiska värden för övriga parametrar ges i följande tabell.

Parameter	Karakteristiskt värde	Enhet
$w_0$	0,05	mm
$w_{cr}$	1,0	mm
$a_1$	74,4	$\mu\text{m}$
$a_2$	7,3	$\mu\text{m}$
$a_3$	17,4	$\mu\text{m}/\text{MPa}$
$b$	ök: 0,0086 uk: 0,0104	mm/ $\mu\text{m}$
$m_0$	882	mm $\times\Omega\text{m}/\text{år}$

### Partialkoefficienter

För kloridinitierad korrosion kan partialkoefficienterna  $\gamma_b$  och  $\gamma_V$  alltid sättas lika med 1,0, eftersom propageringsfasen bidrar obetydligt till livslängden. För karbonatiseringsinitierad korrosion har propageringsfasen större betydelse, därför anges värden på partialkoefficienterna  $\gamma_b$  och  $\gamma_V$  i följande tabell.

Tabell B.9: Partialkoefficienterna  $\gamma_b$  och  $\gamma_V$  för karbonatiseringsinitierad korrosion.

Relativ kostnad för reparationer	Låg	Normal	Hög
$\gamma_b$	1,30	1,40	1,55
$\gamma_V$	1,30	1,40	1,50